

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL-HARRACH

# ***THESE***

présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat  
en Sciences Agronomiques

Recherche sur les possibilités de valorisation des  
sols salés en zone steppique. Etude de la tolérance  
d'*Atriplex halimus* aux sels solubles

Présentée par : NEDJIMI Bouzid

Devant le jury composé par :

M. DJILI Kaddour	Professeur	Président
M. DAOUD Youcef	Professeur	Directeur de thèse
M. DJAMAI Rachid	Maître de Conférence (A)	Examineur
M. BENSLAMA Mohamed	Maître de Conférence (A)	Examineur

*À mes parents*

## Avant Propos

Au terme de ce travail, Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude et mes vifs remerciements d'abord au professeur **youcef Daoud**, mon directeur de thèse qui a été attentif à tout moment à de nombreuses questions particulières. Qu'il soit assuré de mon admiration et mon intime reconnaissance à sa rigueur scientifique doublée d'une rare sagesse humaine.

Je prie madame **micaela Carvajal**, professeur au Centre d'Edaphologie et de Biologie Appliquées de Segura - Consejo Superior de Investigacione Cientificas (CEBAS-CSIC), en Espagne, qui m'a aimablement accueilli dans son laboratoire de physiologie végétale, et qui n'a jamais cessée de m'aider, de m'orienter et de me fournir les éléments nécessaires à la réalisation de ce travail. Qu'elle veuille trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour son aide.

C'est avec beaucoup de reconnaissance que j'adresse mes sincères remerciements à Monsieur **kaddour Djili**, professeur à l'ENSA d'El Harrach, d'avoir accepter de présider le jury de thèse.

Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur **rachid Djamai**, Maître de conférence à l'université **Badji mokhtar** de Annaba, d'avoir eu la gentillesse d'accepter de faire partie de ce jury.

Nous remercions également Monsieur **Mohamed Benslama**, Maître de conférence à l'université **Badji mokhtar** de Annaba, de nous avoir fait l'honneur de participer au jury.

J'adresse un grand merci au docteur **Carmen López-Betnagar** et à la technicienne **Carmen Macia** qui m'ont quotidiennement apportée leur assistance.

Je saisis aussi cette occasion pour remercier vivement monsieur **Luis López-Pérez**, pour ces conseils précieux et pour les facilités et l'aide qu'il m'a apportées durant les manipulations microscopiques.

Mes remerciements vont également à monsieur **Blal Azzouzi**, Maître de conférence à l'université de **Djelfa** qui a bien voulu discuter avec moi les résultats de cette étude en me donnant ses remarques fécondes et ces conciles pour la présentation statistique de ce travail.

Mon séjour en Espagne a été rendu possible grâce à la contribution du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique Algérien, qui m'a accordé une bourse PNE, je lui exprime mes vifs remerciements.

## LISTE DES PUBLICATIONS

Cette thèse est basée sur les résultats des articles suivants :

1. Nedjimi B., Daoud Y., Touati M. (2006) Growth, water relations, proline and ion content of *in vitro* cultured *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* as affected by CaCl<sub>2</sub>. *Commun. Biometry Crop Sci.* 1(2): 79–89.
2. Nedjimi B., Daoud Y. (2006) Effect of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on the growth, water relations, proline, total soluble sugars and ion content of *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* through *in vitro* culture. *Anal. Biol.* 28: 35–43.
3. Nedjimi B., Daoud Y., Touati M. (2007) Effet du stress salin sur la germination, la croissance et l'accumulation ionique chez des jeunes plants d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* en culture *in vitro*. *Biotech. Végé.* 1: 49–55.
4. Nedjimi B., Daoud Y. (2008) Effet du stress salin sur la valeur nutritionnelle et accumulation des sucres totaux chez *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* cultivé *in vitro*. *Ecol. Environ.* 4: 80–88.
5. Nedjimi B., Daoud Y. (2008) Influence du NaCl sur le comportement d'une espèce halophyte (*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*). *Annales de l'INA* 29 (1&2) : 121–135.
6. Nedjimi B., Daoud Y. (2009) Cadmium accumulation in *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* and its influence on growth, proline, root hydraulic conductivity and nutrient uptake. *Flora* 204: 316–324 [Impact factor= 1.03].
7. Nedjimi B., Daoud Y. (2009) Effects of calcium chloride on growth, membrane permeability and root hydraulic conductivity in two *Atriplex* species grown at high (sodium chloride) salinity. *J. Plant Nutr.* 32: 1818–1830 [Impact factor= 0.59].
8. Nedjimi B., Daoud Y. (2009) Ameliorative effect of CaCl<sub>2</sub> on growth, membrane permeability and nutrient uptake in *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* grown at high (NaCl) salinity. *Desalination* 249: 163–166 [Impact factor= 1.15].
9. Nedjimi B. (2009) Calcium can protect *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* from cadmium toxicity. *Acta Bot. Gallica* 156(3): 391–397 [Impact factor= 0.38].

---

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Seuils de sodicité (ESP, SAR) et de salinité (CE) utilisés pour un classement général des sols	8
Tableau II. Production fourragère par hectare des formations naturelles et des plantations d' <i>Atriplex halimus</i> .	52
Tableau III. Valeurs nutritives et la composition chimique moyenne d' <i>Atriplex halimus</i> .	52
Tableau IV. Composition chimique du milieu de culture.	57
Tableau V. Les seuils de tolérance de la production de matière sèche en fonction des sels appliqués.	88
Tableau VI. Niveaux de concentrations qui ont un effet positif et/ou négatif sur les paramètres de croissance étudiés.	89
Tableau VII. Ajustement statistique entre la matière sèche (y) et sa teneur en sodium (x).	125
Tableau VIII. Les seuils de tolérance (toxicité) de la germination des graines d' <i>Atriplex halimus</i> en fonction des différents sels utilisés.	147
Tableau IX. Effets positifs et négatifs des différents sels utilisés sur la production de matière sèche.	149

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Production de biomasse des différents groupes de plantes suivant la salinité.	11
Figure 2. Schématisation du bilan de la circulation du sodium dans les plantes de type <i>include</i> ou <i>exclude</i> .	14
Figure 3. Aspect d'une feuille d' <i>Atriplex lentiformis</i> traitée par 5 g/l NaCl, portant des trichomes gonflés de sels.	15
Figure 4. Rameau feuillu avec inflorescence d' <i>Atriplex halimus</i> subsp. <i>schweinfurthii</i> .	48
Figure 5. Aspect d'une feuille d' <i>Atriplex halimus</i> traitée par 20 g/l NaCl, portant des trichomes gonflés de sels.	49
Figure 6. Localisation du site de prélèvement de la graine.	54
Figure 7. Schéma du dispositif expérimental du test germinatif.	56
Figure 8. Schéma du dispositif expérimental du test <i>in vitro</i> .	58
Figure 9. Effet des doses croissantes de NaCl sur le taux de germination des graines d' <i>Atriplex halimus</i> subsp. <i>schweinfurthii</i> . Les barres représentent la moyenne $\pm$ Ecart-type ( $n=4$ répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de <i>Tukey</i> ( $P < 0.05$ ).	62
Figure 10. Ajustement statistique de la relation entre le taux de germination des graines d' <i>Atriplex halimus</i> subsp. <i>schweinfurthii</i> et la concentration du milieu en NaCl.	63
Figure 11. Evolution du taux de germination de graines d' <i>Atriplex halimus</i> subsp. <i>schweinfurthii</i> en fonction du temps et des doses croissantes en NaCl.	64
Figure 12. Effet des doses croissantes de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> sur le taux de germination des graines d' <i>Atriplex halimus</i> subsp. <i>schweinfurthii</i> . Les barres représentent la moyenne $\pm$ Ecart-type ( $n=4$ répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de <i>Tukey</i> ( $P < 0.05$ ).	65
Figure 13. Ajustement statistique de la relation entre le taux de germination des graines d' <i>Atriplex halimus</i> subsp. <i>schweinfurthii</i> et la concentration du milieu en Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	66
Figure 14. Evolution du taux de germination de graines d' <i>Atriplex halimus</i> subsp. <i>schweinfurthii</i> en fonction du temps et des doses croissantes en Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	66

- Figure 15. Effet des doses croissantes de  $\text{CaCl}_2$  sur le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=4$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 67
- Figure 16. Ajustement statistique de la relation entre le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* et la concentration du milieu en  $\text{CaCl}_2$ . 68
- Figure 17. Evolution du taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* en fonction du temps et des doses croissantes en  $\text{CaCl}_2$ . 69
- Figure 18. Effet de  $\text{NaCl}$  et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=4$  répétitions,  $P < 0.0001$ ). 70
- Figure 19. Effet de  $\text{NaCl}$  et de  $\text{CaCl}_2$  sur le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=4$  répétitions,  $P < 0.0001$ ). 71
- Figure 20. Variation du poids de la matière sèche de la partie aérienne et de la partie racinaire en (mg/plant) de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{NaCl}$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 75
- Figure 21. Variation de l'indice de succulence (MF/MS) de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction de la concentration en  $\text{NaCl}$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 76
- Figure 22. Variation du poids de la matière sèche de la partie aérienne et de la partie racinaire en (mg/plant) de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 78
- Figure 23. Variation de l'indice de succulence (MF/MS) de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 79

Figure 24. Variation du poids de la matière sèche de la partie aérienne et de la partie racinaire en (mg/plant) de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 81

Figure 25. Variation de l'indice de succulence (MF/MS) de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$ ). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 82

Figures 26. Effet de  $\text{NaCl}$  et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la matière sèche (MS) de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions,  $P < 0.0001$ ). 83

Figure 27. Effet de  $\text{NaCl}$  et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la matière sèche (MS) de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions,  $P < 0.0001$ ). 84

Figure 28. Effet de  $\text{NaCl}$  et de  $\text{CaCl}_2$  sur la matière sèche (MS) de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 85

Figure 29. Effet de  $\text{NaCl}$  et de  $\text{CaCl}_2$  sur la matière sèche (MS) de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 86

Figure 30. Variation des teneurs en sodium ( $\text{Na}^+$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{NaCl}$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 91

Figure 31. Variation des teneurs en potassium ( $\text{K}^+$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{NaCl}$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 92

Figure 32. Variation des teneurs en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. 94

*schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

Figure 33. Variation des teneurs en chlore ( $\text{Cl}^-$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 95

Figure 34. Variation des teneurs en phosphore ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 97

Figure 35. Variation des teneurs en azote des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 98

Figure 36. Variation des teneurs en sodium ( $\text{Na}^+$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 100

Figure 37. Variation des teneurs en potassium ( $\text{K}^+$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 101

Figure 38. Variation des teneurs en potassium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 103

Figure 39. Variation des teneurs en chlore (Cl<sup>-</sup>) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 104

Figure 40. Variation des teneurs en phosphore (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 105

Figure 41. Variation des teneurs en sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 106

Figure 42. Variation des teneurs en azote des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 108

Figure 43. Variation des teneurs en sodium (Na<sup>+</sup>) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en CaCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 109

Figure 44. Variation des teneurs en potassium (K<sup>+</sup>) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en CaCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 110

Figure 45. Variation des teneurs en calcium (Ca<sup>2+</sup>) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en CaCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* 111

( $P < 0.05$ ).

Figure 46. Variation des teneurs en chlore (Cl) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 112

Figure 47. Variation des teneurs en phosphore ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 113

Figure 48. Variation des teneurs en azote des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 114

Figure 49. Effet de NaCl et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la teneur en azote des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.05$ ). 116

Figure 50. Effet de NaCl et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la teneur en azote des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 116

Figure 51. Effet de NaCl et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la teneur en phosphore ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 117

Figure 52. Effet de NaCl et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la teneur en phosphore ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P > 0.05$ ). 118

Figure 53. Effet de NaCl et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la teneur en potassium ( $\text{K}^+$ ) des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 119

Figure 54. Effet de NaCl et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la teneur en potassium ( $\text{K}^+$ ) des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 119

- Figure 55. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en azote des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 120
- Figure 56. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en azote des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 121
- Figure 57. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en phosphore (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 122
- Figure 58. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en phosphore (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 122
- Figure 59. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en potassium (K<sup>+</sup>) des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 123
- Figure 60. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en potassium (K<sup>+</sup>) des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 124
- Figure 61. Rapport K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> de la partie aérienne et racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 127
- Figure 62. Rapport K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> de la partie aérienne et racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* en fonction des concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 127
- Figure 63. Evolution des teneurs en proline des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 129
- Figure 64. Evolution des teneurs en sucres totaux solubles des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les 131

barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

Figure 65. Evolution des teneurs en proline des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 132

Figure 66. Evolution des teneurs en sucres totaux solubles des tissus de la partie aérienne et dans la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$ ). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 134

Figure 67. Evolution des teneurs en proline des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$ ). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 135

Figure 68. Evolution des teneurs en sucres totaux solubles des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$ ). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ). 136

Figure 69. Effet du  $\text{NaCl}$  et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la teneur en proline des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 137

Figure 70. Effet de  $\text{NaCl}$  et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la teneur en proline des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 138

Figure 71. Effet de  $\text{NaCl}$  et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la teneur en sucres totaux des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 139

Figure 72. Effet de  $\text{NaCl}$  et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la teneur en sucres totaux des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ). 139

**Figure 73.** Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en proline des tissus de la 141  
partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres  
représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

**Figure 74.** Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en proline des tissus de la 141  
partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres  
représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

**Figure 75.** Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en sucres totaux des tissus de 142  
la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les  
barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

**Figure 76.** Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en sucres totaux des tissus de 142  
la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les  
barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

# SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
1. LES SOLS SALES	5
1.1. Données générales	5
1.2. Les propriétés des sols salés	7
2. LA TOLÉRANCE DES PLANTES AUX SELS SOLUBLES	10
2.1. Les halophytes	10
2.2. Les phénomènes généraux	12
2.3. Les mécanismes physiologiques et biochimiques	15
2.3.1. La compartimentation vacuolaire	15
2.3.2. Le contrôle membranaire	16
2.3.3. L'ajustement osmotique	17
3. LES EFFETS DU STRESS SALIN CHEZ LES VÉGÉTAUX	24
3.1. Les effets physiologiques et métaboliques	26
3.2. Les effets sur la nutrition minérale	33
3.3. Les effets biochimiques	34
3.4. Les approches moléculaires et génétiques des effets du stress salin	36
4. LA CULTURE <i>IN VITRO</i>	39
4.1. Le principe de cette méthode de culture	39
4.2. Les techniques de culture <i>in vitro</i>	40
4.2.1. La culture de méristèmes	40
4.2.2. La micropropagation	41
4.2.3. La régénération de plantes par organogenèse ou embryogenèse	42
4.2.4. La production de plantes haploïdes	42
4.2.5. La technologie des protoplastes ou culture de fusion	43

---

<b>5. PRESENTATION D'<i>Atriplex halimus</i></b>	<b>45</b>
5.1. Description	45
5.2. Métabolisme	48
5.3. Utilités	50
6. Conclusion	53
<b>CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES</b>	
<b>1. MATERIEL D'ETUDE</b>	<b>54</b>
1.1. La semence	54
1.2. Les sels	55
<b>2. METHODES D'ETUDE</b>	<b>56</b>
2.1. Le test germinatif	56
2.2. La culture <i>in vitro</i>	56
2.2.1. Le repiquage	56
2.2.2. Le milieu de culture	57
2.2.3. Le dispositif expérimental	58
2.3. Les paramètres étudiés	58
2.4. Les calculs statistiques	60
<b>CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION</b>	
<b>1. LA GERMINATION</b>	<b>61</b>
1.1. Cas du NaCl	61
1.2. Cas de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	64
1.3. Cas de CaCl <sub>2</sub>	67
1.4. Comparaison de l'effet de la nature des électrolytes sur le taux de germination	69
1.4.1. Effet de la nature de l'anion accompagnateur du sodium (NaCl/Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	69
1.4.2. Effet de la nature du cation accompagnateur du chlore (NaCl/CaCl <sub>2</sub> )	70
1.5. Discussion des résultats	71
1.6. Conclusion	73
<b>2. LA CROISSANCE</b>	<b>73</b>
2.1. Cas du NaCl	73
2.1.1. Matière sèche partie aérienne	73
2.1.2. Matière sèche partie racinaire	74
2.1.3. Indice de succulence	76

---

2.2. Cas du Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	76
2.2.1. Matière sèche partie aérienne	76
2.2.2. Matière sèche partie racinaire	77
2.2.3. Indice de succulence	78
2.3. Cas du CaCl <sub>2</sub>	79
2.3.1. Matière sèche partie aérienne	79
2.3.2. Matière sèche partie racinaire	80
2.3.3. Indice de succulence	81
2.4. Comparaison de l'effet de la nature des électrolytes sur la matière sèche	82
2.4.1. Effet de la nature de l'anion accompagnateur du sodium (NaCl/Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	82
2.4.2. Effet de la nature du cation accompagnateur du chlore (NaCl/CaCl <sub>2</sub> )	84
2.5. Discussion des résultats	86
3. LA NUTRITION MINERALE	90
3.1. Cas du NaCl	90
3.1.1. Le sodium	90
3.1.2. Le potassium	91
3.1.3. Le calcium	93
3.1.4. Le chlore	94
3.1.5. Le phosphore	96
3.1.6. L'azote	97
3.2. Cas de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	99
3.2.1. Le sodium	99
3.2.2. Le potassium	100
3.2.3. Le calcium	102
3.2.4. Le chlore	103
3.2.5. Le phosphore	104
3.2.6. Le sulfate	106
3.2.7. L'azote	107
3.3. Cas de CaCl <sub>2</sub>	108
3.3.1. Le sodium	108
3.3.2. Le potassium	109
3.3.3. Le calcium	110
3.3.4. Le chlore	111
3.3.5. Le phosphore	112
3.3.6. L'azote	113
3.4. Comparaison de l'effet de la nature des électrolytes sur la nutrition minérale	114
3.4.1. Effet de la nature de l'anion accompagnateur du sodium (NaCl/Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	115
3.4.2. Effet de la nature du cation accompagnateur du chlore (NaCl/CaCl <sub>2</sub> )	120
3.5. Discussion des résultats	124

<b>4. ACCUMULATION DES SOLUTES ORGANIQUES</b>	<b>128</b>
4.1. Cas du NaCl	128
4.1.1. La proline	128
4.1.2. Les sucres solubles totaux	130
4.2. Cas de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	131
4.2.1. La proline	131
4.2.2. Les sucres solubles totaux	133
4.3. Cas de CaCl <sub>2</sub>	134
4.3.1. La proline	134
4.3.2. Les sucres solubles totaux	136
4.4. Effet de la nature des électrolytes sur accumulation des solutés organiques	137
4.4.1. Effet de la nature de l'anion accompagnateur du sodium (NaCl/Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	137
4.4.2. Effet de la nature du cation accompagnateur du chlore (NaCl/CaCl <sub>2</sub> )	140
4.5. Discussion des résultats	143
<b>5. SYNTHÈSE DES RESULTATS</b>	<b>146</b>
5.1. La germination	146
5.2. La croissance	148
5.4. La nutrition minérale	150
5.5. Accumulation des solutés organiques	152
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>153</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>155</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>178</b>

## INTRODUCTION

Les surfaces destinées au pâturage en zones arides diminuent continuellement au cours de ces dernières décennies (Aïdoud et al., 2006). Ce phénomène résulte de plusieurs facteurs indissociables tels que le surpâturage, l'augmentation des besoins alimentaires à court terme, et la mise en culture incontrôlée des zones à utilisation pastorale. Corrélativement, il se produit un appauvrissement et une perte du sol par érosion, et une dégradation de la couverture végétale (Le Houérou, 2006). A cette dégradation concourent également les intermittences de périodes de sécheresse extrême qui favorisent la désertification (Le Houérou, 2002).

La salinité du sol est l'une des principales contraintes environnementales qui limitent la production végétale dans les régions arides, elle est souvent associée à la sécheresse et elle entraîne une réduction des surfaces cultivables (Marcum, 2006). La FAO (2005) estime que 7% des terres agricoles dans le monde (920 millions d'hectares) sont affectées par les sels solubles. Par ailleurs, 25% environ des terres irriguées sont confrontées au problème de la salinité (Keren, 2000). Chaque année, 10 millions d'hectares des terres cultivées sont abandonnées en raison de leur salinisation par irrigation avec des eaux minéralisées (Szabolcs, 1994). La salinisation des sols de ces régions est liée aux conditions climatiques, et aux activités humaines. Le fort pouvoir évaporant de l'air et la faible pluviométrie engendrent un déficit hydrique climatique favorable à l'accumulation des sels solubles dans les sols qui peuvent atteindre un niveau suffisant pour rendre les terres impropres à la production végétale (Qadir et al., 2001). En effet, la présence de sels solubles dans un sol à un certain niveau de concentration affecte les mécanismes physiologiques de la plante et limite la production végétale (Maggio et al., 2004).

Tenant compte du fait que le rendement est contrôlé par l'interaction entre le potentiel génétique d'une plante et son environnement physique, deux solutions seraient possibles pour valoriser les sols salés. D'une part, il est possible d'agir sur le sol lui-même, en éliminant l'excès de sels solubles qu'il contient (Kotzer, 2005); cette

opération nécessite une disponibilité en eau de qualité acceptable, elle exige des investissements importants pour la mise en place d'un réseau de drainage pour évacuer les sels solubles du profil. D'autre part, il est possible de valoriser les sols salés par la culture de plantes résistantes aux conditions salines et qui présentent un intérêt agricole (Masters et al., 2007).

Dans le cas d'un stress salin, une double problématique se pose à l'organisme végétal. D'un côté, la présence de sels solubles, en diminuant le potentiel hydrique du sol, limite l'approvisionnement en eau de la plante. De l'autre côté, l'absorption de sels dans les tissus menace le bon fonctionnement physiologique des cellules (Mahajan et Tuteja, 2005). Face à ce danger, toutes les plantes ne sont pas égales. Certaines, nommées glycophytes, ne sont pas capables de supporter la présence de sels solubles en forte concentration. Les halophytes, au contraire, ont développé des réponses physiologiques pour assurer leur approvisionnement en eau tout en préservant leur métabolisme en milieu riche en sels solubles (Malcolm et al., 2003).

La première difficulté d'une plante en milieu salin est donc d'assurer son approvisionnement en eau. Pour cela, il faut que la plante puisse ajuster la pression osmotique de ses tissus par rapport à la pression osmotique de la solution du sol. Ce phénomène, nommé ajustement osmotique, permet à la plante d'assurer une hypertonie constante (Song et al., 2006b). Les plantes halophytes présentent un haut pouvoir d'ajustement osmotique, renforcé par l'absorption des électrolytes et leur conduite vers les feuilles. Les ions, comme le sodium et le chlore, sont stockés dans la vacuole et permettent, ainsi, l'établissement d'une pression osmotique interne importante. Ainsi les halophytes sont contraints de stocker les électrolytes dans leurs vacuoles pour éviter toute intoxication. En retour, l'augmentation de la pression osmotique vacuolaire risque d'entraîner une succion importante sur le cytosol, dont la déshydratation nuirait au fonctionnement du métabolisme en désorganisant la structure tertiaire des protéines, leur faisant ainsi perdre leur activité (Parida et al., 2002). Les halophytes (mais aussi occasionnellement des glycophytes) sont capables de lutter contre ce phénomène en produisant des composés dits osmoprotecteurs (ou

solutés compatibles). Ces composés, par leur concentration, assurent l'ajustement osmotique entre le cytosol et la vacuole (Ashraf et Foolad, 2007). L'accumulation de proline dans le cytosol est accompagnée d'une diminution de la concentration des solutés moins compatibles, comme les sels solubles, et d'une augmentation du volume d'eau du cytosol (Yazici et al., 2007). La proline, de teneur habituellement faible dans les tissus des plantes cultivées sur milieu dépourvu de stress salin, s'accumule de façon spectaculaire en réponse au stress salin. Cette accumulation résulte d'une synthèse du précurseur principal de la proline qui est le glutamate qui provient des voies primaires d'assimilation de l'ammoniac ou du catabolisme des protéines (Jiménez-Bremont et al., 2006). Comme de nombreux autres constituants, Les sucres peuvent servir de composés solubles compatibles pour cet ajustement osmotique (Rejsiková et al., 2007). Ainsi, les enzymes liées au métabolisme des sucres semblent avoir une importance majeure dans la tolérance au stress salin (Noiraud et al., 2001). L'implication des sucres dans la tolérance au stress salin a été mise en évidence par les corrélations observées entre le contenu en certains sucres et l'acquisition de la tolérance aux sels solubles.

*Atriplex halimus* (Chenopodiaceae) est une espèce spontanée, pérenne des régions méditerranéennes arides et semi-arides, qui tolère bien les conditions de sécheresse et de salinité (Le Houérou, 2004a). L'espèce présente une palatabilité et une appétabilité très satisfaisantes (Osman et al., 2006). Riche en protéines brutes, elle constitue une source importante pour le cheptel en matière azotée, essentiellement en période de disette (Abbad et al., 2004). Dotée d'une biomasse aérienne et racinaire assez importante, elle constitue un outil efficace et relativement peu coûteux dans la lutte contre l'érosion et la désertification et dans la réhabilitation des terres salées (Mattia et al., 2005). Ces caractéristiques font d'*Atriplex halimus* une excellente espèce pour la réhabilitation des zones dégradées pastorales. Il convient de rappeler que les *Atriplex* sont des halophytes qui poussent généralement dans les sols salés, et en bordures des Chotts et des Sebkhas.

L'identification d'halophytes utiles et leur introduction dans les sols fortement salés constitue une approche prometteuse pour la réhabilitation et la valorisation de ces zones marginales et peu propices à la majorité des cultures destinées directement à l'alimentation humaine (Weber et al., 2007). Actuellement, de nombreux travaux portent sur l'étude de la résistance des halophytes aux sels solubles dans le but de contribuer à l'augmentation de la production fourragère pour améliorer la production animale des régions arides méditerranéennes (Barhoumi et al., 2007; Ksouri et al., 2007).

Le but de notre travail consiste à étudier le comportement d'une espèce halophyte autochtone (*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*), en présence de différents sels solubles, afin de comprendre les mécanismes mis en jeu par cette plante pour s'adapter à ces types de salinité, pour le repeuplement des terres affectées par la salinité, en vue de leur réhabilitation, notamment en tant que parcours.

## CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce chapitre, il s'agira de rappeler quelques indicateurs des sols salés, de faire le point sur l'état des connaissances sur la tolérance des plantes aux sels solubles, de rappeler quelques données relatives aux techniques de la culture *in vitro*, et de présenter brièvement le genre *Atriplex* dont une espèce autochtone fait l'objet de ce travail.

### 1. LES SOLS SALES

#### 1.1. Données générales

Il est entendu, en général, par salinité une teneur du sol en sels solubles préjudiciable à la production végétale; d'une façon plus générale, la salinité est évoquée chaque fois que la présence des sels solubles modifie la vie ou les caractéristiques du sol (Qadir et al., 2001). La sodicité est un caractère relatif à la présence d'un taux relativement élevé du sodium sur le complexe adsorbant, le taux de saturation en sodium du complexe adsorbant généralement admis comme un seuil pour le caractère de sodicité est de 15 % (Aubert, 1983). La salinité peut constituer une contrainte majeure à la production végétale, elle peut mener à la stérilité des sols (Kotzer, 2005). Elle se rencontre en de nombreuses zones arides et semi arides du bassin méditerranéen (Drevon et al., 2001).

Dans les pays à climats aride et semi aride, l'évaporation rapide de l'eau pendant la saison sèche provoque une augmentation de la concentration des sels solubles dans les horizons superficiels des sols. Cette accumulation des sels peut modifier l'environnement immédiat des cultures dont le développement en est alors perturbé. Les accumulations des sels solubles transforment profondément les propriétés physiques et chimiques du sol (Lambers, 2003). Lorsque les concentrations salines

dépassent un certain seuil, elles provoquent une diminution importante des rendements de cultures; par la suite, les sols non cultivés peuvent être colonisés par des peuplements de plantes halophytes (Masters et al., 2007).

La nature des sels solubles présents dans les sols est relativement variable; en zones sèches méditerranéennes, il s'agit généralement de chlorures et des sulfates de sodium (Pouget, 1973). Selon la FAO (2005), les sols salés englobent deux principales catégories : les sols salins (*Solontchaks*) et les sols alcalins (*Solonetz*) ; une catégorie mixte est souvent proposée, il s'agit des sols salins à alcalins (*Solontchaks - Solonetz*) [Aubert, 1983].

Bien que l'altération des roches soit la principale source de tous les sels, les sols salés sont rarement formés par accumulation de sels in situ , ce type de salinisation est qualifié de primaire par opposition à la salinisation secondaire qui est d'origine anthropique (Yensen, 2000).

La formation d'un sol salé résulte généralement de l'accumulation de sels dans les horizons de surface (Levy, 2000). Ce processus dépend essentiellement du régime hydrique du sol et des sources de sel. Lorsque le climat est chaud et sec, les sels sont accumulés en surface par les eaux capillaires suivant le flux d'évaporation. Les sels les plus communs présents dans la solution du sol correspondent aux cations  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , et aux anions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$   $\text{NO}_3^-$ . D'autres sels, moins courants et plus toxiques à faibles concentrations, peuvent être considérés, il s'agit de sels contenant des éléments traces comme le bore, le sélénium, l'arsenic et le molybdène (Keren, 2000). Un sol devient sodique lorsque la proportion d'ions  $\text{Na}^+$  dépasse celles des autres électrolytes de plusieurs ordres de grandeur et occupe une certaine fraction du complexe adsorbant (Levy, 2000).

Il est souvent recommandé de subdiviser les sols salés en deux catégories principales qui sont les sols salins et les sols sodiques. Les sols salins ont un excès de sels solubles suffisant pour affecter la production végétale, les sols sodiques ont un niveau de saturation du complexe adsorbant par du  $\text{Na}^+$  suffisant pour affecter la structure du sol et la production végétale (Flowers et Flowers, 2005).

La salinité d'un sol se mesure par la conductivité électrique (CE) d'un extrait de pâte saturée. Elle traduit la concentration en électrolytes de la solution, et exprime la teneur en sels solubles (salinité globale) à une température de 25°C. L' USSL (1954) a proposé le seuil de 4 dS/m pour définir un sol salin. Par la suite, il a été reconnu que la distinction entre un sol non salin et un sol salin est intimement rattachée à la tolérance aux sels des plantes considérées. En effet, puisque la CE est un indicateur du stress osmotique subi par les cultures, le classement d'un sol comme salin dépend de la sensibilité aux sels des plantes qui poussent sur ce sol (Essington, 2004).

La sodicité d'un sol se décrit par le pourcentage de sodium échangeable sur le complexe d'échange cationique ( $ESP = Na_{\text{échangeable}} \times 100 / CEC$ ), elle est en rapport avec l'effet dispersif du  $Na^+$  sur les colloïdes structurant un sol. Un sol est généralement qualifié de sodique si son ESP est supérieur à 15 % (USSL, 1954). Pour simplifier la mesure de la sodicité, le ratio d'absorption du sodium (SAR) a été proposé comme une propriété de la composition de la solution du sol caractérisant les concentrations en  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  et déterminant l'ESP. Bien que la sodicité soit une propriété de la composition du complexe d'échange cationique, le SAR est préféré à l'ESP par sa simplicité d'évaluation et par sa capacité à prédire l'ESP. Le ratio d'adsorption du sodium (SAR) d'un extrait de pâte saturée s'obtient avec le rapport des ions  $Na^+$  et des ions divalents en solution :

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

$Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  sont exprimés en meq/l.

## 1.2. Les propriétés des sols salés

L'excès de sels solubles ou de sodium échangeable dans un sol modifie ces propriétés physico-chimiques. Cette modification des conditions édaphiques constitue souvent un stress pour la croissance des plantes. En utilisant conjointement les paramètres de salinité et de sodicité pour obtenir des classes basées sur la CE et le SAR, on peut

distinguer plus spécifiquement les sols salins, les sols sodiques et les sols salin-sodiques (Tableau I). Ce classement est difficilement généralisable car les valeurs seuils sont influencées par les propriétés des sols ainsi que par l'objectif pour lequel est utilisé ce classement (e.g., amélioration de la fertilité des sols, gestion de l'irrigation, contrôle du rendement des cultures).

Tableau I. Seuils de sodicité (ESP, SAR) et de salinité (CE) utilisés pour un classement général des sols (Slavich et Petterson, 1993).

Sol	ESP (%)	SAR	CE (dS/m)	Caractéristiques
Salin	< 15	< 13	> 4	La croissance des plantes est généralement contrainte par une faible infiltration, une faible stabilité et une mauvaise aération du sol. La plupart du temps, l'évaporation de l'eau entraîne la formation d'une croûte blanche à la surface du sol, connue sous le nom de croûte blanche alcaline. La croissance des plantes est affectée par la pression osmotique et par des toxicités ioniques.
Sodique	> 15	> 13	< 4	Ce type de sol est le plus dégradé par le sodium échangeable. Il présente une dispersion des particules du sol et des pores obstrués, ces phénomènes augmentent avec la profondeur. L'absence de larges pores dans les sols dispersés rend le sol peu perméable. Le taux d'infiltration est tellement réduit que l'eau tend à former des flaques. Ce type de sol est dit <i>engorgé</i> .
Salin-sodique	> 15	> 13	> 4	La croissance des plantes peut être affectée à la fois par un excès de sel et par un excès de sodium. Ces sols ont des caractéristiques intermédiaires entre celles des sols salins et celles des sols sodiques. Si les sels solubles sont lixiviés, le niveau de salinité diminue, mais le taux de sodium échangeable augmente, les sols salin-sodiques se transforment en sols sodiques.

Concernant la réaction des sols salés, un sol devient alcalin lorsque son pH dépasse 7. Les électrolytes de la solution du sol et du complexe adsorbant sont essentiellement  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ . Ils sont appelés cations "non acides" ou "non hydrolysables" car ils ne libèrent pas de protons en réagissant avec l'eau. Ils ne libèrent pas non plus d'ions hydroxyles et sont donc neutres. Ce sont principalement les anions, et surtout les carbonates et les bicarbonates, qui se comportent en bases. Ils génèrent des ions hydroxyles et provoquent l'augmentation du pH (Keren, 2000).

Dans les sols salins, les transformations chimiques peuvent avoir des répercussions notables au niveau des propriétés physiques. L'accumulation de sels dans le sol déplace l'équilibre chimique entre la fraction solide et la fraction liquide du sol (Essington, 2004). Les propriétés chimiques sont donc bouleversées qualitativement et quantitativement. Les cations  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Na}^+$  montrent le pouvoir flocculant ou dispersant le plus important ;  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$  se situent entre les deux,  $\text{K}^+$  étant plus dispersant que  $\text{Mg}^{2+}$  (Sumner, 1993). Dans un sol naturel, le niveau de  $\text{Na}^+$  échangeable suffisant pour provoquer une dégradation des propriétés physiques du sol dépend de plusieurs facteurs dont la texture, le type d'argile, la teneur en matière organique, et la présence d'autres électrolytes dans la solution du sol (Naidu et Rengasamy, 1993). En conditions sodiques, l'argile subit deux transformations physiques distinctes, une dispersion et un gonflement (Essington, 2004). Ces processus dépendent de l'ESP et de la concentration totale en électrolytes (CTE) dans la solution du sol. Dans un système où le  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$  sont mélangés, le  $\text{Na}^+$  n'est pas distribué de façon aléatoire. Les ions  $\text{Ca}^{2+}$  neutralisent les charges internes des quasi-cristaux argileux alors que les surfaces externes sont substantiellement enrichies de  $\text{Na}^+$ . En augmentant l'ESP pour se rapprocher d'un système sodique, ces domaines sont progressivement détruits par la pénétration du  $\text{Na}^+$  à l'intérieur des colloïdes argileux, les argiles sont ainsi susceptibles à la dispersion et au gonflement (Levy, 2000).

## 2. LA TOLERANCE DES PLANTES AUX SELS SOLUBLES

La tolérance des végétaux à la salinité correspond à leur aptitude à vivre en présence de sels solubles sans que leur croissance et leur développement ne soient perturbés (Rathinasabapathi, 2000). Cependant, la réponse des espèces végétales à la présence de sels solubles dépend de l'espèce elle-même, de sa variété, de la concentration et de la nature des sels, des conditions de culture, et du stade de développement de la plante (Djanaguiraman et al., 2006). Une plante cultivée sur un sol riche en sels solubles doit faire face à la pénétration excessive de certains ions dans ses tissus qui peuvent être rejetés ou accumulés par les différents organes du végétal (tissus, cellules ou compartiments cellulaires) [Chen et al., 2002].

### 2.1. Les halophytes

Le terme halophyte (du grec « *halo* » : sel et « *phyt(o)* » : plante) définit un organisme végétal qui vit, croît et se reproduit naturellement dans un milieu salin. Par opposition, un glycophyte (du grec « *glyco* » : sucré) ne peut croître en milieu salin. L'halophilie est l'aptitude d'une espèce végétale à réaliser son cycle de développement en milieu fortement salin.

Les halophytes sont des plantes naturellement tolérantes aux sels solubles et poussent aussi bien dans un environnement salin qu'en conditions normales (Malcolm et al., 2003). Elles représentent la limite supérieure des capacités adaptatives des organismes végétaux à la salinité (Weber et al., 2007). Les halophytes s'opposent donc aux glycophytes qui poussent sur des sols non salés, entre ces deux extrêmes, il y a des formes intermédiaires présentant une tolérance plus ou moins importante pour les sels solubles. On distingue ainsi les halophytes facultatifs ou encore les glyco-halophytes (Bor et al., 2003). Les halophytes facultatifs sont caractérisés par leur forte capacité de résistance à la salinité et dont la croissance est se déroule normalement en sols non salés (c'est le cas d'*Atriplex littoralis* et *Suaeda*

*flexilis*). Les halophytes obligatoires ou strictes (cas de *Suaeda microcarpa*) exigent pour leur développement complet des milieux salés (Le Houérou, 1993) [figure 1].

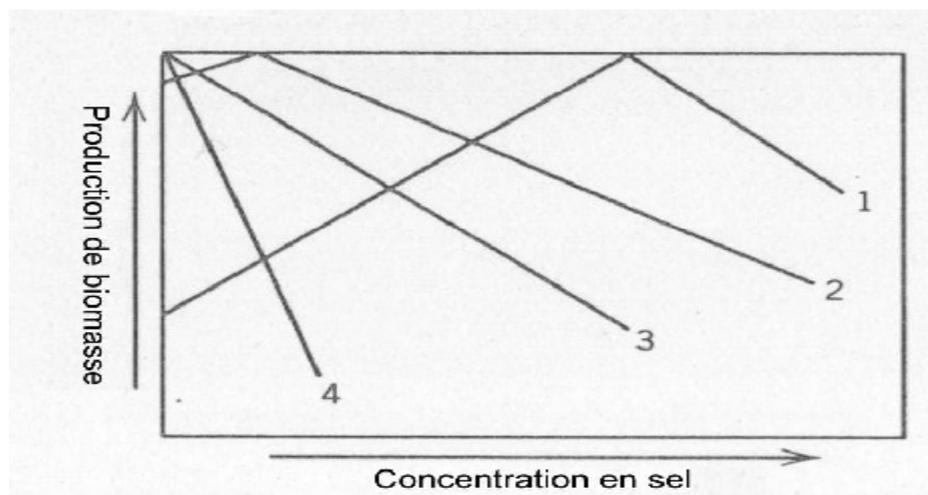


Figure 1. Production de biomasse des différents groupes de plantes suivant la salinité. 1 : halophytes obligatoires ou vrais - 2 : halophytes facultatifs - 3 : glycohalophytes - 4 : glycophytes (Sheng et Xiuling, 1997).

Du point de vue biochimique, les halophytes se caractérisent par une forte richesse de leurs tissus en sels. Une grande partie de ces sels étant dissous dans le suc vacuolaire, il en résulte une pression osmotique élevée, cette pression peut subir des variations rapides si la salinité du milieu extérieur est modifiée. Dans des conditions de vie normale, le suc vacuolaire demeure ainsi toujours légèrement hypertonique par rapport au milieu extérieur. L'absorption d'eau reste donc possible ainsi que la perte d'eau par transpiration (Keiffer et Ungar, 2002).

Les halophytes ont la capacité de réexpédier l'excès de sel présent dans leurs feuilles vers les racines par l'intermédiaire de la sève descendante (*excluder*). Lors de ce processus, les halophytes activent un gène dénommé AtHK1 (Yamaguchi et Blumwald, 2005), qui code pour une protéine de transport membranaire assurant le transport des ions sodium dans la sève. En plus, les racines sont dotées d'une couche cellulaire interne, l'endoderme, qui constitue un procédé d'ultrafiltration cellulaire des ions en excès (Kurkova et al., 2002). Par ce mécanisme d'exclusion, couplé à des

systèmes de transport sélectif permettant d'absorber les ions nutritifs utiles et de ré-excréter les ions  $\text{Na}^+$ , la plante empêche les sels de remonter dans la sève jusqu'aux feuilles. Un second mécanisme de tolérance aux sels est présent dans les feuilles, il s'agit de l'inclusion (***Includer***). Les halophytes utilisent les sels pour ajuster la pression osmotique de leurs cellules. Elles laissent donc monter les sels dans leurs parties aériennes pour les stocker dans les vacuoles et les isoler des constituants cellulaires vitaux (Parida et Das, 2005).

## 2.2. Les phénomènes généraux

En présence d'une forte concentration de sels dans le milieu environnant, la plante subit en premier lieu un choc osmotique qui annule le gradient du potentiel hydrique entre le milieu interne et le milieu externe, et peut provoquer une forte déshydratation des tissus. Cette déshydratation des tissus entraîne, en retour, une augmentation du potentiel hydrique cellulaire par concentration du contenu vacuolaire, ce phénomène s'accroît au niveau du végétal par la fermeture des stomates. C'est la première étape passive de résistance du végétal aux sels solubles telle qu'elle est définie par Verslues et al. (2006). La deuxième étape fait intervenir des processus actifs qui abaissent progressivement le potentiel osmotique de la plante, et un nouvel état stationnaire est ainsi atteint, c'est l'osmorégulation ou l'ajustement osmotique (Munns, 2005).

A l'échelle de la plante entière, les ions chlorure et sodium, qui sont souvent en excès dans les solutions des sols salés, entrent par les racines et sont véhiculés par la sève xylémique jusqu'aux tiges et aux feuilles. Par la suite, ils sont soit stockés (dans le cas des plantes de type ***includer***), soit, au contraire, ils sont revéhiculés par la sève phloémique jusqu'aux racines (dans le cas des plantes de type ***excluder***). Les ions chlorure et sodium pénètrent dans les cellules de la racine, puis circulent à travers le cortex racinaire jusqu'à la stèle (voie symplasmique), où ils sont sécrétés dans le xylème comme les autres ions minéraux (Chen et al. 2002). A l'échelle de la cellule, on considère que le  $\text{Na}^+$  et le  $\text{Cl}^-$  pénètrent par des transporteurs ou canaux ionique peu

spécifique (James et al., 2006). La saturation de l'espace intercellulaire (ou apoplasme) des parties aériennes par le sel apporté par le xylème est le facteur déterminant de la nécrose et de la mort cellulaire (Munns, 2002). Le sel concentré dans ce compartiment provoque une sortie d'eau intracellulaire qui conduit à une déshydratation rapide des cellules. Deux types de comportements ont pour effet d'éviter la saturation en sels de l'apoplasme :

- Le type **Incluser** : Les éléments remontant des racines sont piégés et accumulés dans les cellules des parties aériennes (figure 2), plus particulièrement dans les vacuoles. Les mécanismes impliqués dans le transport du sodium à travers la membrane vacuolaire ou le tonoplaste, ne sont pas complètement élucidés. Cependant, l'hypothèse la plus communément admise est que l'entrée du sodium se faisant contre son gradient électrochimique. L'énergie nécessaire au transport de cet ion serait fournie par le gradient de protons engendré par la pompe à proton du tonoplaste (Yamaguchi et Blumwald, 2005). La vacuole se chargerait ainsi en  $\text{Na}^+$  grâce à l'action d'un antiport sodium-proton  $\text{Na}^+/\text{H}^+$ , le quel serait entretenu par le fonctionnement accéléré des pompes à protons. L'existence d'un système d'échange  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  est largement admis (Popova et Golldack, 2007). Les ions toxiques comme le  $\text{Na}^+$  et le  $\text{Cl}^-$  semblent être exclus des sites sensibles de la cellule et compartimentés dans la vacuole, qui peut représenter jusqu'à 90% du volume cellulaire, et où ils sont utilisés comme *osmotícums* (Tyerman et Skerrett, 1999). Cette accumulation d'ions dans la vacuole permet à la fois d'ajuster son potentiel osmotique et de détoxiquer le cytoplasme où s'effectuent les processus de métabolisme cellulaire (Koyro, 2006).

- Le type **Excluser** : Les éléments véhiculés jusqu'à aux feuilles et qui n'y sont pas retenus sont réexportés vers les racines par le phloème (figure 2). Dans ce cas, ce sont les cellules racinaires qui assurent la protection des parties aériennes, en limitant la quantité de sodium transportée par le xylème et/ou en l'excrétant dans le milieu extérieur (Sobrado, 2004). Cette limitation peut résulter d'un blocage des éléments toxiques à l'intérieur des organes souterrains, ou d'une véritable exclusion au niveau de l'assise extérieure des racines. Par ce mécanisme, la teneur de ces plantes en

éléments varie peu entre un sol salé et un sol non salé (Bethoumieu et al., 2003). Chez de nombreuses halophytes (comme les Chénopodiacées), la résistance au stress salin est associée à la présence d'organes spécialisés tels que les poils vésiculaires (trichomes) et les glandes excrétrices à la surface des feuilles qui leurs donnent un aspect blanchâtre plus ou moins luisant (Simon, 1997). Ces structures anatomiques sont spécialisées dans l'élimination du  $\text{Na}^+$  qui arrive au niveau des feuilles à travers le xylème puis au niveau du mésophylle. Le  $\text{Na}^+$  est emmagasiné dans ces trichomes avant qu'il ne soit excrété par la dégénérescence de ces derniers, empêchant ainsi l'accumulation toxique de ce cation dans les tissus foliaires (figure 3). En général, les systèmes cellulaires responsables du transport d'ions chez les végétaux sont encore peu caractérisés aux niveaux génétiques ou moléculaires. C'est pourquoi les mécanismes qui conditionnent la circulation et la répartition du  $\text{NaCl}$  à l'échelle de la plante entière ou à l'échelle cellulaire son encore peu élucidés (Munns, 2005).

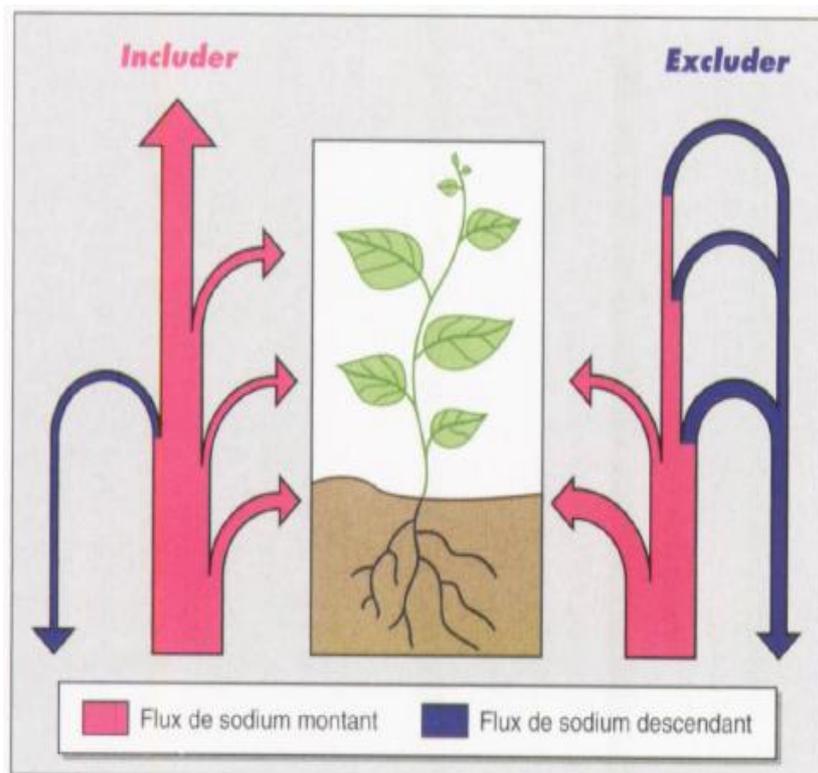


Figure 2. Schématisation du bilan de la circulation du sodium dans les plantes de type *include* ou *exclude*. Chez les plantes de type *include*, les flux de sodium sont essentiellement ascendants (en rose) et le sel est accumulé dans les parties aériennes. Chez celles de type *exclude*, la plus grande partie du sodium véhiculé vers les

feuilles est réexporté vers les racines via le phloème (en bleu). Les intensités relatives des flux sont symbolisées par la largeur des traits (Levigneron et al., 1995).

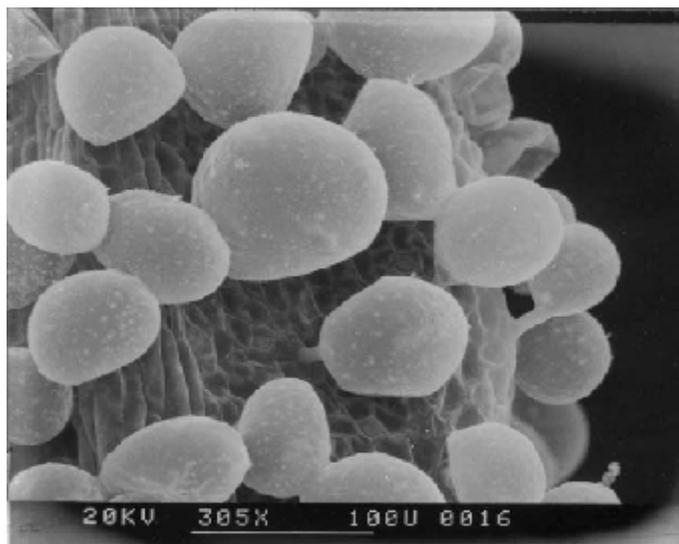


Figure 3. Aspect d'une feuille d'*Atriplex lentiformis* traitée par 5 g/l NaCl, portant des trichomes gonflés de sels (Malcolm et al., 2003).

### 2.3. Les mécanismes physiologiques et biochimiques

De nombreux mécanismes physiologiques et biochimiques rentrent en jeu pour permettre aux végétaux de résister à un stress salin provoqué par la présence d'un excès de sels solubles dans la solution du sol. Les principaux mécanismes généralement évoqués sont la compartimentation vacuolaire, le contrôle membranaire et l'ajustement osmotique.

**2.3.1. La compartimentation vacuolaire :** Un organisme peut difficilement exclure totalement le  $\text{Na}^+$  de ses tissus. Chez les plantes, une des stratégies de tolérance à la salinité les plus communes est la compartimentation des ions ( $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ ) en excès dans les tissus. Cette redistribution contrôlée se fait essentiellement dans les vacuoles (Horie et Schroeder, 2004) et éventuellement, à l'échelle de la plante entière, dans les organes les plus vieux ou les moins sensibles (Munns, 2005). Pour être contrôlé, le

déplacement des ions à travers les membranes implique un transport actif, consommateur d'énergie, qui utilise différents transporteurs à la surface des membranes cellulaires (Neuhaus, 2007). Une fois vacuolisés, le  $\text{Na}^+$  et le  $\text{Cl}^-$  en excès contribuent à l'ajustement osmotique sans altérer les processus métaboliques du végétal (Zhao et al., 2005).

**2.3.2. Le contrôle membranaire :** La notion de sélectivité chez les végétaux est évoquée lorsqu'on constate que dans les mêmes conditions de milieu, le contenu minéral des plantes varie largement d'une espèce à une autre (Meychik et al., 2005), la racine procède donc à un contrôle sélectif de l'entrée des ions et de leurs accumulation dans la plante. Tyerman et Skerrett (1999) signalent que de nombreuses espèces parmi les halophytes, comme chez certaines glycophytes, sont capables de restreindre l'accumulation de  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  en milieu salé par le mécanisme de sélectivité. L'adaptation au stress salin se met en place également au niveau des membranes cellulaires (membrane plasmique, tonoplaste). La modification qualitative et quantitative des aquaporines (protéines trans-membranaires) est par exemple un processus capable de modifier la conductivité hydraulique de la plante et de favoriser ou restreindre les mouvements d'eau (Martinez-Ballesta et al., 2006). En terme de transport ionique, la stratégie de résistance à la salinité est qualitative et quantitative. La sélectivité des ions à l'entrée constitue la composante qualitative. Elle se définit à partir des différents transporteurs membranaires présents (e.g., antiport  $\text{Na}^+/\text{H}^+$ ) [Tyerman et Skerrett, 1999]. Dans la diffusion facilitée comme dans le transport actif, les protéines membranaires peuvent être très spécifiques de certains solutés. Néanmoins, plusieurs solutés peuvent entrer en compétition pour une même protéine de transport (e.g.,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ). D'un point de vue quantitatif, la perméabilité membranaire au  $\text{Na}^+$  ainsi que l'activité et la sensibilité des antiports  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  membranaires évoluent pour s'adapter à un stress salin à long terme (Hamada et al., 2001). Lorsque l'énergie et la matière disponibles pour la croissance sont entièrement détournées pour l'adaptation et la protection, l'organisme ne dispose plus de ressources pour contenir l'excès de  $\text{Na}^+$  loin des activités métaboliques sensibles. Si la capacité osmorégulatrice et osmoprotectrice des solutés

compatibles en présence est excédée par les concentrations en Na<sup>+</sup> (et Cl<sup>-</sup>) dans le cytoplasme, il s'ensuit un dépérissement progressif de l'organisme exposé aux effets spécifiques des ions en excès (Franklin et Zwiazek, 2004).

**2.3.3. L'ajustement osmotique :** Dans un milieu salé, le maintien de la croissance dépend étroitement du maintien du volume et de la turgescence cellulaire. L'ajustement osmotique ou l'osmorégulation est défini comme étant la capacité des plantes à accumuler activement des solutés pour maintenir la turgescence (Chinnusamy et al., 2004). Il apparaît chez de nombreuses espèces, surtout les halophytes, comme un mécanisme clé dans la tolérance à la déshydratation (Ashraf, 2004). Il provoque la diminution du potentiel hydrique et osmotique totale de la partie aérienne et racinaire (Maricle et al., 2007), ce qui permet d'empêcher la fermeture des stomates, donc de maintenir la photosynthèse, la respiration, et l'assimilation du carbone (James et al., 2006). Il intervient également pour retarder la sénescence foliaire en améliorant l'extraction de l'eau du sol par les racines, ce phénomène a pour conséquence le maintien de la croissance (Maggio et al., 2004). L'ajustement osmotique peut aussi contribuer à la protection des membranes cellulaires et des systèmes enzymatiques, en particulier au niveau des organes jeunes (Borsani et al., 2003). L'ajustement osmotique par les plantes soumises à un stress salin peut se produire par l'accumulation d'ions inorganiques et /ou par des solutés organiques (Ashraf et Foolad, 2007). Le terme solutés compatibles a été utilisé pour décrire des composés souvent organiques non toxiques de faibles poids moléculaires, fortement hydrosolubles, non chargés ou de charge nulle, et peuvent être accumulés à forte concentration dans le cytoplasme sans interférer avec les processus physiologiques cellulaires (Rontein et al., 2002). Cependant le terme solutés non compatibles a été utilisé pour désigner certains solutés inorganiques qui sont, à une certaines concentrations, toxiques pour le métabolisme cellulaire (Parida et Das, 2005). Bien que tous les deux jouent un rôle important, leur présence, leur quantité et leur distribution dans les cellules changent considérablement selon l'espèce, la variété et même selon le stade de développement de la plante (Zhu, 2003).

- *L'ajustement osmotique par l'accumulation des solutés organiques* : Sous l'action du stress salin, les plantes réagissent par une modification de leur contenu biochimique, ces modifications se traduisent souvent par une accumulation de certains composés organiques (Mahajan et Tuteja, 2005). Avec l'augmentation de la salinité dans le milieu, les halophytes réalisent l'ajustement osmotique en concentrant les sels dans leurs tissus, où ils sont utilisés comme *osmotocums*, mais les quantités qu'il est nécessaire d'accumuler deviennent rapidement toxiques. Dès lors, une des stratégies d'adaptation consiste à synthétiser des *osmoprotecteurs* et de les accumuler dans le cytoplasme afin de contrebalancer l'effet d'accumulation des ions dans la vacuole (Ashraf et Foolad, 2007). En plus de leur rôle dans le maintien de la turgescence cellulaire par la diminution du potentiel hydrique, l'accumulation des solutés organiques compatibles peut également contribuer dans la stabilisation des protéines de la membrane et du pH cytosolique, dans le maintien de l'homéostasie ionique ainsi que dans la désintoxication qui pourrait être provoquée par un excès de  $\text{NH}_4^+$  (Veeranagamallaiah et al., 2007). La classification d'Ashraf et Harris (2004), a mis en évidence quatre classes principales de corps dissous qui pourraient avoir un rôle osmoprotectant chez les plantes sous stress salin :

- Corps dissous contenant de l'azote tels que la proline, la bétaine et la glycine.
- Sucres solubles de faibles poids moléculaires tels que le glucose, le saccharose, le tréhalose et le raffinose.
- Polyalcools linéaires comme le mannitol, le sorbitol et le glycérol.
- Et en fin les polyalcools cycliques comme l'inositol, le pinitol et l'ononitol.

La proline ; acide pyrrolidine-2-carboxylique ( $\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_2\text{N}$ ) ; est l'acide aminé le plus communément retrouvé dans les tissus des halophytes et glycophytes cultivées en présence de sel (Hernandez et al., 2000; Koyro, 2006). Par ailleurs, l'augmentation de la teneur en proline libre a été pendant longtemps considérée comme le résultat du seul phénomène de protéolyse, toutefois le métabolisme de la proline est dépendant de l'action de certaines enzymes comme la pyrroline-5-carboxylate synthétase ( $\text{P}_5\text{CR}$ ) et la proline déshydrogénase (Hien et al., 2003). Elle serait synthétisée à partir de l'acide glutamique via l'acide 5-carboxylique-1-pyrroline, mais aussi à partir des

polyamines, via l'arginine et l'ornithine (Yoshida et al., 1995; Jiménez-Bremont et al., 2006). Cet aminoacide s'accumule dans la plante lorsque l'équilibre métabolique de celle-ci est perturbé par des conditions défavorables ; il s'accumule sous stress salin (Heidari-Sharifabad et Mirzaie-Nodoushan, 2006), sous stress hydrique (Monreal et al., 2007), et sous l'effet des basses et des hautes températures (Mahajan et Tuteja, 2005). La proline est un *osmoprotecteur*, dont l'accumulation cytoplasmique permet de neutraliser les effets ioniques et osmotiques de l'accumulation du sel dans la vacuole (Ueda et al., 2007). Elle peut intervenir dans la stabilité membranaire (Mansour, 1998) et dans l'amélioration de la rétention d'eau (Slama et al., 2006). La proline accumulée peut également constituer une réserve d'azote utilisée par la plante postérieurement à la période du stress (Wang et al., 2007b), comme elle peut participer dans la désintoxication des espèces oxygénées radicalaires (reactive oxygen species ROS) [Chris et al., 2006].

Les sucres solubles auraient un rôle majeur dans l'ajustement osmotique, leur participation à l'abaissement du potentiel osmotique en conditions de stress salin a été mise en évidence par plusieurs auteurs (Fernandes et al., 2004; Sato et al., 2006). La synthèse des sucres, est stimulée par le stress salin chez de nombreuses espèces soit par blocage de la glycolyse ou par hydrolyse de l'amidon (Rathinasabapathi, 2000). Les sucres stabilisent les structures protoplasmiques, en prenant la place de l'eau liée aux protéines sensibles, grâce à la présence de leurs radicaux OH, ils maintiennent ainsi la structure des édifices protéiques (Hare et al., 1998). Leur présence permet la protection des processus de synthèse des enzymes et le maintien des réactions de phosphorylation et de la production de l'énergie (Rejsiková et al., 2007). Ils participent efficacement à l'élongation des cellules des chevelus racinaires (Cordoba et al. 2001). L'accumulation des sucres semble induire la gélification du contenu cellulaire en saturant le milieu intra-cellulaire. Le saccharose peut agir en tant que composé soluble compatible et son accumulation peut permettre d'éviter la cristallisation des molécules contenues dans la cellule, il limite donc les dommages au niveau des structures cellulaires (ex : protéines, membranes) [Neuhaus, 2007]. Selon Fernandes et al. (2004) l'accumulation accrue du saccharose est due principalement à

sa synthèse à partir du glucose via l'enzyme saccharose phosphate synthétase (SPS). Ainsi il contribue au maintien d'une pression osmotique élevée limitant les pertes d'eau par transpiration (Pérez-Alfocea et Larher, 1995). Le glucose est le sucre majoritairement accumulé dans les feuilles des plantes soumises au stress salin (Mustard et Renault, 2004). Le tréhalose est considéré comme étant le sucre le plus efficace en terme d'osmoprotection et en terme de minimum de quantité requise pour obtenir un effet positif (Garcia et al., 1997). Il protège les membranes et les protéines chez les cellules exposées au stress salin et hydrique (Noiraud et al., 2001). La spectrométrie à infrarouge a permis de mettre en évidence que le tréhalose se liait aux protéines par des liaisons hydrogènes entre ses groupements hydroxyles et les résidus polaires des protéines, et réduit l'agrégation des protéines dénaturées (Neuhaus, 2007). Cependant, ce sucre est extrêmement rare et/ou faiblement synthétisé chez les plantes (Dubos, 2001). En effet le même mécanisme que celui utilisé pour la stabilisation des protéines semble être impliqué pour la protection des membranes. Au cours de la déshydratation, les groupements hydroxyles du tréhalose peuvent former des liaisons avec les groupements phosphate des lipides membranaires. Enfin, les sucres peuvent avoir un impact sur la régulation de l'expression des gènes. En effet, certains gènes sont directement régulés par le taux de glucose dans la cellule. On pourra citer par exemple le gène codant pour la protéine GRR1 (glucose regulated repressor) isolé chez *Saccharomyces cerevisiae* (Li et Johnston, 1997).

Les bétaines sont des composés quaternaires d'ammonium (QACs) qui fonctionnent en tant qu'osmolytes compatibles efficace chez les plantes soumises au stress salin (Raza et al., 2007). Ces composés qui ont la particularité d'être méthylés, sont issus soit de la choline (choline-O-phosphate) soit d'acides aminés (proline-bétaine,  $\beta$ -alaline-bétaine) sous l'action du bétaine aldéhyde déshydrogénase (BADH) [Yin et al., 2002]. Parmi les QACs, la glycine-bétaine qui se produit le plus abondamment sous stress salin (Hincha, 2006), elle protégerait efficacement les composantes essentielles à la photosynthèse comme la Rubisco et le complexe du photosystème II (PSII) ; et maintien de ce fait l'activité photosynthétique (Demiral et Türkan, 2006).

Elle agirait également comme un capteur d'eau qui permet de stabiliser les structures et l'activité des enzymes et maintenir l'intégrité des membranes cytoplasmiques (Saneoka et al., 2001). La betterave est à l'origine du nom Betaïne, car elle en contient des quantités importantes (Subbarao et al., 2001). D'autres halophytes cultivées accumulent aussi ces composés lorsqu'elles sont soumises à un stress salin, c'est le cas d'*Atriplex griffithii* (Khan et al., 2000a) et de *Suaeda maritima* (Moghaieb et al., 2004).

- *L'ajustement osmotique par l'accumulation des solutés inorganiques* : Bien que les composés organiques soient les principaux constituants de l'osmorégulation chez les plantes stressées, les ions inorganiques contribueraient également à l'ajustement osmotique (Blumwald et al., 2000). Selon Cayuela et al. (2001), cet ajustement par l'accumulation d'ions demande moins d'énergie par rapport à l'ajustement par l'accumulation des solutés organiques.

Le calcium est un constituant de près de 50% des cendres de la plante entière et essentiellement des parois cellulaires (Grattan et Grieve, 1999). Selon Schmitz-Eiberger et al. (2002), le rôle du calcium sert au maintien de la structure cellulaire, en particulier celle des parois cellulaires, c'est un constituant de la lamelle moyenne de la membrane squelettique (pectate de calcium). Le calcium a un rôle antitoxique à l'égard des excès de sodium que la plante est susceptible d'absorber. Il insolubilise certains produits toxiques de métabolisme comme l'oxalate de calcium (Ma et al., 2005). L'addition du  $\text{Ca}^{2+}$  à l'environnement racinaire a été suggérée comme moyen d'augmentation de la tolérance au stress salin (Epstien, 1998). C'est un élément qui maintient l'intégrité des membranes cellulaires (Martinez-Ballesta et al., 2006), il réduit l'absorption du  $\text{Na}^+$  par antagonisme (Shabala et al., 2005), et favorise celle du  $\text{K}^+$  (Arshi et al., 2006). Selon Tuna et al. (2007), la présence du calcium dans le milieu peut favoriser la sélectivité pour le potassium au détriment du sodium. En effet, cet élément rentre dans l'intégrité structurelle et fonctionnelle de la membrane cytoplasmique et sa présence peut régler l'absorption des ions en faveur du potassium alors que celle du sodium est inhibée. Un autre rôle attribué au  $\text{Ca}^{2+}$  est

l'amélioration de la croissance des plantes soumises au stress salin à travers sa contribution dans l'ajustement osmotique en favorisant l'accumulation des corps organiques dissous, principalement la proline (Girija et al., 2002) et en modifiant le rapport  $K^+/Na^+$  intracellulaire (Grieve et al., 2004).

Le potassium est présent sous forme dissoute dans les liquides intracellulaires, notamment dans la vacuole, où il s'accumule à des concentrations jusqu'à cent fois supérieures à celles du milieu (Maathuis et Amtmann, 1999). C'est un élément qui est nécessaire en quantité importante, il est irremplaçable et se trouve toujours aux sites où les synthèses sont très actives (dans les méristmes en particulier) [Heller et al., 1998]. Le potassium renforce la tolérance de la plante à la salinité (Grattan et Grieve, 1999). Il est responsable de la pression osmotique au niveau cellulaire et contribue à 40% environ de l'osmolarité (Botella et al., 1997). Il favorise la photosynthèse, la synthèse des sucres, diminue la transpiration et réduit les risques de flétrissement en cas de déficit hydrique en facilitant l'absorption d'eau par les racines (Shabala et al., 2005). Par ailleurs, certaines enzymes de synthèse des protéines sont activées par le potassium (Maathuis et Amtmann, 1999), ce qui explique l'accumulation d'acides aminés lors d'une carence en potassium (Heller et al., 1998).

Le sodium n'est pas un élément essentiel pour la majorité des plantes. En effet, la croissance des plantes, en particulier les glycophytes, est souvent perturbée par la présence des concentrations élevées en sodium dans le milieu (Blumwald et al., 2000). L'accumulation du sodium en conditions de stress salin a été rapportée chez plusieurs espèces halophytes (Askari et al., 2006; Barhoumi et al., 2007). Le sodium qui s'accumule fortement dans la vacuole est antagoniste vis-à-vis des autres cations, il perturbe l'absorption du potassium (Maathuis et Amtmann, 1999) et celle du calcium (Davenport et al., 1997). Les ions  $Na^+$  potentiellement toxiques peuvent s'accumuler dans l'apoplasme en provoquant une déshydratation des cellules et/ou dans le cytoplasme en causant des dommages aux systèmes métaboliques (Tester et Davenport, 2003). L'aptitude des plantes à tolérer le sodium est extrêmement variable, chez les espèces de type *excluser*, les cellules racinaires assurent la

protection de la partie aérienne, en limitant les quantités des ions transportés par le xylème et les excréant à l'extérieur (Bethoumieu et al., 2003). Il y a une forte corrélation entre l'exclusion de sel et la tolérance aux sels des espèces végétales (Tester et Davenport, 2003). Les plantes de type *excluder* excluent environ 98% des sels absorbés dans la solution du sol, permettant seulement à 2% d'être transportés par le xylème aux feuilles, ce contrôle maintient une concentration saline inférieure dans l'ensemble de la plante à celle de la solution du sol (Munns, 2005). Chez les plantes de type *includer*, la majeure partie des sels assimilés est transportée vers les feuilles, où ils sont accumulés et séquestrés dans la vacuole (Yamaguchi et Blumwald, 2005). Les glycophytes restreignent le transport de  $\text{Na}^+$  dans les parties aériennes et maintiennent ainsi des niveaux de sels relativement faibles dans les tissus photosynthétiques. Par contre, les halophytes transportent et accumulent de grandes quantités de  $\text{Na}^+$  dans leurs feuilles. Ces deux comportements opposés traduisent un paradoxe apparent : en effet, le premier, qui correspond à une protection des organes aériens contre l'envahissement par  $\text{NaCl}$ , s'observe chez les espèces les plus sensibles au sel. Le second, qui autorise l'accumulation de  $\text{NaCl}$  dans les feuilles, est caractéristique des espèces les plus résistantes (Blumwald et al., 2000). Donc il existe deux grands schémas de comportement concernant la distribution de  $\text{Na}^+$  dans les plantes, permettant de classer les espèces. Les espèces incapables de transporter facilement  $\text{Na}^+$  dans leurs feuilles sont nettement plus sensibles que les autres, car leur inaptitude à exporter  $\text{Na}^+$  est probablement un caractère protecteur dû à une déficience des systèmes de compartimentation cellulaire (Tester et Davenport, 2003). En effet, ces espèces semblent incapables de réduire le niveau cytoplasmique de  $\text{Na}^+$ , ce qui est peut-être l'une des causes profondes de leur sensibilité au niveau cellulaire. Mais l'incapacité à débarrasser le cytoplasme de  $\text{Na}^+$  a pour conséquence que cet ion soit facilement transporté dans le phloème (Melgar et al., 2006). Il est donc continuellement ramené vers les racines, ce qui se traduit par le comportement classique d'exclusion. La seconde catégorie d'espèces (dites *includers*) associe la résistance à la salinité et l'aptitude à transporter de grandes quantités de  $\text{NaCl}$  dans les feuilles. Il semble que ces comportements résultent d'une bonne compartimentation cellulaire de  $\text{Na}^+$ , ce qui explique la tolérance à

l'accumulation foliaire, et aussi la faible conduction de cet ion dans le phloème. Mais ce schéma de tolérance suppose évidemment un contrôle des quantités accumulées dans les feuilles, qui ne doivent pas perturber l'équilibre osmotique.

### **3. LES EFFETS DU STRESS SALIN CHEZ LES VEGETAUX**

Le stress salin est évoqué à partir du moment où le contenu en sels solubles du sol provoque une diminution de la productivité végétative (Allakhverdiev et al., 2000). La quantité de sels solubles dans le sol que les plantes peuvent supporter sans grand dommage pour leur métabolisme varie selon les genres, les espèces, et les variétés (Munns, 2005).

Les conséquences d'un stress salin peuvent résulter de quatre types de stress que les sels solubles provoquent chez les plantes : hydrique, ionique, nutritionnel et oxydatif.

- **Le stress hydrique** : La présence d'une forte concentration de sels solubles dans le sol crée une pression osmotique élevée dans l'environnement racinaire qui réduit la disponibilité de l'eau du sol pour la plante, c'est ce qu'on appelle une sécheresse physiologique (Maricle et al., 2007). Pour résister à ce stress osmotique, le végétal doit procéder à un ajustement osmotique afin que le potentiel hydrique cellulaire demeure inférieur à celui du milieu extra cellulaire et à celui du sol. Ce phénomène assure, d'une part, la poursuite de l'absorption de l'eau du sol et d'autre part, la rétention de l'eau intracellulaire et le maintien de la turgescence (Lee et al., 2005). Lorsque l'ajustement osmotique n'est pas suffisant, l'eau a tendance à quitter les cellules, ce qui provoque un déficit hydrique et la perte de la turgescence (Redondo-Gomez et al., 2006).

- **Le stress ionique** : La toxicité ionique survient lorsque l'accumulation des sels solubles dans les tissus perturbe l'activité métabolique (Maggio et al., 2007). L'ampleur de ce type de stress dépend du degré de perméabilité des membranes vis à vis des ions et des niveaux de toxicité des ces ions pour l'espèce végétale considérée

(Munns, 2005). Le chlore peut être absorbé par les racines et s'accumuler dans les feuilles, il peut provoquer une brûlure des extrémités ou des bords des feuilles, et le jaunissement prématuré des feuilles. Des analyses chimiques du sol ou des feuilles peuvent être menées pour confirmer une probable toxicité aux chlorites (Gebauer et al., 2004). Le sodium peut également causer des dégâts directs par son absorption racinaire. Les symptômes de toxicités typiques aux ions du sodium sont des brûlures des feuilles, le dessèchement et la mort des tissus sur les bords externes des feuilles contrairement aux symptômes causés par le chlore qui apparaissent normalement à l'extrême pointe des feuilles (Tester et Davenport, 2003).

- **Le stress nutritionnel** : La concentration saline dans la solution du sol provoque une concurrence entre les ions présents dans la solution du sol vis à vis de leur absorption par les racines; ce phénomène entraîne un déficit nutritionnel en certains éléments car au niveau de certains transporteurs membranaires peu sélectifs, le sodium entre en compétition avec le potassium et le calcium, le chlore et les sulfates entrent en compétition avec les nitrates et les phosphates (Jin et al., 2007). Un excès de sodium et de chlore augmente la perméabilité membranaire, ce qui accélère la diffusion des électrolytes dans le milieu extérieur et réduit la sélectivité membranaire (Meychik et al., 2005). Dans les cas extrêmes, l'excès de  $\text{Na}^+$  provoque des lésions membranaires, en particulier par le remplacement excessif des ions divalents  $\text{Ca}^{2+}$  (Renault, 2005). Le maintien des processus vitaux dans des conditions de forte salinité passe donc par une résistance de la plante à la déshydratation ainsi que par un contrôle efficace des flux ioniques intratissulaires et intracellulaires (Munns, 2005).

- **Le stress oxydatif** : En plus des déséquilibres hydriques et ioniques, le stress salin induit un dysfonctionnement des mécanismes photosynthétiques et métaboliques par un stress secondaire appelé stress oxydatif qui est provoqué par l'accumulation des espèces oxygénées radicalaires ou ROS (le peroxyde d'hydrogène par exemple) [Ben Amor et al., 2006]. Les ROS sont habituellement produits par l'activité cellulaire normale comme la photorépiration, mais leur niveau est augmenté sous stress causant des dommages oxydatifs aux lipides membranaires, aux protéines et aux

acides nucléiques (Koca et al., 2007). La capacité des plantes à éliminer les ROS ou à réduire leurs effets nuisibles semble représenter un trait de tolérance important au stress salin (Vranová et al., 2002). Les plantes tolérantes aux ROS ont la capacité d'éviter la production de ces peroxydes, ou d'augmenter la désintoxication ou la réparation des dommages du ROS (Bienert et al., 2006). L'élimination du ROS est réalisée par les composés antioxydants tels que le glutathion, le thioredoxin, l'ascorbate et les caroténoïdes, ou par des enzymes de balayage de ROS comme la superoxyde dismutase, la catalase, les peroxydases de glutathion et les peroxiredoxins (Hasegawa et al., 2000).

### 3.1. Les effets physiologiques et métaboliques

La salinité a tout d'abord un effet osmotique qui entraîne pour les plantes un accroissement de dépense d'énergie pour absorber l'eau du sol. Elle peut avoir également des effets sur les végétaux par suite de la toxicité d'un sel spécifique ou sur l'absorption des nutriments essentiels. Ces effets entraînent une perturbation du fonctionnement de la plante et se traduisent toujours par une diminution de la production (Munns, 2005). La réduction du rendement des cultures est variable selon la résistance des plantes vis-à-vis les sels solubles, car cette résistance diffère selon les espèces (Rengasamy et al., 2003).

Pour la germination, la salinité est un des facteurs environnementaux qui a une influence critique sur la germination des graines des halophytes et des glycolytes (Ashraf et Foolad, 2005). Selon les espèces, l'effet dépressif du stress salin sur la germination peut être de nature osmotique (le sel empêchant l'imbibition de la graine) ou toxique (Abdul Jaleel et al., 2007).

Lorsque la salinité du milieu augmente, la vitesse de germination diminue, mais le pourcentage de germination peut rester constant tant que la salinité ne dépasse pas une certaine valeur limite, caractéristique de l'espèce et même de la variété. Le sel limite la germination de deux façons :

- En empêchant l'absorption d'eau par l'embryon à cause du haut potentiel osmotique du milieu (Abdul Jaleel, et al., 2007).
- Par l'empoisonnement de l'embryon par les effets toxiques de certains ions (Naidoo et Kift, 2006).

Khan et al. (2006) ont étudié ce phénomène en faisant germer des graines de plusieurs espèces halophytes dans des solutions de plus en plus concentrées de chlorure de sodium. Cette étude a montré qu'au début, les résultats obtenus pour les faibles concentrations de NaCl sont très voisins, confirmant l'absorption de l'eau par osmose, puis la forte pression osmotique du milieu intervient et freine l'absorption de l'eau pour les fortes concentrations salines. Ce frein retarde généralement la germination mais ne la compromet pas définitivement. Dans le cas du *Suaeda salsa* le retard de germination après le semis atteint jusqu'à 6 jours (Li et al., 2005), et pour *Atriplex portulacoides* il peut atteindre plus de 11 jours (Redondo-Gomez et al., 2007). D'un autre côté, Misra et Dwivedi (2004) rapportent que la corrélation entre la germination des semences et la tolérance des plantes pendant les autres périodes de croissance n'est pas obligatoire. Ce résultat a été confirmé par Vicente et al. (2004), qui ont trouvé que la tolérance des semences de *Plantago crassifolia* à la salinité pendant la germination est assez faible comparativement à celle des stades ultérieurs.

Plusieurs recherches ont examiné la question de la germination pour augmenter la résistance des plantes à la présence des concentrations élevées en sels solubles. Les prétraitements des semences avec du NaCl, de l'acide gibbérelliques, ou de la cytokinine semblent augmenter le taux de germination (Li et al., 2005).

Une étude de Duan et al. (2004) révèle que le *Chenopodium glaucum* manifeste la plus grande sensibilité à la salinité lors de la germination de la graine. Le taux de germination passe ainsi de 72.5% en condition non saline, à 16.9% en présence d'une teneur de 200 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Gul et Khan (2006) ont montré que l'introduction de 10 mM de CaCl<sub>2</sub> dans le milieu provoque une amélioration du taux de germination chez *Halopyrum mucronatum* cultivée en présence de 400 mM NaCl.

Une diminution des teneurs en proline a été notée par Girija et al. (2002) aussi bien au niveau des cotylédons qu'au niveau de l'embryon en phase de germination des graines d'*Arachis hypogaea*, en présence de NaCl. Cette diminution est expliquée par l'augmentation des teneurs de deux enzymes : la proline oxidase et la  $\gamma$ -Glutamyl kinase; deux enzymes responsables du control de la proline au niveau cellulaire.

Sosa et al. (2005) ont constaté que la germination des graines de *Prosopis strombulifera* est retardée, ralentie et éventuellement inhibée avec l'augmentation de la concentration du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . De cet effet lorsqu'on passe de  $-0.4$  à  $-2.2$  Mpa (correspondant à 88 et 480 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) le pourcentage de germination chute de 90% à moins de 20%. Shaikh et al. (2007) ont montré que l'introduction d'ions  $\text{Ca}^{+2}$  (sous forme  $\text{CaCl}_2$ ) permet d'enrayer la nocivité du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  vis a vis la germination des graines chez *Urochondra Setulosa*, graminée halophyte originaire des régions côtière.

Une forte concentration en  $\text{MgCl}_2$  inhibe l'imbibition des graines et leur germination chez *Halocnemum strobilaceum* et *Salicornia ramosissima*, deux halophytes originaires du sud de l'Espagne (Pujol et al., 2000). Ces auteurs suggèrent que l'influence du  $\text{MgCl}_2$  sur la germination de ces espèces est la résultante d'une combinaison d'un effet osmotique et un effet toxique spécifique d'ions.

Khan et al. (2006) ont montré que les traitements combinés des graines *Atriplex stocksii* et *Suaeda fruticosa*, avec l'acide ascorbique a permis de limiter l'effet inhibiteur du sel sur la germination.

L'effet le plus commun des stress abiotiques sur la physiologie des plantes est la réduction de la croissance. Cette réduction est une capacité adaptative nécessaire à la survie d'une plante exposée à un stress abiotique (Ksouri et al., 2007). En effet, ce retard de développement permet à la plante d'accumuler de l'énergie et des ressources pour résister au stress avant que le déséquilibre entre l'intérieur et l'extérieur de l'organisme n'augmente jusqu'à un seuil où les dommages sont irréversibles. Pour illustrer cette tendance, dans la nature, la croissance est inversement corrélée à la résistance au stress salin d'une espèce et/ou variété (Misra et Gupta, 2005).

Dans le cas d'un stress salin, la disponibilité de l'eau du sol est réduite. Or une plante pour survivre et croître doit faciliter le flux d'eau conduit par la transpiration contre les forces osmotiques, matricielles et gravitationnelles du sol. Ainsi, pour s'adapter au manque d'eau et maintenir l'hydratation et la turgescence de ses tissus, la plante va faciliter l'entrée d'eau au niveau des racines, en effectuant un ajustement osmotique. Cette stratégie mise en œuvre pour maintenir l'homéostasie en condition de stress salin est consommatrice d'énergie et de ressources qu'elle détourne au dépend de la croissance (Verslues et al., 2006).

L'importance du temps dans l'interaction stress salin – croissance a mené au concept d'une réponse biphasée de la croissance à la salinité (Munns, 2005). Une première phase rapide est due à la présence des hautes concentrations salines dans le sol. Cette présence crée une pression osmotique élevée dans l'environnement racinaire, réduisant la disponibilité de l'eau du sol pour la plante, ce qui cause la déshydratation des cellules. La deuxième phase de la réponse de la croissance prend du temps par rapport à la première, elle résulte de l'effet toxique du sel à l'intérieur de la plante due à l'incapacité de celle-ci à empêcher le sel d'atteindre des niveaux toxiques dans ces feuilles. Si des quantités excessives de sels entrent dans le jet de transpiration de la plante, il y aura une sénescence prématurée des feuilles qui réduira la quantité des assimilats produites par la plante et qui limite la croissance. C'est la deuxième phase de la réponse qui sépare clairement les espèces selon leur capacité à résister aux sels solubles.

Le taux de mortalité des feuilles est un facteur crucial pour la survie des plantes, si des nouvelles feuilles sont continuellement produites avec un taux plus grand que celui des vieilles feuilles, il y aura assez de feuilles photosynthétiques pour que la plante puisse survivre. Cependant, si le taux de mortalité des vieilles feuilles est supérieur à celui de la production de nouvelles feuilles, la plante ne peut pas survivre (Munns, 2002).

Les effets spécifiques des ions peuvent être directs (toxicité) ou indirects par absorption concurrentielle des ions qui affectes l'alimentation minérales des plantes et modifie le statut ionique (Ashraf et Orooj, 2006).

Les effets de salinité se manifestent généralement chez les halophytes par une stimulation de la croissance jusqu'à un seuil qui diffère selon l'espèce et la variété. Ces effets sont signalés par plusieurs auteurs. En étudiant l'effet du chlorure de sodium sur la croissance de *Crithmum maritimum*, Ben Amor et al. (2005) ont trouvé une augmentation de 50% de matière sèche par rapport au témoin, et ce ci en présence de 2.5g/l NaCl (50mM). Sur *Suaeda aegyptiaca*, Askari et al. (2006) ont constaté une augmentation nette des biomasses fraîche et sèche en appliquant une dose de 150 mM NaCl (7.5g/l). Messedi et al. (2004) rapportent que la stimulation de la croissance chez l'halophyte *Sesuvium portulacastrum* se fait sentir d'une manière significative à 40 g/l NaCl, cette concentration provoque une augmentation du poids sec de 25 % par rapport au témoin. Ksouri et al. (2007) signalent que pour l'halophyte *Cakile maritima*, l'augmentation du rendement est proportionnelle à l'augmentation de la concentration saline du milieu jusqu'à la dose de 100 mM NaCl (5 g/l), au-delà de cette concentration la biomasse sèche accuse une réduction significative. Barhoumi et al. (2007) trouvent que la croissance pondérale des racines de l'*Aeluropus littoralis* n'est affectée qu'au-delà de 10 g/l NaCl. Wei et al. (2006) ont motionné chez l'halophyte *Lycium barbarum*, le passage du poids de matière sèche à 120%, pour une concentration de 5 g/l NaCl par rapport au témoin. En général, les faibles niveaux de salinité n'ont pas un effet nocif sur la croissance des halophytes, ils stimulent réellement leur croissance.

En étudiant la réaction des plantes de *Cornus stolonifera* en présence du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (50 mM), Renault (2005) a précisé que le choc osmotique annule le gradient hydrique entre la plante et le milieu, entraînant une forte déshydratation des tissus foliaire et une baisse de la quantité de matière sèche totale de l'ordre de 20%. La croissance *in vitro* des clones de jjoba (*Simmondsia chinensis*) sensibles au sel, est réduite, tout comme celle des clones sauvages, plus tolérants. Des réductions de 20% et 30% de la quantité de matière fraîche totale sont obtenues avec 35 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> respectivement

pour les clones tolérantes et sensibles (Mills et al., 2001). *Medicago truncatula*, plante fourragère, à une productivité mesurée en biomasse qui peut être réduite de 50% en présence d'une concentration de 75 mM NaCl (Aydi et al. 2004), en effet chez cette espèce, le stress salin perturbe non seulement la croissance, mais également la fixation de l'azote en affectant les bactéries symbiotiques des nodules. Ramos et al. (2004) ont observé que la croissance chez *Atriplex nummularia* est encore active jusqu'à 100mM KCl. Sur un milieu de culture standard un apport de CaCl<sub>2</sub> suffit pour modifier la croissance du *Cassia angustifolia*, en effet la biomasse maximale est obtenue en présence de 10 mM CaCl<sub>2</sub> (Arshi et al., 2006).

Il est possible de supprimer l'effet néfaste du NaCl, chez certaines espèces grâce à des apports de nitrate de calcium. En effet la pulvérisation foliaire de 10 mM de Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> sur les parties aériennes de *Vigna unguiculata*, a permis à cette espèce de retrouver en présence de 50 mM NaCl, une croissance pondérale analogue à celle des plantes cultivées en absence du sel (Murillo-Amador et al., 2006).

Chez *Lactuca sativa* cultivée en présence des doses croissantes en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, le taux de croissance maximale est obtenu entre 0 et 40mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, les plantules peuvent tolérer jusqu'à 60mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, mais avec une croissance ralentie (Bie et Shinohara, 2004).

Wilson et al. (2000) ont montré que la production maximale de matière fraîche chez l'*Atriplex hortensis* est obtenue avec une forte teneur en sel (correspondant à une conductivité électrique de 13.7 dS/m), il faut cependant 25 dS/m pour réduire la production en biomasse à 50%, par contre Khan et al., (2000a) ont montré que la croissance de l'*Atriplex griffithii* est stimulée par la présence de 90mM NaCl.

La salinité influence la productivité des plantes de plusieurs manières. Elle réduit d'une part les composantes du rendement (Neocleous et Vasilakakis, 2007), et d'autre part elle agit directement sur la photosynthèse à plusieurs niveaux. D'une façon générale, la salinité réduit la photosynthèse nette par la réduction de la surface foliaire (Wang et Nil, 2000), par la diminution de la capacité des stomates à fixer les gaz du fait de la diminution du potentiels hydrique (Neocleous et Vasilakakis, 2007), par la réduction du contenu chlorophyllien des feuilles (M'rah et al., 2006), et par la

diminution de l'activité photochimique (Redondo-Gomez et al., 2006). Si l'énergie solaire captée par les photosystèmes de la feuille n'est plus utilisée entièrement par la photosynthèse, des formes toxiques d'oxygène peuvent apparaître, comme le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) et les radicaux hydroxyles ( $OH\cdot$ ). Ces radicaux sont les mêmes que ceux qui engendrent le vieillissement des cellules végétales et animales, en provoquant la peroxydation des lipides et la dénaturation des protéines et de l'ADN (Kukreja et al., 2005). Notons que selon l'argumentation de Munns (2002), la croissance est affectée avant la photosynthèse. La réduction de la photosynthèse est issue en grande partie de la fermeture des stomates et éventuellement de la réduction de la conductance du mesophylle (parenchyme chlorophyllien) provoquées par la perte de turgescence et les signaux racinaires (ABA) [Janicka-Russak et Klobus, 2007]. En plus des conséquences du stress hydrique initial, si les ions  $Na^+$  s'accumulent à des niveaux toxiques dans la partie aérienne, la photochimie peut-être affectée ainsi que l'activité enzymatique se rapportant à l'ensemble du processus photosynthétique (Broetto et al., 2007).

Arshi et al. (2006) ont montré que la stimulation de la croissance sous l'effet d'exposition des plantules de *Cassia angustifolia* à 10 mM  $CaCl_2$  est corrélée à une augmentation l'activité photosynthétique. Une étude récente de Debez et al. (2006) a montrée chez l'halophyte *Cakile maritima*, cultivé en présence de sel, une hausse particulièrement importante de l'activité du phosphoénol-pyruvate carboxylase (PEPC) à la concentration optimale pour la croissance (100 mM NaCl). Cette enzyme est responsable de la fixation du  $CO_2$  chez les plantes de type C3. Cette hausse d'activité de la PEPC a traduirait une activité photosynthétique et donc une meilleure croissance. Elkahoui et al. (2005) ont rapporté une augmentation de l'activité peroxydasique en présence des fortes concentrations de NaCl chez *Catharanthus roseus*. Les peroxydases interviennent dans le processus de lignification des parois cellulosesiques, ce qui explique selon les mêmes auteurs la réduction de la croissance pour des valeurs maximales de salinité.

A l'échelle cellulaire, la salinité affecte l'ultrastructure des chloroplastes (Parida et al., 2003; 2004b), et plus particulièrement celle du grana (Hernandez et al. 1995), elle provoque la perte de l'enveloppe chloroplastique, l'apparition des gouttelettes

lipidiques et la dégradation des membranes thylakoïdiennes (Balnokin et al., 2004). Parida et al. (2003) notent une diminution du nombre de chloroplastes et de ribosomes cytoplasmiques chez les feuilles stressées de *Bruguiera parviflora*. D'autres auteurs ont montré que le stress salin affecte les chloroplastes par la désorganisation des systèmes granaires et lamellaires (Keiper et al., 1998). Koca et al. (2007), relie l'altération de la structure des thylakoïdes à l'induction d'une surproduction de l'ion superoxyde activé ( $O_2^-$ ). En parallèle, la transpiration diminue et la respiration augmente, en conséquence une partie de l'amidon produit pendant le jour est consommée par respiration, il y a donc moins d'amidon disponible pour la croissance (Bois, 2005).

L'ensemble de ces réaction peut aussi inhiber le dégagement de l'oxygène, ce qui induit un stress oxydatif au sein de la cellule via la production d'eau oxygénée ( $H_2O_2$ ) [Bienert et al., 2006]. Ces molécules sont toxiques et peuvent entraîner des dommages des protéines, des lipides et des acides nucléiques (Shevyakova et al., 2006).

Au total, la réduction de la productivité des végétaux par la salinité est liée à la réduction de la capacité de l'appareil photosynthétique (surface foliaire) et à la réduction de l'efficacité des processus photosynthétiques liée aux activités stomatales (Brown et Pezeshki, 2007).

### 3.2. Les effets sur la nutrition minérale

L'accumulation des ions particulièrement le  $Na^+$  semble être l'adaptation principale des halophytes en milieu salin (Malcolm et al., 2003). En effet, l'augmentation de la concentration du milieu en  $NaCl$ , se traduit chez plusieurs halophytes telle que *Atriplex nummularia* et *Plantago coronopus*, par une baisse des taux de  $K^+$  et de  $Ca^{+2}$ , par contre les taux de  $Na^+$  et de  $Cl^-$  augmentent rapidement avec la concentration externe (Ramos et al., 2004 ; Koyro, 2006), ces derniers notent également une forte corrélation entre la tolérance au sel, la succulence et la faibles rapports de  $K^+/Na^+$ .

L'accumulation du  $\text{Na}^+$  dans les tissus des plantes exposés à la salinité est proportionnelle à la diminution du potentiel osmotique des cellules, ce qui suggère que le  $\text{Na}^+$  est directement impliqué dans le processus d'ajustement osmotique (Tester et davenport, 2005).

L'enrichissement du milieu en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , se traduit chez plusieurs espèce telle que *Lactuca sativa*, par une baisse du taux de  $\text{K}^+$  et de  $\text{Ca}^{+2}$  par contre le taux de  $\text{Na}^+$  et de  $\text{SO}_4^{2-}$  augmente rapidement avec la concentration externe (Bie et al., 2004) ces derniers notent également une forte corrélation entre la tolérance au sel, la succulence et la faibles rapports de  $\text{K}^+/\text{Na}^+$ . L'addition du  $\text{CaSO}_4$  au milieu de culture améliore la croissance de *Lycopersicon esculentum* stressée par le  $\text{NaCl}$ , en modifiant le rapport  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  intra tissulaire. L'entrée de  $\text{Na}^+$  dans la cellule peut, en effet être limitée par l'intermédiaire des ions  $\text{Ca}^{+2}$  qui régulent la perméabilité membranaire (Tuna et al., 2007). Melgar et al. (2006) ont montré que l'augmentation de la concentration de  $\text{Ca}^{+2}$  dans le milieu provoque une diminution de la teneur en  $\text{Na}^+$  dans les parties aérienne et racinaires d'*Olea europaea* cultivée *in vitro* en présence du  $\text{NaCl}$ . Renault et al. (2001) ont montré chez des plantules de *Cornus stolonifera* exposée à 100 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , que les feuilles accumulent des grandes quantités de  $\text{Na}^+$ ; tandis qu'elles s'appauvrissent légèrement en  $\text{K}^+$  et  $\text{Mg}^{2+}$ . Selon les mêmes auteurs le rapport  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  varie de 0.006 pour les plantes cultivées dans le milieu témoin (0mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) à 4 pour celles cultivées en présence de 100 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

### 3.3. Les effets biochimiques

L'adaptation des plantes aux stress salin a souvent été associée à des changements biochimiques au niveau de la plante. L'un de ces changements est l'altération de l'expression de certains gènes (Sreenivasulu et al., 2007). Certains gènes subissent une sous expression, comme les gènes impliqués dans la photosynthèse (Winicov, 1998), d'autres sont surexprimés comme ceux impliqués dans la biosynthèse des osmoprotectants (Ashraf, 2004). L'adaptation se traduit également par la synthèse rapide de polypeptides (Yamaguchi et al., 2006). Plusieurs protéines accumulées sous stress salin ont été identifiées comme les protéines du type HSP (Heat shock protein)

et les protéines de type ELIP (Early light induced protein) [Sun et al., 2002 ; Bois, 2005].

Chez *Nicotiana tabacum*, le  $\text{CaCl}_2$  agit dès les premières étapes du métabolisme azoté et en particulier sur l'assimilation de l'azote nitrique, les activités du nitrate réductase (NR) et du glutamate synthétase (GS) sont exaltées par une teneur égale à 5 mM  $\text{CaCl}_2$ , ces deux enzymes sont prépondérantes dans le passage de l'azote minérale vers l'azote organique (Ruiz et al., 1999). Ma et al., (2005) ont mis en évidence une stimulation de la synthèse d'une polyamine (*Putrescine*) chez des plantules de *Triticum aestivum* cultivées en présence de 40mM  $\text{CaCl}_2$ .

Le fonctionnement cellulaire est modifié pour servir la stratégie d'adaptation de la plante, à l'échelle de la cellule comme de la plante entière. Le niveau de salinité est perçu au niveau des membranes en contact avec la solution saline et dans tout l'organisme par la perte de turgescence (Xiong et al., 2002). Des signaux de transduction sont alors émis. L'ensemble de ces signaux contrôle le rétablissement de l'homéostasie ionique et hydrique des cellules, la réparation et la prévention des dommages et la croissance cellulaire (Zhu, 2002). Par exemple, en réponse à la réduction du potentiel osmotique externe, des signaux à base de  $\text{Ca}^{2+}$  vont activer l'émission d'hormones de stress tel que l'ABA (Acide abscissique) [Xiong et Zhu, 2002]. Mentionnons que cette hormone est largement impliquée dans les relations hydriques et la tolérance au stress des végétaux. Sous stress salin, l'ABA joue un rôle de signal émis par les racines à travers le système vasculaire vers les feuilles où il provoque une baisse de la transpiration par la fermeture des stomates (Khadri et al., 2007), il stimule l'absorption d'eau au niveau des racines et modifie leur croissance (Hartung et al., 2002). Cependant, le sel réduit la concentration des autres hormones de croissance telles que l'Auxine, les cytokinines et les gibbérilines (Zhu, 2001).

### 3.4. Les approches moléculaires et génétiques des effets du stress salin

L'adaptation des plantes à la salinité exige des changements physiologiques cellulaires qui sont commandés par des expressions spécifiques des gènes (Kuznetsov et al., 2007). Ces gènes spécifiques pourraient coder pour des protéines impliquées dans la séquestration du Na<sup>+</sup> (H<sup>+</sup>-Atpases, NHX-type transporteurs) [Zörb et al., 2005 ; Debez et al., 2006], dans la synthèse des osmolytes compatibles (proline, glycinebetaine, polyols) [Parida et Das, 2005], ou dans la désintoxication des composés toxiques (enzymes d'élimination des ROS) [Sreenivasulu et al., 2007]. Pour améliorer la compréhension de la tolérance des végétaux aux sels solubles, il est nécessaire d'améliorer la connaissance sur l'expression de ces gènes (Yamaguchi et Blumwald, 2005).

En cas de perturbation du fonctionnement cellulaire, et c'est précisément ce qui se produit lors d'un stress, il est logique de s'attendre à des modifications (induction ou répression) de l'expression d'un ensemble de gènes. Lorsqu'on cherche des gènes dont l'expression est induite, réprimée ou modulée dans une situation physiologique particulière, deux types d'approche sont généralement mise en œuvre :

- la première consiste à repérer les protéines (produits finaux de l'expression des gènes) dont la teneur est modifiée par le traitement imposé (Verslues et al., 2006);
- la seconde méthode identifie les modifications d'expression des gènes à un niveau situé plus en amont, à savoir celui des ARN messagers (Seki et al., 2003).

L'utilisation de ces différentes approches a permis d'inventorier un certain nombre de gènes induits, ou de protéines synthétisées, en réponse à un stress salin. A partir de la séquence d'un gène ou d'un ARNm, on peut déduire celle de la protéine correspondante. La comparaison des séquences de ces protéines avec celles disponibles dans les banques de données peut permettre de les identifier ou, plus généralement, de suggérer leur fonction. Il s'agit ensuite, par un travail de biochimie, de vérifier la fonction supposée. Le principe des approches « protéine » et « ARNm » dans l'étude des effets de stress salin chez les plantes, repose sur un tri différentiel des produits des gènes. Dans le cas de l'approche « protéine », on compare le

contenu en protéines des plantes témoins, ou soumises à un traitement salin, par électrophorèse bidimensionnelle ; une technique qui sépare les macromolécules à la fois en fonction de leurs tailles et de leur charge. Les protéines qui n'apparaissent que dans les plantes stressées (ou qui s'y accumulent fortement) peuvent être repérées, récupérées et soumises au microséquençage (Yoshida, 2002). En ce qui concerne l'approche « ARNm », on constitue d'abord une banque dans la bactérie *Escherichia coli*, de telle sorte que chaque colonie bactérienne (clone) ne contienne qu'une seule copie d'ARNm. Par la méthode d'hybridation moléculaire, on peut alors distinguer les ARNm qui ne sont présents que dans les plantes stressées (ou qui y sont plus abondants). Les clones contenant ces copies d'ARNm peuvent être alors récupérés, en particulier pour les soumettre au séquençage.

Un certain nombre de protéines ont été isolées chez des halophytes et glycophytes soumises à un stress salin (Souza-Filho et al., 2003 ; Vera-Estrella et al., 2005 ). L'une des premières, isolée chez le tabac cultivé en présence de chlorure de sodium, est l'*osmotine* qui apparaît en cas d'ajustement osmotique ; elle peut s'accumuler en quantité très importante jusqu'à 10% des protéines totales (Levigniron et al, 1995).

La diversité de nature des protéines mises en évidence jusqu'à présent ne permet guère d'avoir une vision bien claire des mécanismes moléculaires fondamentaux dont la mise en place est nécessaire pour permettre aux plantes de se développer en milieu salin. Les résultats acquis sont souvent fragmentaires mais les offres des nombreuses recherches engagées actuellement dans cette direction permettent d'espérer des progrès importants à moyen terme. A la panoplie des études de physiologie, biochimie ou biologie moléculaire sur la réponse des plantes au stress salin, viennent s'ajouter les approches génétiques. La réponse aux stress salin est multiforme et la tolérance des plantes est nécessairement un caractère multigénétique (Sreenivasulu et al., 2007). Aucun des éléments de réponse à l'application d'un stress salin étudié à ce jour ne peut servir à lui seul de base de sélection pour la résistance au champ. Il est donc très délicat d'essayer de mettre en place des schémas de sélection de variétés végétales tolérantes au sel. Le manque des résultats pour obtenir des lignées tolérantes aux sels solubles est la conséquence de deux phénomènes.

D'une part, le sélectionneur dispose de peu d'index fiables pour évaluer la tolérance aux sels d'une lignée en dehors de l'essai au champ. D'autre part, la conduite d'expérimentations en champ est rendue extrêmement délicate par la très grande hétérogénéité des sols salés et par les interactions fortes entre la salinité et les autres facteurs environnementaux. Pour contourner cette difficulté, il devient nécessaire de disposer de marqueurs fiables, physiologiques ou génétiques qui permettent de caractériser des comportements de tolérance des végétaux aux sels solubles.

## 4. LA CULTURE *IN VITRO*

### 4.1. Le principe de cette méthode de culture

Utiliser un fragment de plante pour reproduire un individu comme dans le bouturage, ou pour l'associer à une autre plante, comme dans le greffage, constituent des biotechnologies anciennes. De ces techniques sont dérivées des méthodes plus fines, partant de fragments de plus en plus réduits, jusqu'à la cellule isolée ou le gamète. Lorsque des cellules ou un groupe de cellules sont placées hors de leur environnement normal qu'est la plante, et sont maintenues en vie, on parle de mise en culture *in vitro* (Augé et al., 1989). Le terme *in vitro* rappelle le fait que ces cellules sont entourées par du matériel de laboratoire qui était originellement en verre (Dagorn et al., 2005). Les premiers résultats intéressants de culture de tissus végétaux furent obtenus par Gautheret en 1934. Elles se font hors sol, en conditions stériles et très contrôlées, dans des flacons ou tubes fermés, sur des milieux synthétiques solides ou liquides, contenant des sels minéraux, une source énergétique et des adjuvants.

Gautheret (1934) fut le premier à cultiver des tissus provenant de cellules cambiales de différents arbres (peuplier, érable, saule) sur milieu gélosé en conditions aseptiques. Il s'agit d'une méthode de culture en conditions aseptiques, c'est à dire sans champignon et sans bactérie, utilisant des milieux de culture assez riches (hormones, sucres, vitamines, acides aminés, sels minéraux) qui peuvent être liquides ou gélosés (Margara, 1989). Dans le domaine végétal, les méthodes de culture *in vitro* s'appliquent à des matériels très diversifiés (protoplastes, cellules isolées, tissus, organes, plantes entières) pour atteindre des objectifs tournés soit vers la recherche soit vers la production industrielle (Veltcheva et al., 2005). Cette technique permet de cultiver des tissus ou des fragments d'organes isolés d'une plante tels que des apex, des bourgeons, des nœuds pouvant régénérer des pousses, mais aussi des racines ayant une croissance de type infini, ou encore des feuilles maintenues en survie (Chebet et al., 2003). La culture *in vitro* permet également de

cultiver des cellules isolées voire même des protoplastes (cellules dépourvues de leur paroi) capables de se diviser, de former des cals, des tissus organisés et même de régénérer une plante entière (Veltcheva et al., 2005). La culture *in vitro* permet donc d'utiliser toutes les potentialités régénératrices d'une plante, jusqu'à la totipotence cellulaire (cellule donnant une plante entière). Les applications sont nombreuses aujourd'hui tant dans le domaine de l'horticulture que dans celui de la recherche (notamment en amélioration des plantes), ou encore pour conserver la diversité variétale (conservatoires) ou sauvegarder des espèces menacées (Pati et al., 2006).

#### 4.2. Les techniques de culture *in vitro*

Les techniques de culture *in vitro* cherchent à contrôler les facteurs de l'environnement (température, lumière, composition du milieu...) du fragment de plante mis en culture afin de l'orienter vers un programme d'évolution déterminé (Margara, 1989). Elles se basent sur deux éléments essentiels. Le premier élément considère que toutes les cellules du végétal n'ont pas les mêmes potentialités au cours du développement, certaines se spécialisent et se différencient et perdent leur possibilité de se diviser, d'autres forment des plages de cellules indifférenciées qui engendrent les méristèmes et qui se divisent activement, ce sont des zones à l'origine de la croissance (en largeur ou en longueur) des plantes (Rout et al., 2006). Le deuxième élément considère que des régulateurs de croissance ont été identifiés, ils affectent la vitesse de croissance des cellules et leur différenciation, et ils sont impliqués dans les corrélations entre organes, la découverte de ces substances (auxines, gibbérellines, cytoquinines, acide abscissique, éthylène, oligosaccharines) a permis le développement des techniques de culture *in vitro* (Jiménez, 2005). Il existe plusieurs techniques de culture *in vitro* :

**4.2.1. Les culture de méristèmes :** Dès 1951, Morel et Wetmore de l'INRA de Versailles ont réussi à obtenir une plante entière à partir d'un méristème. Le méristème étant toujours indemne de virus. Cette technique est utilisée pour obtenir des plants sains à partir de plants virosés (Jain, 2001). Sur les pieds-mères choisis, on prélève des

boutures à l'extrémité des rameaux. Sous une loupe binoculaire et sous hotte stérile, avec des outils stérilisés, la bouture est débarrassée de ses jeunes feuilles. Quand le méristème est visible, on élimine délicatement les dernières ébauches et on délimite un petit cube dont une des faces est constituée par le méristème (0,2 à 0,3 mm de côté) qui est prélevé et repiqué sur un milieu gélosé (Rout et al., 2006).

**4.2.2. La micropropagation :** Les plantes se multiplient par semis ou par multiplication végétative. Cette dernière est indispensable quand on veut conserver les caractères d'une variété donnée. C'est ce que l'on fait depuis des siècles quand on effectue des boutures, des greffes ou de la division de touffe. Mais le taux de multiplication que l'on peut obtenir par ces méthodes est souvent très faible. La multiplication végétative *in vitro* apporte un progrès considérable par rapport aux méthodes traditionnelles, avec un taux de multiplication de 100 à 1000 fois plus élevé (Watanabe et al., 2000). La micropropagation permet à partir d'une petite quantité de tissu de produire une infinité de plantes. La vitesse de multiplication est élevée, on propage des plantes identiques à celle du départ, on peut constituer des collections de pieds-mères, des banques de clones, faire de la sauvegarde d'espèces en voie d'extinction, programmer des cultures tout au long de l'année et éviter la dormance (Lucchesini et Mensuali-Sodi , 2004).

Pour un matériel végétal ; plus l'explant est petit, moins il y a de risque de contamination. Un bourgeon terminal a un potentiel de croissance supérieur à un bourgeon axillaire. La saison la plus propice pour le prélèvement est celle qui suit la levée de dormance (période de croissance active) [Jain, 2001]. Selon Pati et al. (2006), la micropropagation nécessite 4 phases :

- établissement de la culture aseptique,
- multiplication dont le taux moyen est de l'ordre de 200000 plants/an à partir d'une bouture,
- enracinement qui est l'étape la plus délicate, on cherche à différencier des initiaux racinaires et provoquer leur développement,
- acclimatation en serre (10 à 60 jours), on cherche à maintenir une humidité très élevée au début.

**4.2.3. La régénération de plantes par organogenèse ou embryogenèse :** Cette approche des biotechnologies *in vitro* est certainement celle qui permet le plus d'avancées en terme de création de nouveautés génétiques dans le but de produire des génotypes nouveaux d'intérêt agronomique (Rout et al., 1999). La régénération peut intervenir soit à partir de morceaux de la plante mère, donc des tissus différenciés tels que des feuilles, des tiges, des nœuds, des racines, des hypocotyles (zone de la plantule située entre l'insertion des cotylédons et le début de la racine, reconnaissable par la présence des poils absorbants), communément appelés « explants », soit à partir de masses de tissus non différenciés appelées « cals ». Par ailleurs, elle peut se produire par organogenèse ou embryogenèse. Comme son nom l'indique, l'organogenèse consiste en la formation de nouveaux organes ; ce terme est souvent utilisé pour décrire la formation de bourgeons mais il s'applique aussi à des racines et même à des nodules vasculaires (espèce de structure plus ou moins arrondie constituée de faisceaux vasculaires disposés de façon concentrique ou spiralée mais qui aboutit rarement à la production d'un méristème) [Pati et al., 2006]. En ce qui concerne l'embryogenèse somatique (du grec *somas* = corps), elle se produit en absence de toute fécondation (ou méiose et recombinaison de l'ADN). Cependant, lors de leur développement, les embryons somatiques suivent les mêmes étapes que ceux dans les graines obtenues après croisement sexué globulaire (ronds), cordiforme (en forme de cœur), torpille (allongés avec croissance bipolaire) et cotylédonaire (les cotylédons sont visibles et l'embryon apte à germer pour donner une plantule) [Rout et al., 2006]. Quelle que soit la voie de régénération suivie par les explants, les cals ou les cellules, il est essentiel de garantir la conformité des régénérants produits, notamment quand la stratégie d'étude comporte des variations induites et dirigées, où il est alors très important d'être sûr qu'aucune variation autre que celle voulue ne sera présente dans les nouvelles plantes (Augé et al., 1989).

**4.2.4. La production de plantes haploïdes :** Cette technique présente un grand intérêt pour l'amélioration des plantes car elle permet d'accélérer les cycles de sélection. Pour l'*androgenèse*, on part d'anthères immatures. A partir des microspores, il peut y avoir apparition d'embryons directement ou après formation d'une cal haploïde

(Veltcheva et al., 2005). Les facteurs ayant une influence sont la saison de prélèvement des anthères, l'état physiologique des plantes mères, le choix de l'inflorescence, le choix du stade morphologique de la fleur (en corrélation avec l'état de maturation des microspores). L'anthère est déposée sans filet (source d'embryon  $2n$ ) sur milieu liquide ou solide. L'obtention de plantes diploïdes (haploïdes doublés) se fait par traitement à la colchicine. Il faut des milliers d'anthères pour avoir des plants haploïdes doublés intéressants. Le premier plant est souvent une *chimère* (le traitement est très destructeur et seules quelques cellules peuvent être doublées) que l'on fait fructifier pour obtenir des graines (Veltcheva et al., 2005). Une autre voie de production de plantes haploïdes est celle qui part des gamètes femelles (ovaires non fécondés), appelées alors *gynogenèse*. Dans cette approche, la régénération se fait uniquement par embryogenèse somatique, et les embryons haploïdes formés suivent les mêmes étapes de développement que ceux issus des microspores dans l'androgenèse (Veltcheva et al., 2005).

**4.2.5. La technologie des protoplastes ou culture de fusion :** Le terme de protoplaste désigne une cellule végétale débarrassée de sa paroi ; elle apparaît alors sous forme d'une cellule sphérique, limitée par sa membrane plasmique. L'intérêt de ces cellules réside dans le fait qu'il est possible de faire pénétrer dans la cellule des molécules diverses dont de l'ADN, des organites (chloroplaste, mitochondrie), des noyaux (fusion), et effectuer des manipulations génétiques (Hoshino et al., 1995). Toutes les espèces ne peuvent pas régénérer à partir de protoplastes et le rendement est souvent faible (Veltcheva et al., 2005). Par digestion enzymatique (cellulases, pectinases) on obtient le protoplaste sphérique en équilibre osmotique avec le milieu. Mis en culture sur milieu liquide, on observe les premières divisions. Plusieurs milieux sont nécessaires. Au trentième jour, des petites cals apparaissent, vers 60 jours, il se produit une apparition de bourgeons et le repiquage pour la culture *in vitro* peut être réalisé (Matthews et al., 1991). La fusion de protoplastes offre de nombreuses possibilités pour le sélectionneur. On peut combiner 3 génomes différents : nucléaire, chloroplastique et mitochondrial. A partir de l'*hétérocaryon* (noyau mixte, du grec *caryon* = noyau) obtenu, plusieurs cas sont possibles : division des deux noyaux

(*chimères*), un noyau se retrouve dans un cytoplasme étranger (*cybride*), les noyaux se sont mélangés par fusion (totale ou partielle) avec un cytoplasme combiné.

En conclusion la technique de multiplication végétative *in vitro* offre des avantages très importants, parmi les quels :

- un taux de multiplication supérieur aux autres techniques utilisées par les professionnels,
- une production rapide, intensive, régulière, homogène, à n'importe quel moment de l'année de sujets identiques à la plante de départ. Signalons que le traitement à basse température, entre 1° et 5 °C (selon les espèces), permet de maintenir des stocks de plantes en vie ralentie pendant plusieurs années,
- une diminution des coûts de production et des dépenses énergétiques, due au gain de temps pour obtenir les produits finis et à la réduction des surfaces de culture ; 100 m<sup>2</sup> d'étagères en salle climatisée équivalent à 100 ha de production au champ,
- une obtention de matériels indemnes de maladies, la reconstitution et la conservation de clones sains. En associant cette sauvegarde sanitaire à celle de la sauvegarde du patrimoine génétique, on aboutit à la mise en place de conservatoires des espèces et variétés végétales,
- une simplification du travail des pépiniéristes qui peuvent supprimer le greffage, donc la culture des porte-greffes, pour un bon nombre d'espèces ligneuses qui exigeaient cette technique pour leur multiplication et le maintien de leur spécificité variétale.

## 5. PRESENTATION D'*Atriplex halimus*

Le genre *Atriplex* (famille des Chenopodiaceae) compte environ 420 espèces réparties dans les zones tempérées, méditerranéennes et subtropicales, entre 20 et 50° de latitude Nord et Sud (Le Houérou, 1992b). *Atriplex halimus* L. est la plante autochtone la plus représentée sur le pourtour méditerranéen. Elle est classée en seconde position après l'espèce australienne *A. nummularia* pour la superficie occupée (Le Houérou, 2000; Martinez et al., 2003). L'espèce est spontanée à l'intérieur d'une aire relativement vaste englobant les pays du Nord de l'Afrique et du proche et moyen orient, depuis les Canaries jusqu'à l'Iran, vers le sud, l'espèce atteint le massif d'Ahaggar. En Algérie, *Atriplex halimus* L. est spontané dans les étages bioclimatiques semi-arides et arides. Les statistiques du Ministère de l'agriculture (1998), révèlent que les nappes d'*Atriplex* en association couvrent une superficie de 01 million d'hectares. La plus grande superficie se trouve entre les isohyètes 100 et 400 mm/an. *Atriplex halimus* L. est un arbuste autochtone, dont l'intérêt fourrager pour les zones arides et semi-arides a été signalé par de nombreux auteurs (Hcini et al., 2006 ; Abbad et al., 2004 ). Son importance fourragère s'explique par son contenu élevé en azote (Nefzaoui et Chermiti, 1991), son adaptation à la sécheresse et à la salinité, le maintien de son feuillage vert durant toute l'année, et par sa tolérance au pâturage (Le Houérou, 2002b).

### 5.1. Description

Les zones arides et semi-arides sont les loges écologiques préférentielles de la plupart des espèces du genre *Atriplex*. Toutes ces espèces présentent des adaptations particulières à ce type d'habitat. *Atriplex halimus* L. est un halophyte présentant une photosynthèse en C<sub>4</sub> (Martinez et al., 2005). Les plantes en C<sub>4</sub> possèdent des caractéristiques anatomiques leur permettant d'augmenter le taux de CO<sub>2</sub> dans les cellules photosynthétiques tout en diminuant la transpiration (Wang, 2004). Vue en coupe, les feuilles des plantes en C<sub>4</sub> contiennent deux types de cellules particulières, les cellules de la gaine fasciculaire autour des faisceaux, et les cellules du mésophylle

autour des cellules de la gaine fasciculaire. Les adaptations physiologiques des plantes en C<sub>4</sub> leur confèrent une protection contre les fortes températures (les enzymes thermosensibles se trouvant dans la gaine fasciculaire) et une faible photorespiration (le taux de CO<sub>2</sub> étant suffisamment élevé pour que le Rubisco ne fonctionne qu'en carboxylase) [Zhu et Meinzer, 1999]. Les plantes en C<sub>4</sub> ont une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau que les plantes en C<sub>3</sub> en conditions d'illumination et de température élevées (Broetto et al., 2007).

Selon Le Houérou (2004), L'*Atriplex halimus* (Noms usuels : Guetaf, Salt bush méditerranéen, Arroche, Pourpier de mer) est un arbuste de 1 à 3 m de haut, très rameux, formant des touffes pouvant atteindre 1 à 3 m de diamètre. Les feuilles sont alternes, brièvement mais nettement pétiolées, plus ou moins charnues, luisantes, couvertes de poils vésiculeux blanchâtres (trichomes), ovales, entièrement ou légèrement sinuées, de 0.5 à 1 cm de large sur 2 à 4 cm de long (figure 4). Les fleurs sont monoïques, ce sont des inflorescences en panicules d'épis, terminales, les inflorescences portent souvent des fleurs mâles au sommet et des fleurs femelles à la base. La floraison - fructification se déroule de mai à Décembre. Talamali et al. (2001) ont observé une grande variabilité dans la structure des fleurs, même au sein de populations très réduites comme des plantes maintenues en collection dans des conditions contrôlées. Il existerait deux types d'architecture florale de base, l'une est constituée de fleurs mâles pentamères, et l'autre de fleurs femelles munies d'un unique carpelle inséré entre deux bractées opposées. A partir de ces deux types, des fleurs bisexuées peuvent apparaître, conduisant à un nombre total de 6 types floraux dont les proportions et la distribution sur les rameaux sont fonction des conditions environnementales, en particulier de la durée du jour et de l'intensité lumineuse (Talamali et al., 2003). C'est une espèce très polymorphe. Le polymorphisme de cette espèce semble lié à sa diversité d'habitat impliquant vraisemblablement une forte adaptabilité de la plante à son milieu naturel (Abbad et Benchaabane, 2004). Le système racinaire pivotant présente un fort développement pouvant atteindre 10 mètres de profondeur (Mattia et al., 2005). L'espèce *Atriplex halimus* présente deux sous-espèces distinctes qui diffèrent par leur morphologie (densité de feuillage et

longueur des rameaux florifères) et leur loge écologique, *Atriplex halimus* L. subsp. *halimus*, et *Atriplex halimus* L. subsp. *schweinfurthii* Boiss. La première est généralement plus feuillue, à port érigé, très ramifiée et se rencontre en zones semi-arides à humides. La seconde est plus strictement liée aux zones arides, elle se caractérise par ses valves fructifères à ailes nettement dentées sur les marges, avec des rameaux florifères nus au sommet (Le Houérou, 2004). Les populations naturelles d'*Atriplex halimus* dans les régions steppiques Algériennes appartiennent presque toute à la variété *schweinfurthii* (Walker et al. 2005). Il existe de nombreuses populations de cette dernière à l'état pur ou associées avec d'autres espèces halophytes comme *Suaeda sp.* et *Salsola sp.*, réparties généralement dans les zones salées Algériennes (Chotts Hodna, Skhouna, Melghigh, Zehrez chergui et gherbi) [Bouabdellah , 1992].

Sur le plan climatique, L'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* résiste bien aux gelées jusqu'à des minima de janvier voisines de  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $-12^{\circ}\text{C}$ , notamment dans les hautes plaines steppiques de l'Algérie (Le Floc'h, 1989). Franclét et Le Houérou, (1971) indiquent que cette variété peut même se développer sous des pluviosités de 50 à 100 mm/an lorsque les sols sont pourvus de nappe phréatique ou recevant un appoint d'eau latéral par ruissellement. L'espèce est considérée comme halophyte (Le Houérou, 1992b). Cette variété se développe encore normalement dans les sols dont la conductivité de l'extrait de saturation atteint 5 à 100 dS/m dans les horizons de surface et 20 à 35 dS/m dans les horizons profonds.



Figure 4. Rameau feuillu avec inflorescence d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* (Cliché Nedjimi, 2006)

## 5.2. Métabolisme

Chez les espèces du genre *Atriplex*, il y a une translocation préférentielle des ions  $\text{Na}^+$  vers les parties aériennes (Bajji et al. 1998). Le transport du sel peut se faire par la voie symplastique ou par la voie apoplastique, ce dernier étant le système de transfert le plus souvent observé chez *Atriplex halimus*. Le transport symplastique se ferait par le biais de vésicules de pinocytose et d'exocytose contenant le sel dans le cytoplasme. Chez *Atriplex halimus*, le système de vésiculation apparaît particulièrement important au niveau des cellules présentant un cytoplasme dense et situées à proximité du système vasculaire. Le sel absorbé par les racines de la plante est transporté vers les feuilles où il s'accumule dans les trichomes pour être ensuite excrété. Chez de nombreuses espèces du genre *Atriplex* (Chénopodiacées), la résistance au stress salin est associée à la présence d'organes spécialisés tels que les poils vésiculaires (trichomes) et les glandes excrétrices à la surface des feuilles qui leurs donnent un aspect blanchâtre plus ou moins luisant (figure 5) [Malcolm et al., 2003]. Ces structures anatomiques sont spécialisées dans l'élimination du  $\text{Na}^+$  qui arrive au niveau des feuilles à travers le xylème puis au niveau du mésophylle. Le  $\text{Na}^+$  est emmagasiné dans ces trichomes avant qu'il ne soit excrété par la

dégénérescence de ces derniers, empêchant ainsi l'accumulation toxique de ce cation dans les tissus foliaires (Barhoumi et al., 2007). Les poils vésiculaires sont constitués d'un pédicelle unicellulaire ou pluricellulaire portant une tête distendue. Les cellules de ces poils possèdent en plus du réticulum endoplasmique de l'appareil de Golgi et de nombreux chloroplastes, de petites vacuoles (vésicules) qui joueraient un rôle dans le transport des sels (ces vésicules semblent être plus développées dans le cas des plantes cultivées sur un milieu riche en sels solubles). Les plasmodesmes, qui favorisent le transport des ions entre les cellules, sont nettement visibles à l'intérieur de la cellule. Le rôle des poils vésiculaires dans l'élimination des sels absorbés par l'*Atriplex halimus* a été déjà étudié, principalement en Australie à l'aide des techniques d'histo-autoradiographie et de Microscopie électronique. Grâce à l'utilisation des sels de potassium marqué, il a été montré dans le cas d'*Atriplex spongia* et *Atriplex nummularia* que les poils vésiculaires sont plus riches en sels que le limbe des feuilles (Franclet et Le Houérou, 1971). Des cristaux de sels se forment dans ces cellules vésiculaires, faisant éclater la cellule, permettant le rejet du sel à la surface de la feuille. La présence de ces poils pourrait également aider la plante à diminuer son évapotranspiration et assurer une protection contre une illumination trop intense (Malcolm et al., 2003).

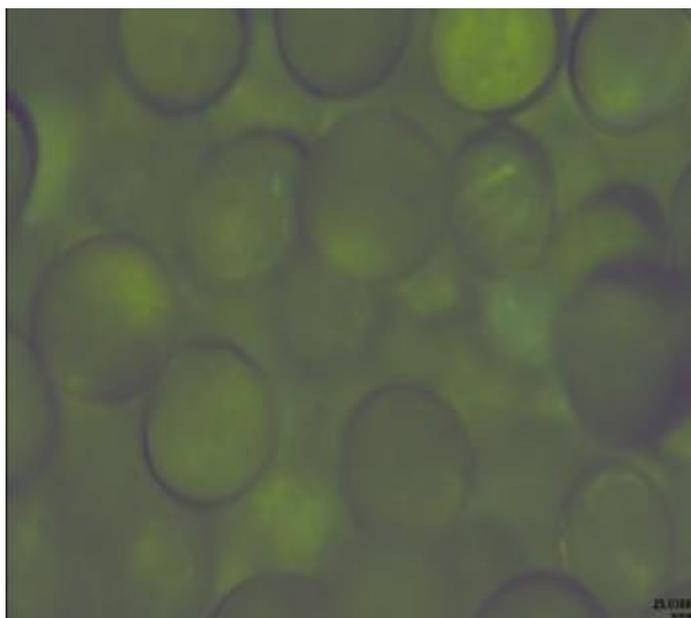


Figure 5. Aspect d'une feuille d'*Atriplex halimus* traitée par 20 g/l NaCl, portant des trichomes gonflés de sels. Photo prise par Microscope type *OLYMPUS BX40 U-TV1X-2 JAPAN*. Agr. X100. (Cliché Nedjimi, 2007).

### 5.3. Utilités

Les *Atriplex* présentent dans les régions arides un grand intérêt comme plantes fourragères en raison de leur rusticité, leur bonne valeur fourragère, leur résistance élevée à la sécheresse, et leur faculté de tolérer des salures élevées (Osman et al., 2006) [Tableaux II et III]. Les peuplements naturels sont difficilement utilisables par les animaux en raison de leur port buissonnant et de l'inaccessibilité des jeunes rameaux. Le Houérou (1992b) signale que les arbustes d'*Atriplex halimus* doivent être rabattus à 30 - 50 cm tous les 3 à 5 ans, afin d'éviter une lignification très importante. Il propose, pour atteindre le même objectif, un pâturage étalé dans l'année avec 2 fois par an un pâturage très intense (15 à 30 jours de passage chaque fois), ce qui assure le maintien d'une plantation à l'état juvénile et une production maximale des feuilles tendres. La mise en valeur de ces peuplements exige donc des coupes périodiques destinées à éliminer les parties trop ligneuses et à mettre les jeunes rameaux à la portée des animaux, surtout des ovins. Selon la FAO (1992), les plantations à base *Atriplex halimus* sont susceptibles de remplir les rôles suivants en zones arides :

- amélioration de la production animale et stabilisation des effectifs du cheptel surtout en périodes de disettes résultant de la sécheresse,
- mise en valeur des terres marginales inutilisables en agriculture conventionnelle,
- production de bois de chauffage,
- valorisation des eaux salines impropres à d'autres productions végétales.

Selon Khan et Duke (2001), les *Atriplex* peuvent être utilisés pour désaliniser les sols. En effet, il est donc possible selon Barrett-Lennard (2002) d'extraire d'un hectare d'*Atriplex* 1000 kg de NaCl des horizons superficiels en une année de culture. Certaines espèces d'*Atriplex* accumulent le molybdène (Mo) et le sélénium (Se) en grandes quantités, dans ce dernier cas la plante pourrait être capable d'en assurer la volatilisation des terres contaminées (Watson et al., 1994). Certains agronomes vont même jusqu'à recommander l'addition de fourrage d'*Atriplex* dans la ration du bétail pour combler les carences en Se; si cet élément n'est pas requis pour les plantes, il est par contre nécessaire chez les mammifères, et particulièrement chez les brebis en phase de lactation (Vickerman et al., 2002). Dans la majorité des cas, les espèces du

genre *Atriplex* sont testées à des fins de phytostabilisation plutôt que dans un but de phytoextraction. 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 baryum (Ba), le chrome (Cr) et le nickel (Ni) [Jordan et al., 2002; Sawalha et al., 2006]. L'espèce est présente, à l'état spontané, sur d'anciens sites miniers contaminés par divers métaux lourds (Moreno Rodriguez et al., 2005). Des études récentes ont permis de souligner le caractère prometteur de l'espèce qui, soumise à une importante dose de cadmium (Cd) ou de zinc (Zn), est capable d'accumuler des quantités importantes de ces éléments sans présenter d'inhibition de croissance ou d'augmentation de la mortalité. La population testée, en revanche, apparaît particulièrement sensible au cuivre (Cu) [Lutts et al. 2004].

*Atriplex halimus* L. constitue une plante bien adaptée pour augmenter et stabiliser la production fourragère en climats arides et semi-arides, et sur des sols salés. Ce végétal est susceptible de mettre en valeur des terres où la végétation naturelle est profondément dégradée et où la production agricole est très irrégulière comme c'est le cas des zones steppiques Algériennes.

Tableau II. Production fourragère par hectare des formations naturelles et des plantations d'*Atriplex halimus*.

Auteurs	Pays	Bioclimat ou précipitation	Densité ou recouvrement	Biomasse ou production /ha	Observation
Ziani (1970)	Tunisie	Aride inférieur	R=37%	9357 kg M.S. biomasse totale sur pied dont 1009kg MS feuille	Peuplement naturel
Rodin et al. (1970)	Algérie (Chellala)	250-300 mm/an	-	2000 à 5000 kg MS	Peuplement naturel
Francllet et Le Houérou, (1971)	Algérie (Hodna)	200- 250 mm/an	-	12000 à 16000 kg MF	Peuplement naturel
FAO (1992)	Libye	120- 160 mm/an	1000 plants/ha	320 UF /ha /an	Plantation
Le Houérou (1992b)	Tunisie	200- 400 mm/an	1000 à 2000 plants/ha	2000 à 4000 kg MS / ha /an	Plantation irriguée

Tableau III. Valeurs nutritives et composition chimique moyenne d'*Atriplex halimus*.

Auteurs	Pays	M.S. (%)	Matière Azotée Totale (% M.S.)	U. F. / kg MS	Na (% M.S.)	K (% M.S.)	Ca (% M.S.)	P (% M.S.)
El Shaer et Kandil (1998)	Egypt	34.20	12.60	-	4.41	1.33	1.51	0.29
Aouissat et al. (1993)	Espagne	36.8	19.73	0.30	6.48	7.70	2.26	0.19
Hassen (1994)	Syrie	-	15.40	-	4.62	3.36	0.87	0.16
Nefzaoui et Chermiti (1991)	Tunisie	30.56	18.77	0.70	3.33	2.47	1.66	0.44

## 6. Conclusion

Cette étude bibliographique montre que l'adaptation des plantes aux excès de sels solubles est un problème vaste et complexe. Les données recueillies montrent que la salinité limite l'activité physiologique du végétal par plusieurs effets :

- un effet osmotique qui exige de la plante une dépense supplémentaire d'énergie pour pouvoir absorber l'eau du sol,
- un effet sur l'alimentation minérale qui peut se traduire par une toxicité en cas de fortes accumulations de certains ions, comme le sodium et le chlore, ou par des carence provoquées par la compétition entre ions (cas du potassium en présence du sodium),
- un effet physiologique sur la photosynthèse et la transpiration.

Les plantes réagissent de différentes façons à un stress salin. Les unes résistent par exclusion des électrolytes, d'autres les accumulent comme c'est le cas des halophytes pour les utiliser en ajustement osmotique afin de diminuer leur potentiel hydrique. Certaines plantes procèdent à une sélectivité dans l'assimilation des éléments par leur système racinaire afin de réduire ou de neutraliser les méfaits des sels solubles. L'adaptation peut se faire également par des mécanismes biochimiques, comme l'accumulation des sucres et des composés azotés. Parmi ces derniers, c'est la proline qui semble jouer un rôle important dans l'adaptation des plantes à la salinité. En fin l'adaptation des plantes à la salinité exige des changements physiologiques et des mécanismes métaboliques qui sont commandés par des expressions spécifiques des gènes.

## CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

### 1. MATERIEL D'ETUDE

#### 1.1. La semence

Les semences d'*Atriplex halimus* L. proviennent de la région d'*El Mesrane* dans la Wilaya de Djelfa, plus précisément dans la zone du chott *Zahrez* (Figure 6), dont les coordonnées géographiques sont les suivantes :

3°03'E de Longitude,

34°36'N de Latitude,

et 830 m d'élévation.

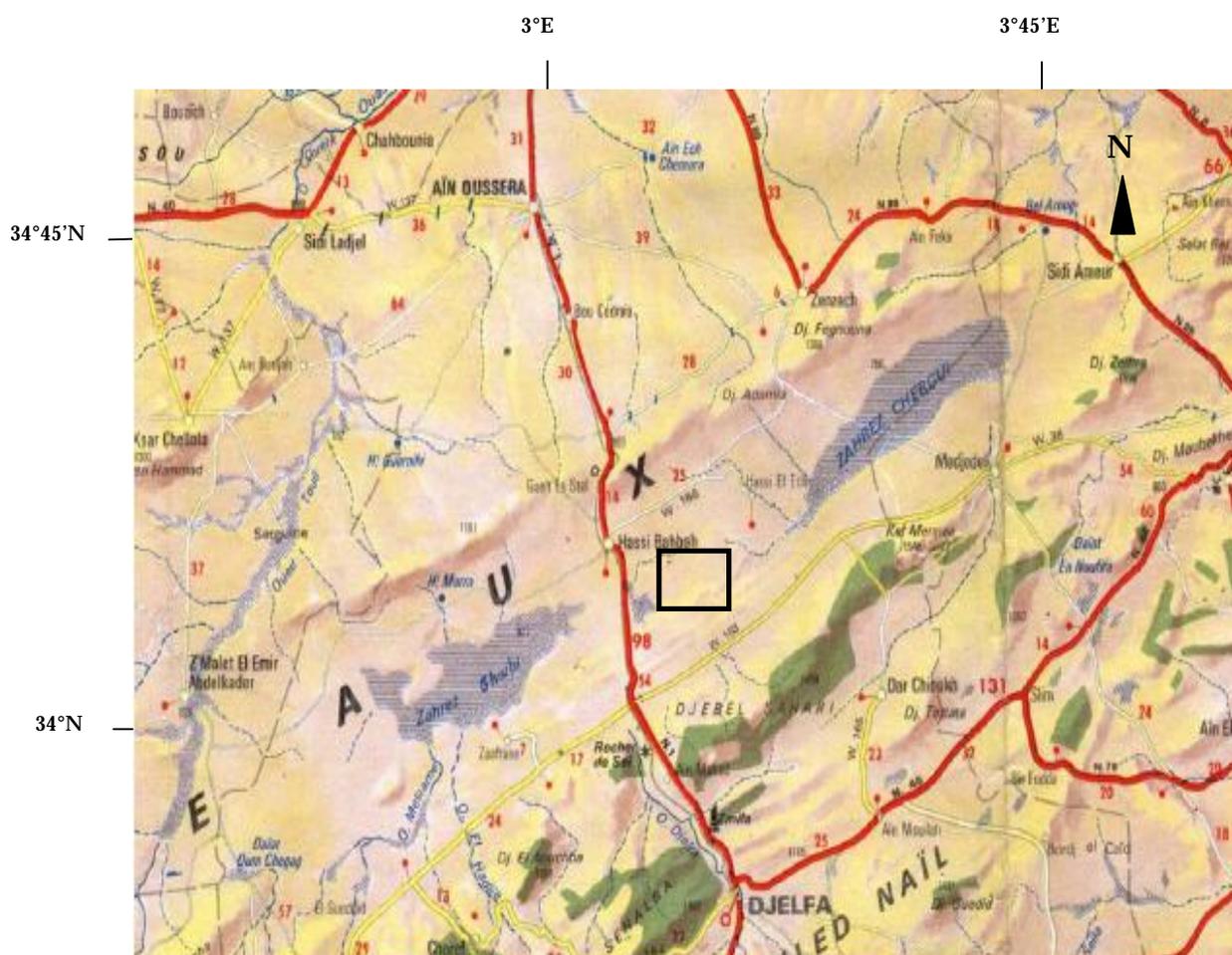


Figure 6. Localisation du site de prélèvement des graines (Encadré) [1/1 000 000].

La récolte des graines est réalisée sur une touffe d'*Atriplex halimus* présentant un bon état végétatif apparent. La conductivité électrique de la solution du sol a été mesurée au niveau du premier horizon du sol ( 0 – 20 cm), en un point au voisinage de la touffe d'*Atriplex* qui a été échantillonnée pour la semence. Sachant que la variabilité spatiale de la salinité peut être élevée, la valeur suivante est présentée à titre indicatif, la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée est de 10.5 dS/m à 25°C. Après décortication manuelle de leurs valves fructifères (bractéoles), les graines sont désinfectées par un séjour de 10 minutes dans l'Ethanol à 70 %, suivi de 10 minutes dans une solution d'hypochlorite de sodium (Domestos) à 8%, ensuite elles sont rincées 3 fois à l'eau distillée stérile (Martínez et al., 2004).

## 1.2. Les sels

Le facteur de variation étudié est la concentration et la nature de trois sels solubles (NaCl, CaCl<sub>2</sub> et NaSO<sub>4</sub>). Ces sels ont été retenus en raison de leurs prédominances dans les sols salés de notre zone d'étude (Halitim, 1988). Les concentrations en sels retenues suivent une croissance arithmétique dont l'incrément est de 2g/l. La gamme de concentration étudiée englobe le seuil de sensibilité du genre *Atriplex* au NaCl et qui se situerait autour de 10 g/l (Khan et al., 2000a). C'est ainsi que 11 concentrations salines sont retenues dans ce travail pour bien cerner le seuil de sensibilité de l'espèce étudiée, les concentrations utilisées sont les suivantes : 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 et 20g/l, ces concentrations correspondent aux traitements suivants : T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11.

## 2. METHODES D'ETUDE

### 2.1. Le test germinatif

Les graines sont mises à germer, par lot de 100 graines pour chaque traitement, dans les boîtes de pétri de 9 cm de diamètre, tapissées de papier filtre stérilisé, à raison de 25 graines/boîtes, soit 4 répétitions par traitement (Debez et al., 2004). Le papier filtre est humecté au départ, et ensuite toutes les 24 heures avec 5 ml de la solution saline.

Le test germinatif était conduit dans une chambre de culture dont la température et la photopériode sont contrôlées. La température est réglée à  $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ , sous un éclairage de  $25\mu\text{E}/\text{s}/\text{m}^2$  assuré par une série de néons fluorescents de type Mazdafluor. La photopériode est de 16 heures de lumière, et 8 heures d'obscurité. L'humidité relative est de 70% (Martínez et al. 2004). Les graines germées sont dénombrées toutes les 24 heures. L'apparition d'une radicule de 1mm environ a été utilisée comme le critère de germination (Bajji et al., 1998). Le dispositif expérimental utilisé est le bloc aléatoire complet (Dagnelie, 1981). Chaque traitement est répété 4 fois, chaque répétition correspond à une boîte de pétri contenant 25 graines. Le dispositif expérimental utilisé est présenté dans la Figure 7.

<b>Bloc 1</b>	T <sub>1</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>9</sub>
<b>Bloc 2</b>	T <sub>9</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>11</sub>
<b>Bloc 3</b>	T <sub>1</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>3</sub>
<b>Bloc 4</b>	T <sub>7</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>5</sub>

Figure 7. Schéma du dispositif expérimental du test germinatif.

### 2.2. La culture *in vitro*

#### 2.2.1. Le repiquage

Au bout de 05 jours, les plantules ayant entre 10 et 15 mm de hauteur ont été repiquées à raison d'une plantule par tube sur différents milieux de culture qui

diffèrent seulement par leurs contenus en sels solubles (Pourrat et Dutuit, 1993). Elles sont ensuite mises en culture pendant 30 jours dans les mêmes conditions que pour la germination. Chaque tube à essai contient 20ml du milieu de culture.

### 2.2.2. Le milieu de culture

Les milieux de culture utilisées sont composés de Macro et micro-éléments de Murashige et Skoog (1962), les vitamines de Morel et Wetmore (1951), 0.1mM Fer-EDTA, 20g/l de saccharose (source de carbone), et 8 g/l d'Agar (Bactoagar Difco) qui permet de solidifier le milieu (Tableau IV). Le pH est ajusté à 5.8 avec KOH (Margara 1989).

**Tableau IV. Composition chimique du milieu de culture**

Macro-éléments de Murachige et Skoog 1962 (mg/l)	
- NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	- 1650
- KNO <sub>3</sub>	- 1900
- CaCl <sub>2</sub> , 2H <sub>2</sub> O	- 440
- MgSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O	- 370
- KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	- 170
Micro-éléments de Murachige et Skoog 1962 (mg/l)	
- MnSO <sub>4</sub> , 4M <sub>2</sub> O	- 22.3
- ZnSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O	- 8.6
- H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	- 6.2
- KI	- 0.83
- NaMoO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O	- 0.25
- CuSO <sub>4</sub> , 5H <sub>2</sub> O	- 0.025
- CoCl <sub>2</sub> , 6H <sub>2</sub> O	- 0.025
Solution stock de Fe-EDTA (mg/l)	
- Na <sub>2</sub> -EDTA	- 3730
- FeSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O	- 2780
Solution de vitamines de Morel et Wetmore 1951(mg/l)	
- Meso-Inositol	- 5000
- Pantothenate de calcium	- 50
- Acide nicotinique	- 50
- Pyridoxine (Vit. B6)	- 50
- Thiamine (Vit. B1)	- 50
- Biotine	- 0.5

### 2.2.3. Le dispositif expérimental

Chaque expérience porte sur un sel soluble, elle correspond à un ensemble de 11 traitements, chaque milieu est testé sur 10 individus correspondant à 10 répétitions. Le dispositif expérimental utilisé est le Bloc aléatoire complet (Dagnelie, 1981) dont les traitements correspondent aux concentrations des sels solubles (Figure 8).

<b>Bloc 1</b>	T <sub>1</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>9</sub>
<b>Bloc 2</b>	T <sub>9</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>11</sub>
<b>Bloc 3</b>	T <sub>1</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>3</sub>
<b>Bloc 4</b>	T <sub>7</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>5</sub>
<b>Bloc 5</b>	T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>
<b>Bloc 6</b>	T <sub>11</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>1</sub>
<b>Bloc 7</b>	T <sub>10</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>5</sub>
<b>Bloc 8</b>	T <sub>10</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>
<b>Bloc 9</b>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>3</sub>
<b>Bloc 10</b>	T <sub>6</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>5</sub>

Figure 8. Schéma du dispositif expérimental du test *in vitro*.

### 2.3. Les paramètres étudiés

Les mesures des poids frais et sec de la partie aérienne et racinaire ont lieu 30 jours après la mise en culture et portent sur 10 plantules pour chaque traitement. Pour éliminer l'accumulation de sel en surface, les plantules ont été lavées à l'eau distillée. Les poids des matières sèches aérienne et racinaire ont été obtenus après séchage des échantillons pendant 05 jours à 60 °C.

Les cations (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) sont dosés par spectrophotométrie à absorption atomique type (Perkin-Elmer ICP 5500, Norwalk, CT, USA) sur un produit d'une attaque Nitro-perchlorique en présence de l'acide sulfurique (méthode tri-acide).

Les anions (Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) sont dosés par un chromatographe type Dionex D-100 avec colonne type ionpac AS124-4 mm (10–32), le logiciel utilisé est le Chromeleon/Peaknet 6.40 chromatography software.

Pour le dosage de la proline, la méthode utilisée est celle de Bates et al. (1973), elle consiste à placer un échantillon de 100mg de matière fraîche dans des tubes à essai contenant 2 ml de méthanol à 40%. L'ensemble est porté à 85° dans un bain marie pendant une heure (les tubes sont recouverts de papier aluminium afin d'éviter la volatilisation de l'alcool). Après refroidissement, on prélève 1ml de l'extrait auquel on ajoute 1ml d'acide acétique (CH<sub>3</sub>COOH), 25mg de ninhydrine (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O<sub>4</sub>) et 1ml de mélange (120ml d'eau distillée + 300ml d'acide acétique + 80ml d'acide orthophosphorique (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) de densité d=1.7). La solution obtenue est portée à ébullition pendant 30mn. La couleur vire au rouge, on refroidit et on ajoute 5ml de toluène. Deux phases se séparent : la phase supérieure contient la proline et la phase inférieure sans proline. La phase supérieure (colorée en rouge) est récupérée, on ajoute du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> anhydre à l'aide d'une spatule afin d'éliminer l'eau qu'elle contient. La dernière étape consiste à mesurer la densité optique au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 528nm. La valeur obtenue est convertie en concentration en proline par le biais d'une courbe étalon préalablement établie à partir d'une série de solutions de concentrations en proline connues.

Les sucres solubles totaux ont été dosés par la méthode de Dubois et al. (1956), elle consiste à mettre 100mg de matière fraîche dans des tubes à essai contenant 3ml de méthanol à 80%. On laisse à température ambiante pendant 48 heures. Au moment du dosage, les tubes sont placés dans une étuve à 80°C pour faire évaporer l'alcool. Dans chaque tube, on ajoute 20ml d'eau distillée. C'est la solution à analyser. Dans des tubes à essai propre, on introduit 1ml de la solution à doser auquel on ajoute 1ml de phénol à 5%. Les tubes sont soigneusement agités. On ajoute alors 5ml d'acide sulfurique concentré (96%, d=1.89) à l'aide d'une burette dont le jet tombe brutalement sur la surface du liquide. La température atteint alors environ 110°C. Après une agitation rapide au vortex, les tubes sont maintenus pendant 45mn à 5°C. Après un séjour de 30mn à l'obscurité, les mesures d'absorbance sont effectuées à une longueur d'onde de 485 nm. Enfin, les résultats des densités optiques sont rapportés sur une courbe étalon des sucres solubles.

L'Azote est dosé d'après la méthode de Kjeldahl.

#### 2.4. Les calculs statistiques

Les résultats obtenus pour chaque type de sel sont soumis à une analyse de la variance (ANOVA) à un facteur de variation, avec le test de *Tukey* au seuil de 5% ( $P < 0.05$ ) pour identifier les groupes homogènes. Une analyse de la variance à un facteur de variation est réalisée évidemment pour rechercher d'éventuelles différences entre la nature des sels appliqués. Le logiciel utilisé est le *STATISTICA 2000*. Des calculs d'équation de régression sont réalisés pour caractériser les relations éventuelles qui existeraient entre les paramètres mesurés et les concentrations salines.

## CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

Le travail réalisé porte sur la recherche de l'influence des concentrations croissantes en NaCl, en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et en CaCl<sub>2</sub> sur l'évolution du taux et de la vitesse de germination, la croissance, la nutrition minérale, et l'accumulation des solutés organiques chez l'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* conduit en culture *in vitro*.

Les données analytiques et les résultats des calculs statistiques sont présentés en annexes.

### 1. LA GERMINATION

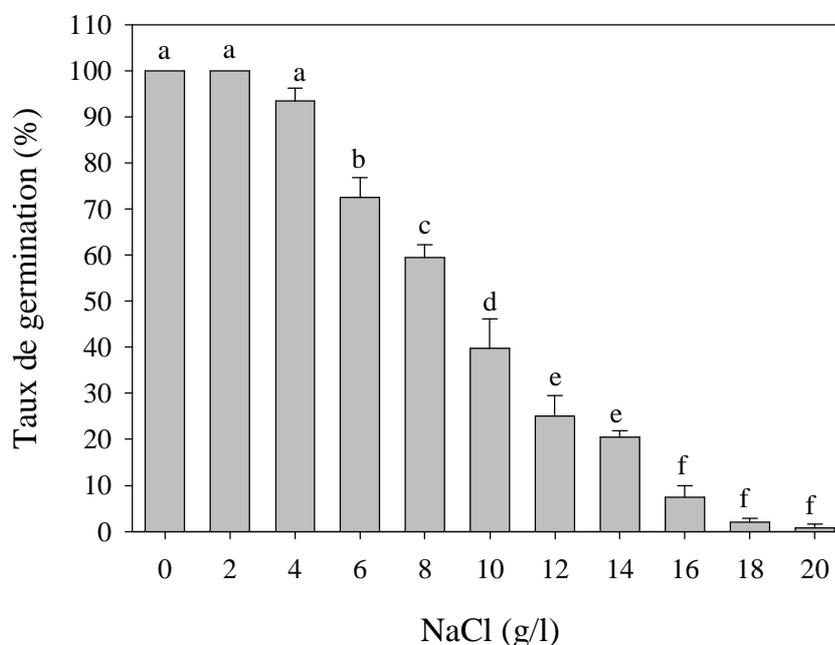
Il s'agit d'évaluer l'influence des concentrations salines et de la nature des sels solubles utilisés sur le taux et la vitesse de germination des graines d'*Atriplex halimus*.

#### 1.1. Cas du NaCl

Les résultats obtenus montrent que le pourcentage de germination des graines d'*Atriplex halimus* obtenu au bout de 07 jours varie en fonction de la concentration en NaCl du milieu (figure 9). Dans le milieu témoin et en présence de 2 g/l NaCl, le pourcentage de germination atteint son maximum avec une valeur de 100%. Pour des concentrations de NaCl de 4 et 6g/l (correspondant à des pressions osmotiques de 0.25 et 0.37 Mpa respectivement), les taux de germination sont de 94 et 73%. Par contre, l'addition au milieu de quantité de NaCl supérieure ou égale à 8g/l produit une forte diminution du taux de germination qui atteint 1% pour la concentration de 20 g/l (soit une pression osmotique de l'ordre de 0.65 Mpa). L'analyse de la variance à un critère de classification montre une différence très hautement significative entre les différents traitements de NaCl utilisés ( $P < 0.0001$ ).

Cette analyse de la variance montre un effet global de la salinité, le test de *Tukey* au seuil de 5%, permet de classer les traitements en groupes homogènes et d'identifier les seuils de différenciation de l'effet du NaCl (figure 9).

Les traitements correspondant aux concentrations 0, 2, 4 g/l NaCl font partie du groupe (a), le taux de germination à 6 g/l NaCl est classé dans le groupe (b). Les groupes (c et d) correspondent respectivement à des concentrations de 8 et 10 g/l, les taux de germination à 12 et 14 g/l NaCl sont classés dans le groupe (e), et à partir du 16 g/l tous les traitements se classent dans le groupe (f). Ces résultats signifient que le NaCl diminue d'une manière significative le taux de germination entre 4 et 6 g/l, c'est dans cet intervalle que se localiserait le seuil de sensibilité de cette espèce au NaCl.



**Figure 9.** Effet des doses croissantes de NaCl sur le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=4$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

La recherche de la meilleure fonction d'ajustement statistique de la relation entre le taux de germination et la concentration en NaCl aboutit à l'équation linéaire suivante (figure 10) :

$$y = -5.83 x + 105.76, \quad r = 0.97.$$

La recherche du seuil critique admissible ou seuil de toxicité sera calculé pour une réduction du taux de germination de 25% (Maas, 1990). Ce seuil est de 5.25 g/l NaCl,

ce résultat confirme le test de *Tukey*, et situe de façon plus précise le seuil de sensibilité ou de tolérance d'*Atriplex halimus* au NaCl.

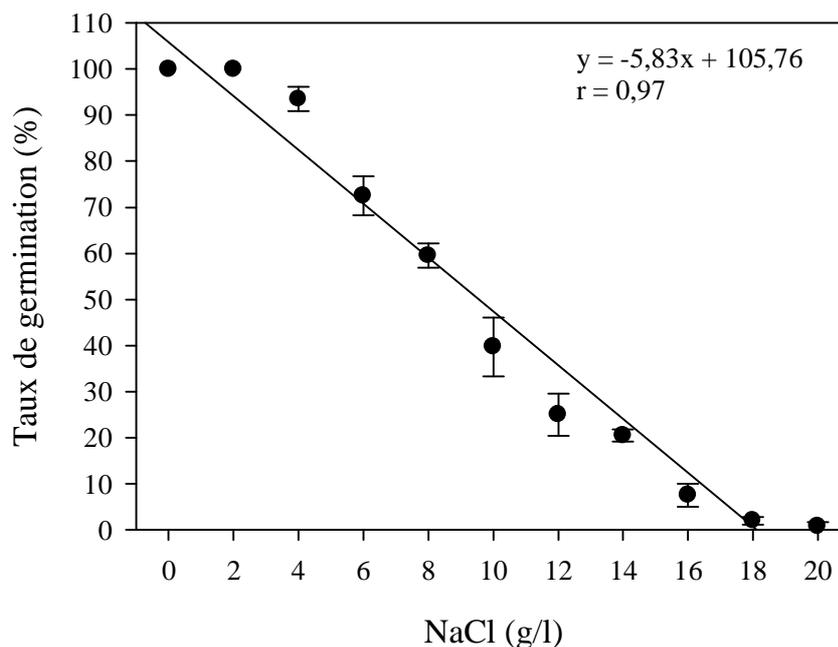


Figure 10. Ajustement statistique de la relation entre le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* et la concentration du milieu en NaCl.

Par ailleurs, le taux de germination évolue en fonction du temps et de la concentration saline du milieu (figure 11). Les moyennes calculées sur quatre répétitions par traitement pour les différents niveaux de salinité présentent la même allure pour les différents traitements. La germination commence dès le deuxième jour, elle est rapide durant les premiers jours puis ralentit pour atteindre un palier à partir du sixième jour. Au troisième jour, les taux de germination sont de 88 %, 47 % et 33 % pour des concentrations en NaCl de 0, 2, et 4 g/l ; tandis qu'au septième jour, les taux de germination obtenus sont de 100 %, 100% et 94% pour les doses respectives de 0, 2 et 4 g/l. L'augmentation des concentrations en chlorure de sodium diminue la vitesse de germination des graines.

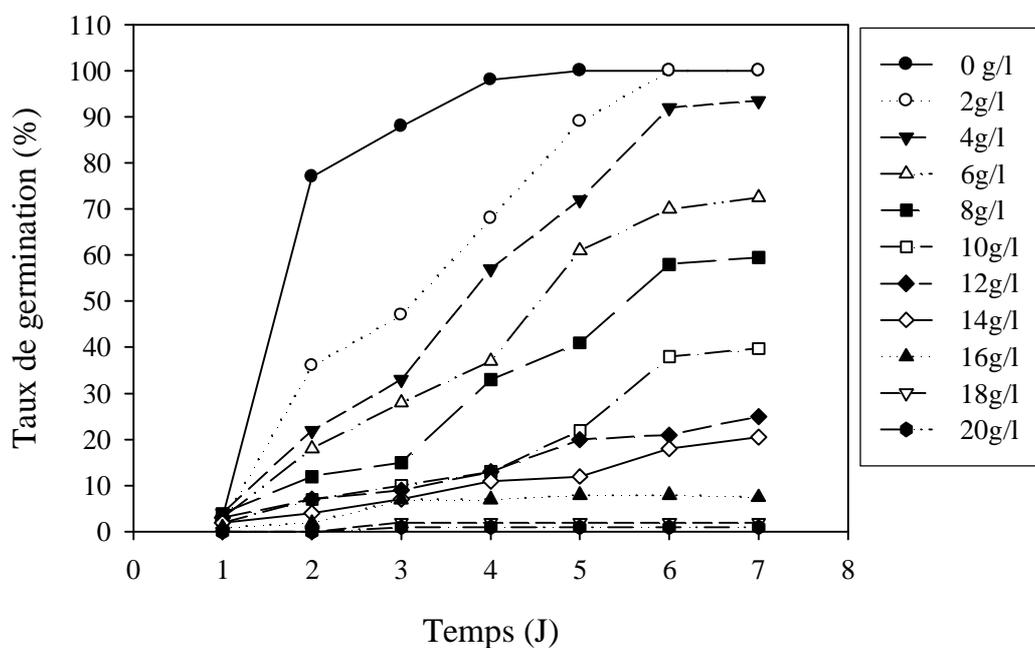
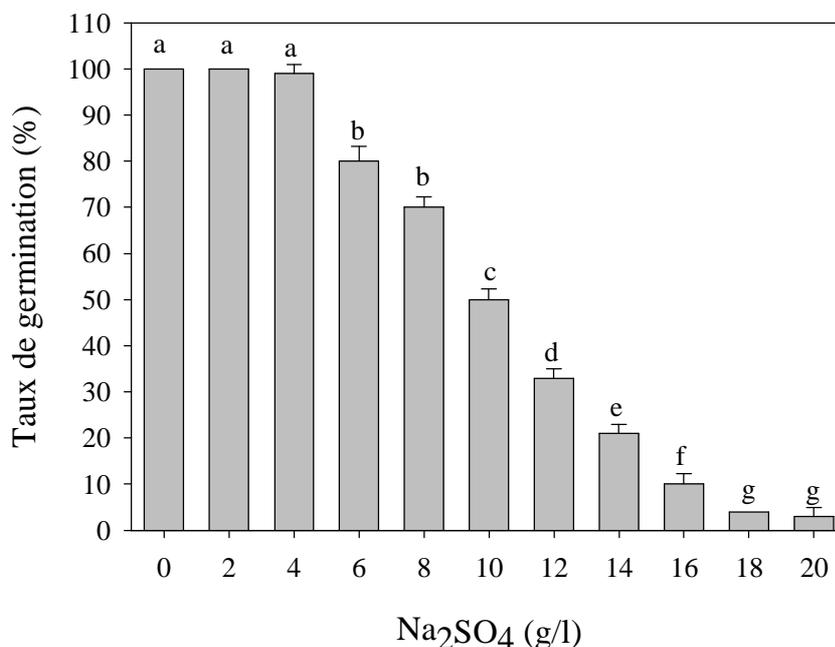


Figure 11. Evolution du taux de germination de graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* en fonction du temps et des doses croissantes en NaCl.

## 1.2. Cas du $\text{Na}_2\text{SO}_4$

Les résultats montrent que l'effet négatif du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se manifeste à partir de 6 g/l. À 10 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , il se produit une diminution du taux de germination de 50% par rapport au témoin (figure 12). Par ailleurs, l'analyse de la variance à un critère de classification montre que l'effet des doses croissantes de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  est très hautement significatif ( $P < 0.001$ ).

Selon le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 12), la différence n'est pas significative entre les niveaux allant de 0 à 4 g/l, mais elle devient significative entre le niveau 4 et 6 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Le seuil de sensibilité du taux de germination se situerait donc dans l'intervalle compris entre 4 et 6 g/l.



**Figure 12.** Effet des doses croissantes de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=4$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

La recherche de la meilleure fonction d'ajustement statistique de la relation entre le taux de réduction de la germination et la concentration en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aboutit à l'équation linéaire suivante (figure 13) :

$$y = -5.86 x + 110.5, \quad r = 0.97.$$

La recherche du seuil critique admissible ou seuil de toxicité sera calculé pour une réduction du taux de germination de 25% (Mass, 1990). Le résultat obtenu est de 6.06 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, soit une valeur qui dépasse sensiblement l'intervalle cité ci-dessus (entre 4 et 6g/l)

L'évolution du taux de germination en fonction de la concentration en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et en fonction du temps montre qu'après le troisième jour, les taux de germination n'ont atteint respectivement que 68, 60 et 33% pour les traitements 2, 4 et 6 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, alors que pour le témoin les graines ont germé à un taux de 92% (figure 14).

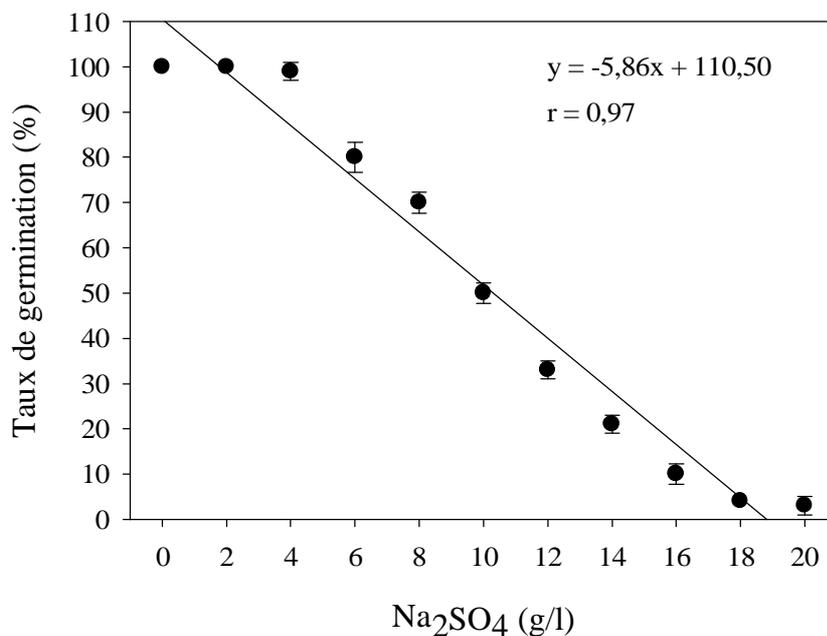


Figure 13. Ajustement statistique de la relation entre le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* et la concentration du milieu en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

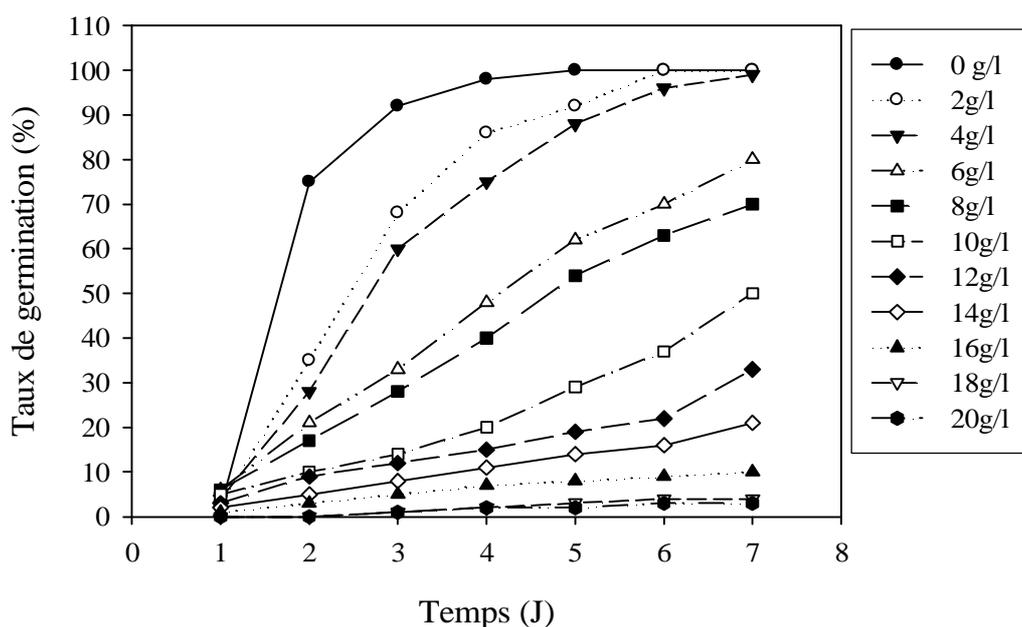


Figure 14. Evolution du taux de germination de graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* en fonction du temps et des doses croissantes en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

### 1.3. Cas du $\text{CaCl}_2$

Le taux de germination n'est pas affecté par le  $\text{CaCl}_2$  jusqu'à une concentration de 6 g/l. À 10 g/l, il se produit une forte diminution du taux de germination qui atteint 9% pour la concentration de 20 g/l de  $\text{CaCl}_2$  (figure 15).

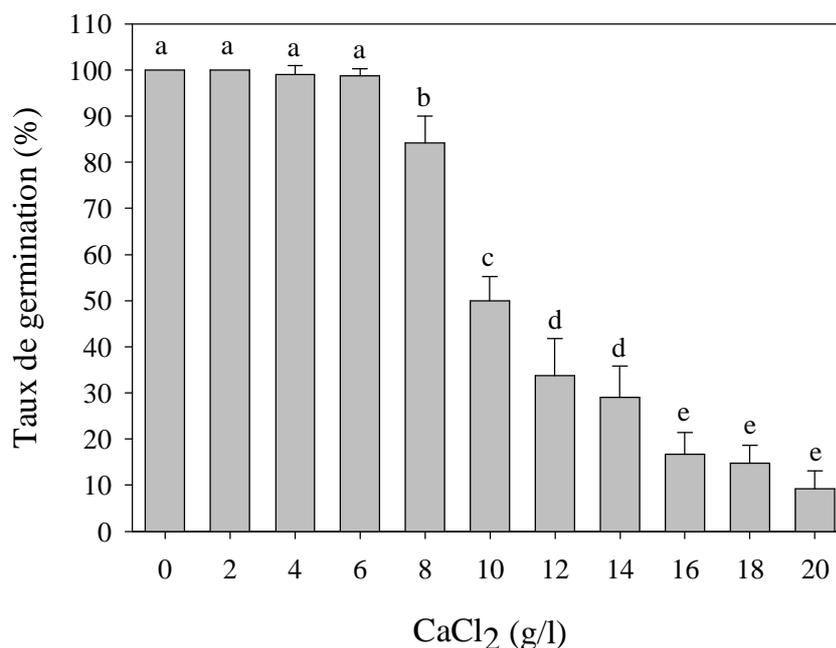


Figure 15. Effet des doses croissantes de  $\text{CaCl}_2$  sur le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=4$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

Statistiquement, l'analyse de la variance montre qu'il existe un effet très hautement significatif de la concentration en  $\text{CaCl}_2$  sur le taux de germination ( $P < 0.001$ ).

Par ailleurs, le test de *Tukey* au seuil de 5%, met en évidence une différence significative entre la concentration de 6 g/l qui fait partie du groupe (a), et le groupe (b) qui correspond à une concentration de 8 g/l  $\text{CaCl}_2$  (figure 15). Le seuil de sensibilité de la germination au  $\text{CaCl}_2$  se situerait dans l'intervalle des concentrations comprises entre 6 et 8 g/l.

Le taux de réduction de la germination est illustré par la figure 16, qui présente la relation statistique linéaire suivante :

$$y = -5.59 x + 113.75, \quad r = 0.95.$$

Selon cette équation, la recherche du seuil critique admissible qui provoque une réduction de 25% du taux de germination (Mass, 1990) correspond à une concentration de 7 g/l  $\text{CaCl}_2$  qui se situe dans l'intervalle indiqué ci-dessus (6 à 8g/l).

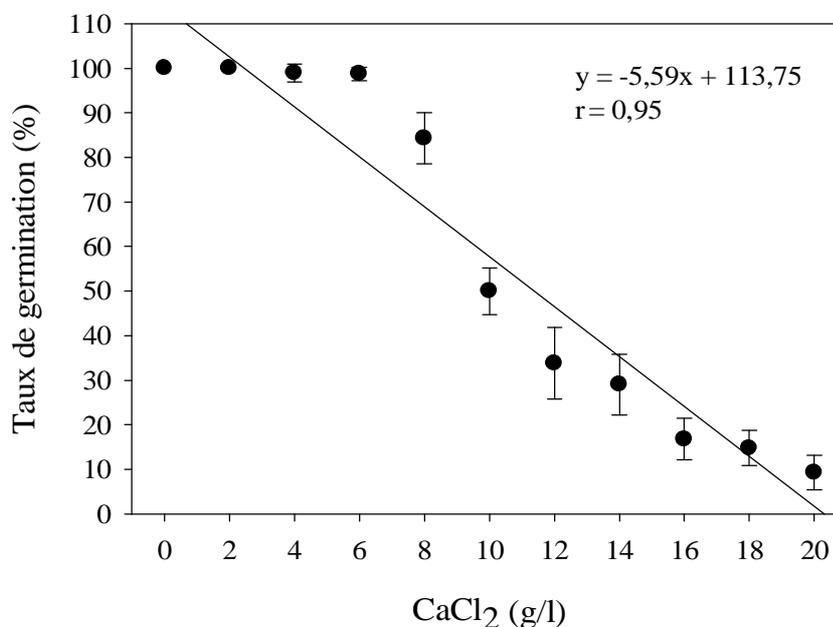


Figure 16. Ajustement statistique de la relation entre le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* et la concentration du milieu en  $\text{CaCl}_2$ .

La présence du chlorure de calcium entraîne un retard de germination plus ou moins important selon la concentration du milieu en  $\text{CaCl}_2$  (figure 17). En effet l'influence du chlorure de calcium sur l'énergie germinative commence dès le deuxième jour. Au troisième jour, les taux de germination des traitements 0, 2, 4 et 6 g/l  $\text{CaCl}_2$  sont de 93, 74, 71 et 63 %, alors qu'au septième jour ces taux atteignent leurs maximums avec des valeurs oscillant entre 99 et 100 %.

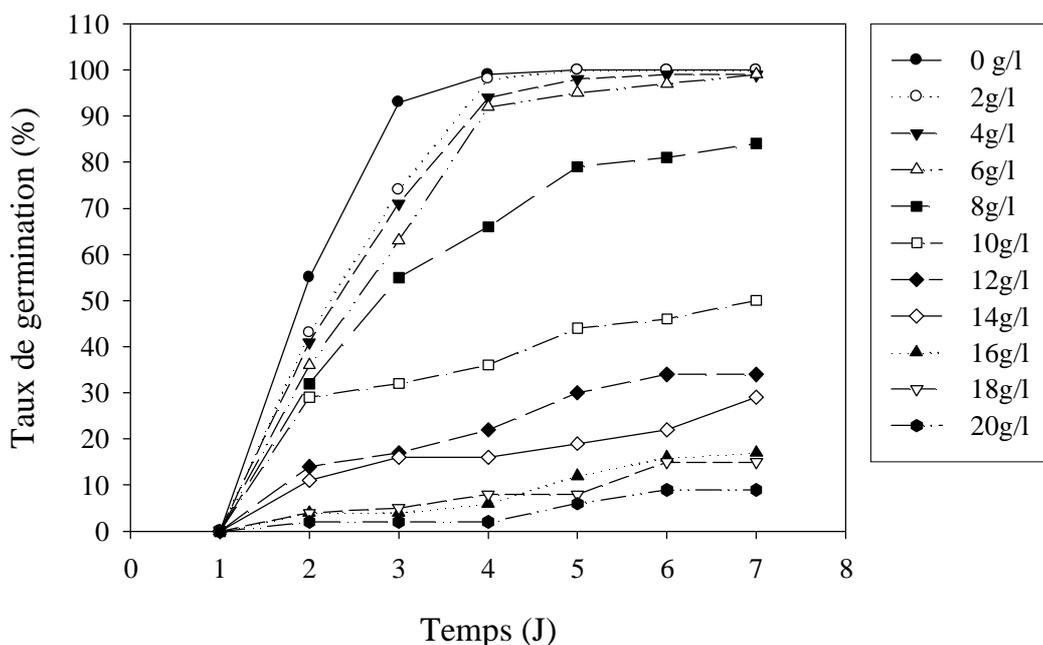


Figure 17. Evolution du taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* en fonction du temps et des doses croissantes en  $\text{CaCl}_2$ .

#### 1.4. Comparaison de l'effet de la nature des électrolytes sur le taux de germination

Il s'agit de comparer l'effet de la nature de l'anion accompagnateur du sodium ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), et l'effet de la nature du cation accompagnateur du chlore ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) sur le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus*.

##### 1.4.1. Effet de la nature de l'anion accompagnateur du sodium ( $\text{NaCl}/\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

La comparaison de l'évolution du taux de germination entre les graines traitées par le  $\text{NaCl}$  et celles traitées par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  rend compte d'une certaine différence entre les deux sels étudiés (figure 18). En effet, le calcul du seuil critique admissible ou seuil de toxicité pour une réduction du taux de germination de 25% montre que l'*Atriplex halimus* est plus tolérant au stade germination vis-à-vis du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , dans la

mesure où son seuil de toxicité est sensiblement plus élevé que celui du NaCl (5.25 g/l et 6.06 g/l respectivement pour le NaCl et le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

L'analyse de la variance à un critère de classification pour les taux de germination obtenus par l'application du NaCl et du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> montre un effet très hautement significatif de la nature de l'anion accompagnateur du sodium ( $P < 0.0001$ ).

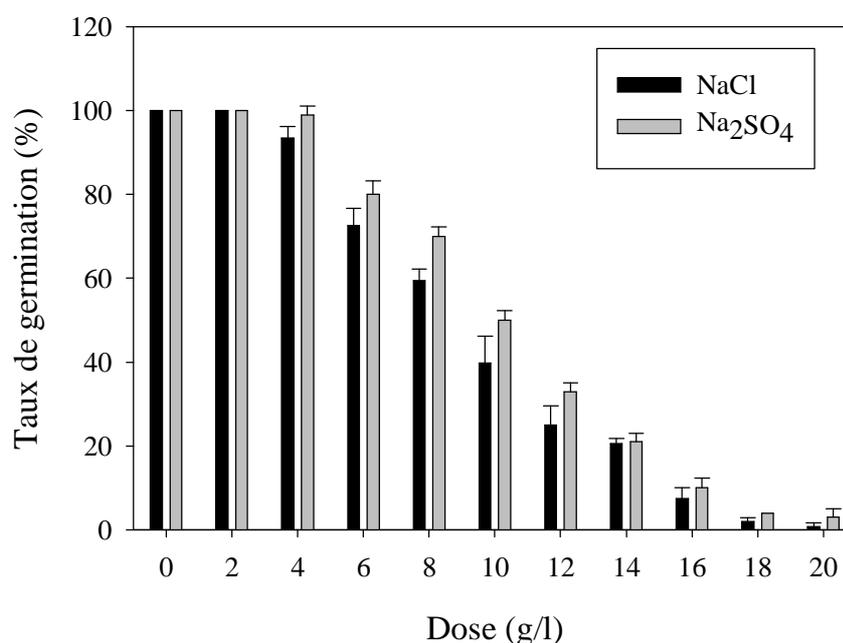


Figure 18. Effet de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=4$  répétitions,  $P < 0.0001$ ).

#### 1.4.2. Effet de la nature du cation accompagnateur du chlore (NaCl/CaCl<sub>2</sub>)

L'augmentation de la concentration du NaCl et du CaCl<sub>2</sub> dans le milieu affecte différemment le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* (figure 19). En effet, le seuil de toxicité vis-à-vis du CaCl<sub>2</sub> est plus élevé que celui du NaCl (7 g/l et 5.05 g/l respectivement pour CaCl<sub>2</sub> et NaCl). Ce résultat suggère que les fortes concentrations en NaCl ont un effet plus néfaste sur le taux de germination que celles du CaCl<sub>2</sub>. L'analyse de la variance montre que la nature du cation accompagnateur

du chlore a un effet significatif sur le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* ( $P < 0.0001$ ).

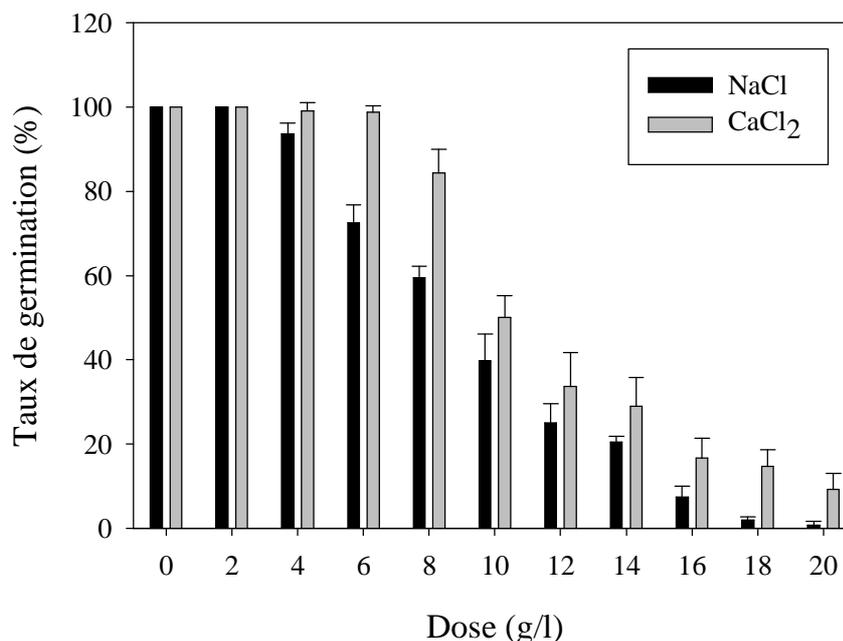


Figure 19. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=4$  répétitions,  $P < 0.0001$ ).

### 1.5. Discussion des résultats

Chez l'*Atriplex halimus*, le taux de germination atteint 75% pour des concentrations de 5.25 g/l NaCl, 6.06 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et 7 g/l CaCl<sub>2</sub>. Ces seuils correspondent respectivement à des pressions osmotiques de l'ordre 0.32, 0.15 et 0.22 Mpa, soit des potentiels osmotiques (exprimés en pF) de 3.12, 3.22 et 3.85. Ces niveaux de potentiels engendrés seulement par la pression osmotique sont proches du point de flétrissement temporaire (généralement fixé à un pF de 3.70) de la majorité des espèces végétales cultivées (Mass, 1990).

Dans l'ensemble, l'allure des courbes du taux et de la vitesse de germination en fonction des doses croissantes des sels est comparable pour les trois sels étudiés, cette allure se caractérise par un retard de la germination et une diminution du taux de germination pour les concentrations les plus stressantes. Des résultats similaires

ont été observés chez d'autres espèces halophytes, comme *Atriplex portulacoides* (Redondo-Gomez et al., 2007), *Halopyrum mucronatum* (Gul et Khan, 2006) et *Plantago crassifolia* (Vicente et al., 2004).

Les graines des halophytes en conditions naturelles sont soumises au stress salin, dont le NaCl est généralement dominant dans la solution du sol. Cependant, d'autres sels de chlorure, et de sulfates peuvent jouer un rôle significatif en affectant la germination des graines (Duan et al., 2004). Les sels peuvent affecter la germination de la graine en limitant l'approvisionnement en eau (stress osmotique) et/ou en provoquant des toxicités spécifiques d'ions (stress ionique) [Abdul Jaleel, et al., 2007].

Les résultats obtenus montrent que la présence des sels solubles dans le milieu retarde la germination et l'inhibe à des concentrations élevées. En effet, la faculté germinative et la vitesse de germination diminuent lorsque la concentration saline augmente. Ces effets peuvent être expliqués par une limitation de la diffusion d'une quantité d'eau nécessaire au déclenchement du processus de germination à l'intérieur des graines en présence des concentrations élevées en chlorure de sodium, en chlorure de calcium, ou en sulfates de sodium [Pujol et al., 2000]. Cette limitation de l'absorption de l'eau résulterait de l'augmentation de la pression osmotique du milieu par la présence de sel qui réduit la disponibilité d'eau pour la semence.

Par ailleurs, certains travaux ont rapporté que les graines des halophytes ne germent pas lorsqu'elles sont exposées à des niveaux élevés de salinité (Debez et al., 2004; Song et al., 2005 ; Khan et al., 2006). Cependant une fois placées dans l'eau distillée, les graines qui n'ont pas germé à des concentrations salines élevées atteignent des taux de germination équivalents à ceux du témoin sans sel. Cette observation suggère que l'inhibition de la germination sous l'effet osmotique est réversible (Li et al., 2005). Des effets semblables sont été observés par Redondo-Gomez et al. (2007), en étudiant la germination chez *Atriplex portulacoides*. Ces auteurs ont trouvé que, pour cette espèce, la présence de sel dans le milieu se traduit par un allongement de la phase de latence (période dans la quelle il n' y a pas de germination), une inhibition de l'imbibition des téguments par l'eau et un

allongement de la période d'extrusion (phase durant la quelle les radicules, percent le tégument).

La comparaison de l'effet de la nature des sels sur le taux de germination, en particulier du couple NaCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (effet de la nature de l'anion, Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et du couple NaCl/CaCl<sub>2</sub> (effet de la nature du cation, Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>) permet de proposer l'ordre de tolérance suivant : Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > NaCl, et CaCl<sub>2</sub> > NaCl.

## 1.6. Conclusion

Ces résultats montrent que le taux de germination et la vitesse sont affectés par les concentrations croissantes des trois sels solubles étudiés avec des intensités spécifiques pour chaque sel. Le seuil critique se situe à 5.25 g/l pour le NaCl, à 6.06 g/l pour Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, et à 7 g/l pour CaCl<sub>2</sub>.

## 2. LA CROISSANCE

Les paramètres étudiés pour caractériser l'influence des concentrations en NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et CaCl<sub>2</sub> sur la croissance d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* sont les productions des matières sèches de la partie aérienne et de la partie racinaire, et l'indice de succulence.

### 2.1. Cas du NaCl

2.1.1. La matière sèche de la partie aérienne : L'examen de la figure 20, montre que l'addition du NaCl produit une augmentation de la production de la matière sèche de la partie aérienne à 4 g/l avec 2.42 mg/plant. Cet effet stimulant disparaît à partir de 8 g/l NaCl, où il se produit une diminution de la quantité de matière sèche produite. L'analyse de la variance montre un effet très hautement significatif des doses de NaCl (P < 0.001).

Selon le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 20), le NaCl affecte de façon significative la production de la biomasse sèche aérienne entre la concentration 6 g/l NaCl qui appartient au groupe (a), et la concentration 8 g/l NaCl qui correspond au groupe (c).

Pour situer de façon précise le seuil de sensibilité de la production de la matière sèche de la partie aérienne, le taux de sa réduction par rapport au témoin et en fonction des concentrations croissantes du milieu de culture en NaCl est calculé. Le taux de réduction de la matière sèche au niveau de la partie aérienne est représenté par l'équation linéaire suivante :

$$y = 5.52 x - 18.77, \quad r = 0.92.$$

Selon cette équation, le seuil critique qui provoque une réduction de 25% de la production de la matière sèche (Mass, 1990) correspond à une concentration de 7.92 g/l NaCl.

**2.1.2. La matière sèche de la partie racinaire :** Selon la figure 20, la valeur maximale à été obtenue par la concentration de 4 g/l de NaCl (0.84 mg/plant). Le passage à des concentrations plus élevées produit une diminution progressive de la biomasse sèche racinaire. Selon les résultats de l'analyse de la variance, les différentes concentrations de NaCl ont un effet très hautement significatif sur la quantité de matière sèche racinaire produite ( $P < 0.001$ ).

D'autre part, d'après le classement des traitements en groupes homogènes selon le test de *Tukey* (figure 20), il s'avère que le sel affecte d'une manière significative la production de la matière sèche au niveau des racines entre les concentrations 6 et 10 g/l.

La recherche de la meilleure fonction d'ajustement statistique de la relation entre le taux de réduction de la matière sèche et la concentration en NaCl, aboutit à une équation de la forme linéaire suivante :

$$y = 4.21 x - 14.46, \quad r = 0.92.$$

Le seuil critique calculé pour une réduction de 25% de la matière sèche (Mass, 1990) est de 9.37 g/l.

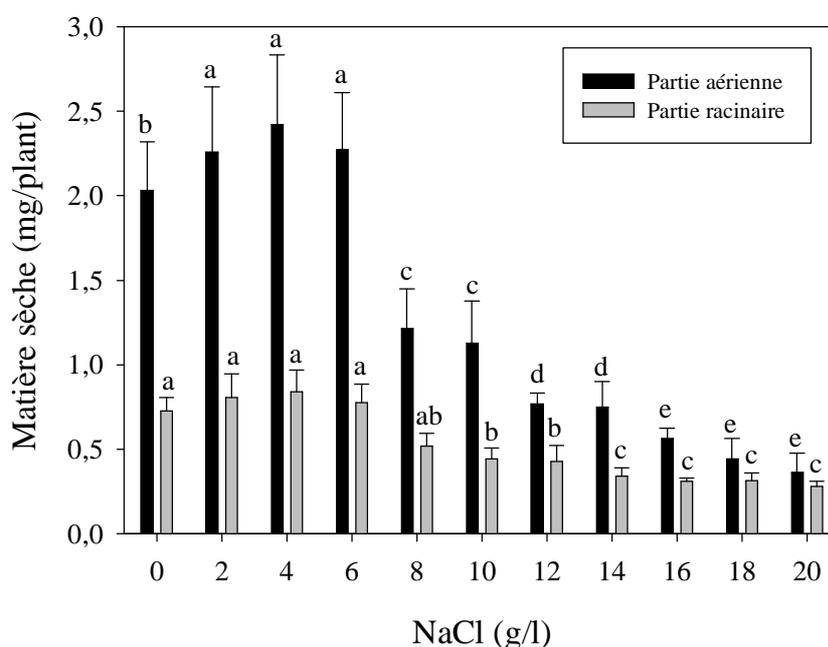
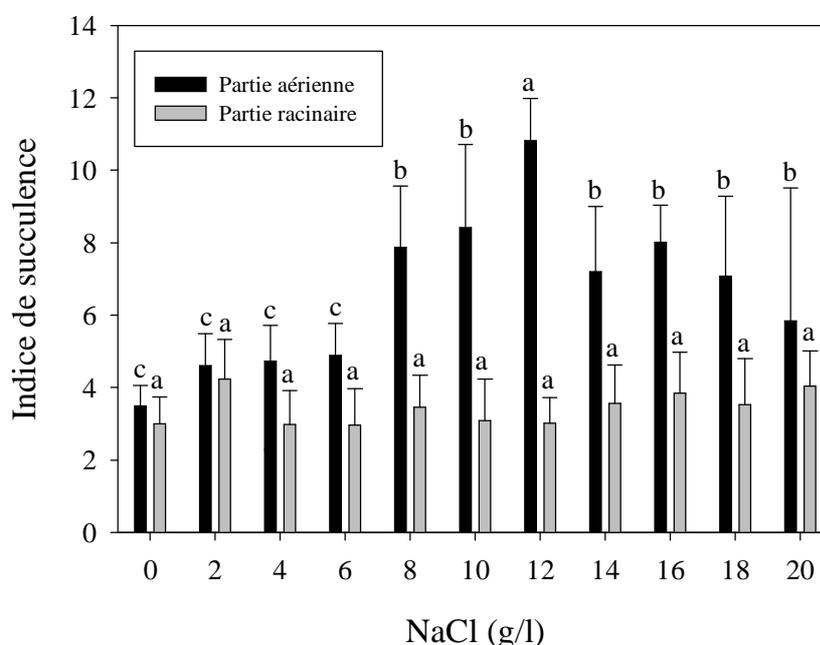


Figure 20. Variation du poids de la matière sèche de la partie aérienne et de la partie racinaire en (mg/plant) de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

Ces résultats montrent que, globalement, l'effet positif du chlorure de sodium se manifeste par une concentration de 4 g de NaCl/l pour la partie aérienne et racinaire. Par ailleurs, le seuil de tolérance concernant la biomasse sèche est de 9.37 g/l pour la biomasse sèche racinaire, et il est de 7.92 g/l pour la biomasse aérienne. Ce résultat suggère que le sel affecte plus rapidement et plus intensément la partie aérienne que la partie racinaire.

**2.1.3. L'indice de succulence :** L'indice de succulence (matière fraîche/matière sèche) au niveau de la partie aérienne augmente avec la concentration en NaCl (figure 21), il passe de 3.49 chez le témoin à 10.81 pour les plantes cultivées dans le milieu contenant 12g/l. Selon l'analyse de la variance, le facteur NaCl exerce un effet très hautement significatif sur l'indice de succulence au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.0001$ ), alors qu'il n'a pas d'effet significatif ( $P > 0.05$ ) sur cet indice au niveau de la partie racinaire (figure 21).



**Figure 21.** Variation de l'indice de succulence (MF/MS) de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction de la concentration en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

## 2.2. Cas du $\text{Na}_2\text{SO}_4$

**2.2.1. La matière sèche de la partie aérienne :** La production la plus élevée (2.57 mg/plant) est obtenue par une concentration de 6 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Au delà, il se produit une diminution de la matière sèche produite jusqu'à une quantité de 0.41 mg/plant à 20 g/l de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (figure 22). Les résultats de l'analyse de la variance montrent que

la concentration de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans le milieu exerce un effet très hautement significatif sur la matière sèche produite au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.001$ ).

Par ailleurs, le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 22), montre qu'il existe une différence significative entre le groupe (b) qui correspond aux concentrations 0 et 2 g/l, et le groupe (a) qui représente les concentrations 4, 6 et 8 g/l de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , suggérant un effet de stimulation de la croissance aérienne par ces dernières concentrations. La différence est significative entre les concentrations 8 et 10 g/l, le seuil de sensibilité de la production de la matière sèche aérienne se situerait dans cet intervalle de concentrations.

Le taux de réduction de la matière sèche en fonction des concentrations croissantes en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se présente selon une équation linéaire de la forme suivante :

$$y = 5.05 x - 26.37, \quad r = 0.88.$$

Le seuil critique provoquant une réduction de 25% de matière sèche (Mass, 1990) correspond à une concentration saline de 10.17 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

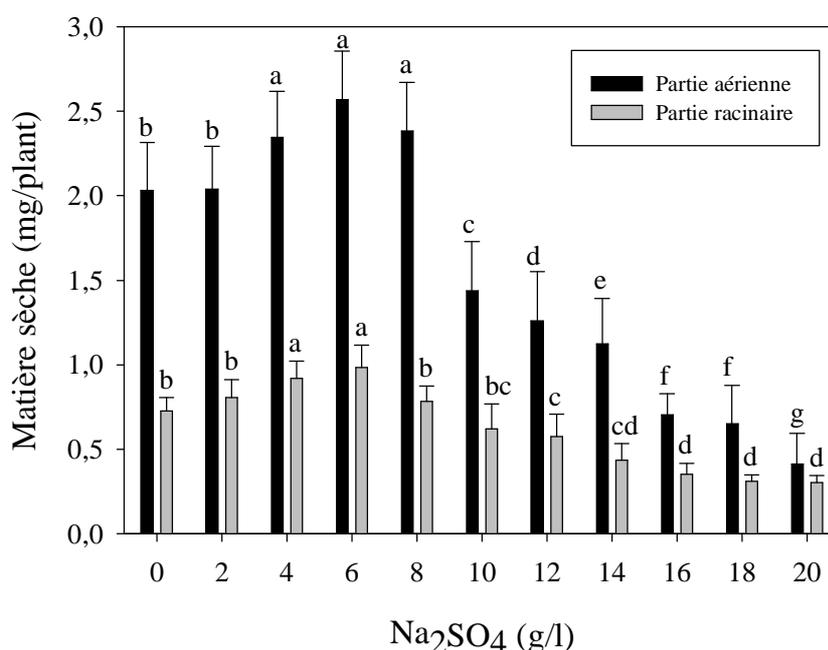
**2.2.2. La matière sèche de la partie racinaire :** Les résultats présentés sur la figure 22, montrent que les concentrations de 4 et 6 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  produisent les quantités de matière sèche racinaire les plus importantes, avec des moyennes respectives de 0.92 et 0.98 mg/plant. Lorsque la concentration augmente à plus de 10 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , la production de matière sèche racinaire diminue fortement. En effet la production la plus faible (0.30 mg/plant) est obtenue par 20 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . L'analyse de la variance montre que l'effet du sel sur la production de matière sèche racinaire est très hautement significatif ( $P < 0.001$ ).

Selon le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 22), les traitements 0, 2 et 8 g/l sont classés dans le groupe (b), le groupe (a) correspond aux doses 4 et 6 g/l, alors que la dose de 12 g/l appartient au groupe (c). Ces résultats suggèrent que le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  diminue d'une façon significative la production de la matière sèche racinaire entre 6 et 12 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

La relation statistique entre le taux de réduction de la biomasse sèche racinaire et la concentration en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , est illustrée par l'équation linéaire suivante :

$$y = 4.44 x - 29.68, \quad r = 0.87.$$

Le seuil critique qui provoque une réduction de 25% de la matière sèche (Mass, 1990) se situe à 12.31 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , soit une valeur dépassant sensiblement la limite supérieure de l'intervalle cité ci-dessus (6 à 12g/l).



**Figure 22.** Variation du poids de la matière sèche de la partie aérienne et de la partie racinaire en (mg/plant) de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

L'effet positif du sulfate de sodium sur la production de matière sèche se manifeste par une concentration de 6 g de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ /l pour la partie aérienne et racinaire. Le seuil de tolérance est de 12.31 g/l pour la biomasse sèche racinaire, et il est de 10.17 g/l pour la biomasse aérienne. Ce résultat suggère que le sel affecte plus rapidement et plus intensément la partie aérienne que la partie racinaire.

**2.2.3. L'indice de succulence :** La figure 23, montre que les doses de 12 et 20 g/l donnent les valeurs de l'indice de succulence les plus élevées (respectivement 8.36 et

8.34). Statistiquement, l'effet des concentrations salines sur cet indice est très hautement significatif pour la partie aérienne ( $P < 0.0001$ ) et pour la partie racinaire ( $P < 0.0012$ ).

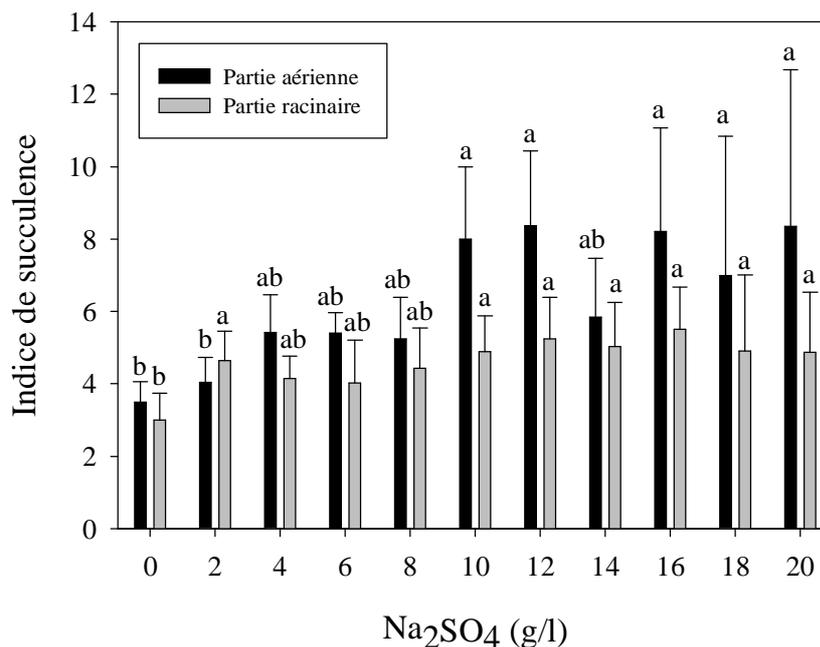


Figure 23. Variation de l'indice de succulence (MF/MS) de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 2.3. Cas du CaCl<sub>2</sub>

2.3.1. La matière sèche de la partie aérienne : Il se produit une augmentation du poids de la matière sèche de la partie aérienne en présence 8 g/l de CaCl<sub>2</sub>, avec une production de 3.02 mg/plant qui est supérieure à celle du témoin (2.03 mg/plant). Ce n'est qu'à 14 g/l de CaCl<sub>2</sub> qu'il se produit une diminution de la matière sèche produite (figure 24). D'après les résultats de l'analyse de la variance, il en ressort un effet très hautement significatif de ce type de sel sur la matière sèche produite par la partie aérienne ( $P < 0.001$ ).

D'autre part, d'après le classement des traitements en groupes homogènes selon le test de *Tukey* (figure 24), il s'avère que le  $\text{CaCl}_2$  affecte d'une manière significative la production de la matière sèche au niveau de la partie aérienne entre les concentrations 8 et 12 g/l.

La recherche de la meilleure fonction d'ajustement statistique de la relation entre le taux de réduction de la matière sèche et la concentration en  $\text{CaCl}_2$ , aboutit à une équation de la forme polynomiale suivante :

$$y = 0.43 x^2 - 6.6 x - 3.81, \quad r = 0.87.$$

Le seuil critique calculé pour un taux de réduction de 25% (Mass, 1990) est de 15.70 g/l

**2.3.2. La matière sèche de la partie racinaire :** Les productions de matière sèche les plus importantes sont obtenues par les concentrations 8, 10, 12 et 14 g/l  $\text{CaCl}_2$  (figure 24). L'analyse de la variance montre que la concentration de  $\text{CaCl}_2$  dans le milieu de culture a une influence très hautement significative sur la matière sèche au niveau de la partie racinaire ( $P < 0.0009$ ).

Par ailleurs, le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 24), montre qu'il existe une différence significative entre le groupe (b) qui correspond au témoin, et le groupe (a) qui représente les traitements allant de 8 à 14 g/l  $\text{CaCl}_2$ , indiquant un effet de stimulation de la croissance racinaire par ces dernières concentrations. Par la suite, la différence entre les traitements n'est pas significative.

Le seuil critique qui provoque une réduction de 25% de la matière sèche (Mass, 1990) est supérieur à 20 g/l  $\text{CaCl}_2$ .

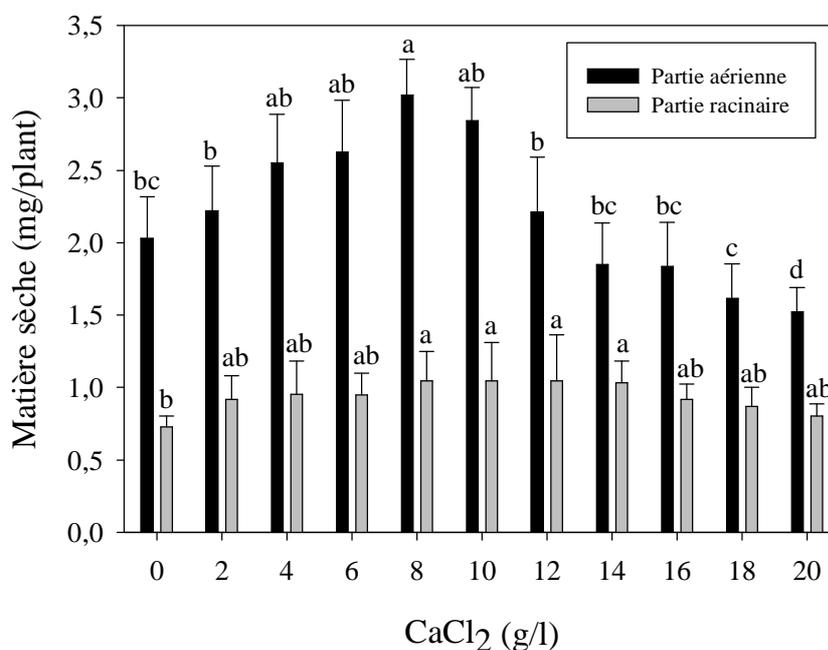


Figure 24. Variation du poids de la matière sèche de la partie aérienne et de la partie racinaire en (mg/plant) de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en CaCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

Globalement, il s'avère que l'effet positif du chlorure de calcium se manifeste par une concentration de 8 g de CaCl<sub>2</sub>/l pour la partie aérienne et entre 8 et 14 g/l CaCl<sub>2</sub> pour la partie racinaire. Par ailleurs, le seuil de tolérance concernant la biomasse sèche est supérieur à 20 g/l pour la biomasse sèche racinaire, et il est de 15.70 g/l pour la biomasse aérienne. Ce résultat montre que le sel affecte plus rapidement et plus intensément la partie aérienne que la partie racinaire.

**2.3.3. L'indice de succulence :** Les résultats de la figure 25, montrent que l'indice de succulence de la partie aérienne augmente à partir de 12 g/l, il atteint une valeur de 6.59 à 20 g/l de CaCl<sub>2</sub>. Par contre, pour la partie racinaire, cet indice varie faiblement entre 0 et 20 g/l de CaCl<sub>2</sub>. Mais l'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif des traitements de CaCl<sub>2</sub> sur l'indice de succulence de la partie aérienne ( $P < 0.001$ ) et de la partie racinaire ( $P < 0.0087$ ).

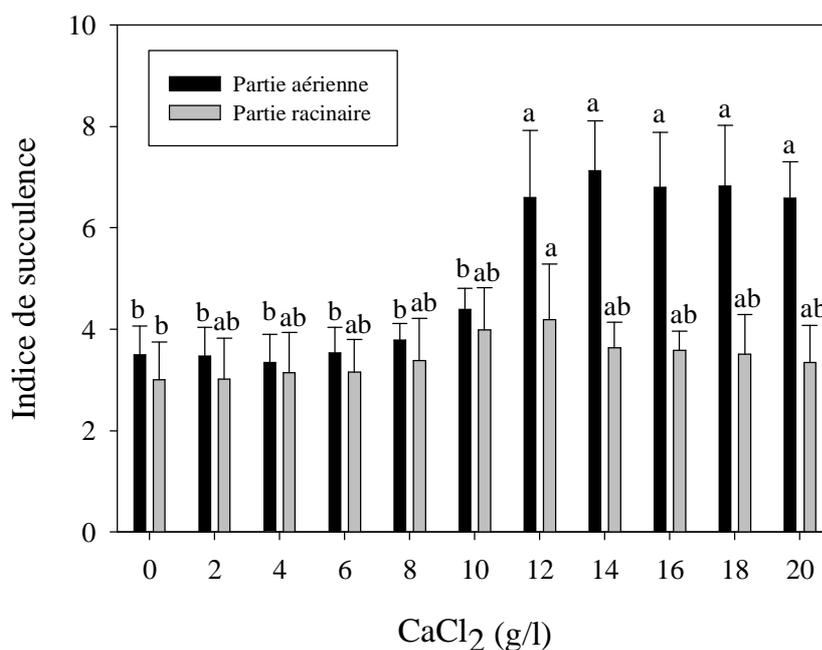


Figure 25. Variation de l'indice de succulence (MF/MS) de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en CaCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$ ). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de Tukey ( $P < 0.05$ ).

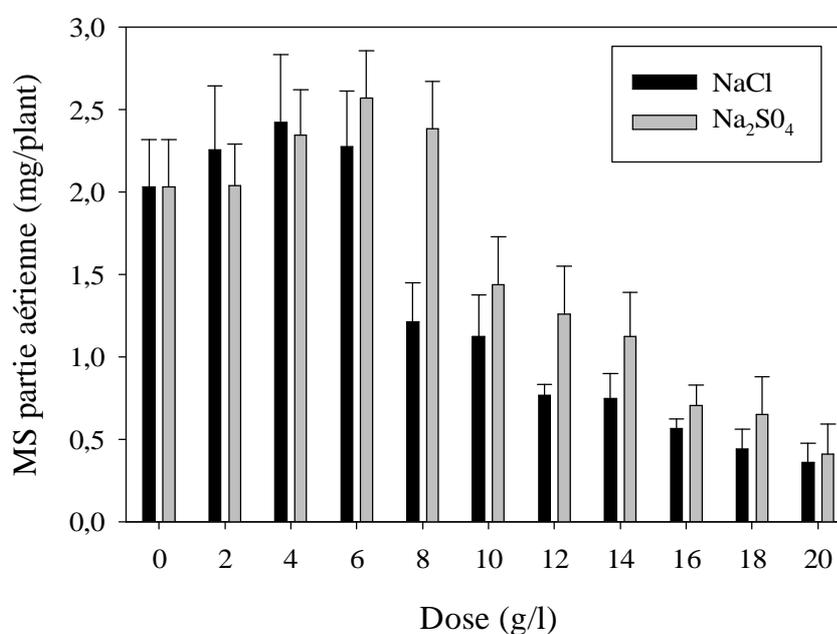
## 2.4. Comparaison de l'effet de la nature des électrolytes sur la matière sèche

### 2.4.1. Effet de la nature de l'anion accompagnateur du sodium (NaCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Après 30 jours de culture, des concentrations de l'ordre de 4 et 6 g/l respectivement pour le NaCl et le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ont conduit à une stimulation de la production de la matière sèche au niveau de la partie aérienne et de la partie racinaire chez les plantules d'*Atriplex halimus* (figures 26 et 27).

L'analyse de la variance montre un effet très hautement significatif de la nature de l'anion accompagnateur du sodium sur la matière sèche produite par la partie aérienne ( $P < 0.0001$ ) et par la partie racinaire ( $P < 0.0001$ ).

Les seuils critiques qui provoquent une réduction de 25% de la matière sèche au niveau de la partie aérienne et racinaire correspondent à des concentrations de 7.92 et de 10.17 g/l au niveau de la partie aérienne, et à des concentrations de 9.37 et de 12.31 g/l au niveau de la partie racinaire, respectivement pour le NaCl et le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Ces résultats montrent, globalement, que l'*Atriplex halimus* est plus tolérant au Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> qu'au NaCl, dans la mesure où son seuil de tolérance de la partie aérienne et racinaire reste supérieur à celui du NaCl.



Figures 26. Effet de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la matière sèche (MS) de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions,  $P < 0.0001$ ).

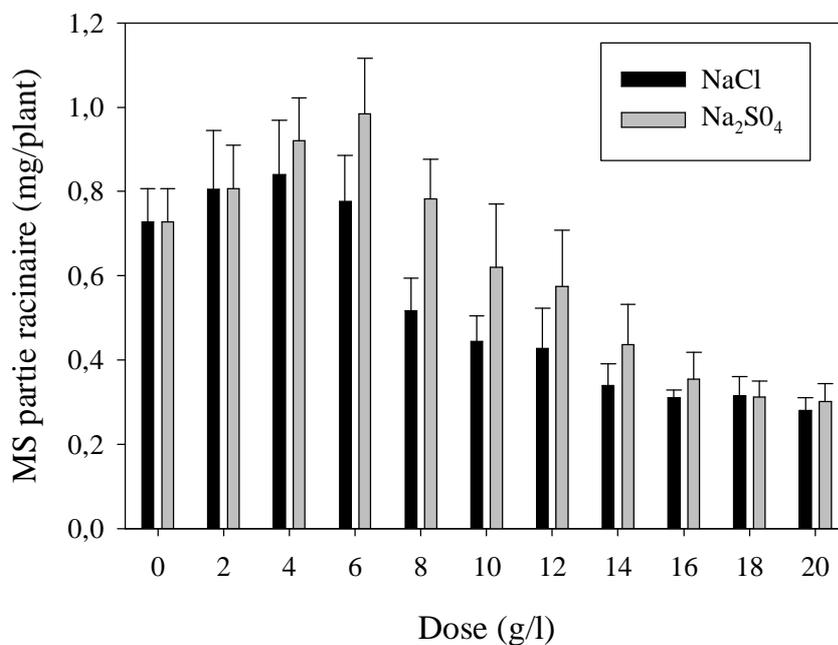


Figure 27. Effet de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la matière sèche (MS) de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions,  $P < 0.0001$ ).

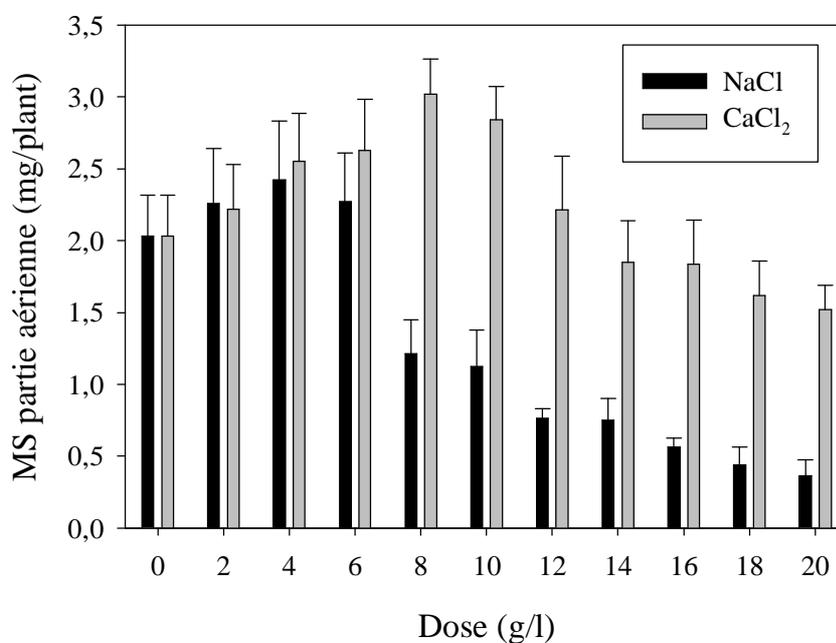
#### 2.4.2. Effet de la nature du cation accompagnateur du chlore (NaCl/CaCl<sub>2</sub>)

Les résultats de l'analyse de la variance montrent que la nature du cation accompagnateur du chlore exerce un effet très hautement significatif sur les matières sèches au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.001$ ) et de la partie racinaire ( $P < 0.001$ ).

La comparaison de l'évolution de la matière sèche au niveau de la partie aérienne et racinaire entre les plantes traitées par le NaCl et celles traitées par le CaCl<sub>2</sub> rend compte d'une différence entre les deux sels testés (figures 28 et 29). D'une façon générale, la production de matière sèche pour les deux sels solubles appliqués est stimulée en présence de sel pour un certain niveau de concentration. En effet la croissance maximale est obtenue par une dose 8 g/l de CaCl<sub>2</sub> comparativement à

4g/l pour le NaCl. Les moyennes calculées pour les deux sels montrent que la matière sèche produite au niveau de la partie aérienne et racinaire est affectée davantage par l'application du NaCl.

Les seuils critiques calculés pour une réduction de 25% de matière sèche sont de 7.92 et 15.70 g/l au niveau de la partie aérienne, et de 9.37 et plus de 20 g/l au niveau de la partie racinaire respectivement pour le NaCl et le CaCl<sub>2</sub>. Ces résultats montrent que les fortes concentrations salines se manifestent davantage par leur effet néfaste sur la croissance aérienne.



**Figure 28.** Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la matière sèche (MS) de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=10$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

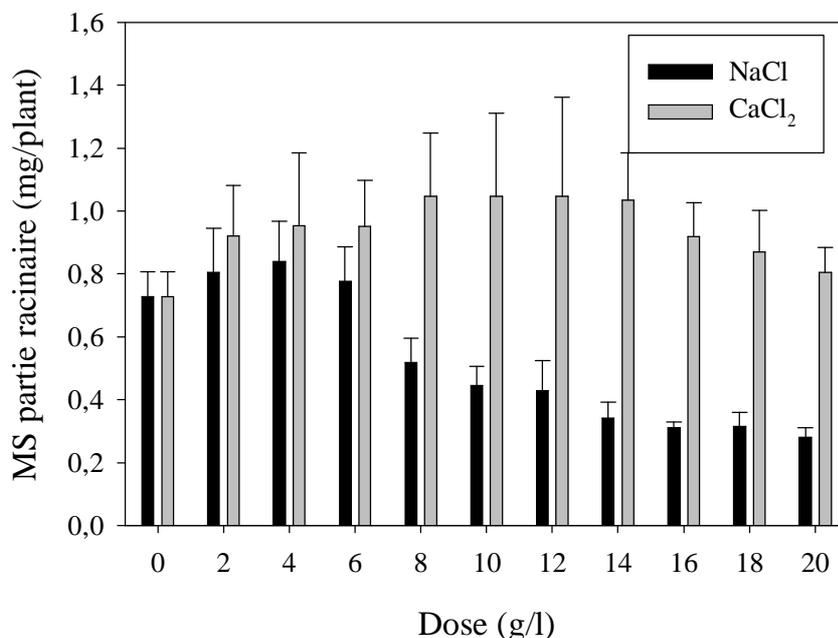


Figure 29. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la matière sèche (MS) de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=10$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

## 2.5. Discussion des résultats

Selon Maas (1986), la tolérance au sel s'exprime habituellement en termes de croissance, de rendement ou de survie. Pour la plupart des plantes étudiées, elle peut être définie par une équation linéaire simple du type :

$$Y_r = 100 - B (CE - A)$$

Où :

Y<sub>r</sub> : représente la croissance ou le rendement

CE : la conductivité électrique de la solution du sol

A : est le seuil de conductivité électrique à partir duquel il se produit une diminution de la croissance.

B : est le pourcentage de réduction de croissance par unité d'augmentation de conductivité électrique au-delà du seuil A.

Pour les fortes concentrations salines, les causes qui sont évoquées pour expliquer le déterminisme de la réduction de la croissance sous l'effet du stress salin sont une diminution du contrôle du statut hydrique (Debez et al., 2006), un déséquilibre nutritionnel et ionique (Teter et Davenport, 2003), une limitation de la division et de la croissance cellulaires (Munns, 1993), un ralentissement de la synthèse protéique et une inhibition de l'activité enzymatique (Radic et al., 2006), une réduction de la capacité photosynthétique suite à la diminution de la conductance stomatique de CO<sub>2</sub> (Wei et al., 2006 ; Brown et Pezeshki, 2007), et une altération du métabolisme hormonal (Wilkinson et Davies, 2002).

La réduction de la croissance peut être aussi liée à des perturbations des taux des régulateurs de croissance (acide abscissique et cytokinine) induites par le stress salin (Khadri et al., 2007), ou à l'augmentation du coût énergétique de la croissance en raison des différentes dépenses supplémentaires couvrant les besoins des transports ioniques et de l'ajustement osmotique qui aboutit à la réduction de la production de biomasse (Volkmar et al., 1998).

Des concentrations de l'ordre de 4, 6 et 8 g/l respectivement de NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et de CaCl<sub>2</sub> ont conduit à une stimulation de la production de la matière sèche chez les plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii*. Des réponses analogues ont été signalées chez d'autres halophytes telles que *Atriplex hortensis* (Wilson et al., 2000); *Atriplex centralasiatica* (Qiu et Lu, 2003); *Atriplex nummularia* (Ramos et al., 2004); *Crithmum maritimum* (Ben Amor et al., 2005) et *Cakile maritima* (Ksouri et al., 2007).

La photosynthèse étant réduite chez les plantes cultivées en milieu salin (Qiu et al., 2003), l'effet dépressif des sels expliquerait la diminution de la croissance. Toutefois, comme la croissance diminue plus tôt que la photosynthèse et, à long terme, décline davantage que cette dernière, l'assimilation du carbone par les plantes serait affectée par la salinité à cause d'une réduction de l'indice foliaire plutôt que du taux de la photosynthèse (Munns, 2002).

Pour situer de façon précise le seuil de sensibilité de la production de la matière sèche au niveau de la partie aérienne et racinaire, les taux de sa réduction par rapport au témoin et en fonction des concentrations croissantes du milieu de culture sont calculés. Les seuils de tolérance qui provoquent une réduction de 25% de la production de la matière sèche au niveau de la partie aérienne et racinaire sont illustrés par le tableau V.

Tableau V. Les seuils de tolérance de la production de matière sèche en fonction des sels appliqués.

Sel	Partie du végétal	Relation statistique	Equation	Seuil de tolérance
NaCl	Partie aérienne	Linéaire	$y = 5.52 x - 18.77$	7.92 g/l
	Partie racinaire	Linéaire	$y = 4.21 x - 14.46$	9.37 g/l
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Partie aérienne	Linéaire	$y = 5.05 x - 26.37$	10.17 g/l
	Partie racinaire	Linéaire	$y = 4.44 x - 29.68$	12.31 g/l
CaCl <sub>2</sub>	Partie aérienne	Polynomiale	$y = 0.43 x^2 - 6,6 x - 3,81$	15.70 g/l
	Partie racinaire	/	/	> 20 g/l

L'espèce se montre plus tolérante au CaCl<sub>2</sub> qu'au Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et NaCl, dans la mesure où son seuil de tolérance de la partie aérienne et racinaire reste supérieur à celui du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et du NaCl. En se basant sur les taux de réduction de la matière sèche, la comparaison pour les trois sels donne l'ordre de tolérance suivant : CaCl<sub>2</sub> > Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > NaCl. L'augmentation de la concentration saline du milieu de culture affecte différemment la partie aérienne et la partie racinaire. En effet, le seuil de toxicité de la partie racinaire (9.37, 12.31 et plus de 20 g/l respectivement pour NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et CaCl<sub>2</sub>) est sensiblement plus élevé que celui de la partie aérienne (7.92, 10.17 et 15.70 g/l respectivement pour NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et CaCl<sub>2</sub>) [tableau VI]. Ce résultat montre que les fortes concentrations salines se manifestent davantage par leur effet néfaste sur la croissance aérienne.

Le calcul de l'indice de succulence (matière fraîche/matière sèche) au niveau de la partie aérienne, montre que celui ci augmente avec la concentration en sel, alors qu'il varie faiblement pour la partie racinaire. Cette succulence accrue permet la mise en

réserve d'une importante quantité d'eau par rapport à la surface de transpiration (Touchette, 2006). La plante peut réduire sa transpiration en fermant ses stomates. La réduction de la transpiration améliore l'état hydrique des tissus car les racines continuent à absorber l'eau alors que la transpiration est réduite. La signalétique du contrôle stomatique fait intervenir des messages de type chimique qui transitent entre les racines et les feuilles par la sève xylémienne, en particulier le pH de la sève (Wilkinson et Davies, 1997) et la concentration d'une hormone végétale (l'acide abscissique) synthétisée par les organes en dessèchement (Janicka-Russak et Klobus, 2007). Les plantes qui synthétisent plus cette hormone gardent un état hydrique plus favorable et survivent plus longtemps au stress salin (Limiting et Zhu, 2003).

La fermeture, même partielle, des stomates au cours de la journée limite instantanément les pertes en eau par transpiration, évite la déshydratation de la plante et, à plus long terme, préserve la réserve hydrique de la plante, contribuant ainsi à stabiliser le rendement. Cependant, le flux de transpiration étant indissociable du flux d'absorption du CO<sub>2</sub>, une diminution de la conductance des stomates limite directement l'assimilation carbonée, et réduit ainsi l'efficacité instantanée de la transpiration (Debez et al. 2006). En situation d'alimentation hydrique insuffisante, la production par les racines de signaux chimiques contrôlant l'ouverture stomatique a été démontrée chez de nombreuses halophytes (He et Cramer, 1996 ; Lu et al., 2002).

Tableau VI. Niveaux de concentrations qui ont un effet positif et/ou négatif sur les paramètres de croissance étudiés.

Paramètres	Effet positif (stimulant)			Effet négatif (toxicité)		
	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>
Germination	-	-	-	5.25	6.06	7
Matière sèche partie aérienne	4	6	8	7.92	10.17	15.70
Matière sèche partie racinaire	4	6	8	9.37	12.31	> 20

### 3. LA NUTRITION MINERALE

Pour les éléments analysés, les résultats obtenus portent sur 3 répétitions. Les données analytiques et les résultats des calculs statistiques sont présentés en annexes.

#### 3.1. Cas du NaCl

##### 3.1.1. Le sodium

La teneur en Na<sup>+</sup> de la partie aérienne augmente avec la concentration en NaCl, elle se démarque très nettement à 8 g/l où sa teneur atteint 177.33 µmol/g MS, elle se poursuit jusqu'à 20 g/l, où le Na<sup>+</sup> tissulaire représente environ 349.77 µmol /g MS. L'analyse de la variance montre que l'augmentation de la concentration en NaCl, a un effet positif et très hautement significatif sur l'accumulation du Na<sup>+</sup> tissulaire chez l'*Atriplex halimus* (P<0.0001). Par ailleurs le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 30), permet de classer les différents traitements dans les groupes homogènes suivants : les concentrations de 16, 18, et 20 g/l sont classées dans le groupe (a), le groupe (b) correspond aux concentrations de 8, 10, 12 et 14 g/l, alors que les concentrations allant de 0 à 6 g/l sont classés dans le groupe (c).

Pour la partie racinaire, il se produit une augmentation progressive des quantités du Na<sup>+</sup> dans les tissus au fur et à mesure que la concentration en NaCl du milieu de culture augmente. L'augmentation la plus forte (132.34 µmol /g MS) est obtenue par le traitement 20 g/l NaCl. L'analyse de la variance montre que la présence du NaCl dans le milieu favorise d'une manière très hautement significative l'accumulation du Na<sup>+</sup> tissulaire au niveau des racines (P < 0.0001). Le test de *Tukey* (figure 30) indique que le traitement 20 g/l est classé dans le premier groupe (a), le groupe (b) correspond à une concentration de 14 g/l, le groupe (c) correspond aux concentrations 10 et 12 g/l, alors que les traitements allant de 0 à 8 g/l sont classés dans le groupe (d).

Par ailleurs, il faut souligner que pour tous les traitements, les teneurs en  $\text{Na}^+$  enregistrées au niveau de la partie aérienne sont supérieures à celles enregistrées dans la partie racinaire. La capacité de ce végétal à accumuler du sodium est donc préférentiellement localisée dans sa partie aérienne.

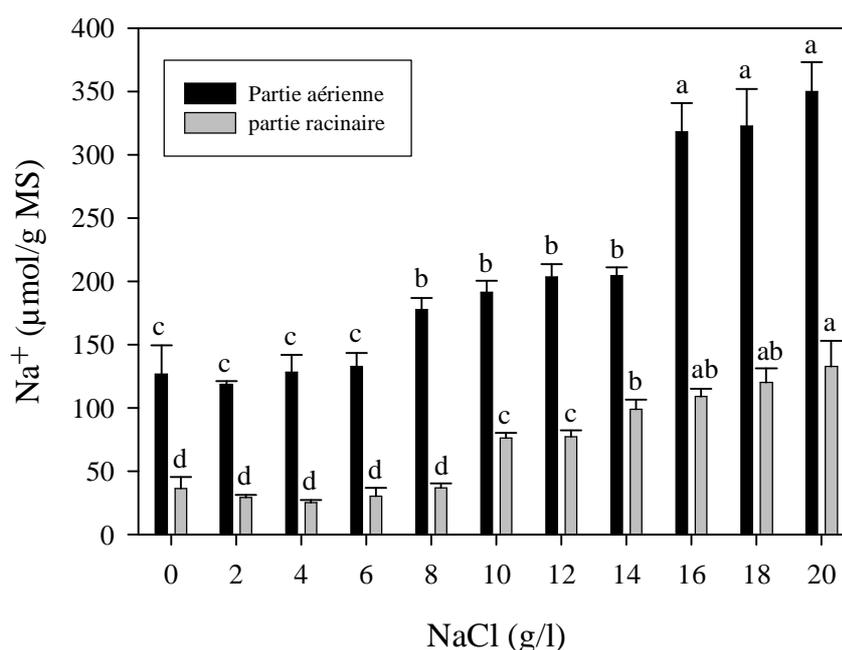


Figure 30. Variation des teneurs en sodium ( $\text{Na}^+$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.1.2. Le potassium

La teneur en  $\text{K}^+$  des tissus de la partie aérienne diminue progressivement au fur et à mesure que la concentration en chlorure de sodium augmente, cette diminution se poursuit jusqu'à 20 g/l. L'analyse de la variance montre qu'il existe une différence très hautement significative entre les différents traitements ( $P < 0.0001$ ). Le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 31), révèle que ce sel affecte particulièrement l'assimilation du potassium entre les concentrations de 2 et 4 g/l de NaCl.

Les teneurs enregistrées dans la partie racinaire des plantes traitées par 0, 2 et 4 g/l de NaCl présentent des valeurs comparables avec des moyennes respectives de 44.52, 43.22 et 41.87  $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ . Par la suite, le potassium accuse une réduction notable de sa teneur pour une concentration de 8 g/l NaCl. Cette teneur est peu modifiée au niveau des racines quand la concentration dépasse les 10 g/l de NaCl. L'analyse de la variance aboutit à un effet très hautement significatif des concentrations en NaCl sur les teneurs en potassium de la partie racinaire ( $P < 0.0001$ ). Selon le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 31), les concentrations de 0, 2,4 et 6 g/l sont classés dans le groupe (a), le second groupe (b) est formé par le traitement 8 g/l de NaCl, et à partir de 12 g/l tous les traitements se classent dans le groupe (c). Ces résultats suggèrent que le NaCl diminue d'une façon significative la teneur du potassium au niveau racinaire entre 6 et 8 g/l de NaCl.

Plus généralement, il faut signaler qu'en dehors les fortes concentrations de NaCl, les teneurs en  $\text{K}^+$  sont toujours plus élevées au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire.

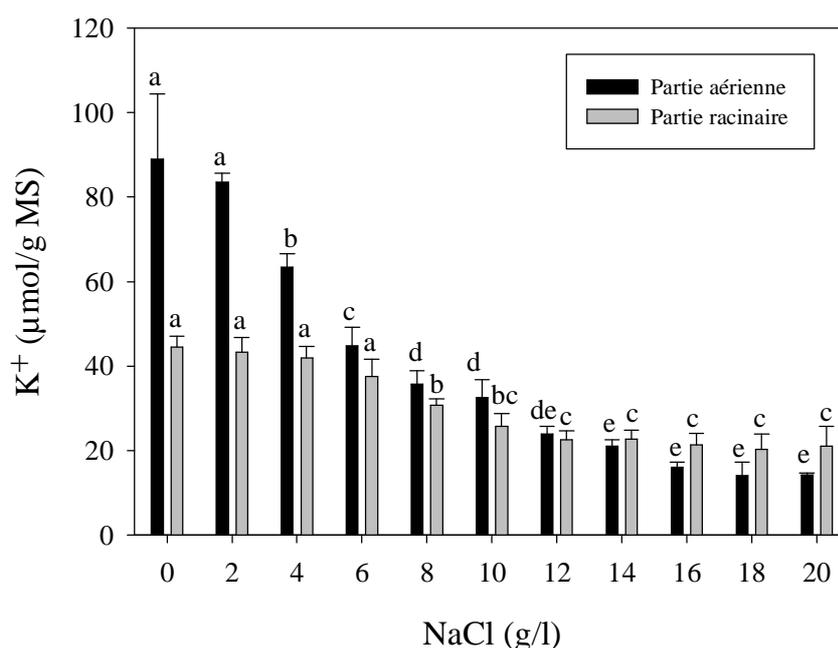


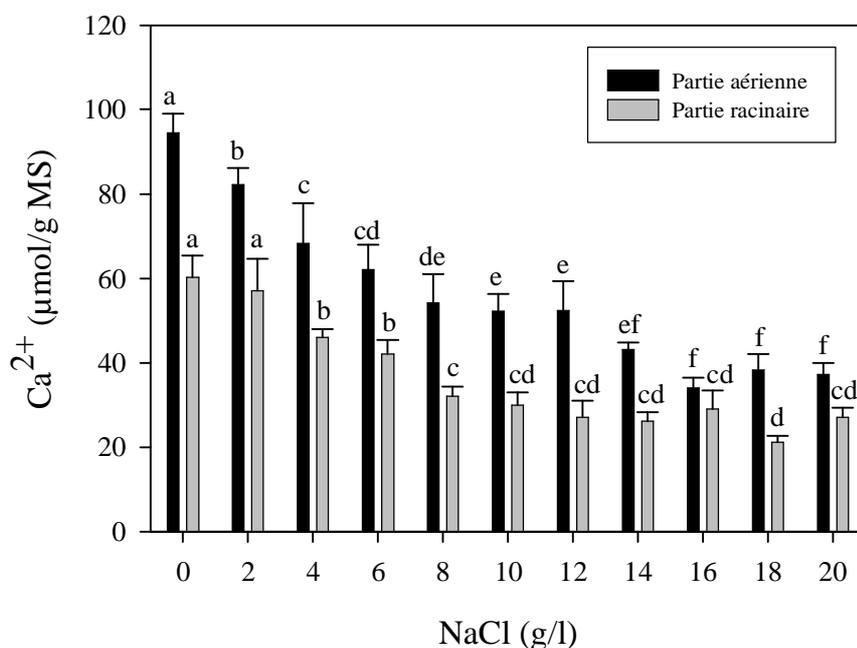
Figure 31. Variation des teneurs en potassium ( $\text{K}^+$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n = 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.1.3. Le calcium

Il se produit une diminution progressive des teneurs en  $\text{Ca}^{2+}$  dans la partie aérienne avec l'augmentation de la concentration en NaCl du milieu. La diminution relative la plus forte est obtenue par le traitement 20 g/l en NaCl. L'analyse de la variance montre que l'effet du NaCl sur la teneur en calcium au niveau de la partie aérienne est très hautement significatif au seuil de 5% ( $P < 0.0001$ ). Le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 32), classe le traitement 0 g/l dans le groupe (a), alors que la concentration de 2 g/l est représentée par le groupe (b). Ce résultat signifie que ce sel affecte d'une manière significative la teneur en calcium au niveau de la partie aérienne entre 0 et 2 g/l NaCl.

Pour la partie racinaire, les résultats montrent qu'au dessus de 4 g/l, les effets de NaCl réduisent nettement l'assimilation du calcium. En effet, il se produit une diminution très prononcée de la teneur du calcium tissulaire au niveau des racines lorsque la plante se développe en présence de 6 g/l de NaCl. L'analyse de la variance montre que la concentration en NaCl a une influence très hautement significative sur la teneur en calcium des tissus racinaires ( $P < 0.0001$ ). Selon le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 32), le NaCl affecte de façon significative la teneur du  $\text{Ca}^{2+}$  au niveau des racines entre la concentration 2 g/l NaCl qui appartient au groupe (a), et la concentration 4 g/l NaCl qui correspond au groupe (b).

Les teneurs enregistrées en  $\text{Ca}^{2+}$  sont plus élevées au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire.



**Figure 32.** Variation des teneurs en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.1.4. Le Chlore

La teneur en  $\text{Cl}^-$  de la partie aérienne se différencie à partir 4 g/l de NaCl (elle atteint 27.06  $\mu\text{mol/g MS}$ ). Les concentrations de 18 et 20 g/l présentent les valeurs les plus élevées (respectivement 88.09 et 97.03  $\mu\text{mol/g MS}$ ). Statistiquement, la différence entre les différentes concentrations de NaCl est très hautement significative au seuil de 5% ( $P < 0.0001$ ). Le test de *Tukey* au seuil de 5%, révèle que le témoin présente la plus faible teneur en  $\text{Cl}^-$  et se classe dans le groupe (e), tandis que les traitements 18 et 20 g/l présentent les plus fortes teneurs en cet élément et se classent dans le groupe (a) [figure 33].

Les teneurs en  $\text{Cl}^-$  observées dans les tissus racinaires augmentent progressivement en fonction des concentrations en NaCl, cette augmentation se poursuit jusqu' à

20 g/l où le chlore tissulaire représente 79.06  $\mu\text{mol/g}$  MS, rappelons que le témoin présente une teneur en  $\text{Cl}^-$  de 18.10  $\mu\text{mol/g}$  MS. L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les différents traitements en NaCl ( $P < 0.0001$ ). Le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 33), indique que la plus forte teneur en  $\text{Cl}^-$  est obtenue par la concentration de 20 g/l de NaCl, ce traitement correspond au groupe (a). Le témoin présente la plus faible teneur en  $\text{Cl}^-$  et se classe dans le groupe (e).

Pour les fortes concentrations en NaCl, les teneurs en  $\text{Cl}^-$  sont plus importantes au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire.

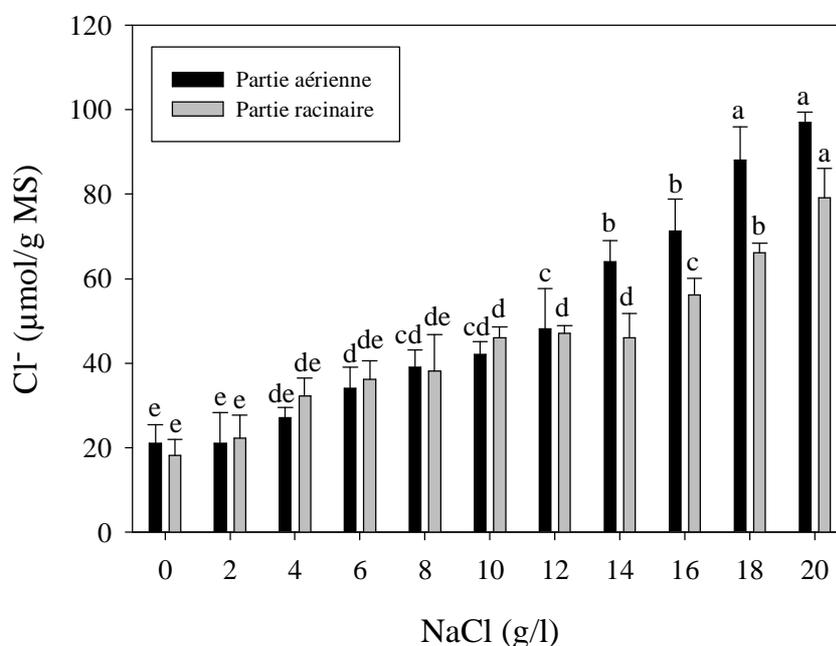


Figure 33. Variation des teneurs en chlore ( $\text{Cl}^-$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.1.5. Le Phosphore

Les teneurs en  $\text{PO}_4^{3-}$  de la partie aérienne diminuent progressivement au fur et à mesure que la concentration en NaCl augmente dans le milieu, cette diminution se poursuit jusqu' à 20 g/l lorsque le phosphore tissulaire représente une teneur de 8.33  $\mu\text{mol/g MS}$ , le témoin présente une teneur de 37.43  $\mu\text{mol/g MS}$ . Il se produit donc une réduction d'environ 77% des teneurs en  $\text{PO}_4^{3-}$  tissulaires entre le témoin et la plus forte concentration en NaCl (figure 34). L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative ( $P < 0.0001$ ) entre les différents traitements.

Les résultats concernant la quantité du  $\text{PO}_4^{3-}$  accumulée au niveau des racines montrent une diminution dès que la plante reçoit 2 g/l de NaCl (16.07  $\mu\text{mol/g MS}$ ). Par ailleurs, cette teneur est peu modifiée au niveau des racines quand la concentration dépasse les 12g/l de NaCl (figure 34). L'analyse de la variance aboutit à un effet très hautement significatif des traitements sur la teneur du  $\text{PO}_4^{3-}$  au niveau de la partie racinaire ( $P < 0.0001$ ).

Globalement, il s'avère que pour tous les traitements, les teneurs en  $\text{PO}_4^{3-}$  enregistrées sont plus importantes au niveau de la partie aérienne que racinaire. En outre, les diminutions des teneurs observées pour les concentrations croissantes en NaCl sont plus intenses dans la partie racinaire.

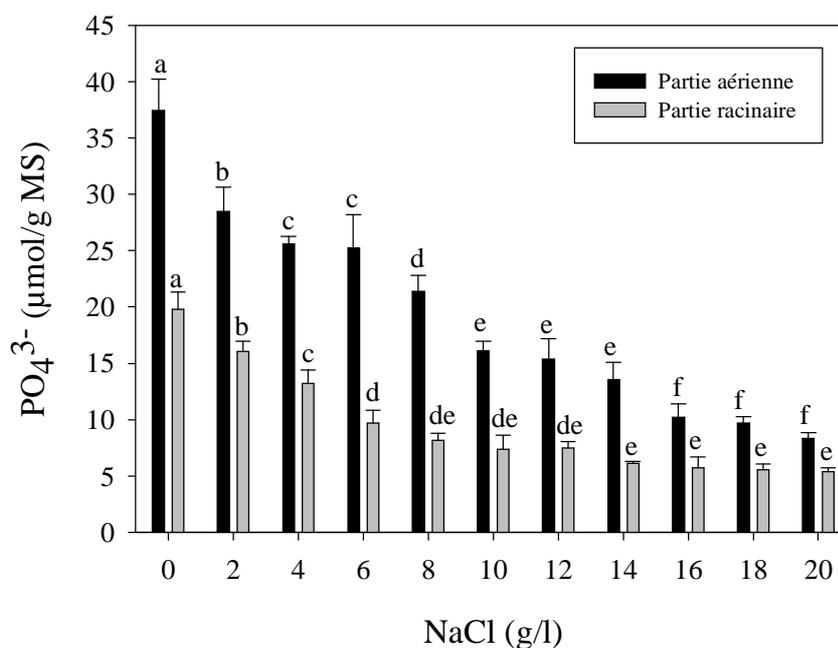


Figure 34. Variation des teneurs en phosphore ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.1.6. L'azote

Les teneurs en azote de la partie aérienne diminuent progressivement au fur et à mesure que la concentration en NaCl augmente, cette diminution se poursuit jusqu'à la concentration la plus stressante (20 g/l) où l'azote total représente une teneur de 23.97mg/g MS (figure 35). Les résultats de l'analyse de la variance montrent une différence très hautement significative entre les différents traitements de NaCl ( $P < 0.0001$ ).

Au niveau des racines, il se produit une faible diminution de la quantité d'azote tissulaire avec l'augmentation de NaCl, particulièrement à 2 g/l lorsque la teneur atteint 20.40 mg/g MS, le témoin présente une teneur de 23.90 mg/g MS. Par contre,

les résultats obtenus avec le reste des traitements montrent que le contenu en azote tissulaire est peu modifié au niveau des racines (figure 35). L'analyse de la variance donne une différence très hautement significative entre les différentes concentrations étudiées ( $P < 0.0001$ ).

Il faut signaler que les quantités d'azote enregistrées au niveau de la partie aérienne sont toujours plus importantes que celles des racines.

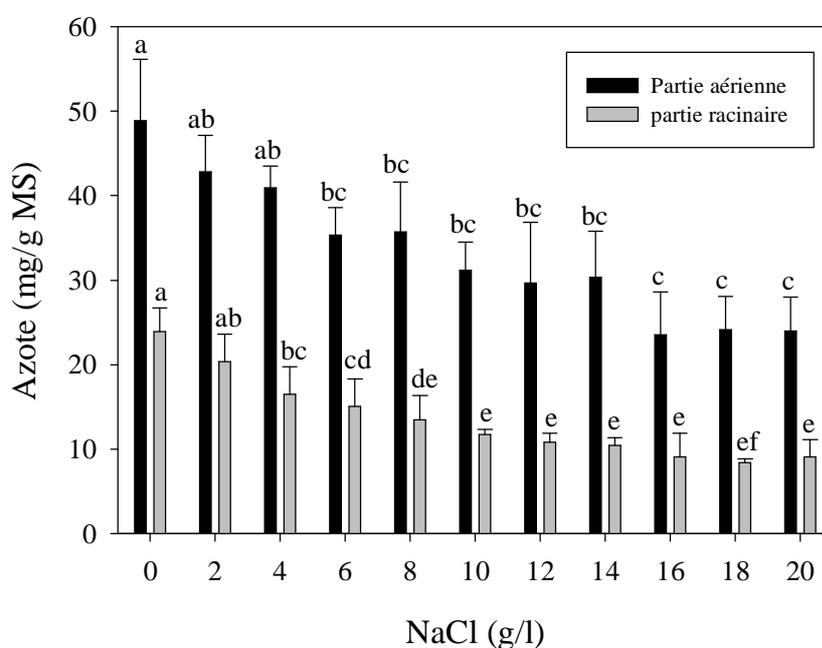


Figure 35. Variation des teneurs en azote des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

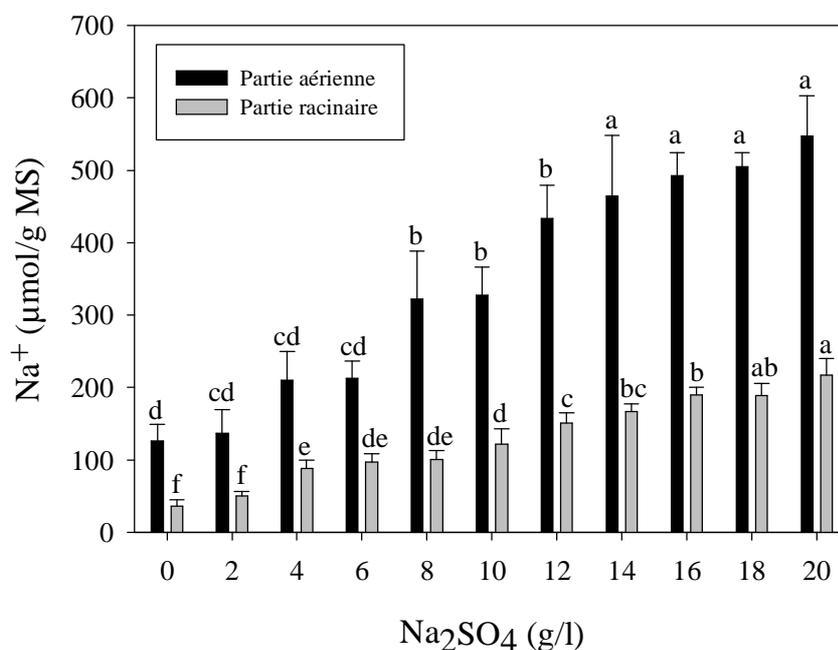
## 3.2. Cas du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

### 3.2.1. Le sodium

La concentration en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dans le milieu entraîne une augmentation progressive des teneurs en Na<sup>+</sup> au niveau de la partie aérienne. Les milieux extrêmes (milieu témoin et milieu à 20g/l NaCl), donnent des teneurs respectives de 126.56 et 547.43 µmol/g MS, soit une augmentation de 76% (figure 36). Statistiquement, il en ressort que l'augmentation progressive de la concentration du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a un effet très hautement significatif sur l'accumulation du Na<sup>+</sup> au niveau de la partie aérienne chez l'*Atriplex halimus* (P<0.0001). Le test de *Tukey* au seuil de 5%, révèle que le témoin présente la plus faible teneur en Na<sup>+</sup> et se classe dans le groupe (d), tandis que les traitements allant de 14 à 20 g/l présentent les plus fortes teneurs en cet élément et se classent dans le groupe (a)

Les teneurs en Na<sup>+</sup> obtenues dans les tissus racinaires montrent une augmentation progressive des quantités du Na<sup>+</sup> en fonction de la concentration en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, cette augmentation se poursuit jusqu' à 20 g/l lorsque le Na<sup>+</sup> tissulaire représente une teneur de 217.14 µmol/g MS, le témoin présente une teneur de 36.14 µmol/g MS (figure 36). Les données de l'analyse de la variance révèlent une différence très hautement significative entre les différents traitements en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (P<0.0001).

Par ailleurs, il faut souligner que pour tous les traitements, les teneurs en Na<sup>+</sup> enregistrées au niveau de la partie aérienne sont supérieures à celles enregistrées dans la partie racinaire. La capacité de ce végétal à accumuler du Na<sup>+</sup> est donc préférentiellement localisée dans sa partie aérienne.



**Figure 36.** Variation des teneurs en sodium ( $\text{Na}^+$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de **Tukey** ( $P < 0.05$ ).

### 3.2.2. Le potassium

La présence du sulfate de sodium affecte sérieusement l'absorption du  $\text{K}^+$  au niveau de la partie aérienne. En effet la teneur de ce dernier diminue brusquement avec les concentrations élevées de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les résultats de l'analyse de la variance montrent qu'il existe une différence très hautement significative entre les différents traitements étudiés ( $P < 0.0001$ ).

Le test de **Tukey** au seuil de 5% (figure 37), révèle que ce sel affecte particulièrement l'assimilation du potassium entre les concentrations de 2 et 4 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Dans la partie racinaire, il se produit une diminution de la quantité du  $K^+$  tissulaire avec l'augmentation de  $Na_2SO_4$ , particulièrement à 2 et 4g/l, avec des moyennes respectives de  $36.42\mu\text{mol/g MS}$  et  $32.20\mu\text{mol/g MS}$ , le témoin présente une teneur de  $44.52\mu\text{mol/g MS}$ . Par la suite, les résultats obtenus avec le reste des traitements montrent que le contenu du  $K^+$  tissulaire est peu modifié. Selon les résultats de l'analyse de la variance, les différentes doses de  $Na_2SO_4$  ont un effet très hautement significatif sur la quantité du  $K^+$  accumulée au niveau des racines ( $P < 0.0001$ ). Selon le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 37), le  $Na_2SO_4$  affecte de façon significative la teneur du  $K^+$  au niveau des racines entre la concentration 4 g/l de  $Na_2SO_4$  qui appartient au groupe (a), et la concentration 6 g/l de  $Na_2SO_4$  qui correspond au groupe (b).

Plus généralement, il faut signaler que les teneurs en  $K^+$  de la partie aérienne sont toujours supérieures à celles de la partie racinaire.

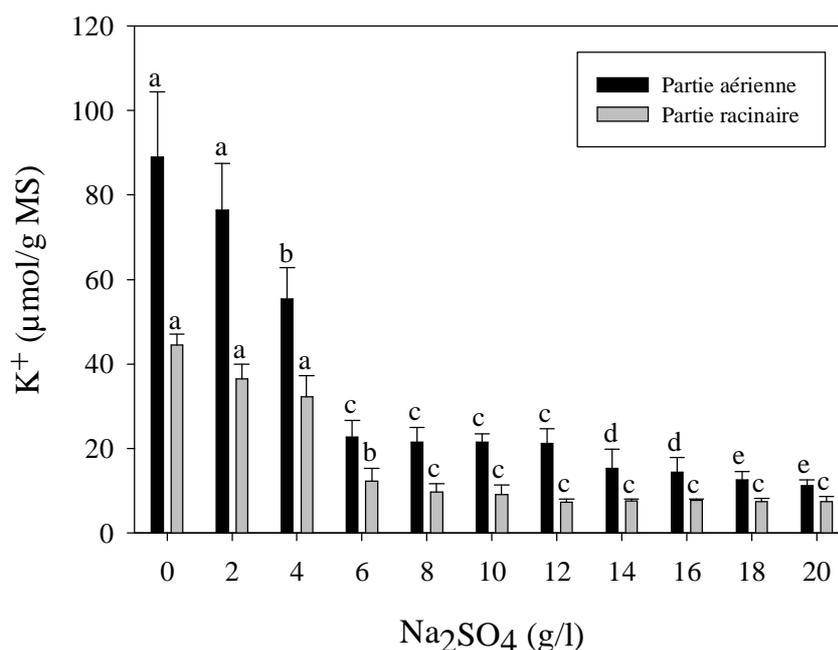


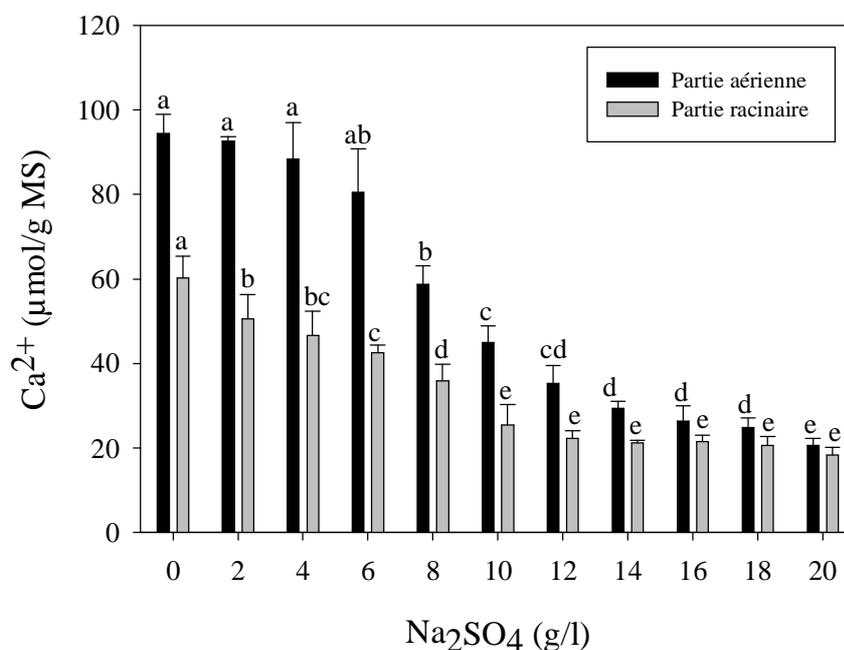
Figure 37. Variation des teneurs en potassium ( $K^+$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $Na_2SO_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.2.3. Le calcium

La teneur en  $\text{Ca}^{2+}$  dans la partie aérienne diminue avec l'augmentation de la concentration du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . L'absorption de cet élément est affectée dès que la plante reçoit 4 g/l. À 20g/l de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , les quantités absorbées en  $\text{Ca}^{2+}$  (20.67  $\mu\text{mol/g MS}$ ) ne représentent que 21 % par rapport au témoin. L'analyse de la variance met en évidence une différence très hautement significative entre les différentes concentrations étudiées ( $P < 0.0001$ ). Le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 38), classe les traitements 0,2 et 4 g/l dans le groupe (a), alors que la concentration de 8 g/l est représentée par le groupe (b). Ce résultat signifie que ce sel affecte d'une manière significative la teneur en calcium au niveau de la partie aérienne entre 4 et 8 g/l NaCl.

L'accumulation du  $\text{Ca}^{2+}$  au niveau de la partie racinaire diminue progressivement au fur et à mesure que la concentration en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  augmente dans le milieu, cette diminution se poursuit jusqu' à 20 g/l lorsque le  $\text{Ca}^{2+}$  tissulaire représente 18.32  $\mu\text{mol/g MS}$ , le témoin présente une teneur de 60.24  $\mu\text{mol/g MS}$ . L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les différents traitements de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ( $P < 0.0001$ ). Selon le test de *Tukey* au seuil de 5% (figure 38), ce sel affecte d'une manière significative la teneur en  $\text{Ca}^{2+}$  au niveau de la partie racinaire entre 0 et 2 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Il faut indiquer que les quantités de  $\text{Ca}^{2+}$  enregistrées au niveau de la partie aérienne sont toujours supérieures à celles observées dans la partie racinaire.



**Figure 38.** Variation des teneurs en potassium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

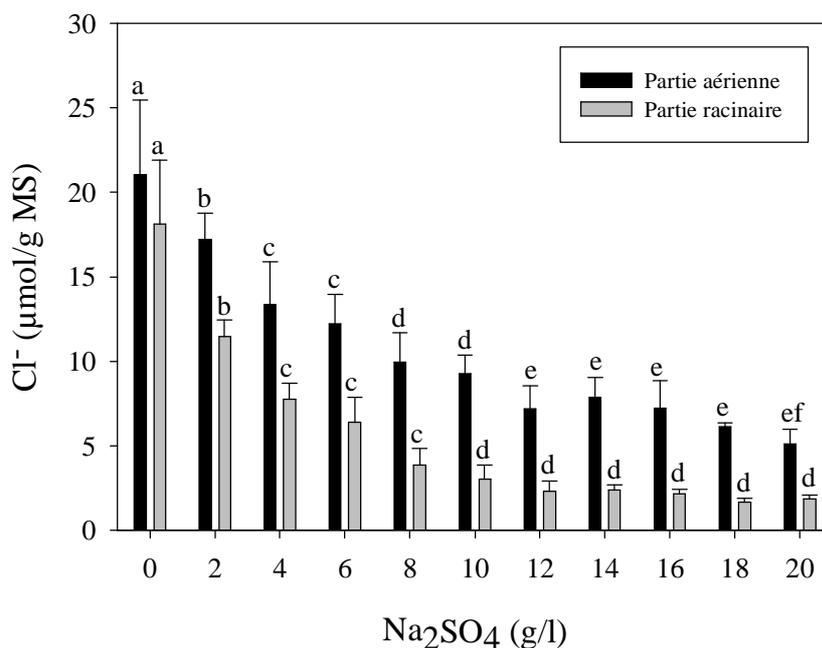
### 3.2.4. Le Chlore

Il se produit une diminution progressive des teneurs en  $\text{Cl}^-$  dans la partie aérienne avec l'augmentation de la concentration en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  du milieu. La diminution relative la plus forte est obtenue par le traitement 20 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  lorsque la teneur atteint 5.12  $\mu\text{mol/g MS}$  (figure 39). L'analyse de la variance révèle que l'effet du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur l'accumulation du  $\text{Cl}^-$  au niveau de la partie aérienne est très hautement significatif au seuil de 5% ( $P < 0.0001$ ).

Les teneurs en  $\text{Cl}^-$  des tissus de la partie racinaire des plantes diminuent jusqu'à 8 g/l de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Par la suite, la teneur de cet élément varie faiblement bien que la concentration en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  du milieu augmente (figure 39). Statistiquement, les

différentes concentrations de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ont un effet très hautement significatif sur les teneurs en  $\text{Cl}^-$  des racines au seuil de 5% ( $P < 0.0001$ ).

En outre, les diminutions des teneurs en  $\text{Cl}^-$  observées pour les concentrations croissantes en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sont plus intenses dans la partie racinaire.



**Figure 39.** Variation des teneurs en chlore ( $\text{Cl}^-$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.2.5. Le Phosphore

L'augmentation de la concentration du milieu en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  provoque une diminution progressive du  $\text{PO}_4^{3-}$  assimilé au niveau de la partie aérienne. La teneur observée est de  $37.43 \mu\text{mol/g MS}$  pour le témoin, alors qu'elle atteint  $10.87 \mu\text{mol/g MS}$  pour la concentration la plus élevée ( $20 \text{g/l}$  de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), soit une réduction de 70% (figure 40). L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les différents traitements de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  utilisés ( $P < 0.0001$ ).

Les teneurs en  $\text{PO}_4^{3-}$  obtenues au niveau des racines diminuent au fur et à mesure que la concentration en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  augmente dans le milieu de culture. La diminution relative la plus forte est obtenue par le traitement 20 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (figure 40). Les résultats d'analyse de la variance montrent que la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans le milieu influe d'une manière très hautement significative l'assimilation du  $\text{PO}_4^{3-}$  au niveau des racines ( $P < 0.0001$ ).

Globalement, il s'avère que pour tous les traitements, les teneurs en  $\text{PO}_4^{3-}$  enregistrées sont plus importantes au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire.

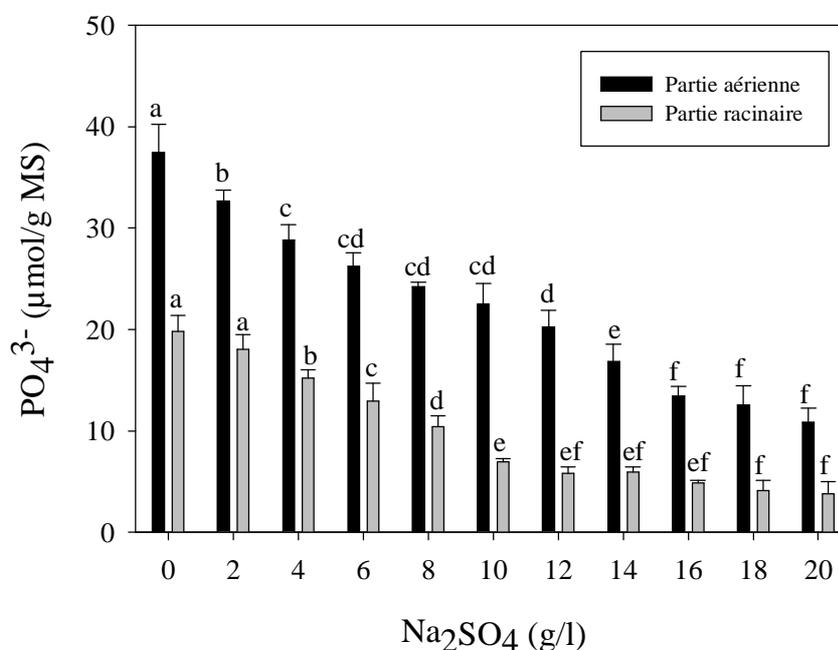


Figure 40. Variation des teneurs en phosphore ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.2.6. Le sulfate

Dans la partie aérienne, l'accumulation du  $\text{SO}_4^{2-}$  progresse selon la concentration en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (figure 41). Statistiquement, il en ressort que l'augmentation de la concentration du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a un effet très hautement significatif sur la teneur en  $\text{SO}_4^{2-}$  tissulaire chez *Atriplex halimus* ( $P < 0.0001$ ).

Au niveau des racines, aux faibles doses de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , les teneurs en  $\text{SO}_4^{2-}$  restent comparables à celle du témoin. Mais au-delà de 8 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , elles augmentent de façon notable (figure 41). Selon les résultats de l'analyse de la variance, les différentes doses de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ont un effet très hautement significatif sur la quantité du  $\text{SO}_4^{2-}$  accumulée au niveau des racines ( $P < 0.0001$ ).

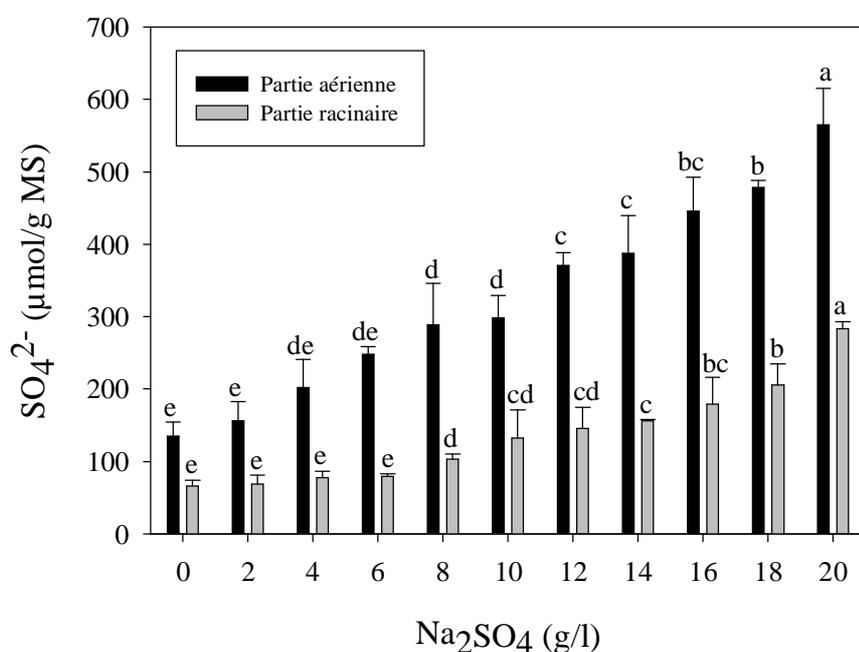


Figure 41. Variation des teneurs en sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.2.7. L'azote

Les teneurs en azote total des tissus de la partie aérienne diminuent progressivement en fonction de la concentration en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  du milieu, cette diminution se poursuit jusqu' à 20 g/l, où l'azote représente 25.17 mg/g MS (figure 42). Selon les résultats de l'analyse de la variance, les différentes doses de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ont un effet très hautement significatif sur la quantité d'azote accumulée au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.0001$ )

Il se produit une faible diminution de la quantité d'azote au niveau des racines particulièrement à 2 et 4g/l, avec des moyennes respectives de 23.37 et 20.50 mg/g MS, par rapport au témoin qui présente une teneur de 23.90 mg/g MS. Par contre, au-delà de 12g/l, bien que la concentration en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  du milieu augmente, le contenu d'azote varie faiblement (figure 42). Les résultats de l'analyse de la variance montrent qu'il existe une différence très hautement significative entre les différentes concentrations ( $P < 0.0001$ ).

Il faut signaler que les quantités d'azote enregistrées au niveau de la partie aérienne sont supérieures à celles observées dans la partie racinaire.

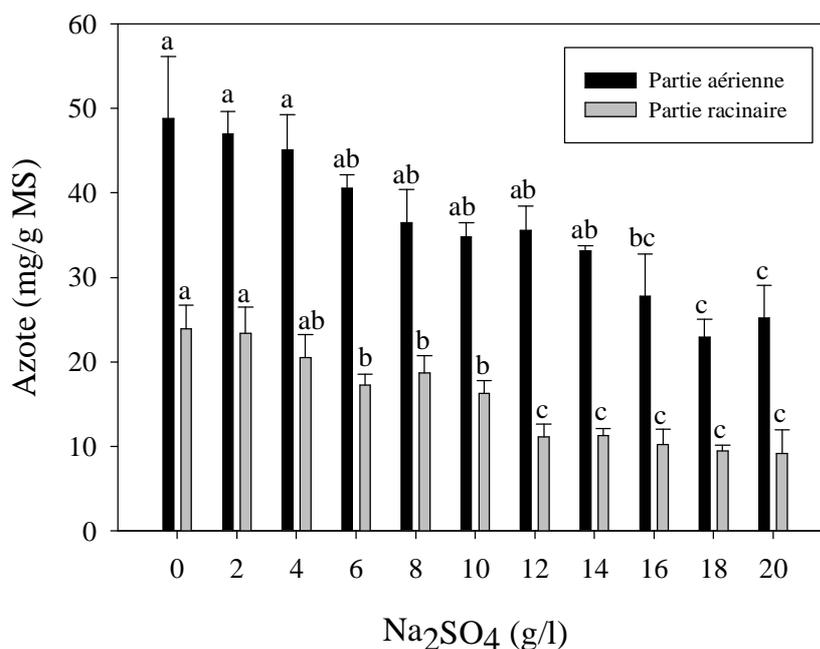


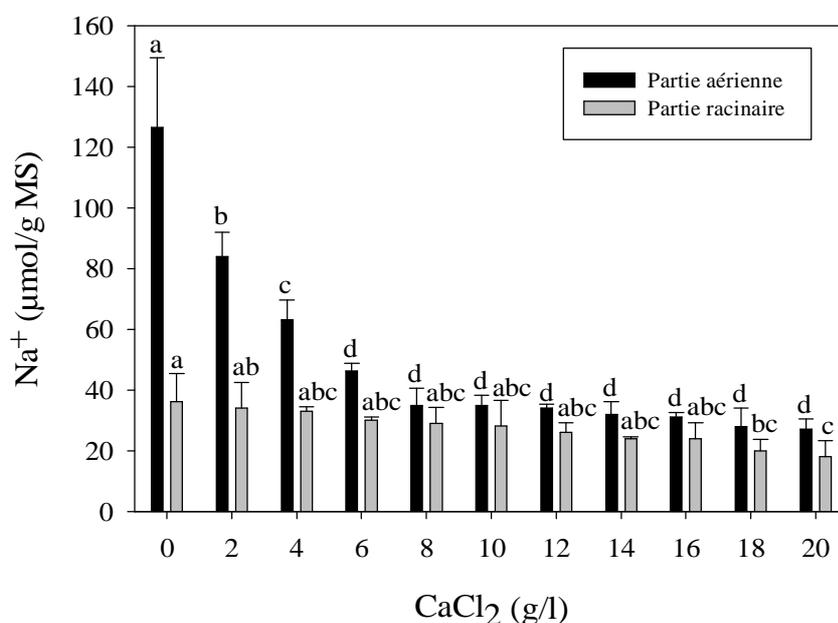
Figure 42. Variation des teneurs en azote des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.3. Cas du CaCl<sub>2</sub>

#### 3.3.1. Le sodium

Il se produit une diminution progressive des teneurs en Na<sup>+</sup> dans la partie aérienne avec l'augmentation de la concentration en CaCl<sub>2</sub> du milieu. La diminution relative la plus forte est obtenue par le traitement 20g/l de CaCl<sub>2</sub> (figure 43). L'analyse de la variance montre que l'effet du CaCl<sub>2</sub> sur l'accumulation du sodium au niveau de la partie aérienne est très hautement significatif au seuil de 5% ( $P < 0.0001$ ).

La teneur en Na<sup>+</sup> tissulaire au niveau des racines diminue avec l'augmentation de la concentration du CaCl<sub>2</sub> (figure 43). L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les différentes concentrations étudiées ( $P < 0.05$ ).



**Figure 43.** Variation des teneurs en sodium ( $\text{Na}^+$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.3.2. Le potassium

Les teneurs en  $\text{K}^+$  enregistrées dans la partie aérienne des plantes traitées par des doses allant de 0 à 12 g/l  $\text{CaCl}_2$  présentent des valeurs comparables. Par la suite, le  $\text{K}^+$  accuse une augmentation de sa teneur dès que la plante reçoit 14 g/l  $\text{CaCl}_2$ , et c'est la dose 20 g/l qui se dégage des autres en présentant la valeur la plus élevée (411.12  $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) [figure 44]. L'analyse de la variance révèle une différence très hautement significative entre les différents traitements en  $\text{CaCl}_2$  ( $P < 0.0001$ ).

Au niveau de la partie racinaire, les teneurs en  $\text{K}^+$  sont peu affectées pour les concentrations allant de 0 à 14 g/l  $\text{CaCl}_2$ . L'augmentation en cet élément n'a lieu qu'à partir de 16 g/l, elle se poursuit pour atteindre une valeur maximale de 222.32

$\mu\text{mol/g MS}$  pour la dose la plus élevée (20 g/l  $\text{CaCl}_2$ ) [figure 44]. Les résultats de l'analyse de la variance montrent qu'il existe une différence très hautement significative entre les différents traitements ( $P < 0.0001$ ).

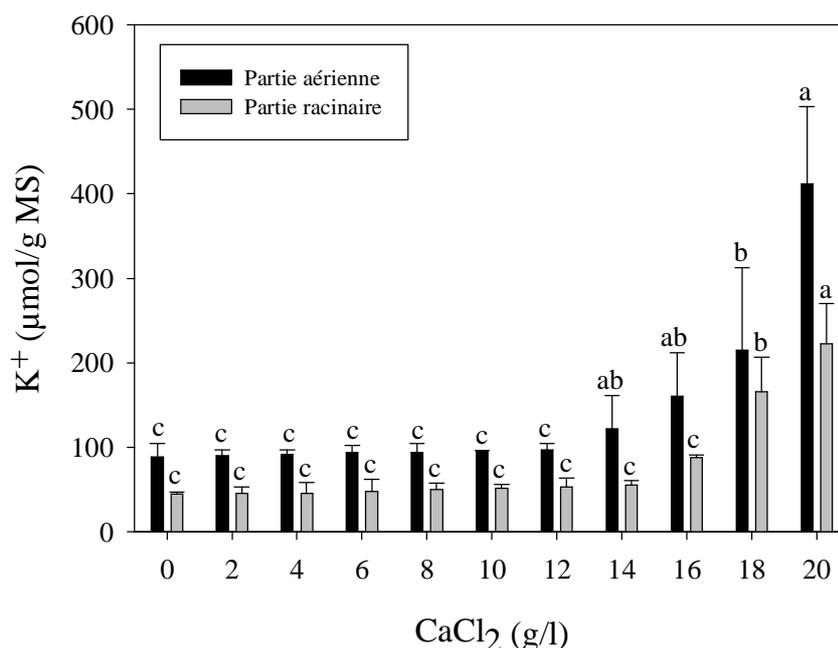


Figure 44. Variation des teneurs en potassium ( $\text{K}^+$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de Tukey ( $P < 0.05$ ).

### 3.3.3. Le calcium

La teneur en  $\text{Ca}^{2+}$  au niveau de la partie aérienne varie à partir 16 g/l  $\text{CaCl}_2$  où sa teneur représente 130.54  $\mu\text{mol/g MS}$ , ce sont les traitements 18 et 20 g/l qui présentent les valeurs relativement les plus élevées avec des teneurs respectives de 165.55 et 185.28  $\mu\text{mol/g MS}$  (figure 45). Statistiquement, la différence entre les différentes concentrations de  $\text{CaCl}_2$  est très hautement significative au seuil de 5% ( $P < 0.0001$ ).

Au niveau des racines les teneurs en  $\text{Ca}^{2+}$  deviennent remarquables au dessus de 14 g/l  $\text{CaCl}_2$ . En effet, il se produit une augmentation prononcée de la teneur du  $\text{Ca}^{2+}$  tissulaire au niveau des racines lorsque la plante reçoit 16 g/l de  $\text{CaCl}_2$  (figure 45). L'analyse de la variance révèle que le facteur  $\text{CaCl}_2$  a une influence très hautement significative sur la teneur du  $\text{Ca}^{2+}$  au niveau racinaire ( $P < 0.0001$ ).

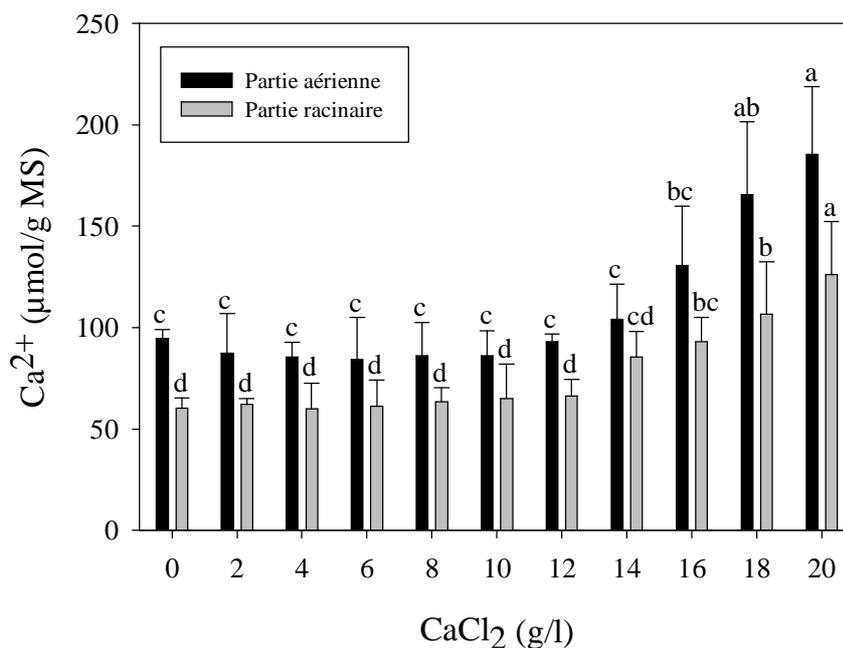


Figure 45. Variation des teneurs en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n= 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.3.4. Le Chlore

La teneur en  $\text{Cl}^-$  des tissus de la partie aérienne augmente en fonction de la concentration en  $\text{CaCl}_2$ , elle se poursuit jusqu'à 20 g/l où le  $\text{Cl}^-$  tissulaire représente 188.17  $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ , le témoin présente une teneur de 21.02  $\mu\text{mol} / \text{g MS}$  (figure 46). L'analyse de la variance montre que l'augmentation progressive de la concentration

du  $\text{CaCl}_2$  a un effet très hautement significatif sur la teneur en  $\text{Cl}^-$  au niveau de la partie aérienne de l'*Atriplex halimus* ( $P < 0.0001$ ).

Les teneurs en  $\text{Cl}^-$  obtenues dans les tissus racinaires augmentent progressivement en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les teneurs extrêmes (témoin et 20 g/l  $\text{CaCl}_2$ ) présentent des teneurs respectives de 18.10 et 112.23  $\mu\text{mol/g MS}$  (figure 46). L'analyse de la variance révèle une différence très hautement significative entre les différents traitements en  $\text{CaCl}_2$  ( $P < 0.0001$ ).

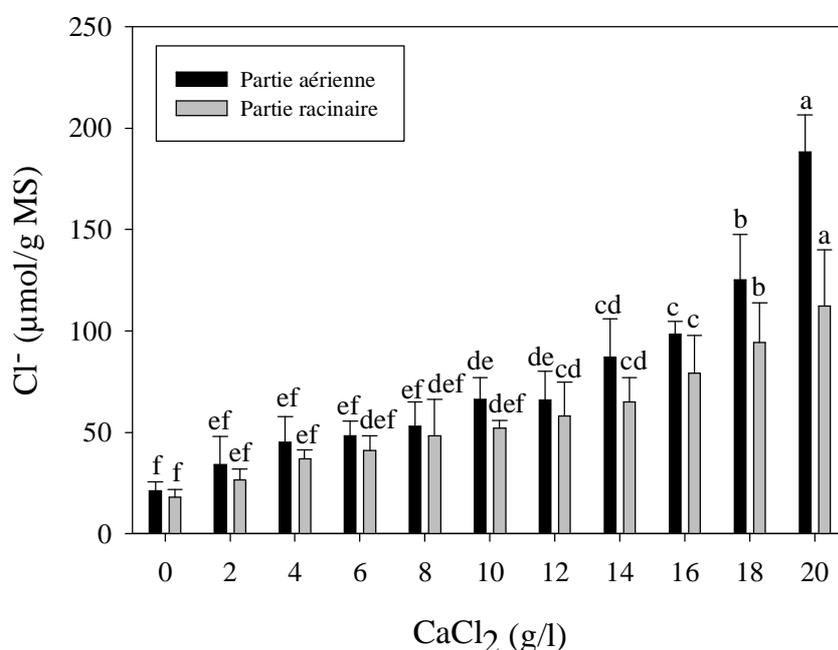


Figure 46. Variation des teneurs en chlore ( $\text{Cl}^-$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n = 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.3.5. Le Phosphore

La teneur en  $\text{PO}_4^{3-}$  de la partie aérienne diminue progressivement au fur et à mesure que la concentration en  $\text{CaCl}_2$  augmente. A partir de 14 g/l, sa teneur varie faiblement

(figure 47). Statistiquement, la différence entre les différentes concentrations de  $\text{CaCl}_2$  est très hautement significative au seuil de 5% ( $P < 0.0001$ ).

Les teneurs en  $\text{PO}_4^{3-}$  des tissus racinaires subissent une diminution importante de cet élément jusqu'à 8 g/l de  $\text{CaCl}_2$ . Par la suite, sa teneur varie faiblement (figure 47). L'analyse de la variance révèle que l'effet du  $\text{CaCl}_2$  sur la teneur en  $\text{PO}_4^{3-}$  au niveau de la partie racinaire est très hautement significatif au seuil de 5% ( $P < 0.05$ ).

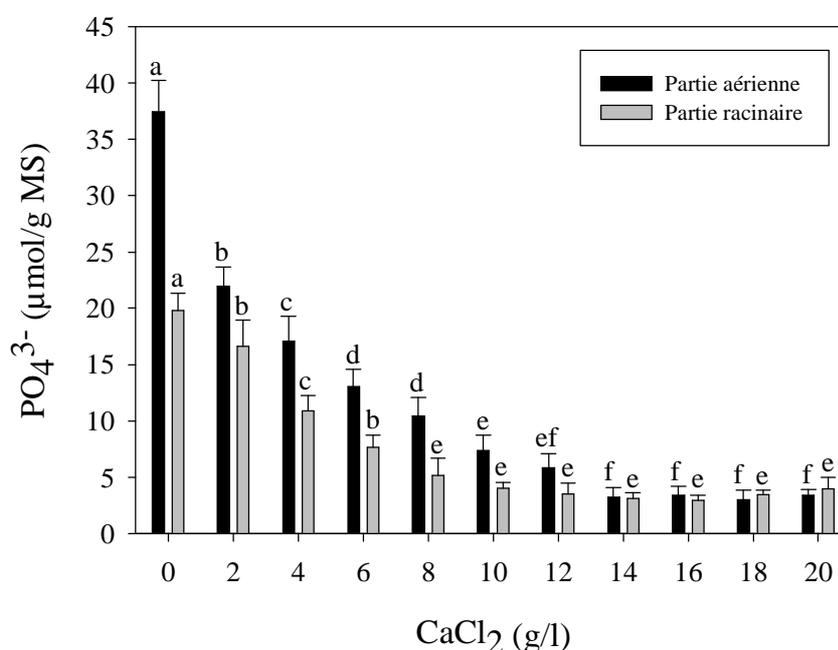


Figure 47. Variation des teneurs en phosphore ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

### 3.3.6. L'azote

La teneur en azote de la partie aérienne diminue progressivement au fur et à mesure que la concentration en  $\text{CaCl}_2$  augmente dans le milieu, cette diminution se poursuit jusqu'à 20 g/l lorsque l'azote tissulaire représente 17.73 mg/g MS (figure 48).

L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les différents traitements de  $\text{CaCl}_2$  ( $P < 0.0001$ ).

Dans la partie racinaire, la teneur en azote enregistre une réduction dès que la plante reçoit 2 g/l de  $\text{CaCl}_2$ . Par la suite, cette teneur est peu modifiée au niveau des racines quand la concentration dépasse les 8 g/l  $\text{CaCl}_2$  (figure 48). L'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif des traitements de  $\text{CaCl}_2$  sur la teneur d'azote au niveau de la partie racinaire ( $P < 0.0001$ ).

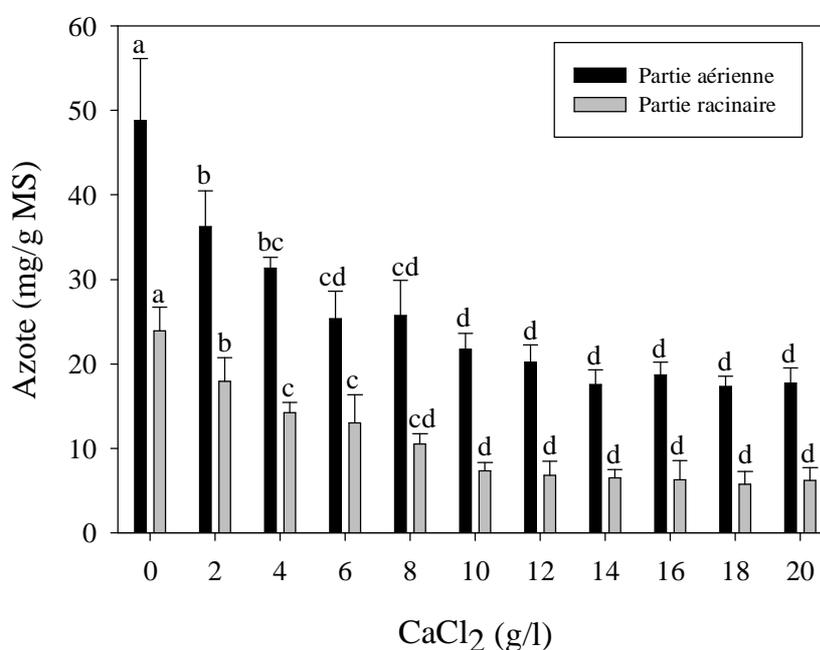


Figure 48. Variation des teneurs en azote des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

#### 3.4. Comparaison de l'effet de la nature des électrolytes sur la nutrition minérale

Il s'agit de comparer l'effet de la nature de l'anion accompagnateur du sodium, et l'effet de la nature du cation accompagnateur du chlore sur la nutrition minérale du végétal.

### 3.4.1. Effet de la nature de l'anion accompagnateur du sodium (NaCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

#### 3.4.1.1. L'azote

Les teneurs en azote observées dans les tissus de la partie aérienne et racinaire montrent une diminution progressive des quantités de cet élément en fonction de la concentration du milieu en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, cette diminution se poursuit jusqu'à 20 g/l, où l'azote tissulaire représente environ 23.97 et 25.97 mg/g MS au niveau de la partie aérienne et 9.07 et 9.13 mg/g MS au niveau de la partie racinaire respectivement pour le NaCl et le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (figures 49 et 50).

Globalement, les teneurs en azote sont relativement plus élevées chez les plants traités par le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> que chez ceux traités par le NaCl.

Pour les deux sels, les teneurs en azote enregistrées sont plus importantes au niveau de la partie aérienne que racinaire. La capacité de ce végétal à accumuler l'azote est donc plus particulièrement localisée dans sa partie aérienne.

L'analyse de la variance montre que le type de sel a un effet significatif sur l'accumulation du l'azote au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.05$ ) et de la partie racinaire ( $P < 0.001$ ) chez *Atriplex halimus*.

La présence du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dans le milieu de culture s'avère donc relativement moins limitante dans la nutrition azotée en milieu salé que celle du NaCl.

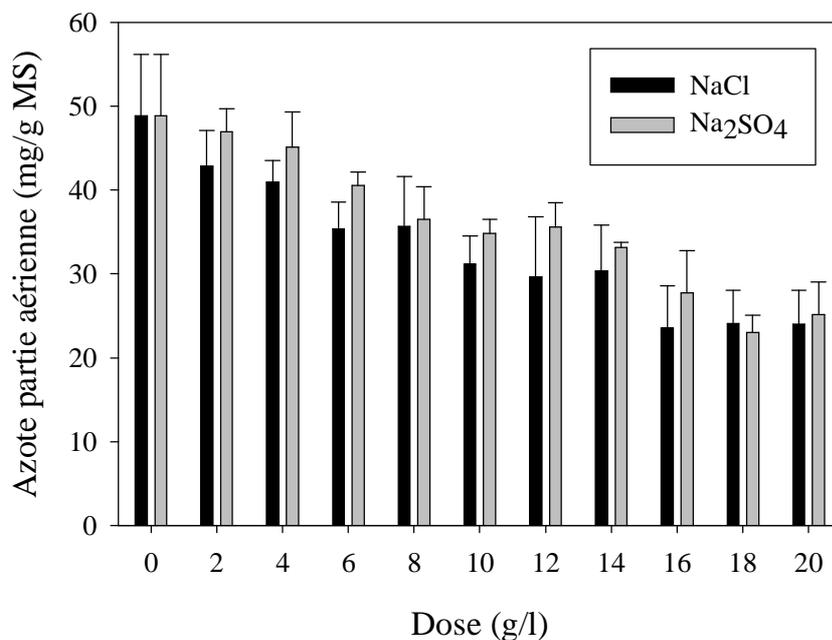


Figure 49. Effet de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la teneur en azote des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.05$ ).

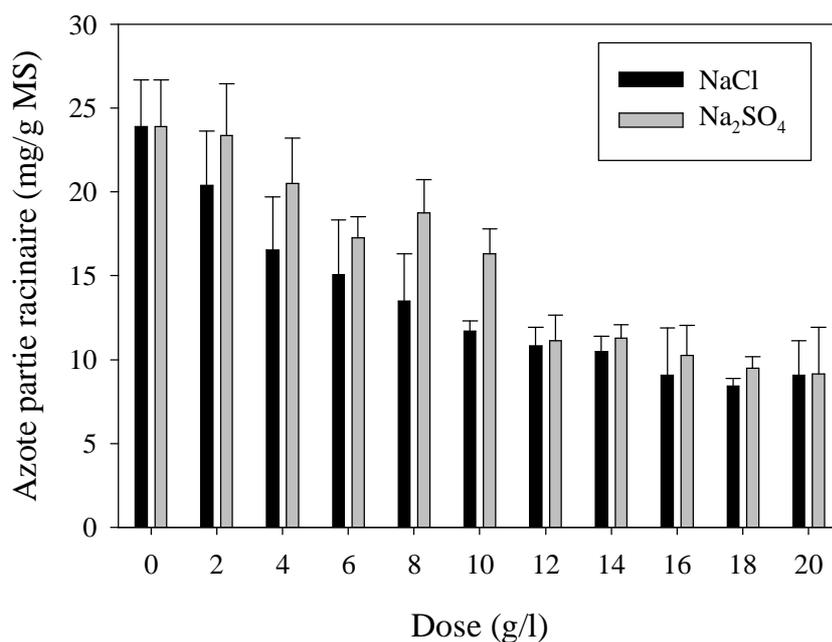


Figure 50. Effet de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la teneur en azote des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

### 3.4.1.2. Le phosphore

Le dosage du phosphore au niveau de la partie aérienne et racinaire montre que les teneurs en  $\text{PO}_4^{3-}$  diminuent avec l'augmentation de la concentration en NaCl et en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans le milieu de culture, avec un moindre degré chez les plantes traitées par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (figures 51 et 52). Pour tous les traitements appliqués, les teneurs du  $\text{PO}_4^{3-}$  sont toujours plus importantes pour le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

L'analyse de la variance montre que le type de sel a un effet très hautement significatif sur l'accumulation du  $\text{PO}_4^{3-}$  au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.001$ ), par contre le type de sel n'a pas un effet significatif sur la teneur en phosphore dans la partie racinaire ( $P > 0.05$ ).

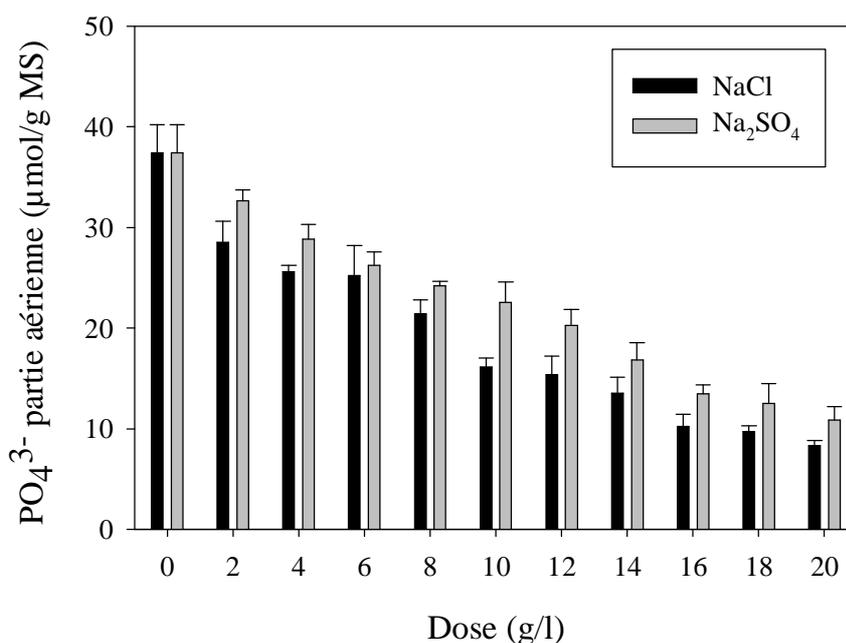


Figure 51. Effet de NaCl et de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la teneur en phosphore ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

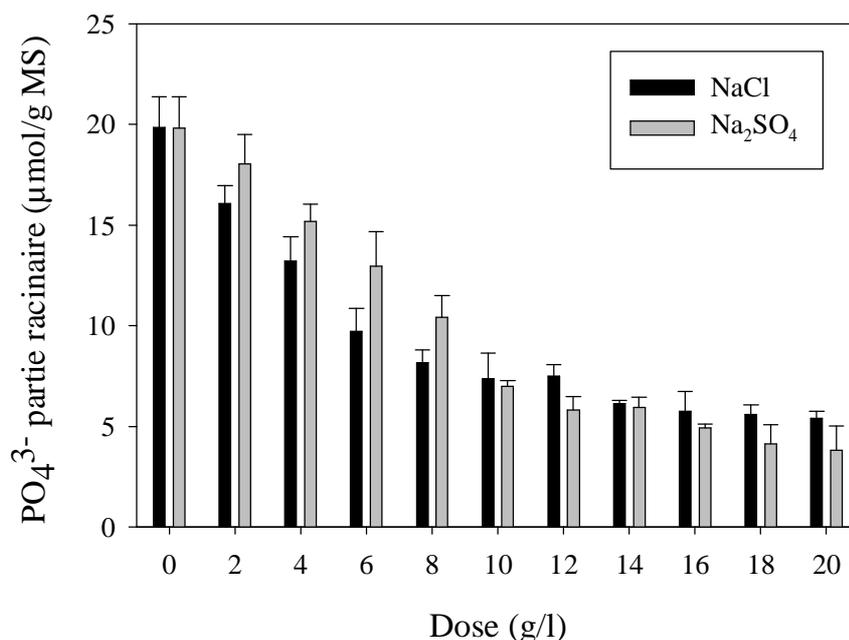


Figure 52. Effet de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la teneur en phosphore (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P>0.05$ ).

### 3.4.1.3. Le potassium

Les résultats montrent que l'accumulation du K<sup>+</sup> dans les tissus aériens et racinaires diminue progressivement au fur et à mesure que la concentration en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> augmente dans le milieu de culture, les plants traités par le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> montrent la diminution la plus marquée de cet élément (figures 53 et 54). Il faut signaler qu'en dehors des fortes concentrations, les teneurs en K<sup>+</sup> sont toujours plus importantes au niveau de la partie aérienne que racinaire pour les deux sels.

L'analyse de la variance montre que l'effet du type de sel a un effet très hautement significatif au seuil de 5%, sur l'accumulation du potassium au niveau de la partie aérienne ( $P<0.001$ ) et de la partie racinaire ( $P<0.001$ ). L'effet du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> serait plus limitant dans la nutrition potassique que celui du NaCl.

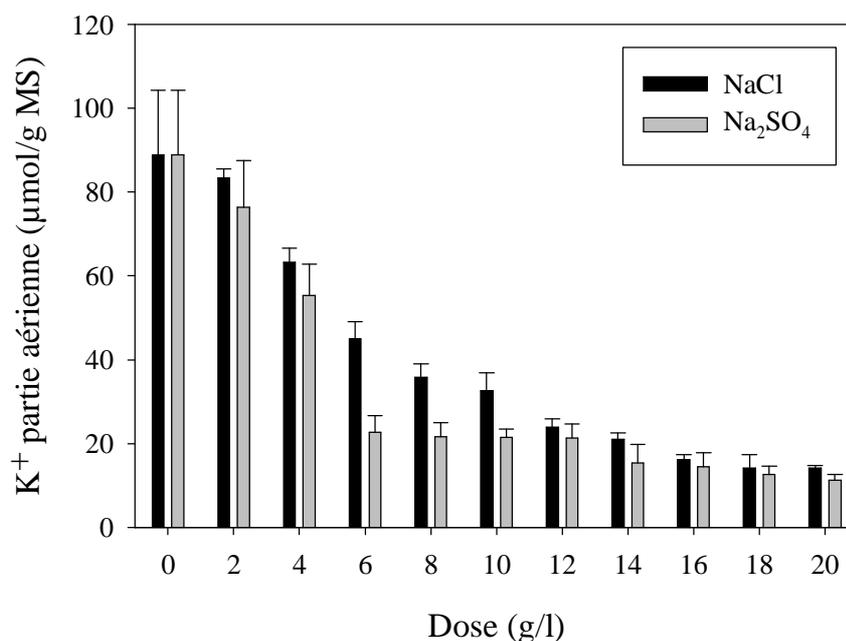


Figure 53. Effet de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la teneur en potassium (K<sup>+</sup>) des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

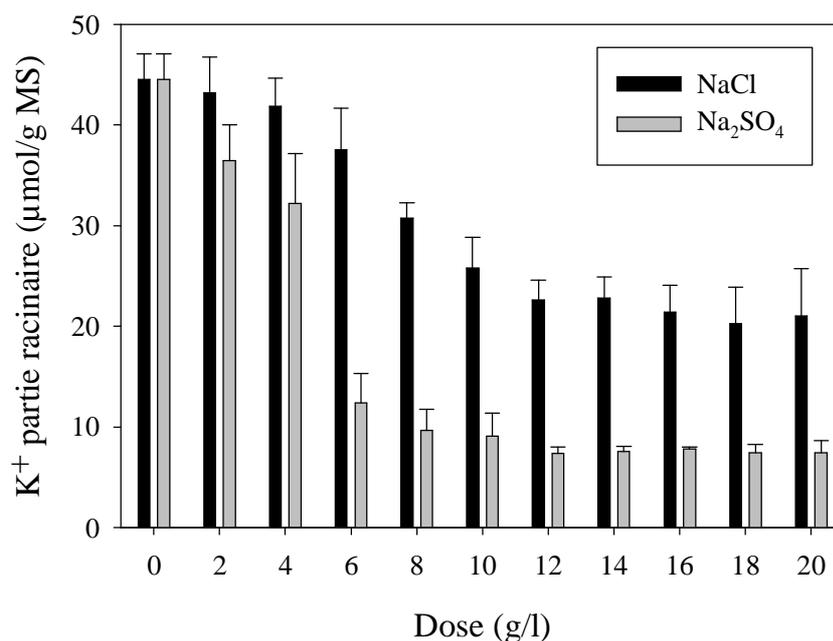


Figure 54. Effet de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la teneur en potassium (K<sup>+</sup>) des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

### 3.4.2. Effet de la nature du cation accompagnateur du chlore (NaCl/CaCl<sub>2</sub>)

#### 3.4.2.1. L'azote

La teneur en azote au niveau de la partie aérienne et racinaire diminue avec l'augmentation de la concentration en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>, cette diminution se poursuit jusqu'à 20 g/l, où l'azote tissulaire représente environ 23.97 et 17.73 mg/g MS au niveau de la partie aérienne, et 9.07 et 6.20 mg/g MS au niveau de la partie racinaire respectivement pour le NaCl et le CaCl<sub>2</sub> (figures 55 et 56).

L'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif de la nature du cation accompagnateur du chlore sur l'accumulation de l'azote au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.001$ ) et de la partie racinaire ( $P < 0.001$ ).

Les moyennes calculées pour les deux sels montrent que l'azote tissulaire au niveau de la partie aérienne et racinaire est plus affecté par l'application du CaCl<sub>2</sub>. Pour les deux sels, les teneurs en azote enregistrées sont plus importantes au niveau de la partie aérienne que racinaire.

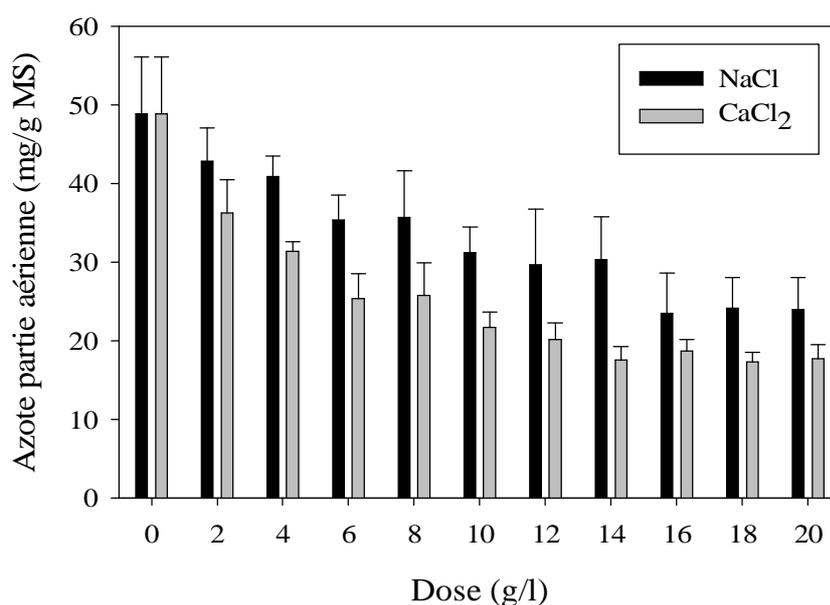
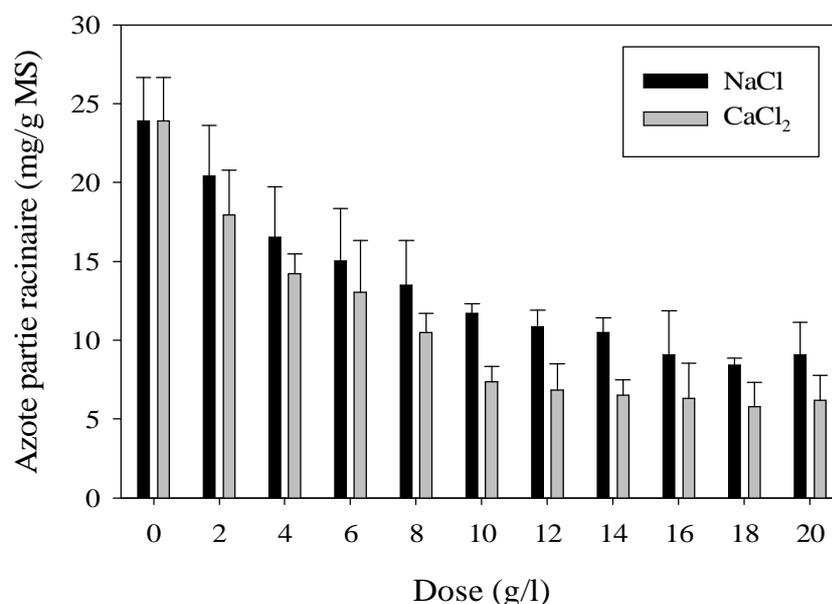


Figure 55. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en azote des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).



**Figure 56.** Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en azote des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

#### 3.4.2.2. Le phosphore

Pour le phosphore, il se produit une diminution progressive des quantités du  $\text{PO}_4^{3-}$  dans la partie aérienne et racinaire avec l'augmentation de la concentration en NaCl et en CaCl<sub>2</sub> du milieu (figures 57 et 58). La diminution relative la plus forte (8.33 et 3.43  $\mu\text{mol/g MS}$  respectivement pour le NaCl et le CaCl<sub>2</sub>) est obtenue par le traitement le plus stressant 20 g/l pour les deux sels.

Les données de l'analyse de la variance révèlent un effet très hautement significatif du type de sel sur l'accumulation  $\text{PO}_4^{3-}$  du au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.001$ ) et de la partie racinaire ( $P < 0.001$ ) chez *Atriplex halimus*.

Globalement, l'accumulation du  $\text{PO}_4^{3-}$  au niveau de la partie aérienne et racinaire est plus affectée chez les plants traités par le CaCl<sub>2</sub> que par le NaCl.

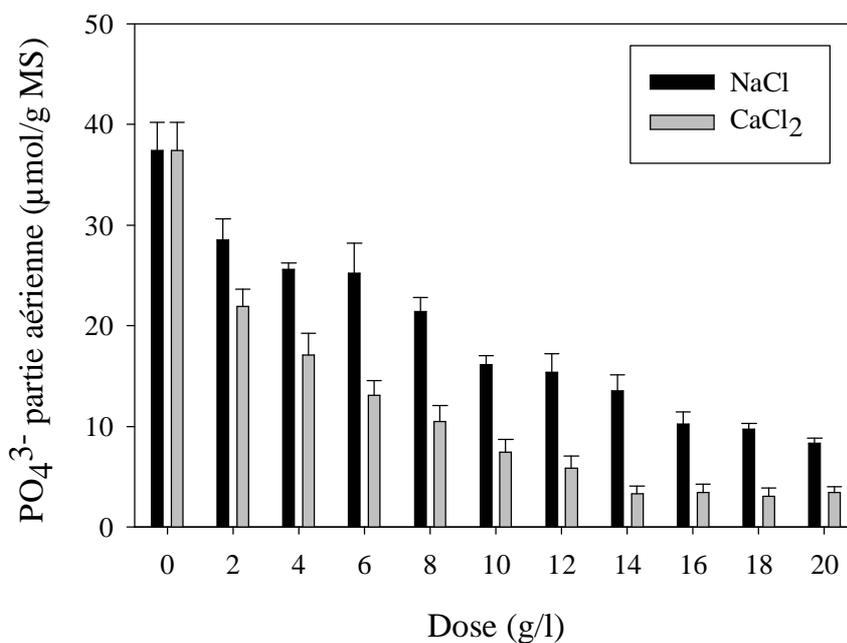


Figure 57. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en phosphore (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

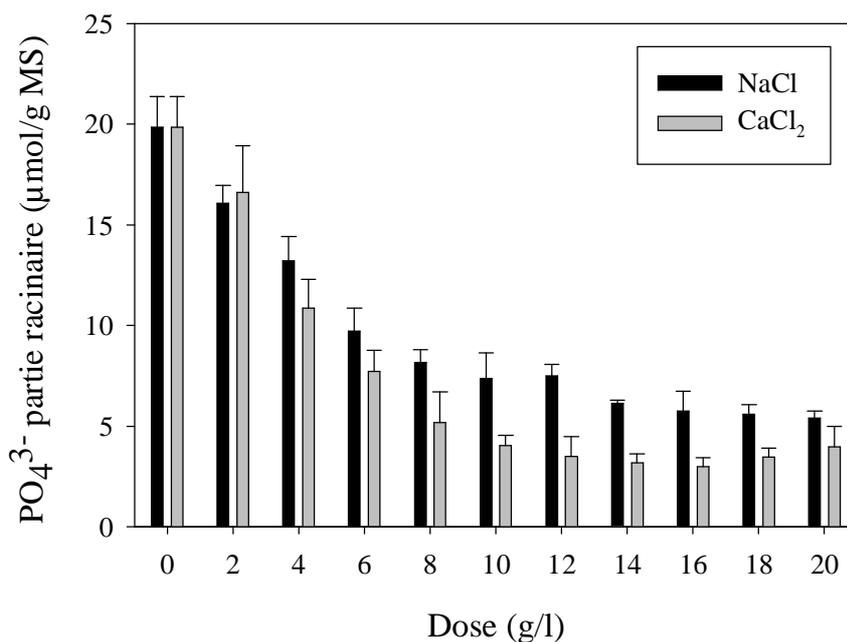


Figure 58. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en phosphore (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

### 3.4.2.3. Le potassium

Pour le potassium, les plantes maintiennent une teneur plus élevée pour le  $\text{CaCl}_2$  par rapport au  $\text{NaCl}$ . Pour la dose la plus stressante (20 g/l), le  $\text{K}^+$  représente environ 14.22 et 411.12  $\mu\text{mol/g MS}$  au niveau de la partie aérienne, et 20.99 et 222.32  $\mu\text{mol/g MS}$  au niveau de la partie racinaire respectivement pour le  $\text{NaCl}$  et le  $\text{CaCl}_2$  (figures 59 et 60).

Pour les deux sels, les teneurs en  $\text{K}^+$  enregistrées sont plus importantes au niveau de la partie aérienne que racinaire. La capacité de ce végétal à accumuler le  $\text{K}^+$  est donc plus particulièrement localisée dans sa partie aérienne.

L'analyse de la variance montre que l'effet du type de sel a un effet très hautement significatif au seuil de 5%, sur l'accumulation du potassium au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.001$ ) et de la partie racinaire ( $P < 0.001$ ).

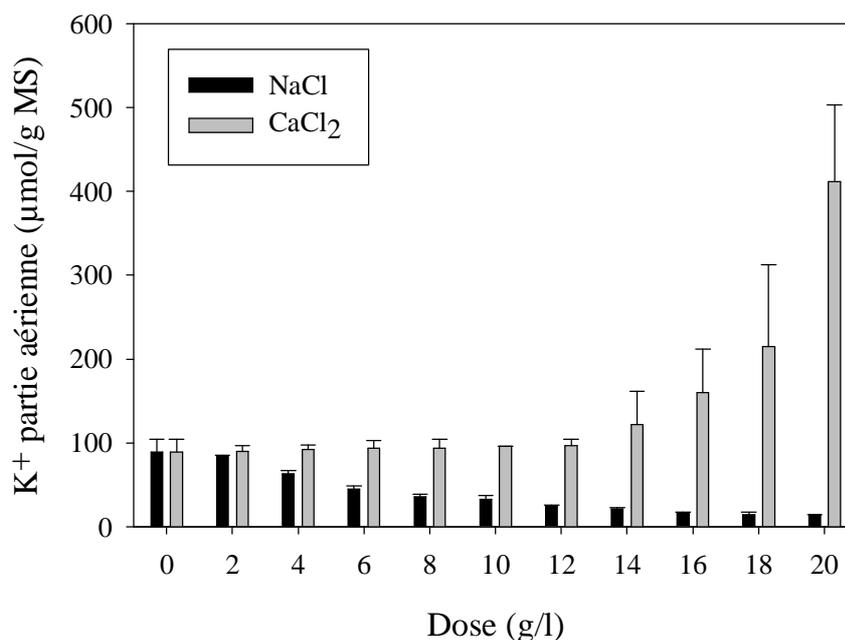


Figure 59. Effet de  $\text{NaCl}$  et de  $\text{CaCl}_2$  sur la teneur en potassium ( $\text{K}^+$ ) des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

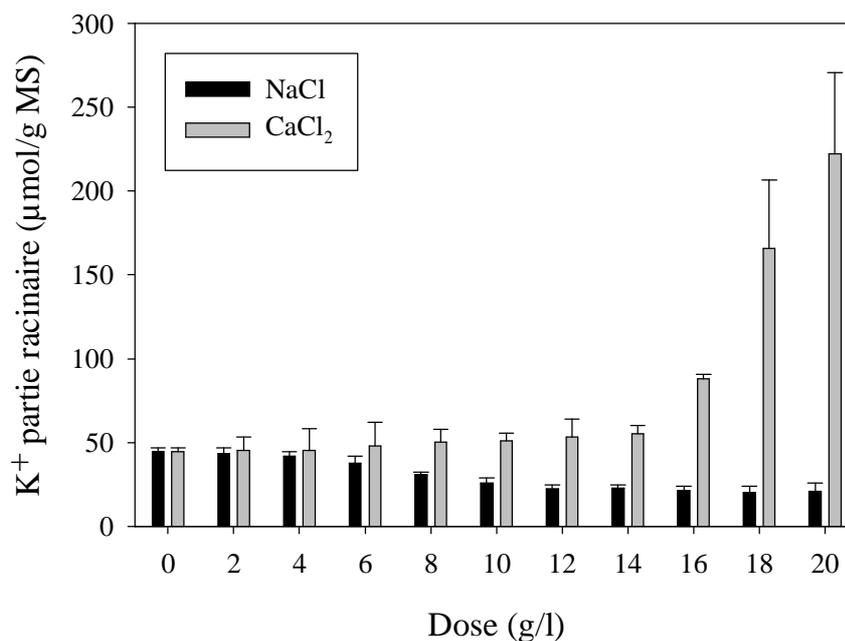


Figure 60. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en potassium (K<sup>+</sup>) des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

### 3.5. Discussion des résultats

Sur le plan nutritionnel, la présence du chlorure et du sulfate de sodium dans le milieu entraîne une absorption accrue du Na<sup>+</sup>, du Cl<sup>-</sup> et de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> par la plante qui se traduit par une augmentation des teneurs de ces éléments au détriment du Ca<sup>2+</sup>, du K<sup>+</sup>, du PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et de l'azote. La compétition entre ces éléments est bien connue et elle est déjà signalée chez d'autres espèces halophytes comme chez *Atriplex griffithii* (Khan et al., 2000a), *Suaeda fruticosa* (Khan et al., 2000b), *Haloxylon recurvum* (Khan et al., 2000c), *Atriplex centralasiatica* (Qiu et al., 2003), *Atriplex nummularia* (Ramos et al., 2004), *Cakile maritima* (Debez et al., 2004), *Sesuvium portulacastrum* (Messedi et al., 2004), *Suaeda altissima* (Balnokin et al., 2004), *Kochia prostrata* (Karimi et al., 2005), *Crithmum maritimum* (Ben Amor et al., 2005).

L'analyse des teneurs en  $\text{Na}^+$  montre qu'il s'accumule préférentiellement dans la partie aérienne, et affecte négativement la production de matière sèche aérienne et racinaire dans le cas du  $\text{NaCl}$  et du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (tableau VII). Par contre, la production de la matière sèche dans le cas de  $\text{CaCl}_2$ , qui a relativement des teneurs moins élevées en  $\text{Na}^+$ , est moins affectée par la salinité.

Tableau VII. Ajustement statistique entre la matière sèche (y) et sa teneur en sodium (x).

Sel	Paramètre	Relation statistique	Equation	Coefficient de corrélation
NaCl	Partie aérienne	Polynomiale	$y = 7 \times 10^5 x^2 - 0.03x + 6.13$	$r = 0.97$
	Partie racinaire	Polynomiale	$y = 5 \times 10^5 x^2 - 0.01x + 1.08$	$r = 0.95$
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	Partie aérienne	Polynomiale	$y = -2 \times 10^5 x^2 + x + 1.55$	$r = 0.94$
	Partie racinaire	Polynomiale	$y = -3 \times 10^5 x^2 + x + 0.73$	$r = 0.91$

Quant aux  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ , les résultats montrent que l'absorption de ces deux éléments est affectée par la présence du  $\text{NaCl}$  et du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Pour le cas du  $\text{K}^+$ , la chute de sa teneur correspond à des diminutions importantes de la production de la matière sèche, ce qui suggère que la déficience en cet élément perturbe la croissance et entraîne la chute de production de la matière sèche (Bie et al., 2004).

L'application du  $\text{CaCl}_2$  dans le milieu de culture se traduit par une diminution du contenu de suc cellulaire en  $\text{Na}^+$  et une accumulation du  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ . Selon Epstien (1998), l'augmentation de la concentration de  $\text{Ca}^{2+}$  dans le milieu de culture limite l'entrée de  $\text{Na}^+$  au niveau des racines, cela est justifié par l'antagonisme existant entre ces deux éléments (Davenport et al., 1997). En comparant les parois des racines d'une espèce résistante au sel, *Glycine soja*, et celle d'une espèce sensible, *Glycine tomentella*, Kao et al. (2006) ont constaté que les racines de l'espèce halotolérante sont deux fois plus riches en  $\text{Ca}^{2+}$  que celles de l'espèce non tolérante. Les racines de *Glycine soja* présenteraient une plus grande affinité et une plus importante sélectivité pour le  $\text{Ca}^{2+}$  par rapport au  $\text{Na}^+$ .

L'addition du  $\text{Ca}^{2+}$  à l'environnement racinaire a été suggérée comme moyen d'augmentation de la tolérance au stress salin (Epstien, 1998). C'est un élément qui

maintient l'intégrité des membranes cellulaires (Martinez-Ballesta et al., 2006), il réduit l'absorption du  $\text{Na}^+$  par antagonisme (Shabala et al., 2005), et favorise celle du  $\text{K}^+$  (Arshi et al., 2006). Selon Tuna et al. (2007), la présence du calcium dans le milieu peut favoriser la sélectivité pour le potassium au détriment du sodium. En effet, cet élément rentre dans l'intégrité structurelle et fonctionnelle de la membrane cytoplasmique et sa présence peut régler l'absorption des ions en faveur du potassium alors que celle du sodium est inhibée.

L'examen du rapport  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  montre que ce dernier peut traduire le degré de sensibilité de l'espèce au sel donné (figures 61 et 62). En effet, ce rapport peut exprimer le degré de sélectivité entre le  $\text{K}^+$  et le  $\text{Na}^+$ , plus il est élevé et plus la sélectivité est favorable au  $\text{K}^+$  (Maathuis et Amtmann, 1999). A ce propos, Ramoliya et al. (2004) notent que la production de matière sèche dépend de la teneur en  $\text{K}^+$  des feuilles. Le  $\text{NaCl}$  ou le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  peuvent affecter la croissance en limitant l'approvisionnement de la plante en  $\text{K}^+$ . L'adaptation à la salinité d'une espèce ou d'une variété consiste alors à maintenir une forte sélectivité en faveur de  $\text{K}^+$  (Shi et Sheng, 2005).

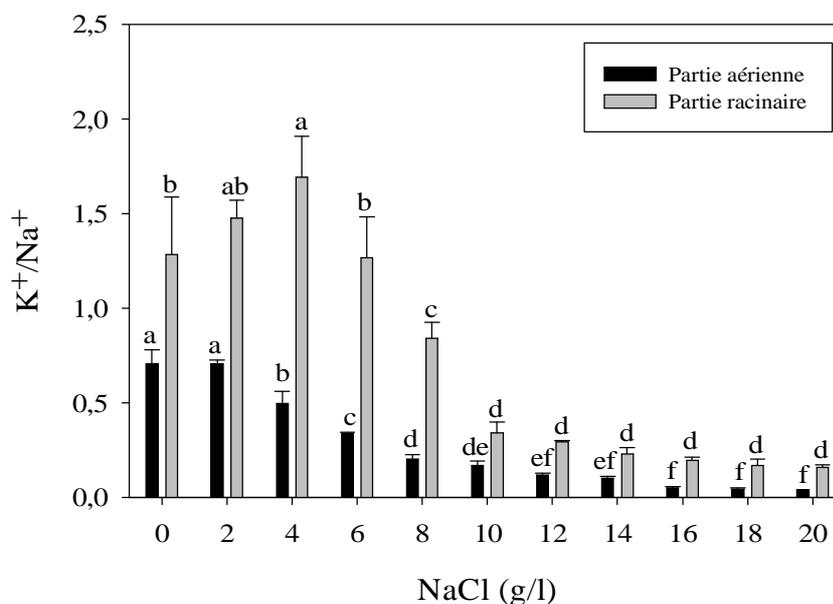


Figure 61. Rapport  $K^+/Na^+$  de la partie aérienne et racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de Tukey ( $P < 0.05$ ).

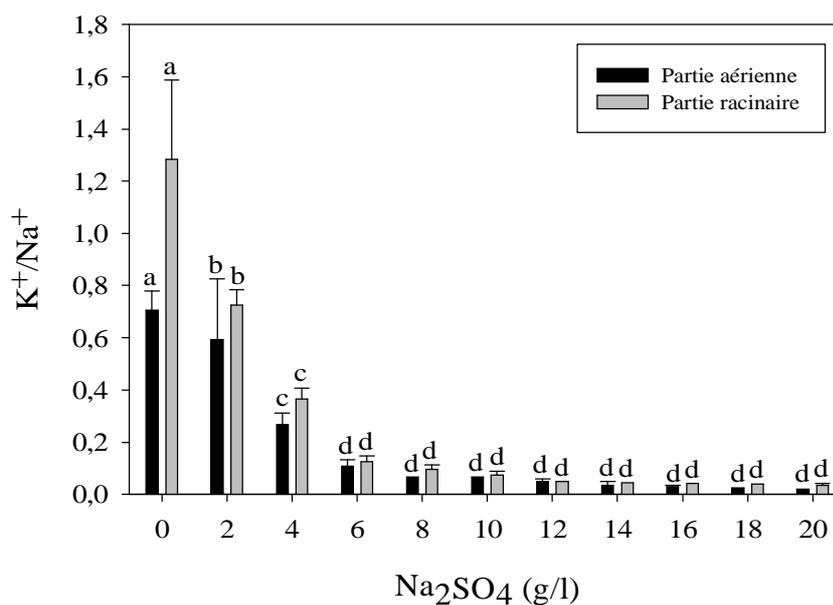


Figure 62. Rapport  $K^+/Na^+$  de la partie aérienne et racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* en fonction des concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de Tukey ( $P < 0.05$ ).

L'intégration des ions dans l'organisme entier est complexe et fait intervenir des mécanismes d'absorption et de répartition dans les tissus de la plante, elle repose sur des processus de transport actifs et sélectifs d'ions contre le gradient de concentration (Colmer et al., 2006). La différence de tolérance entre halophytes et glycophytes pourrait se situer au niveau des mécanismes d'exclusion du sel du cytoplasme, et de sa concentration dans la vacuole "compartmentation vacuolaire des ions" (Horie et Schroeder, 2004). Il est couramment admis que les ions impliqués dans l'ajustement osmotique sont largement circonscrits dans la vacuole, tandis que le potentiel osmotique du cytoplasme est ajusté avec des solutés organiques dits compatibles. Les ions toxiques  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  semblent être exclus des sites sensibles de la cellule et compartimentés dans la vacuole, qui peut représenter jusqu'à 90% du volume cellulaire, et où ils sont utilisés comme *osmotocums* (Tyerman et Skerrett, 1999). Cette accumulation d'ions dans la vacuole permet à la fois d'ajuster son potentiel osmotique et de détoxifier le cytoplasme où s'effectuent la plus part des processus du métabolisme cellulaire.

#### 4. ACCUMULATION DES SOLUTES ORGANIQUES

Les solutés organiques étudiés sont la proline et les sucres solubles totaux. Pour les éléments analysés, les résultats obtenus portent sur 3 répétitions. Les données analytiques et les résultats des calculs statistiques sont présentés en annexes.

##### 4.1. Cas du NaCl

###### 4.1.1. La proline

Les valeurs présentées sur la figure 63, montrent que l'augmentation de la salinité dans le milieu entraîne une augmentation des teneurs en proline au niveau de la partie aérienne. Entre le témoin et le milieu le plus concentré (20g/l NaCl), la teneur en proline a été multipliée par 8 (0.07  $\mu\text{g/g}$  MS pour le témoin, et 0.55  $\mu\text{g/g}$  MS pour le milieu le plus concentré en NaCl). Sur le plan statistique, il s'avère que les

concentrations en NaCl augmentent de façon significative la teneur en proline des tissus de la partie aérienne du végétal ( $P < 0.0001$ ).

Pour la partie racinaire, la figure 63 montre une accumulation de cet acide aminé dans les racines des plants cultivés en présence des fortes concentrations salines (la teneur en proline est de  $0.04 \mu\text{g/g MS}$  pour le témoin, et elle est de  $0.38 \mu\text{g/g MS}$  pour  $20\text{g/l}$  de NaCl). L'analyse de la variance montre un effet positif et très hautement significatif des concentrations en NaCl sur la teneur en proline au niveau de la partie racinaire du végétal ( $P < 0.0001$ ).

Par ailleurs, il faut souligner que pour tous les traitements, les teneurs en proline observées au niveau de la partie aérienne sont supérieures à celles observées dans la partie racinaire. La capacité de ce végétal à accumuler du proline est donc préférentiellement localisée dans sa partie aérienne.

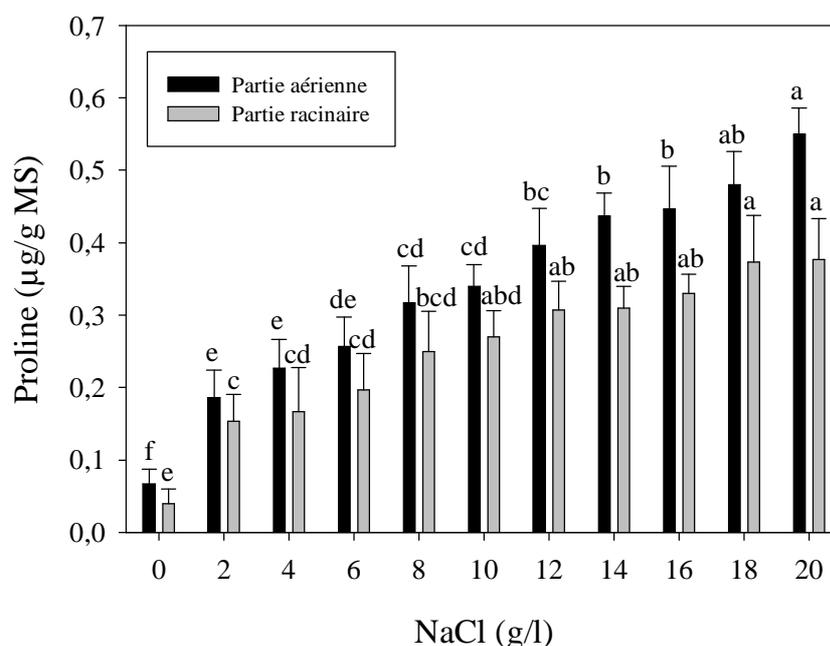


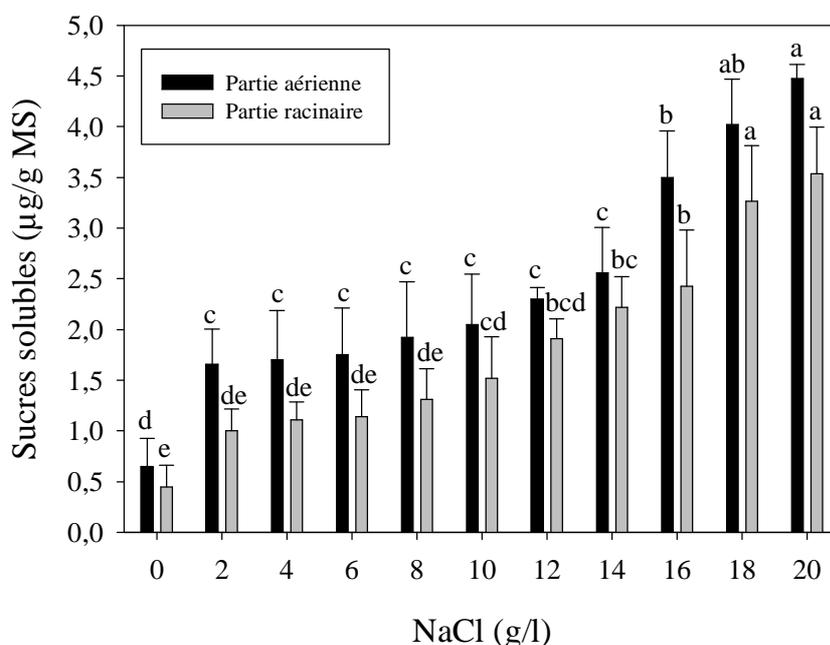
Figure 63. Evolution des teneurs en proline des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n = 3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

#### 4.1.2. Les sucres solubles totaux

La figure 64 montre que la salinité provoque une accumulation des sucres totaux dans la partie aérienne de l'*Atriplex halimus*. Cette accumulation est d'autant plus importante que la concentration en sel dans le milieu est élevée. La quantité accumulée des sucres totaux est de l'ordre de 0.65 µg/g MS pour le témoin alors qu'elle atteint 4.48 µg/g MS pour la concentration la plus stressante (20g/l NaCl). L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les différents traitements de NaCl utilisés ( $P < 0.0001$ ).

La figure 64 montre une augmentation de l'accumulation des sucres solubles totaux dans la partie racinaire avec l'augmentation des concentrations de NaCl. Cette augmentation se poursuit jusqu' à 20 g/l, où les sucres totaux tissulaires représentent 3.54 µg/g MS alors que le témoin ne contient que 0.45 µg/g MS. Par ailleurs, l'analyse de la variance montre que la présence de NaCl dans le milieu a une influence très hautement significative sur l'accumulation des sucres au niveau des racines ( $P < 0.001$ ).

Plus généralement, il s'avère que pour tous les traitements, les teneurs des sucres totaux enregistrées sont plus importantes au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire.



**Figure 64.** Evolution des teneurs en sucres totaux solubles des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en NaCl. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

## 4.2. Cas du $\text{Na}_2\text{SO}_4$

### 4.2.1. La proline

La figure 65 montre que la présence de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  provoque une accumulation de la proline dans la partie aérienne de l'*Atriplex halimus*. Cette accumulation est d'autant plus importante que la concentration en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans le milieu est élevée. La quantité de proline accumulée est de l'ordre de  $0.45 \mu\text{g/g MS}$  pour  $20 \text{ g/l}$  comparativement à  $0.07 \mu\text{g/g MS}$  pour le témoin. L'analyse de la variance montre que l'augmentation progressive de la concentration du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , a un effet très hautement significatif sur l'accumulation de la proline au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.0001$ ).

Au niveau des racines, la figure 65 présente une augmentation de la teneur en proline avec l'augmentation de la concentration de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Cette augmentation se poursuit jusqu'à 20 g/l, où la teneur en proline atteint 0.36  $\mu\text{g/g}$  MS, alors que le témoin présente une teneur de 0.04  $\mu\text{g/g}$  MS.

L'analyse de la variance montre que la présence de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans le milieu a une influence très hautement significative sur l'accumulation de la proline au niveau de la partie racinaire ( $P < 0.001$ ).

Il faut signaler que les teneurs en proline sont plus importantes au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire.

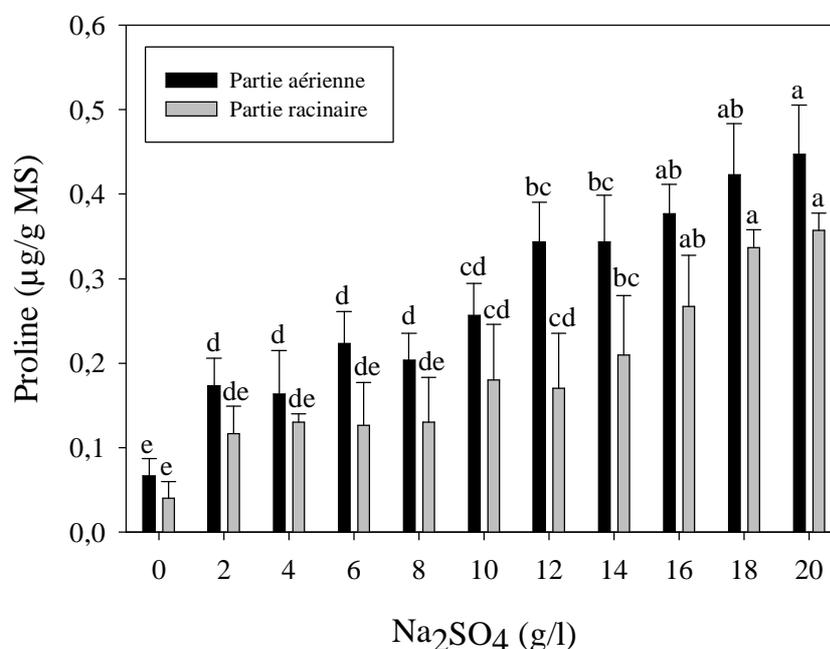


Figure 65. Evolution des teneurs en proline des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

#### **4.2.2. Les sucres solubles totaux**

Les résultats de la figure 66 montrent que l'augmentation de la concentration en sulfate de sodium dans le milieu entraîne une augmentation des teneurs en sucres totaux au niveau de la partie aérienne. À 20g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , la quantité accumulée dans la matière sèche est de 3.61  $\mu\text{g/g}$  MS, elle présente une augmentent de 80 % par rapport au témoin. L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les différents traitements de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ( $P < 0.0001$ ).

La figure 66 montre que la teneur en sucres solubles augmente progressivement dans les racines pour atteindre 2.30  $\mu\text{g/g}$  MS pour 20g/l de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , alors que le témoin ne contient que 0.45  $\mu\text{g/g}$  MS. L'analyse de la variance révèle que l'augmentation progressive de la concentration du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a un effet très hautement significatif sur l'accumulation des sucres solubles totaux au niveau de la partie racinaire ( $P < 0.0001$ ).

Par ailleurs, il faut souligner que pour tous les traitements, les teneurs en sucres solubles observées au niveau de la partie aérienne sont supérieures à celles observées dans la partie racinaire.

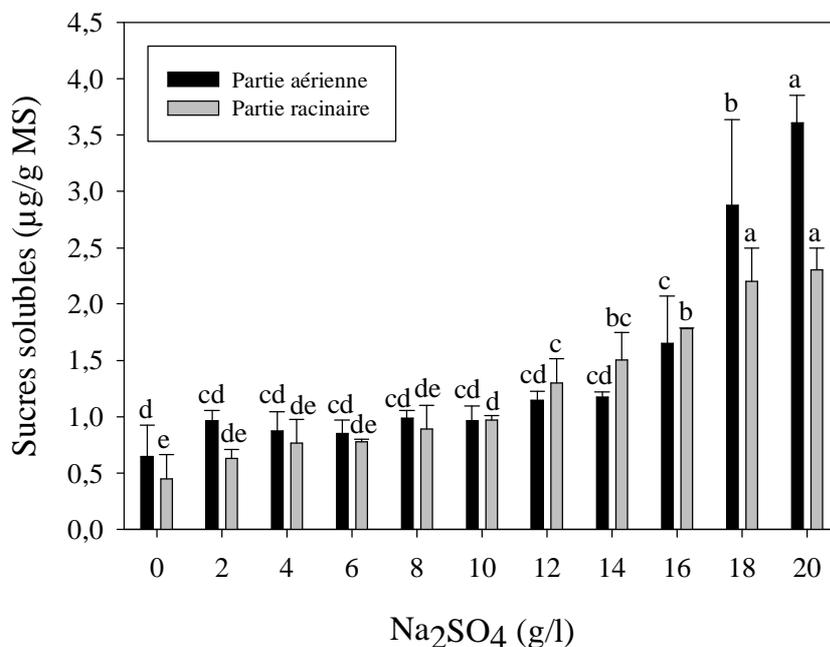


Figure 66. Evolution des teneurs en sucres totaux solubles des tissus de la partie aérienne et dans la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$ ). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de Tukey ( $P < 0.05$ ).

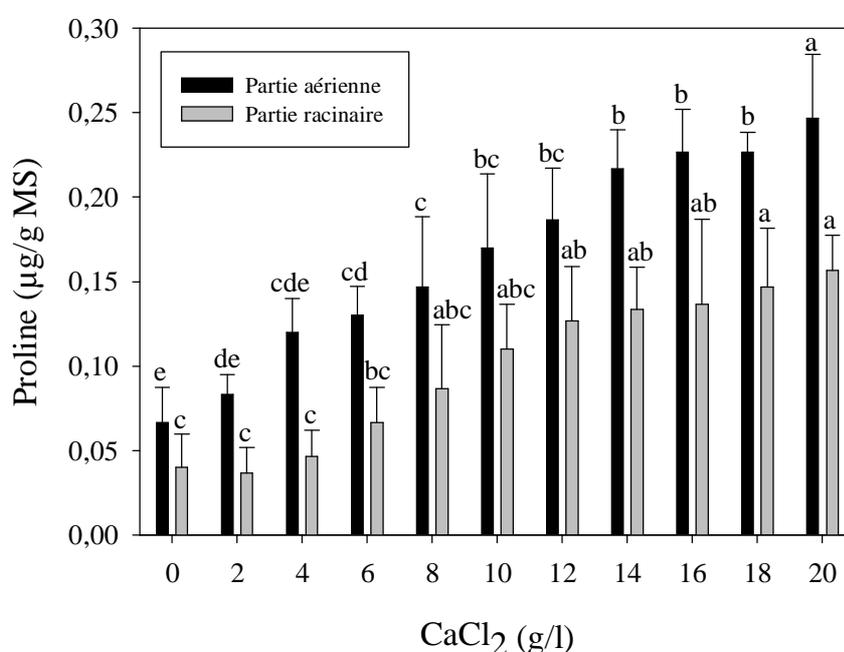
### 4.3. Cas du CaCl<sub>2</sub>

#### 4.3.1. La proline

Il se produit une augmentation progressive des teneurs en proline dans la partie aérienne au fur et à mesure que la concentration en CaCl<sub>2</sub> du milieu de culture augmente. L'augmentation relative la plus forte est obtenue par le traitement 20 g/l de CaCl<sub>2</sub> (figure 67). L'analyse de la variance montre que la présence du CaCl<sub>2</sub> dans le milieu affecte d'une manière très hautement significative l'accumulation de la proline au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.0001$ ).

Il se produit également, au niveau des racines, une augmentation de la teneur en proline avec l'augmentation des concentrations de  $\text{CaCl}_2$ . Cette augmentation se poursuit jusqu'à 20 g/l où cet acide aminé représente environ 0.16  $\mu\text{g/g}$  MS (figure 67). Par ailleurs, l'analyse de la variance montre que la présence de  $\text{CaCl}_2$  dans le milieu a une influence très hautement significative sur l'accumulation de la proline au niveau des racines ( $P < 0.001$ ).

Pour tous les traitements, les teneurs de proline enregistrées sont plus élevées au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire.



**Figure 67.** Evolution des teneurs en proline des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$ ). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

#### 4.3.2. Les sucres solubles totaux

Les teneurs présentées sur la figure 68 montrent que l'augmentation de la salinité dans le milieu entraîne une augmentation des teneurs en proline au niveau de la partie aérienne, la teneur passant de 0.65  $\mu\text{g/g}$  MS pour le témoin à 2.40  $\mu\text{g/g}$  MS pour 20 g/l  $\text{CaCl}_2$ . Statistiquement, la différence entre les différentes concentrations de  $\text{CaCl}_2$  est très hautement significative au seuil de 5% ( $P < 0.0001$ ).

La figure 68 montre que l'accumulation des sucres totaux augmente progressivement au niveau des racines pour atteindre 1.70  $\mu\text{g/g}$  MS à 20g/l de  $\text{CaCl}_2$ , le témoin présente une teneur de 0.45  $\mu\text{g/g}$  MS. L'analyse de la variance révèle que l'augmentation de la concentration du  $\text{CaCl}_2$  a un effet très hautement significatif sur l'accumulation de la proline au niveau de la partie racinaire ( $P < 0.0001$ ).

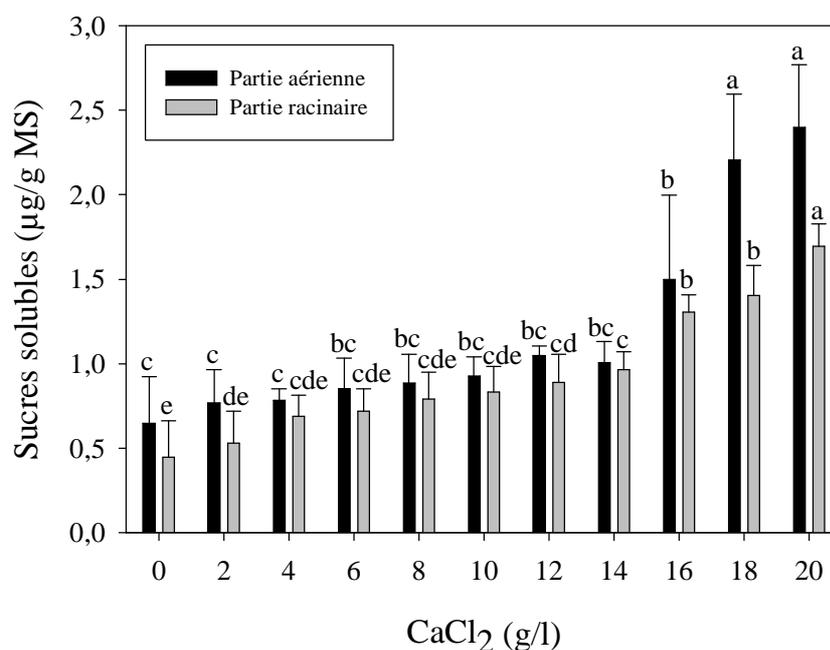


Figure 68. Evolution des teneurs en sucres totaux solubles des tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire de plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois en fonction des concentrations en  $\text{CaCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$ ). Les différentes lettres au-dessus des barres représentent les groupes homogènes selon le test de *Tukey* ( $P < 0.05$ ).

#### 4.4. Effet de la nature des électrolytes sur accumulation des solutés organiques

##### 4.4.1. Effet de la nature de l'anion accompagnateur du sodium (NaCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Les teneurs en proline obtenues dans les tissus aériens et racinaires montrent une augmentation progressive de cet acide aminé en fonction de la concentration du milieu en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, cette augmentation se poursuit jusqu' à 20 g/l où la proline représente environ 0.55 et 0.45 µg/g MS au niveau de la partie aérienne, et 0.38 et 0.36 µg/g MS au niveau de la partie racinaire respectivement pour le NaCl et le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. L'accumulation de la proline dans la partie aérienne et dans la partie racinaire serait plus importante pour les plantes cultivées en présence du NaCl (figures 69 et 70).

Statistiquement, l'analyse de la variance montre que la nature du sel a un effet très hautement significatif sur l'accumulation de la proline au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.0001$ ) et de la partie racinaire ( $P < 0.0001$ ).

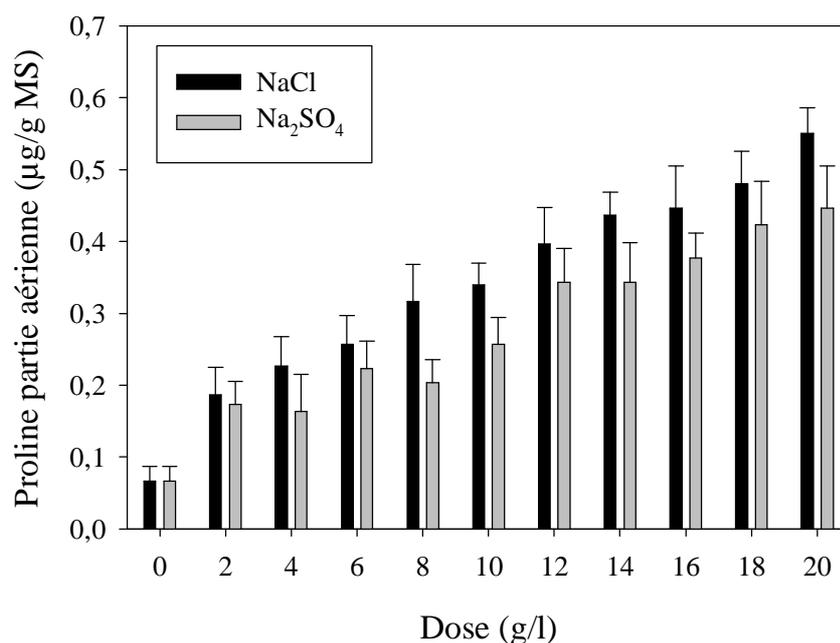
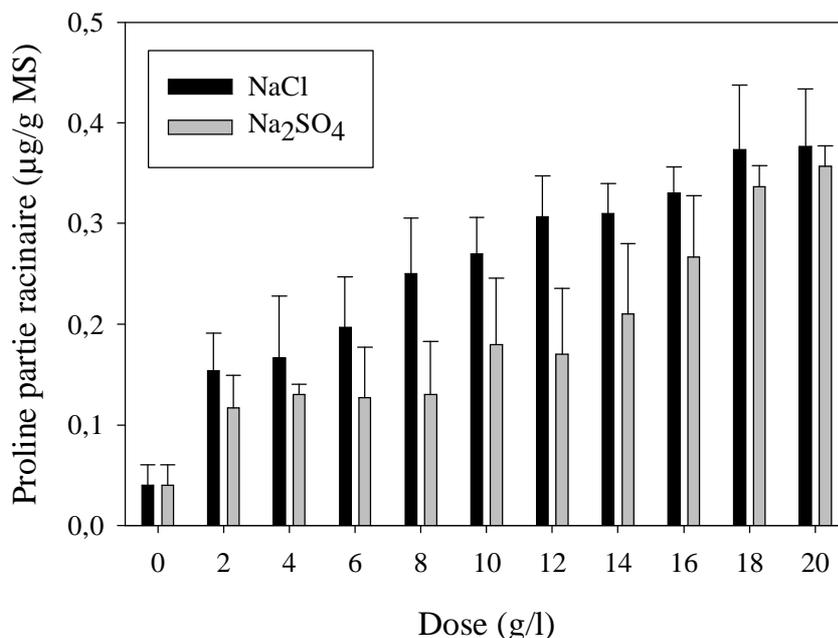


Figure 69. Effet du NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la teneur en proline des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).



**Figure 70.** Effet de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la teneur en proline des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

Il se produit également une augmentation des teneurs en sucres solubles totaux dans la partie aérienne et racinaire avec l'augmentation de la concentration en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> du milieu. Pour la dose la plus stressante (20 g/l), les sucres totaux représentent environ 4.48 et 3.61 µg/g MS au niveau de la partie aérienne, et 3.54 et 2.30 µg/g MS au niveau de la partie racinaire respectivement pour le NaCl et le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les teneurs en sucres totaux sont élevées chez les plants traités par le NaCl que chez ceux traités par le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (figures 71 et 72).

L'analyse de la variance pour les quantités des sucres totaux obtenues montre une différence très hautement significative entre les types de sel au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.0001$ ) et de la partie racinaire ( $P < 0.0001$ ).

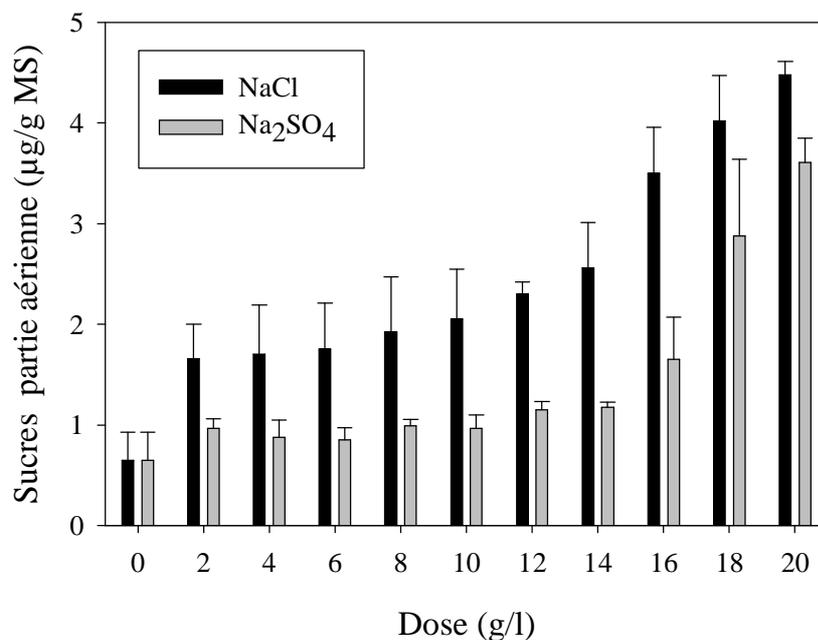


Figure 71. Effet de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la teneur en sucres totaux des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

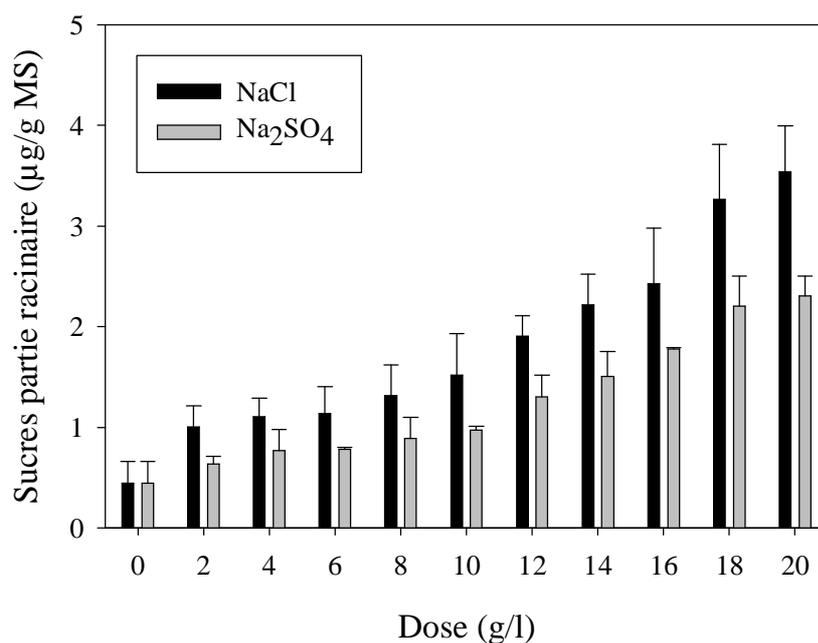


Figure 72. Effet de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la teneur en sucres totaux des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

#### 4.4.2. Effet de la nature du cation accompagnateur du chlore (NaCl/CaCl<sub>2</sub>)

Les résultats montrent que les deux types de sels solubles (NaCl et CaCl<sub>2</sub>) ont provoqué une accumulation de la proline dans la partie aérienne et dans la partie racinaire de l'*Atriplex halimus*. Cette accumulation est d'autant plus importante que la concentration en sel dans le milieu est élevée.

Globalement, les quantités accumulées de la proline sont plus remarquables chez les plants traités par le NaCl que chez les plants traités par le CaCl<sub>2</sub> (figures 73 et 74).

D'après l'analyse de la variance, il ressort un effet très hautement significatif du types de sel sur la teneur en proline dans la partie aérienne ( $P < 0.0001$ ) et dans la partie racinaire ( $P < 0.0001$ ).

Pour les sucres totaux, le NaCl engendre une plus grande production dans les tissus de la partie aérienne et de la partie racinaire que le CaCl<sub>2</sub> (figures 75 et 76). En effet, l'analyse de la variance montre un effet très hautement significatif de la nature du sel sur l'accumulation des sucres totaux au niveau de la partie aérienne ( $P < 0.0001$ ) et racinaire ( $P < 0.0001$ ).

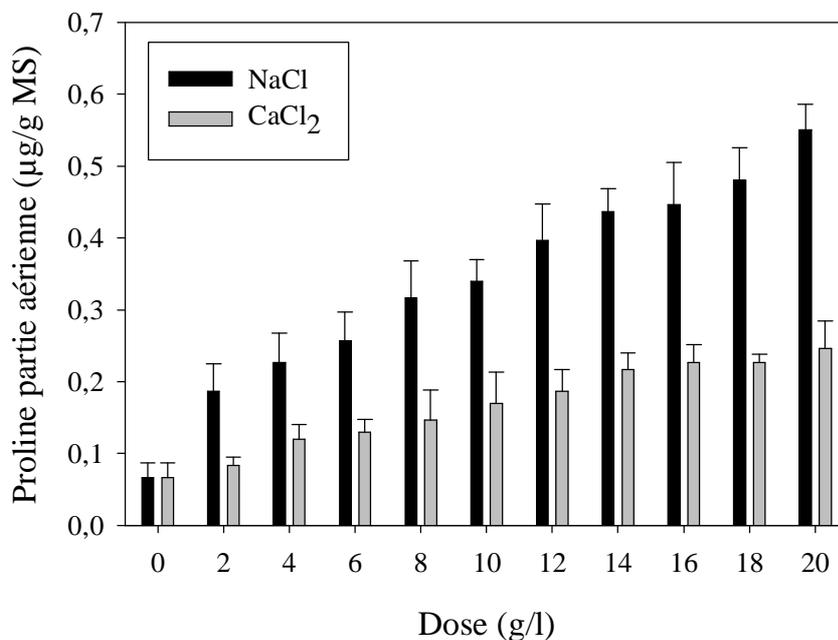


Figure 73. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en proline des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

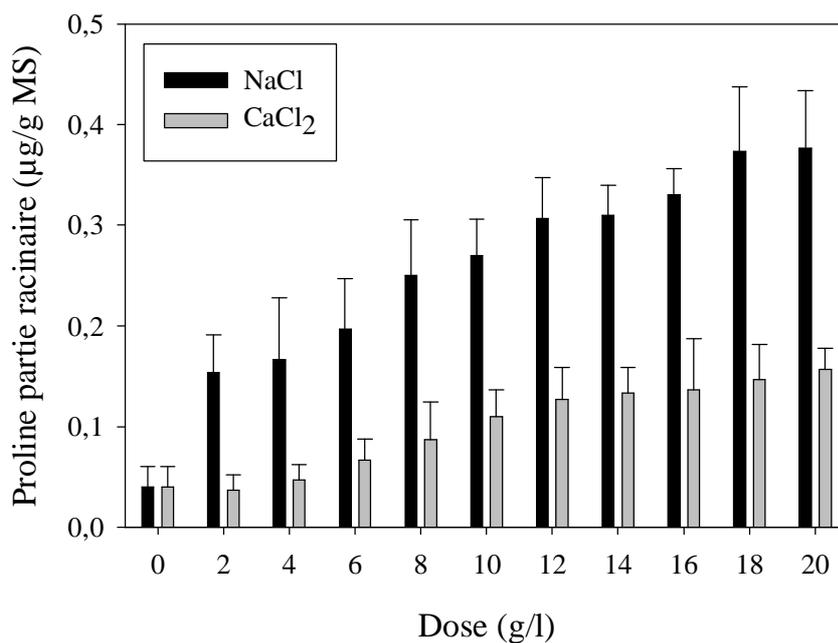


Figure 74. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en proline des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

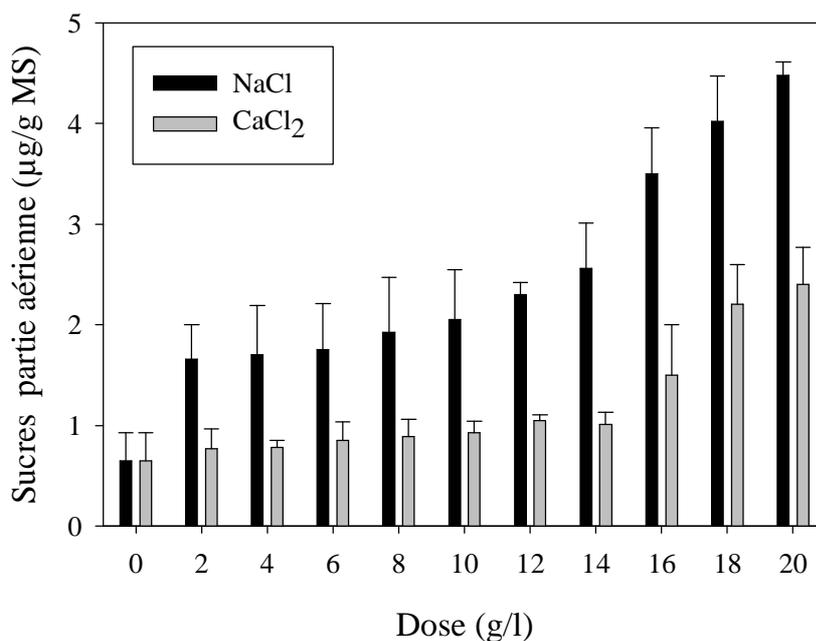


Figure 75. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en sucres totaux des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

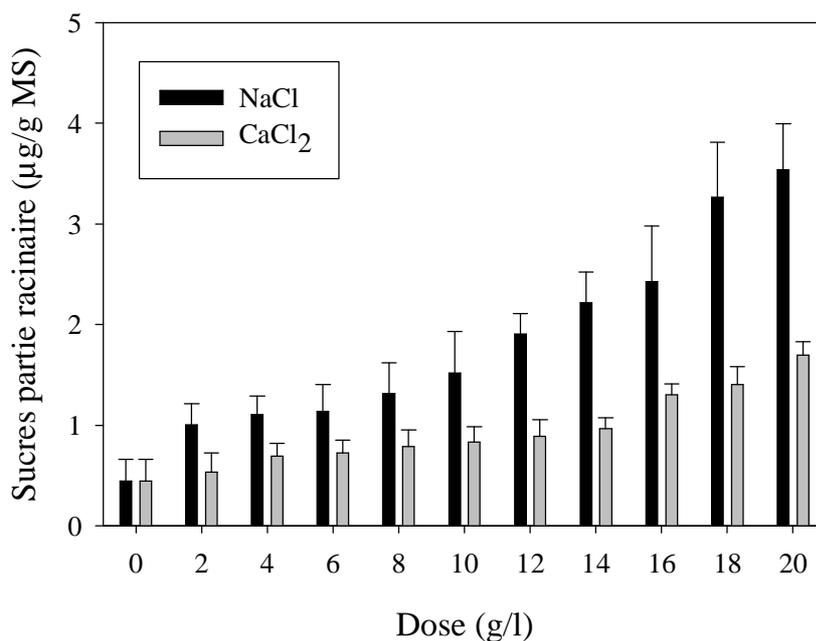


Figure 76. Effet de NaCl et de CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en sucres totaux des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Les barres représentent la moyenne ± Ecart-type ( $n=3$  répétitions,  $P < 0.001$ ).

#### 4.5. Discussion des résultats

Les résultats obtenus montrent que l'accumulation de la proline et des sucres solubles totaux augmente avec la concentration saline dans les deux parties de la plante. Ce résultat suggère l'utilisation par le végétal de ces composés dans l'ajustement osmotique (Ashraf et Foolad, 2007). Ces résultats corroborent ceux obtenus par Karimi et al. (2005), Heidari-Sharifabad et Mirzaie-Nodoushan (2006) et Song et al. (2006b), et qui notent une augmentation de la teneur de la proline et des sucres totaux chez *Kochia prostrata*, *Salsola dendroides* et *Suaeda physophora* soumises à un stress salin. Il faut signaler que dans notre cas, les teneurs de ces deux solutés sont plus élevées au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire. Les résultats obtenus montrent que, dans le cas du NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, la plante accumule plus de proline et des sucres totaux que dans le cas du CaCl<sub>2</sub>, ce qui semble indiquer une meilleure tolérance de cette espèce vis-à-vis du CaCl<sub>2</sub>.

L'accumulation de certains solutés organiques (connus sous le nom d'osmoprotectants) est une adaptation métabolique commune trouvée dans des diverses plantes soumises au stress salin (Rontein et al., 2002). Ces corps dissous protègent les protéines et les membranes cellulaires contre des dommages causés par la concentration élevée des ions inorganiques. Ces osmoprotectants protègent également les mécanismes métaboliques contre les dommages oxydatifs (Rathinasabapathi, 2000). L'ajustement osmotique a été considéré comme un mécanisme important dans la tolérance des plantes à la salinité. Ce mécanisme est un résultat de l'accumulation des corps organiques compatibles (tels que la proline et les sucres solubles) [Maggio et al., 2002]. Cette réponse au stress salin permet éventuellement de maintenir la turgescence foliaire à une valeur positive, en dépit d'un abaissement du potentiel hydrique du milieu. Ce maintien de la turgescence des tissus entretient l'activité métabolique de la plante (la photosynthèse notamment), soutient la croissance des racines et retarde la sénescence foliaire (Lacerda et al., 2005).

L'ajustement osmotique favorise donc la production de matière sèche en conditions hydriques limitantes, en augmentant –ou en maintenant– la consommation globale en eau et la tolérance de la plante à la déshydratation (Maggio et al., 2004).

La proline a été identifiée en tant qu'osmoprotecteur compatible et efficace, elle s'accumule en particulier dans les feuilles, à des concentrations élevées chez les halophytes et les glycophytes en réponse aux stress salin et hydrique (Ashraf et Foolad, 2007). Les résultats obtenus montrent, d'une façon générale, que l'accumulation de la proline chez *Atriplex halimus* est stimulée par le stress salin. Des résultats similaires ont été signalés chez d'autres halophytes, tels que *Salvadora persica* (Maggio et al., 2000); *Juncus kraussii* (Naidoo et Kift, 2006) et *Suaeda physophora* (Song et al., 2006b). En réalité, la nature de l'accumulation de la proline reste encore mal connue, s'il s'agit d'un simple symptôme de souffrance, ou d'un véritable mécanisme de tolérance (Ashraf et harris, 2004).

L'accumulation de la proline, induite par le stress salin, peut être le résultat de la stimulation de sa synthèse (Wang et al., 2007b), résultant d'une élévation de quantités de messagers codant pour l'enzyme glutamine synthétase qui convertit la glutamine semi aldéhyde en proline (Jiménez-Bremont et al., 2006). La stimulation de la pyrroline-5-carboxylate synthétase par le stress salin est signalée chez plusieurs espèces (Hien et al., 2003 ; Veeranagamallaiah et al., 2007). L'accumulation de la proline peut être aussi le résultat de la diminution de son oxydation ou du blocage de la protéogénèse (Claussen, 2005); d'après Hien et al. (2003), le sel induit une inhibition de l'activité de la proline déshydrogénase et de la proline oxydase. De même une hydrolyse des protéines riches en proline et/ou une synthèse activée de nouveau de cet acide aminé aboutissent à son accumulation dans les cellules (Ashraf et Foolad, 2007).

A l'instar de la proline, les résultats montrent que les sucres solubles sont aussi accumulés dans les plantules d'*Atriplex halimus* lors de l'augmentation de la concentration des sels solubles dans le milieu. Des résultats analogues ont été rapportés chez plusieurs halophytes et glycophytes sous stress salin; tels que *Aegiceras corniculatum* (Parida et al., 2004a); *Nicotiana tabacum* (Niknam et al., 2004); *Plantago coronopus* (Koyro, 2006).

L'accumulation des sucres solubles dans les feuilles a été largement rapportée comme une réponse à la salinité. Ils participeraient au phénomène d'ajustement osmotique (Arbona et al., 2005). Les sucres accumulés viennent essentiellement de l'hydrolyse des réserves d'amidon ou du blocage de la glycolyse (Hare et al., 1998). Dubey et Singh (1999) ont observé une dégradation de l'amidon accompagnée d'une augmentation des teneurs en sucres solubles qui peu être attribuée à une augmentation de l'activité de l'amidon phosphorylase, de celle du glucose phosphatase synthétase et d'une diminution de l'activité de l'invertase. L'accumulation des sucres solubles peut être aussi le résultat d'une utilisation réduite plutôt que d'une augmentation de leur biosynthèse (Serraj et Sinclair, 2002).

## 5. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Dans ce paragraphe, il s'agira de rappeler les principaux résultats obtenus dans ce travail.

### 5.1. Germination

Les observations sur la germination en boîte de Pétri durant 7 jours conduisent à des différences de comportement des graines d'*Atriplex halimus* vis-à-vis de la nature des sels appliqués.

Selon les résultats obtenus, les graines d'*Atriplex halimus* sont caractérisées par leur faible sensibilité aux faibles concentrations salines, même s'il existe une variabilité dans la réponse au stress salin selon la nature de sel et la concentration saline.

Les tests effectués montrent que les fortes concentrations salines ralentissent la vitesse de germination des graines et diminuent leur capacité germinative. Ces effets sont d'autant plus marqués que la concentration saline est élevée. Ces résultats sont en accord avec ceux de Khan et al. (2006) qui ont noté chez, *Atriplex stocksii*, une réduction du taux et de la vitesse de germination des graines en additionnant du NaCl dans le milieu de culture. Les perturbations observées pourraient être expliquées par une diminution du potentiel osmotique du milieu induite par la présence du sel (Debez et al., 2004).

L'augmentation de la concentration du NaCl, du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et de CaCl<sub>2</sub> dans la solution d'imbibition a provoqué, chez les graines d'*Atriplex halimus*, un allongement de la période de germination. D'après Redondo-Gomez et al. (2007), ce retard s'expliquerait par le temps nécessaire aux graines pour déclencher les mécanismes leur permettant d'ajuster leur pression osmotique. Du point de vue agronomique, le retard engendré par le sel n'est pas contraignant pour le rendement final de la culture, mais c'est plutôt la capacité germinative qui est la plus déterminante (Ashraf

et Foolad, 2005). Concernant ce paramètre, il apparaît dans notre travail un seuil de tolérance à la salinité qui dépend de la nature du sel appliqué. Ainsi, la capacité de germination a été significativement réduite (taux de germination de 75%) à partir de 5.25 g/l pour NaCl, 6.06 g/l pour Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et 7 g/l et pour CaCl<sub>2</sub> (tableau VIII).

En tenant compte des résultats de la capacité et de la durée de germination, il apparaît qu'au stade germination, l'espèce est plus tolérante au CaCl<sub>2</sub> et à moins degré au Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, elle est relativement plus sensible au NaCl.

La comparaison de l'effet de la nature des sels sur le taux de germination, en particulier du couple NaCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (effet de la nature de l'anion, Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et du couple NaCl/CaCl<sub>2</sub> (effet de la Nature du cation, Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>) donne les ordres de tolérance suivants : Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > NaCl.

$$\text{CaCl}_2 > \text{NaCl}.$$

L'effet inhibiteur du sel sur la germination des halophytes serait essentiellement de nature osmotique, le sel empêchant l'imbibition de la graine (Li et al., 2005, Song et al., 2006a). Dans les conditions naturelles, cette particularité s'avère d'un grand intérêt car elle permet la survie des espèces dont les habitats naturels présentent de grandes fluctuations de salinité et ouvre la possibilité de constituer une banque de graines viables qui germent lorsque les conditions du milieu deviennent plus favorables (Meloni et al., 2008).

Tableau VIII. Les seuils de tolérance (toxicité) de la germination des graines d'*Atriplex halimus* en fonction des différents sels utilisés.

Paramètre	Seuils de toxicité		
	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>
Germination	5.25 g/l	6.06 g/l	7 g/l

## 5.2. La croissance

Les effets de salinité se manifestent généralement chez les halophytes par une stimulation de la croissance jusqu'à un seuil qui diffère selon le végétal (l'espèce et la variété) et selon les conditions salines (nature et concentration du sel). En effet, après 30 jours de culture, des concentrations de l'ordre de 4, 6 et 8 g/l respectivement pour NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et CaCl<sub>2</sub> ont conduit à une stimulation de la production de la matière sèche chez les plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* (tableau IX).

Au delà d'un certain seuil, chez toutes les espèces végétales, les glycophytes comme les halophytes, la salinité du milieu entraîne une réduction de la biomasse. Néanmoins, le degré d'inhibition de la croissance dépend du genre, de l'espèce, de la variété, du stade de développement de la plante et de la nature de l'organe, de la nature du sel et de la concentration saline (Djanaguiraman et al., 2006).

Évalué sur l'ensemble de cette expérimentation, *Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* se présente comme une plante tolérante à la salinité. A partir d'un certain seuil, qui dépend de la nature du sel, l'action dépressive se manifeste par une réduction de la production de matière sèche des différents organes de la plante.

Pour le NaCl, le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ainsi que pour le CaCl<sub>2</sub>, les analyses de la variance ont montré des différences significatives entre les trois sels utilisés pour les différents paramètres biométriques analysés. Les facteurs relatifs à la concentration saline et à la nature de sel semblent induire des perturbations significatives de la croissance au niveau de la partie aérienne et de la partie racinaire.

Selon les valeurs de l'indice de succulence (matière fraîche/matière sèche) de la partie aérienne, l'espèce semble présenter une meilleure résistance à la déshydratation foliaire en présence du sel. Selon Janicka-Russak et Klobus (2007), la plante adopte deux types de stratégies selon l'ampleur et la durée du stress salin. Une première réponse se produit par la fermeture des stomates avant que l'état

hydrique de la feuille ne soit altéré ; une deuxième réponse implique une synthèse d'ABA au niveau racinaire qui est exportée vers les feuilles où elle initie la fermeture prolongée des stomates (Zhang et al., 2006 ; Maggio et al., 2007).

Au delà d'un certain seuil, les plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* ont affichée des diminutions du rendement en matière sèche dans les conditions de stress salin ; cette diminution est plus importante au niveau du stress salin imposé par NaCl que par le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et à moins degré par le CaCl<sub>2</sub>.

La comparaison de l'effet de la nature des sels sur la production de matière sèche, en particulier du couple NaCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (effet de la nature de l'anion, Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et du couple NaCl/CaCl<sub>2</sub> (effet de la Nature du cation, Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>) donne les ordres de tolérance suivants :

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > NaCl.

CaCl<sub>2</sub> > NaCl.

Le comportement d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* en conditions de stress salin montre que le sel affecte davantage la croissance de la partie aérienne que celle des racines. Cette différence de sensibilité au sel entre les deux types d'organes apparaît clairement par le calcul des seuils de tolérance des deux parties, dont la valeur est supérieure pour la partie racinaire (tableau IX). La tolérance du système racinaire est l'une des caractéristiques des halophytes, car généralement ce sont les organes photosynthétiques qui manifestent une plus forte sensibilité au stress salin que les organes d'absorption (Munns, 2002).

Tableau IX. Effets positifs et négatifs des différents sels utilisés sur la production de matière sèche.

Paramètres	Effet positif (stimulant)			Effet négatif (toxicité)		
	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>
MS partie aérienne	4 g/l	6 g/l	8 g/l	7.92 g/l	10.17 g/l	15.70 g/l
MS partie racinaire	4 g/l	6 g/l	8 g/l	9.37 g/l	12.31 g/l	> 20 g/l

L'effet dépressif de la salinité sur la croissance des plantes peut avoir deux causes principales et non exclusives relatives aux difficultés d'alimentation en eau et en nutriments, et à la toxicité des ions accumulés en excès dans la plante (Tester et Davenport, 2003). Nos résultats suggèrent que la réduction de la production de la matière sèche observée consécutivement à l'addition de NaCl et de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dans le milieu de culture serait imputable à l'action défavorable du sodium accumulé dans les tissus. En effet, l'analyse minérale des plantes après 30 jours de développement montre que l'accumulation de Na<sup>+</sup> dans les organes aériens atteint des niveaux élevés, conduisant à la réduction de la matière sèche des plantules, particulièrement à la plus forte concentration en sel (20 g/l). Mais cette accumulation massive de Na<sup>+</sup> dans les tissus foliaires s'accompagne d'une diminution des teneurs en K<sup>+</sup> d'autant plus prononcée que la concentration en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dans le milieu de culture est plus élevée. Il est bien établi que la présence de Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en grandes quantités dans le milieu de culture entraîne une compétition au niveau des sites d'absorption de K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, se manifestant par la limitation de l'absorption de ces éléments nutritifs essentiels (Jin et al., 2007).

### 5.3. La nutrition minérale

Les résultats obtenus ont montré que la présence du NaCl et du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dans le milieu de culture implique l'accumulation du Na<sup>+</sup>, du Cl<sup>-</sup> et de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dans les différents tissus d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii*. La majeure partie de ces éléments absorbés se trouve stockée au niveau de la partie aérienne. Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle les halophytes utilisent les sels pour ajuster la pression osmotique de leurs cellules. Elles laissent donc monter les sels dans leurs parties aériennes pour les stocker dans les vacuoles où ils sont utilisés comme *osmotocums* (Parida et Das, 2005). Cependant, à certains seuils, cette accumulation du sel est accompagnée d'une inhibition de la production de la biomasse. Dans le cas d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii*, cette inhibition peut être la conséquence d'une carence en d'autres éléments nutritifs (Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) indispensables au maintien de la structure cellulaire, au processus photosynthétiques et à la régulation

de la synthèse protéique (Heller et al., 1998). Des résultats similaires ont été observés chez d'autres espèces du même genre comme *Atriplex griffithii* (Khan et al., 2000a) et *Atriplex nummularia* (Ramos et al., 2004).

En présence de sel, la diminution des teneurs en éléments essentiels peut être expliquée par une perturbation de la perméabilité membranaire suite à une altération de leur composition lipidique (Munns, 2005), et/ou une compétition ionique au niveau des sites d'absorption (Jin et al., 2007).

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer l'action inhibitrice du sodium sur le prélèvement et l'accumulation du calcium et du potassium. Sachant que les ions  $\text{Na}^+$  peuvent être transportés à travers les canaux protéiques du  $\text{Ca}^{2+}$  et du  $\text{K}^+$  au niveau des membranes des cellules racinaires, une éventuelle compétition entre les ions peut se produire pour les mêmes sites d'absorption (Jin et al., 2007).

Nos résultats ont montré que l'augmentation de la concentration en  $\text{CaCl}_2$  dans le milieu de culture entraîne une diminution de l'absorption du sodium et par conséquent une diminution de ses teneurs dans les tissus de la plante, ce phénomène permet une amélioration significative de la production de la biomasse végétale. Le rôle du  $\text{Ca}^{2+}$  dans le maintien de l'intégrité structurale des biomembranes a été démontré aussi bien à l'échelle de la plante entière qu'à l'échelle cellulaire (Epstien, 1998).

La comparaison de l'effet de la nature des sels sur l'accumulation ionique, en particulier du couple  $\text{NaCl}/\text{Na}_2\text{SO}_4$  (effet de la nature de l'anion,  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ) et du couple  $\text{NaCl}/\text{CaCl}_2$  (effet de la nature du cation,  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ ) montre que les teneurs en azote sont relativement plus élevées chez les plants traités par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  que chez ceux traités par le  $\text{NaCl}$ . Par contre, pour le couple  $\text{NaCl}/\text{CaCl}_2$ , les teneurs en azote sont plus élevées chez les plants traités par le  $\text{NaCl}$ . Pour les trois sels, les teneurs en azote enregistrées sont plus importantes au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire. La capacité de ce végétal à accumuler l'azote est donc plus particulièrement localisée dans sa partie aérienne. Pour la comparaison

NaCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, les teneurs en PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> diminuent avec l'augmentation de la concentration en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dans le milieu de culture, avec un moindre degré chez les plantes traitées par le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. En revanche, la teneur en PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> au niveau de la partie aérienne et racinaire est plus affectée chez les plants traités par le CaCl<sub>2</sub> que par le NaCl. Il faut préciser, ici, que les teneurs du phosphore pour les trois sels sont plus élevées au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire. Les résultats de la comparaison du couple NaCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, montrent que l'accumulation du K<sup>+</sup> dans les tissus aériens et racinaires diminue progressivement au fur et à mesure que la concentration en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> augmente dans le milieu de culture, en particulier chez les plantes traitées par le Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> qui subissent la diminution la plus marquée. Par contre les plantes maintiennent une teneur plus élevée du K<sup>+</sup> pour le CaCl<sub>2</sub> par rapport au NaCl. Pour les trois sels, la capacité du végétal à accumuler le K<sup>+</sup> est plus particulièrement localisée dans sa partie aérienne.

#### 5.4. Accumulation des solutés organiques

L'augmentation de la concentration saline dans le milieu de culture engendre une accumulation accrue de la proline et des sucres totaux dans la partie aérienne et racinaire. De nombreux travaux effectués sur des espèces halophytes, comme *Suaeda physophora* (Song et al., 2006b) et *Kochia prostrata* (Karimi et al., 2005), ont montré que l'ajout du sel dans le milieu de culture entraîne une augmentation de ces solutés au niveau de la plante.

D'une façon générale, en conditions salines, l'accumulation de la proline et des sucres totaux se trouve nettement amplifiée par la concentration saline. Les organes aériens et souterrains donnent lieu à des observations similaires tant sur le plan cinétique que sur celui de l'importance de la proline et des sucres totaux accumulés en conditions salines faisant suite à la protéolyse et l'hydrolyse induites sous conditions de stress salin (Hernandez et al., 2000 ; Serraj et Sinclair, 2002).

## CONCLUSION GENERALE

Le but de ce travail porte sur l'étude de l'effet des sels solubles (NaCl, NaSO<sub>4</sub> et CaCl<sub>2</sub>) sur la germination, la croissance, la nutrition minérale, et l'accumulation de certains osmotecums chez une espèce halophyte autochtone à intérêt fourrager (*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii*). L'approche expérimentale au laboratoire a mise en œuvre des tests de germination et des cultures *in vitro* dans des conditions contrôlées.

Les principaux résultats obtenus montrent un effet peu marqué du stress salin sur le taux et la vitesse de germination pour des niveaux de salinité modérés, les graines de cette espèce sont caractérisées par leur rapidité de germination et leur faible sensibilité aux faibles concentrations salines. Le taux de germination des graines d'*Atriplex halimus* subit une diminution de 25 % pour des concentrations salines de 5.25 g/l NaCl, 6.06 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et 7 g/l CaCl<sub>2</sub>. Au delà de ces seuils, le taux de germination accuse une diminution significative. La comparaison de l'effet de la nature des sels sur le taux de germination, en particulier du couple NaCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (effet de la nature de l'anion, Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et du couple NaCl/CaCl<sub>2</sub> (effet de la Nature du cation, Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>) donne les ordres de tolérance suivants : Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > NaCl et CaCl<sub>2</sub> > NaCl.

Ce travail a confirmé l'adaptation d'*Atriplex halimus* à la salinité et sa tendance à l'halophilie. En effet, l'influence de la salinité dans le milieu se traduit par une stimulation de la production de la matière sèche, particulièrement à 4 g/l NaCl, 6 g/l NaSO<sub>4</sub> et 8 g/l CaCl<sub>2</sub>. Au delà de ces concentrations salines, le sel affecte négativement la production de la matière sèche. Par ailleurs, la concentration saline qui provoque une diminution de 25% de la croissance pondérale des plantes est de 7.92 g/l NaCl, 10.17 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, et 15.70 g/l CaCl<sub>2</sub> pour la partie aérienne, comparativement à 9.37 g/l NaCl, 12.31 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et plus de 20 g/l CaCl<sub>2</sub> pour la partie racinaire. L'action dépressive du sel se fait davantage sentir au niveau des racines par rapport à la partie aérienne. La comparaison de l'effet de la nature des

sels sur la production de matière sèche, en particulier du couple NaCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et du couple NaCl/CaCl<sub>2</sub> (Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>) donne les ordres respectifs de tolérance suivants : Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > NaCl et CaCl<sub>2</sub> > NaCl.

Cette espèce présente une bonne hydratation de ses tissus en présence du sel. En général, le statut hydrique de la partie aérienne montre que la turgescence augmente avec l'augmentation de la concentration saline.

L'augmentation de la concentration du NaCl et du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dans le milieu de culture provoque une augmentation de la teneur du Na<sup>+</sup>, du Cl<sup>-</sup> et de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, et une diminution des teneurs du Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et de l'azote dans la partie aérienne et dans la partie racinaire. A l'inverse, dans le cas du CaCl<sub>2</sub> la présence du calcium se traduit par une diminution du contenu en Na<sup>+</sup> et une accumulation du Ca<sup>2+</sup> et K<sup>+</sup>. L'effet de la nature de la nature de l'anion accompagnateur du sodium (Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et de la nature du cation accompagnateur du chlore (Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>) sur l'accumulation des trois éléments majeurs se traduit selon l'ordre suivant :

Azote (N): Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > NaCl et NaCl > CaCl<sub>2</sub>.

Phosphore (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>): Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > NaCl et NaCl > CaCl<sub>2</sub>.

Potassium (K<sup>+</sup>): NaCl > Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et CaCl<sub>2</sub> > NaCl.

La proline et les sucres totaux sont accumulés en quantités relativement proportionnelles aux concentrations salines. Leurs teneurs sont corrélées négativement à la production de matière sèche pour les trois sels. Ces osmotocums participent à l'ajustement osmotique des cellules du végétal en conditions salines.

Ces résultats fournissent des marqueurs intéressants pour élucider davantage la relation entre le stress salin et le comportement d'*Atriplex halimus*. Ils permettent une meilleure compréhension de la réponse au stress salin de ce végétal. Ils constituent des données nécessaires pour proposer des pratiques culturales permettant de valoriser des sols salés par une production végétale d'intérêt fourrager.

## BIBLIOGRAPHIE

Abbad A., Benchaabane A. (2004) The phenological study of *Atriplex halimus* L. *Afr. J. Ecol.* 42: 69-73.

Abbad A., Cherkaoui M., Wahid N., El Hadrami A., Benchaabane A. (2004) Variabilités phénotypique et génétique de trois populations naturelles d'*Atriplex halimus*. *C.R. Biol.* 327: 371-380.

Abdul Jaleel C., Gopi R., Sankar B., Manivannan P., Kishorekumar A., Sridharan R., Panneerselvam R. (2007) Studies on germination, seedling vigour, lipid peroxidation and proline metabolism in *Catharanthus roseus* seedlings under salt stress. *South Afr. J. Bot.* 73: 190-195.

Aïdoud A., Le Floc'h E., Le Houérou HN. (2006) Les steppes arides du nord de l'Afrique. *Sécheresse* 17 (1-2) : 19-30.

Allakhverdiev S.I., Sakamoto A., Nishiyama Y., Inaba M., Murata N. (2000) Ionic and osmotic effects of NaCl-induced inactivation of photosystems I and II in *Synechococcus* sp. *Plant Physiol.* 123 :1047-1056.

Aouissat, M., Sotomayor, J.A. and Correal, E. (1993). Production fourragère d'une plantation d'*Atriplex halimus* exploitée deux fois par an (hiver-été). In 7<sup>th</sup> Meeting FAO-sub network on mediterranean pastures and fodder crops. Chania, Greece. FAO-REUR Technical Series, pp: 12-16.

Arbona V., Marco A.J., Iglesias D.J., Lopez-Climent M.F., Talon M., Gomez-Cadenas A. (2005) Carbohydrate depletion in roots and leaves of salt-stressed potted *Citrus clementina* L. *Plant Growth Regul.* 46: 153-160.

Arshi A., Abdin M.Z., Iqbal M. (2006) Sennoside content and yield attributes of *Cassia angustifolia* Vahl. as affected by NaCl and CaCl<sub>2</sub>. *Sci. Horti.* 111: 84-90.

Ashraf M. (2004) Some important physiological selection criteria for salt tolerance in plants. *Flora* 199: 361-376.

Ashraf M., Harris P.J.C. (2004) Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant Sci.* 166: 3-16.

Ashraf M., Foolad M.R. (2005) Pre-sowing seed treatment- A shotgun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions. *Adv. Agron.* 88: 223-271.

Ashraf M., Orooj A. (2006) Salt stress effects on growth, ion accumulation and seed oil concentration in an arid zone traditional medicinal plant ajwain (*Trachyspermum ammic* [L.] Sprague). *J. Arid Environ.* 64: 209-220.

Ashraf, M., Foolad M.R. (2007) Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environ. Exp. Bot.* 59:206-216.

Askari H., Edqvist J., Hajheidari M., Kafi M., Salekdeh G.H. (2006) Effects of salinity levels on proteome of *Suaeda aegyptiaca* leaves. *Proteomics* 6: 2542-2554.

Aubert G. (1983) Observations sur les caractéristiques, la domination et la classification des sols salés ou salsodiques. *Cah. O.R.S.T.O.M sér. Pédol.* (20)1: 73-78.

Augé R., Beauchesne G., Boccon-Gibod J., Decourtye L., Digat B., Jalouzot R., Minier R., Morand J.C., Reynoird J.P., Strullu G., Vidalie H. (1989) *La culture in vitro et ses applications horticoles*. Ed. Lavoisier, Paris 8<sup>ème</sup> édition, 225p.

Aydi S., Drevon J., Abdelly C. (2004) Effect of salinity on root-nodule conductance to the oxygen diffusion in the *Medicago truncatula*-*Sinorhizobium meliloti* symbiosis. *Plant Physiol. Bioch.* 42: 833-840.

**B**ajji M., Kinet J-M., Lutts S. (1998) Salt stress effects on roots and leaves of *Atriplex halimus* L., and their corresponding callus cultures. *Plant Sci.* 137: 131-142.

Balnokin Y.V., Kurkova E.B., Myasoedov N.A., Lun'kov R.V., Shamsutdinov N.Z., Egorova E.A., Bukhov N.G. (2004) Structural and functional state of thylakoids in a halophyte *Suaeda altissima* before and after disturbance of salt-water balance by extremely high concentrations of NaCl. *Russ. J. Plant Physiol.* 51(6): 815-821.

Barhoumi Z., Djebali W., Smaoui A., Chaibi W., Abdelly C. (2007) Contribution of NaCl excretion to salt resistance of *Aeluropus litoralis* (Willd) Parl. *J.Plant Physiol.* 164: 842-850.

Barrett-Lennard E.G. (2002) Restoration of saline land through revegetation. *Agri. Water Manag.* 53: 213-226.

Bates L.S., Waldron R.P., Teare I.D. (1973) Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil* 39: 205-207.

Ben Amor N., Ben Hamed K., Debez A., Grignon C., Abdelly C.(2005) Physiological and antioxidant responses of the perennial halophyte *Crithmum maritimum* to salinity. *Plant Sci.* 168: 889-899.

Ben Amor N., Jimenez A., Megdiche W., Lundqvist M., Sevilla F., Abdelly C. (2006) Response of antioxidant systems to NaCl stress in the halophyte *Cakile maritima*. *Physiol. Plant.* 126: 446-457.

- Bethoumieu P., Conéjéro G., Nublat A., Brackenbury W.J., Lambert C., Savio C., Uozumi N., Oiki S., Yamada K., Cellier F., Gosti F., Simonneau T., Essah P.A., Tester M., Verry A.A., Sentenac H., Casse F. (2003) Functional analysis of AtHKT1 in *Arabidopsis* shows that Na<sup>+</sup> recirculation by the phloem is crucial for salt tolerance. *Embo J.* 22: 2004-2014.
- Bie Z., Ito T., Shinohara Y. (2004) Effects of sodium sulfate and sodium bicarbonate on the growth, gas exchange and mineral composition of lettuce. *Sci. Horti.* 99: 215-224.
- Bienert G.P., Schjoerring J.K., Jahn T.P. (2006) Membrane transport of hydrogen peroxide. *Bioch. Biophys. Acta* 1758 : 994-1003
- Blumwald E., Aharon G.S., Apse M.P. (2000) Sodium transport in plant cells. *Bioch. Biophys. Acta* 1465: 140-151.
- Bois G. (2005) *Ecophysiologie de semis de conifères ectomycorhizés en milieu salin et sodique*. Thèse doc. Université Laval, Québec. 190p.
- Bor M., Özdemir F., Türkan I. (2003) The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet *Beta vulgaris* L. and wild beet *Beta maritima* L. *Plant Sci.* 164: 77-84.
- Borsani O., Valpuesta V., Botella M.A. (2003) Developing salt tolerant plants in a new century: a molecular biology Approach. *Plant Cell Tissue Org. Cult.* 73: 101-115.
- Botella M.A., Martinez V., Parodine S.J., Cerda A. (1997) Salinity induced Potassium deficiency in maize plants. *J. plant. Physiol.* 150: 200-205.
- Bouabdellah E. (1992) *La végétation steppique sur sols salés des hautes-plaines sud-Algéroises. Composition, structure et production*, Thèse Doc., Univ. Paris sud. Centre d'Orsay, 206 p.
- Broetto F., Duarte H.M., Lüttge U. (2007) Responses of chlorophyll fluorescence parameters of the facultative halophyte and C<sub>3</sub>-CAM intermediate species *Mesembryanthemum crystallinum* to salinity and high irradiance stress. *J. Plant Physiol.* 164: 904-912.
- Brown C.E., Pezeshki S.R. (2007) Threshold for recovery in the marsh halophyte *Spartina alterniflora* grown under the combined effects of salinity and soil drying. *J. Plant Physiol.* 164: 274-282.

Cayuela E., Estaña M.T., Parra M., Caro M., Bolarin M.C. (2001) NaCl pre-treatment at the seedling stage enhances fruit yield of tomato plants irrigated with salt water. *Plant Soil* 230: 231-238.

Chebet D.K., Okeno J.A., Mathenge P. (2003) Biotechnological approaches to improve horticultural crop production. *Acta Horti*. 625: 473-477.

Chen S., Li J., Fritz E., Wang S., Hüttermann A. (2002) Sodium and chloride distribution in roots and transport in three poplar genotypes under increasing NaCl stress. *Forest Ecol. Manag.* 168: 217-230.

Cherian S., Reddy M.P. (2003) Evaluation of NaCl tolerance in the callus cultures of *Suaeda nudiflora* Moq. *Biol. Plant.* 46(2): 193-198.

Chinnusamy V., Schumaker K., Zhu J.K. (2004) Molecular genetic perspectives on cross-talk and specificity in abiotic stress signalling in plants. *J Exp. Bot.* 55: 225-236.

Chris A., Zeeshan M., Abraham G., Prasad S.M. (2006) Proline accumulation in *Cylindrospermum* sp. *Environ. Exp. Bot.* 57:154-159.

Claussen W. (2005) Proline as a measure of stress in tomato plants. *Plant Sci.* 168: 241-248.

Colmer T.D., Flowers T.J., Munns R. (2006) Use of wild relatives to improve salt tolerance in wheat. *J. Exp. Bot.* 57(5): 1059-1078.

Cordoba A., Seffino L.G., Moreno H., Arias C., Grunberg K., Zenoff A., Taleisnik E. (2001) Characterization of the effect of high salinity on roots of *Chloris gayana* Kunth: carbohydrate and lipid accumulation and growth. *Grass Forage Sci.* 56:162-168.

Dagnelie Ph. (1981) *Principes d'expérimentation*. Les presses Agronomiques de Gembloux Belgique, 182p.

Dagorn C., Daviot D., Guey D., Laffineur B., Lucas S., Raux P., Saber C., Straëbler M. (2005) *Les biotechnologies végétales. De nouveaux horizons pour l'amélioration des plantes*. Ed. Gnis, Paris, 51p.

Davenport R., Reid R.J., Smith F.A. (1997) Sodium-calcium interactions in two wheat species differing in salinity tolerance. *Physiol. Plant.* 99: 323-327.

Debez A., Ben Hamed K., Grignon C., Abdelly C. (2004) Salinity effects on germination, growth, and seed production of the halophyte *Cakile maritima*. *Plant Soil* 262:179-189.

Debez A., Saadaoui D., Ramani B., Ouerghi Z., Koyro H., Huchzermeyer B., Abdelly C. (2006) Leaf H<sup>+</sup>-ATPase activity and photosynthetic capacity of *Cakile maritima* under increasing salinity. *Environ. Exp. Bot.* 57: 285-295.

Demiral T., Türkan I. (2006) Exogenous glycinebetaine affects growth and proline accumulation and retards senescence in two rice cultivars under NaCl stress. *Environ. Exp. Bot.* 56:72-79.

Djanaguiraman M., Sheeba J.A., Shanker A.K., Devi D.D., Bangarusamy U. (2006) Rice can acclimate to lethal level of salinity by pre-treatment with sublethal level of salinity through osmotic adjustment. *Plant Soil* 284: 363-373.

Drevon J.J., Abdelly C., Amarger N., Aouani E.A., Aurag J., Gherbi H., Jebara M., Liuch C., Payre H., Schump O., Soussi M., Sifi B., Trabelsi M. (2001) An interdisciplinary research strategy to improve symbiotic nitrogen fixation and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris*) in salinised areas of the Mediterranean basin. *J. Biotech.* 91: 257-268.

Duan D., Liu X., Khan M.A., Gul B. (2004) Effects of salt and water stress on the germination of *chenopodium glaucum* L., seed. *Pak J. Bot.* 36(4): 793-800.

Dubey R.S., Singh A.K. (1999) Salinity induces accumulation of soluble sugars and alters the activity of sugar metabolising enzymes in rice plants. *Biol. Plant.* 42(2): 233-239.

Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A., Smith F. (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Ann. Chem.* 28: 350-356.

Dubos C. (2001) *Réponse moléculaire de jeunes plants de pin maritime soumis à un stress hydrique en milieu hydroponique*. Thèse doc. Université Henri Poincaré, Nancy I. 225p.

**E**l Shaer H.M., Kandil H.M. (1998) Potential of *Atriplex* species as fodder shrubs under the arid conditions of Egypt. Proc.VII Inter. Cong. Ecol., Florence, Italy.13p.

Elkahoui S., Hernandez J.A., Abdelly C., Ghrir R., Limam F. (2005) Effects of salt on lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of *Catharanthus roseus* suspension cells. *Plant Sci.* 168: 607-613.

Epstien E. (1998) How calcium enhances plant salt tolerance. *Science* 40: 1906-1907.

Essington M.E. (2004) *Soil and water chemistry, an integrative approach*. CRC Press, USA.

**F**AO (1992) *Foresterie en zones arides; guide à l'intention des techniciens de terrain. Cahier FAO conservation*. Rome, n° 20, 143p.

FAO (2005) *Global network on integrated soil management for sustainable use of salt-affected soils*. Rome, Italy: FAO Land and plant nutrition management service. (<http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>).

FAO (2006) Extension de la salinisation et stratégies de prévention et réhabilitation. Conférence électronique sur la salinisation, Rome, Italie, (<http://www.dgroups.org/groups/fao/salinization-conf/>) 12p.

Fernandes F.M., Arrabaça M.C., Carvalho L.M.M (2004) Sucrose metabolism in *Lupinus albus* L. under salt stress. *Biol. Plant.* 48(2): 317-319.

Flowers T.J., Flowers S.A. (2005) Why does salinity pose such a difficult problem for plant breeders? *Agri. Water Manag.* 78:15-24

Franclet A., Le Houérou N.H. (1971) *Les Atriplex en Tunisie et en Afrique du Nord*. Doc. Tech n° 7, FAO, Rome, 249p.

Franklin J.A., Zwiazek J.J. (2004) Ion uptake in *Pinus banksiana* treated with sodium chloride and sodium sulphate. *Physiol. Plant.* 120: 482-490.

**G**arcia A.B., de Almeida E.J., Iyer S., Gerats T., van Montagu M., Caplan A.B. (1997) Effects of osmoprotectants upon NaCl stress in rice. *Plant Physiol.* 115: 159-169.

Gautheret R.J. (1934) La culture de tissus cambial. *C.R. Acad. Sci.* 198 : 2195-2196.

Gebauera J., El-Siddigb K., Salih A.A., Eberta G. (2004) *Tamarindus indica* L. seedlings are moderately salt tolerant when exposed to NaCl-induced salinity. *Sci. Horti.* 103 :1-8.

Girija C., Smith B.N., Swamy P.M. (2002) Interactive effects of sodium chloride and calcium chloride on the accumulation of proline and glycinebetaine in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Environ. Exp. Bot.* 47: 1-10.

Grattan S.R., Grieve C.M. (1999) Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Sci. Horti.* 78:127-157.

Grieve C.M., Poss J.A., Grattan S.R., Suarez D.L., Benes S.E., Robinson P.H. (2004) Evaluation of salt-tolerant forages for sequential water reuse systems II. Plant - ion relations. *Agri. Water Manag.* 70:121-135.

Gul B., Khan M.A. (2006) Role of calcium in alleviating salinity effects in coastal halophytes. In: Khan M.A., Weber D.J. (Eds), *Ecophysiology of high salinity tolerant plants*. Ed. Springer-Netherlands, pp: 107-114.

**H**alitim A. (1988) *Sols des régions arides d'Algérie*. Ed. OPU, Alger, 384p.

Hamada A., Shono M., Xia T., Ohta M., Hayashi Y., Tanaka A., Hayakawa T. (2001) Isolation and characterization of a Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> antiporter gene from the halophyte *Atriplex gmelini*. *Plant Mol. Biol.* 46: 35-42.

Hare P.D., Cress W.A., Van Staden J. (1998) Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant Cell Environ.* 21: 535-553.

Hartung W., Sauter A., Hose E. (2002) Abscisic acid in the xylem: Where does it come from, where does it go to? *J. Exp. Bot.* 53:27-32.

Hasegawa P.M., Bressan R.A., Zhu J.K., Bohnert H.J. (2000) Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Ann. Rev. Plant Biol. Mol. Biol.* 51: 463-499.

Hassen N.I. (1994) Evaluation nutritionnelle des arbustes d'*Atriplex*. Coll. Inter. *Développement de la production animale et fourragère dans les régions steppiques*. ACSAD. Damas, Syrie, pp: 183-191.

Hcini Kh., Walker D. J., Bouzid S., Gonzalez E., Correal E. (2006) Determination of ploidy level and nuclear DNA content in Tunisian populations of *Atriplex halimus* L. *Gene. Res. Crop Evol.* 53: 1-5 .

He T., Cramer G.R. (1996) Abscisic acid concentrations are correlated with leaf area reductions in two salt-stressed rapid-cycling *Brassica* species. *Plant Soil* 179: 25-33.

Heidari-Sharifabad H., Mirzaie-Nodoushan H. (2006) Salinity-induced growth and some metabolic changes in three *Salsola* species. *J. Arid Environ.* 67 :715-720.

Heller R., Esnault R., Lance C. (1998) *Physiologie végétale. I. Nutrition*. Ed. Dunod, 323p.

Hernandez J.A., Olmos E., Corpas F.J., Sevilla F., del Rio L.A. (1995) Salt-induced oxidative stress in chloroplasts of pea plants. *Plant Sci.* 105: 151-167.

Hernandez S., Deleu C., Larher F. (2000) Accumulation de proline dans les tissus foliaires de tomate en réponse à la salinité. *C.R. Biol.* 323: 551-557.

Hien D.T., Jacobs M., Angenon G., Hermans C., Thu T.T., Son L.V., Roosens N.H. (2003) Proline accumulation and  $\Delta^1$ -pyrroline-5-carboxylate synthetase gene

properties in three rice cultivars differing in salinity and drought tolerance. *Plant Sci.* 165: 1059-1068.

Hincha D.K. (2006) High concentrations of the compatible solute glycinebetaine destabilize model membranes under stress conditions. *Cryobiol.* 53: 58-68.

Horie T., Schroeder J.I. (2004) Sodium transporters in plants. Diverse genes and physiological functions. *Plant Physiol.* 136: 2457-2462.

Hoshino Y., Nakano M., Mii M. (1995) Plant regeneration from cell suspension-derived protoplasts of *Saintpaulia ionantha* Wendl. *Plant Cell Rep.* 14: 341-344.

**J**ain SM. (2001) Tissue culture-derived variation in crop improvement. *Euphytica* 118: 153-166.

James J.J., Alder N.N., Mühling K.H., Läuchli A.E., Shackel K.A., Donovan L.A., Richards J.H. (2006) High apoplastic solute concentrations in leaves alter water relations of the halophytic shrub, *Sarcobatus vermiculatus*. *J. Exp. Bot.* 57(1): 139-147.

Janicka-Russak M., Klobus G. (2007) Modification of plasma membrane and vacuolar H<sup>+</sup>-ATPases in response to NaCl and ABA. *J. Plant Physiol.* 164: 295-302.

Jiménez V.M. (2005) Involvement of plant hormones and plant growth regulators on in vitro somatic embryogenesis. *Plant Growth Regul.* 47: 91-110.

Jiménez-Bremont J.F., Becerra-Flora A., Hernández-Lucero E., Rodríguez-Kessler M., Acosta-Gallegos J.A, Ramírez-Pimentel J.G. (2006) Proline accumulation in two bean cultivars under salt stress and the effect of polyamines and ornithine. *Biol. Plant.* 50 (4): 763-766.

Jin Z.M., Wang C.H., Liu Z.P., Gong W.J. (2007) Physiological and ecological characters studies on *Aloe vera* under soil salinity and seawater irrigation. *Process Bioch.* 42: 710-714.

Jordan F.L., Robin-Abbot M., Maier R.M., Glenn E.P. (2002) A comparison of chelator facilitated metal uptaker by a halophyte and a glycophyte. *Environ.Chem.* 21: 2698-2704.

**K**arimi G., Ghorbanli M., Heidari H., Khavari Nejad R.A., Assareh M.H. (2005) The effects of NaCl on growth, water relations, osmolytes and ion content in *Kochia prostrata*. *Biol. Plant.* 49(2): 301-304.

Kao W.Y., Tsai T.T., Tsai H.C., Shih C.N. (2006) Response of three *Glycine* species to salt stress. *Environ. Exp. Bot.* 56: 120-125.

Kaya C., Tuna A.L., Ashraf M., Altunlu H. (2007) Improved salt tolerance of melon (*Cucumis melo* L.) by the addition of proline and potassium nitrate. *Environ. Exp. Bot.* 60: 397-403.

Keiper, F.J., Chen, D.M., De Filippis, L.F. (1998) Respiratory, photosynthetic and ultrastructural changes accompanying salt adaptation in culture of *Eucalyptus microcorys*. *J. Plant Physiol.* 152: 564-573.

Keiffer C.H., Ungar I.A. (2002) Germination and establishment of halophytes on brine-affected soils. *J. App. Ecol.* 39:402-415.

Keren R. (2000) Salinity. In: Sumner M.E. (Ed.) *Handbook of Soil Science*. CRC Press, NY,USA, pp: 3-25.

Khadri M., Tejera N.A., Lluch C. (2007) Sodium chloride-ABA interaction in two common bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars differing in salinity tolerance. *Environ. Exp. Bot.* 60: 211-218.

Khan M.A., Ungar I.A., Showalter A.M. (2000a) Effects of salinity on growth, water relations and ions accumulation of the subtropical perennial halophyte, *Atriplex griffithii* var. *stockii*. *Ann. Bot.* 85: 225-232.

Khan M.A., Ungar I.A., Showalter A.M. (2000b) The effect of salinity on the growth, water status, and ion content of a leaf succulent perennial halophyte, *Suaeda fruticosa* (L.) Forssk. *J. Arid Environ.* 45: 73-84.

Khan M.A., Duke N.C. (2001) Halophytes-A resource for the future. *Wetlands Ecolo. Manag.* 6: 455-456.

Khan M.A., Zaheer M., Hameed A.A. (2006) Effect of sea salt and L-ascorbic acid on the seed germination of halophytes. *J. Arid Environ.* 67:535-540.

Koca H., Bor M., Özdemir F., Türkan I. (2007) The effect of salt stress on lipid peroxidation, antioxidative enzymes and proline content of sesame cultivars. *Environ. Exp. Bot.* 60: 344-351.

Kotzer E. (2005) Artificial kidneys for the soil - solving the problem of salinization of the soil and underground water. *Desalination* 185 :71-77.

Koyro H.W. (2006) Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of the potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* (L.) *Environ. Exp. Bot.* 56: 136-146.

Ksouri R., Megdiche W., Debez A., Falleh H., Grignon C., Abdelly C. (2007) Salinity effects on polyphenol content and antioxidant activities in leaves of the halophyte *Cakile maritima*. *Plant Physiol. Bioch.* 45: 244-249.

Kukreja S., Nandwal A.S., Kumar N., Sharma S.K., Sharma S.K., Unvi V., Sharma P.K. (2005) Plant water status, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> scavenging enzymes, ethylene evolution and membrane integrity of *Cicer arietinum* roots as affected by salinity. *Biol. Plant.* 49(2): 305-308.

Kurkova E.B., Myasoedov N.A., Kotov A.A., Kotova L.M., Lun'kov R.V., Shamsutdinov N.Z., Balnokin Y.V. (2002) Specific structure of root cells of the salt-accumulating halophyte *Suaeda altissima* L. *Dokl. Biol. Sci.* 387: 573-576.

Kuznetsov V., Shorina M., Aronova E., Stetsenko L., Rakitin V., Shevyakova N. (2007) NaCl and ethylene-dependent cadaverine accumulation and its possible protective role in the adaptation of the common ice plant to salt stress. *Plant Sci.* 172: 363-370.

**L**acerda C.F., Cambraia J., Oliva M.A., Ruiz H.A. (2005) Changes in growth and in solute concentrations in *Sorghum* leaves and roots during salt stress recovery. *Environ. Exp. Bot.* 54: 69-76.

Lambers H. (2003) Dryland salinity: A key environmental issue in southern Australia. *Plant Soil* 257: 5-7.

Lee G., Carrow R.N., Duncan R.R. (2005) Growth and water relation responses to salinity stress in halophytic seashore paspalum ecotypes. *Sci. Horti.* 104: 221-236.

Le Floch E. (1989) *Plantation d'arbustes fourragers. Bilan préliminaire de 30 ans de pastoralisme.* RAB/84/025, FAO, 240p.

Le Houérou H.N. (1992a) Agroforestry and sylvopastoralism to combat land degradation in the mediterranean basin: old approaches to new problems. *Agri. Ecosy. Environ.* 33: 99-109.

Le Houérou H.N. (1992b) The role of saltbushes (*Atriplex* sp.) in arid land rehabilitation in the mediterranean basin: A review. *Agrof. Sys.* 18:107-146

Le Houérou H.N. (1993) Salt tolerant plant of the arid regions of the mediterranean isoclimatic zone. In: Lieht H., Almasoom A. (Eds) *Towards the rational use of high salinity tolerant plant.* Kluwer academic publishers, pp: 403-422.

Le Houérou H.N. (2000) Utilization of fodder trees and shrubs in the arid and semi-arid zones of west Asia and north Africa. *Arid Soil Res. Rehab.* 14: 101-135.

Le Houérou H.N. (2002a) Man-made deserts: Desertization processes and threats. *Arid Land Res. Manag.* 16: 1-36.

Le Houérou H.N. (2002b) Multipurpose germplasm of fodder shrubs and trees for the rehabilitation of arid and semi-arid land in the Mediterranean isoclimatic zone. A photographic catalogue. *Options Médit.* 37: 1-118.

Le Houérou H.N. (2004) *Atriplex halimus data sheet*. Commonwealth Agricultural Bureau International (CABI), Wallingford. UK, pp: 1-19.

Le Houérou H.N. (2006) Environmental constraints and limits to livestock husbandry in arid lands. *Sécheresse* 17 (1-2): 10-18.

Levigner A., Lopez F., Vansuyt G., Berthomieu P., Fourcroy P., Casse-delbart f. (1995) Les plantes faces au stress salin. *Cahiers Agri.* 4: 263-273.

Levy G.J. (2000) Sodidity. In: Sumner M.E. (Ed). *Handbook of Soil Science*. CRC Press, NY,USA, pp: 27-62.

Li F.N., Johnston M. (1997) GRR1 of *Saccharomyces cerevisiae* is connected to the ubiquitin proteolysis machinery through Skp1: coupling glucose sensing to gene expression and the cell cycle. *Embo. J.* 16: 5629-5638.

Li W., Liu X., Khan M. A., Yamaguchi S. (2005) The effect of plant growth regulators, nitric oxide, nitrate, nitrite and light on the germination of dimorphic seeds of *Suaeda salsa* under saline conditions. *J. Plant Res.* 118: 207-214.

Limiting X., Zhan J.K. (2003) Regulation of Abscisic acid biosynthesis. *Plant Physiol.* 133: 29-36.

Lu C.M., Qiu N.W., Lu Q.T., Wang B.S., Kuang T.Y. (2002) Does salt stress lead to increased susceptibility of photosystem II to photoinhibition and changes in photosynthetic pigment composition in halophyte *Suaeda salsa* grown outdoors? *Plant Sci.* 163: 1063-1068.

Lucchesini M., Mensuali-Sodi A. (2004) Influence of medium composition and vessel ventilation on in vitro propagation of *Phillyrea latifolia* L. *Sci. Horti.* 100: 117-125.

Lutts S., Lefèvre I., Délderée C., Kivits S., Dechamps C., Robledo A., Correal E. (2004) Heavy metal accumulation by the halophyte species mediterranean saltbush. *J. Environ. Qual.* 33: 1271-1279.

Ma R., Zhang M., B. Li, Du G., Wang J., Chen J. (2005) The effects of exogenous Ca<sup>2+</sup> on endogenous polyamine levels and drought-resistant traits of spring wheat grown under arid conditions. *J. Arid Environ.* 63: 177-190.

Maas E.V. (1986) Salt tolerance of plants. *Appl. Agric. Res.* 1: 12-26.

Maas, E.V. (1990) Crop salt tolerance. In: Tanji, K.K. (Ed.), *Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE Manuals and Reports on Engineering* No. 71, ASCE, New York, pp: 262-304.

Maathuis F.J.M., Amtmann A. (1999) K<sup>+</sup> nutrition and Na<sup>+</sup> toxicity: the basis of cellular K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> ratios. *Ann Bot.* 84: 123–133.

Maggio A., Reddy M.P., Joly R.J. (2000) Leaf gas exchange and solute accumulation in the halophyte *Salvadora persica* grown at moderate salinity. *Environ. Exp. Bot.* 44: 31-38.

Maggio A., Miyazaki S., Veronese P., Fujita T., Ibeas J.I., Damsz B., Narasimhan M.L., Hasegawa P.M., Joly R.J., Bressan R.A. (2002). Does proline accumulation play an active role in stress induced growth reduction? *Plant J.* 31: 699-712.

Maggio A., De Pascale S., Angelino G., Ruggiero C., Barbieri G. (2004) Physiological response of tomato to saline irrigation in long-term salinized soils. *Europ. J. Agron.* 21:149-159.

Maggio A., Raimondi G., Martino A., De Pascale S. (2007) Salt stress response in tomato beyond the salinity tolerance threshold. *Environ. Exp. Bot.* 59: 276-282.

Mahajan S., Tuteja N. (2005) Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Arch. Biochem. Biophys.* 444: 139-158.

Malcolm C.V., Lindley V.A., O'Leary J.W., Runciman H.V., Barrett-Lennard E.G. (2003) Halophyte and glycophyte salt tolerance at germination and the establishment of halophyte shrubs in saline environments. *Plant Soil* 253: 171-185.

Mansour M.M.F. (1998) Protection of plasma membrane of onion epidermal cells by glycine betaine and proline against NaCl stress. *Plant Physiol. Biochem.* 36: 767–772.

Marcum K.B. (2006) Use of saline and non-potable water in the turfgrass industry: Constraints and developments. *Agri. Water Manag.* 80: 132-146.

Maricle B.R., Cobos D.R., Campbell C.S. (2007) Biophysical and morphological leaf adaptations to drought and salinity in salt marsh grasses. *Environ. Exp. Bot.* 60: 458-467.

Margara I. (1989) *Bases de la multiplication végétative, les méristèmes et l'organogénèse*. Ed. INRA, Paris, 7<sup>ème</sup> édition, 262p.

Martínez J-P., Ledent J.F., Bajji M., Kinet J-M., Lutts S. (2003) Effect of water stress on growth, Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> accumulation and water use efficiency in relation to osmotic adjustment in two populations of *Atriplex halimus* L. *Plant Growth Regul.* 41: 63-73.

- Martínez J-P., Lutts S., Schanck A., Bajji M., Kinet J-M. (2004) Is osmotic adjustment required for water stress resistance in the Mediterranean shrub *Atriplex halimus* L.? *J. Plant Physiol.* 161: 1041-1051
- Martínez J-P., Kinet J-M., Bajji M., Lutts S. (2005) NaCl alleviates polyethylene glycol-induced water stress in the halophyte species *Atriplex halimus* L. *J. Exp. Bot.* 56(419): 2421-2431.
- Martinez-Ballesta M.C., Silva C., Lopez-Berenguer C. Cabañero F.J., Carvajal M. (2006) Plant aquaporins: New perspectives on water and nutrient uptake in saline environment. *Plant Biol.* 8:535-546.
- Masters D.G., Benes S.E., Norman H.C. (2007) Biosaline agriculture for forage and livestock production. *Agri. Ecosys. Environ.* 119: 234-248.
- Matthews D., Mottley J., Horan I., Roberts A.V. (1991) A protoplast to plant system in roses. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 24:173-180.
- Mattia C., Bischetti G.B., Gentile F. (2005) Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species. *Plant Soil* 278: 23-32.
- Melgar J.C., Benlloch M., Fernandez-Escobar R. (2006) Calcium increases sodium exclusion in olive plants. *Sci. Horti.* 109: 303-305.
- Meloni D.A., Gulotta M.R., Martinez C.A. (2008) Salinity tolerance in *Schinopsis quebracho* colorado: Seed germination, growth, ion relations and metabolic responses. *J. Arid Environ.* 72 : 1785-1792
- Messedi D., Labidi N., Grignon C., Abdelly C. (2004) Limits imposed by salt to the growth of the halophyte *Sesuvium portulacastrum*. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167: 720-725.
- Meychik N.R., Nikolaeva J.I., Yermakov I.P. (2005) Ion exchange properties of the root cell walls isolated from the halophyte plants (*Suaeda altissima* L.) grown under conditions of different salinity. *Plant Soil* 277:163-174.
- Mills D., Zhang G., Benzioni A. (2001) Effect of different salts and of ABA on growth and mineral uptake in *Jobba* shoots grown in vitro. *J. Plant Physiol.* 158:1031-1039.
- Ministère de l'agriculture (1998) Plan national d'action pour l'environnement. Rapp. synth., 15p.
- Misra N., Dwivedi U.N. (2004) Genotypic difference in salinity tolerance of green gram cultivars. *Plant Sci.* 166: 1135-1142.
- Misra N., Gupta A.K. (2005) Effect of salt stress on proline metabolism in two high yielding genotypes of green gram. *Plant Sci.* 169: 331-339.

Moghaieb R.E.A., Saneoka H., Fujita K. (2004) Effect of salinity on osmotic adjustment, glycinebetaine accumulation and the betaine aldehyde dehydrogenase gene expression in two halophytic plants, *Salicornia europaea* and *Suaeda maritima*. *Plant Sci.* 166: 1345-1349.

Monreal J.A., Jiménez E.T., Remesal E., Morillo-Velarde R., Garcia-Mauriño S., Echevarria C. (2007) Proline content of sugar beet storage roots: Response to water deficit and nitrogen fertilization at field conditions. *Environ. Exp. Bot.* 60: 257-267.

Morel G., Wetmore R.H. (1951) Fern callus tissue culture. *Amer. J. Bot.* 38: 141-143.

Moreno-Rodriguez M.J., Rivero V.C., Ballesta R.J. (2005) Selenium distribution in topsoils and plants of a semi-arid Mediterranean environment. *Environ. Geochem. Health* 27: 513-519.

M'rah S., Ouerghi Z., Berthomieu C., Havaux M., Jungas C., Hajji M., Grignon C., Lachaâl M. (2006) Effects of NaCl on the growth, ion accumulation and photosynthetic parameters of *Thellungiella halophila*. *J. Plant Physiol.* 163: 1022-1031.

Munns R. (1993) Physiological processes limiting plant growth in saline soil: some dogmas and hypotheses. *Plant Cell Environ.* 16: 15-24.

Munns R. (2002) Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environ.* 25: 239-250.

Munns R. (2005) Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytol.* 167: 645-663.

Murashige T., Skoog F. (1962) A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue culture. *Physiol. Plant.* 15: 473-497.

Murillo-Amador B. , Jones H.G., Kaya C., Aguilar R.L. , Garcia-Hernandez J.L. , Troyo-Dieguez E., Avila-Serrano N.Y., Rueda-Puente E. (2006) Effects of foliar application of calcium nitrate on growth and physiological attributes of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) grown under salt stress. *Environ. Exp. Bot.* 58: 188-196.

Mustard J., Renault S. (2004) Effects of NaCl on water relations and cell wall elasticity and composition of red-osier dogwood (*Cornus stolonifera*) seedlings. *Physiol. Plant.* 121: 265-271.

**N**aidoo G., Kift J. (2006) Responses of the saltmarsh rush *Juncus kraussii* to salinity and water logging. *Aquatic Bot.* 84: 217-225.

Naidu R., Rengasamy P. (1993) Ion interactions and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils. *Aus. J. Soil Research* 31: 801-819.

Neocleous D., Vasilakakis M. (2007) Effects of NaCl stress on red raspberry (*Rubus idaeus* L. Autumn Bliss). *Sci. Horti.* 112: 282-289.

Nefzaoui A., Chermiti A. (1991) Place et rôles des arbustes fourragers dans les parcours de zones arides et semi-arides de la Tunisie. *Options Médit.* 16: 119-125.

Neuhaus H. E. (2007) Transport of primary metabolites across the plant vacuolar membrane. *FEBS Letters* 581: 2223-2226.

Niknam V., Bagherzadeh M., Ebrahimzadeh H., Sokhansanj A. (2004) Effect of NaCl on biomass and contents of sugars, proline and proteins in seedlings and leaf explants of *Nicotiana tabacum* grown *in vitro*. *Biol. Plant.* 48(4): 613-615.

Noiraud N., Maurousset L., Lemoine R. (2001) Transport of polyols in higher plants. *Plant Physiol. Bioch.* 39:71 7-728.

**O**smán A.E., Bahhady F., Hassan N., Ghassali F., AL Ibrahim T. (2006) Livestock production and economic implications from augmenting degraded rangeland with *Atriplex halimus* and *Salsola vermiculata* in northwest Syria. *J. Arid Environ.* 65: 474-490.

**P**arida A., Das A.B., Das P. (2002) NaCl stress causes changes in photosynthetic pigments, proteins and other metabolic components in the leaves of a true mangrove, *Bruguiera parviflora*, in hydroponic cultures. *J. Plant Biol.* 45: 28-36.

Parida A.K., Das A.B., Mitra B. (2003) Effects of NaCl stress on the structure, pigment complex composition and photosynthetic activity of mangrove *Bruguiera parviflora* chloroplasts. *Photosynthetica* 41: 191-200.

Parida A.K., Das A.B. Sanada Y., Mohanty P. (2004a) Effects of salinity on biochemical components of the mangrove, *Aegiceras corniculatum*. *Aquatic Bot.* 80: 77-87.

Parida A.K., Das A.B., Mitra B. (2004b) Effects of salt on growth, ion accumulation photosynthesis and leaf anatomy of the mangrove, *Bruguiera parviflora*. *Trees-Struct. Funct.* 18: 167-174.

Parida A.K., Das A.B. (2005) Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotox. Environ. Safety* 60: 324-349.

Pati P.K., Rath S.P., Sharma M., Sood A., Ahuja P.S. (2006) In vitro propagation of rose—a review. *Biotech. Adv.* 24: 94-114.

Pérez-Alfocea F., Larher F. (1995) Sucrose and proline accumulation and sugar efflux in tomato leaf discs affected by NaCl and polyethylene glycol 6000 iso-osmotic stresses. *Plant Sci.* 107 :9-15.

Popova O.V., Golldack D. (2007) In the halotolerant *Lobularia maritima* (Brassicaceae) salt adaptation correlates with activation of the vacuolar H<sup>+</sup>-ATPase and the vacuolar Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> antiporter. *J. Plant Physiol.* 164: 1278-1288.

Pouget M. (1973) Une manifestation particulière et méconnue de la salure dans les steppes du sud Algérois : Les plages de salure sur les glaciers quaternaires à croûte calcaire. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord* 64: 15-24.

Pourrat Y., Dutuit P. (1993) Effects of the sodium and calcium concentrations on the in vitro growth of *Atriplex halimus* L. plantlets. *J. Plant Nutr.* 16: 1417-1429.

Pujol J.A., Calvo J., Ramirez-Diaz L. (2000) Recovery of germination from different osmotic conditions by four halophytes from south eastern Spain. *Ann. Bot.* 85: 279-286.

**Q**adir M., Schubert S., Ghafoor A., Murtaza G. (2001) Amelioration strategies for sodic soil: A review. *Land Deg. Develop.* 12: 357-386.

Qiu N., Lu C. (2003) Enhanced tolerance of photosynthesis against high temperature damage in salt-adapted halophyte *Atriplex centralasiatica* plants. *Plant Cell Environ.* 26: 1137-1145.

Qiu N., Lu Q., Lu C. (2003) Photosynthesis, photosystem II efficiency and the xanthophyll cycle in the salt-adapted halophyte *Atriplex Centralasiatica*. *New Phytol.* 159: 479-486.

**R**adic S., Radic-Stojkovic M., Pevalek-Kozlina B. (2006) Influence of NaCl and mannitol on peroxidase activity and lipid peroxidation in *Centaurea ragusina* L. roots and shoots. *J. Plant Physiol.* 163: 1284-1292.

Ramoliya P.J., Patel H.M., Pandey A.N. (2004) Effect of salinization of soil on growth and macro- and micro-nutrient accumulation in seedlings of *Salvadora persica* (Salvadoraceae). *Forest Ecol. Manag.* 202: 181-193.

Ramos, J., Lopez, M.J., Benlloch, M. (2004) Effect of NaCl and KCl salts on the growth and solute accumulation of the halophyte *Atriplex nummularia*. *Plant Soil* 259: 163-168.

Rathinasabapathi B. (2000) Metabolic engineering for stress tolerance: Installing osmoprotectant synthesis pathways. *Ann. Bot.* 86: 709-716.

Raza S.H., Athar H.R., Ashraf M., Hameed A. (2007) Glycinebetaine-induced modulation of antioxidant enzymes activities and ion accumulation in two wheat cultivars differing in salt tolerance. *Environ. Exp. Bot.* 60: 368-376.

Redondo-Gomez S., Wharmby C., Castillo J.M., Mateos-Naranjo E., Luque C.J., de Cires A., Luque T., Davy A.J., Figueroa M.E. (2006) Growth and photosynthetic responses to salinity in an extreme halophyte, *Sarcocornia fruticosa*. *Physiol. Plant.* 128: 116-124.

Redondo-Gomez S., Mateos-Naranjo E., Wharmby C., Luque C.J., Castillo J.M., Luque T., Mohamed M.F., Davy A.J., Figueroa M.E. (2007) Bracteoles affect germination and seedling establishment in a Mediterranean population of *Atriplex portulacoides*. *Aquatic Bot.* 86: 93-96.

Rejsiková A., Patková L., Eva Stodulková E., Lipavská H. (2007) The effect of abiotic stresses on carbohydrate status of olive shoots (*Olea europaea* L.) under in vitro conditions. *J. Plant Physiol.* 164: 174-184.

Renault S., Croser C., Franklin J.A., Zwiazek J.J. (2001) Effects of NaCl and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on red-osier dogwood (*Cornus stolonifera* Michx) seedlings. *Plant Soil* 233: 261-268.

Renault S. (2005) Response of red-osier dogwood (*Cornus stolonifera*) seedlings to sodium sulphate salinity: effects of supplemental calcium. *Physiol. Plant.* 123: 75-81.

Rengasamy P., Chittleborough D., Helyar K. (2003) Root-zone constraints and plant based solutions for dryland salinity. *Plant Soil* 257: 249-260.

Rodin L.E., Vinogradov B., Mirochnichenko Y., Pelt M., Kalenov H., Botschantsev V. (1970) *Etude géobotanique des pâturages du secteur ouest du département de Médéa (Algérie)*. Ed. Nauka, Leningrad, 124p.

Rontein D., Basset G., Hanson A.D. (2002) Metabolic engineering of osmoprotectant accumulation in plants. *Metab. Engin.* 4:49-56.

Rout G.R., Samantaray S., Mottley J., Das P. (1999) Biotechnology of the rose: a review of recent progress. *Sci. Horti.* 81: 201-228.

Rout G.R., Mohapatra A., Jain S. M. (2006) Tissue culture of ornamental pot plant: A critical review on present scenario and future prospects. *Biotech. Adv.* 24: 531-560.

Ruiz J.M., Rivero R.M., Garcia P.C., Baghour M., Romero L. (1999) Role of CaCl<sub>2</sub> in nitrate assimilation in leaves and roots of tobacco plants (*Nicotiana tabacum* L.). *Plant Sci.* 141: 107-115.

- S**aneoka H., Ishiguro S., Moghaieb R.E.A. (2001) Effect of salinity and abscisic acid on accumulation of glycinebetaine and betaine aldehyde dehydrogenase mRNA in Sorghum leaves ( *Sorghum bicolor*). *J. Plant Physiol.* 158: 853-859.
- Sato S., Sakaguchi S., Furukawa H., Ikeda H. (2006) Effects of NaCl application to hydroponic nutrient solution on fruit characteristics of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Sci. Horti.* 109: 248-253.
- Sawalha M.F., Peralta-Videa J.R., Romero-González J., Gardea-Torresdey J.L. (2006) Biosorption of Cd(II), Cr(III), and Cr(VI) by saltbush (*Atriplex canescens*) biomass: Thermodynamic and isotherm studies. *J. Colloid Interface Sci.* 300: 100-104.
- Schmitz-Eiberger M., Haefs R., Noga G. (2002) Calcium deficiency – Influence on the antioxidative defense system in tomato plants. *J. Plant Physiol.* 159: 733–742
- Seki M., Kamei A., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. (2003) Molecular responses to drought, salinity and frost: common and different paths for plant protection. *Curr. Opinion Biotech.* 14: 194-199.
- Serraj R., Sinclair T.R. (2002) Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions? *Plant Cell Environ.* 25: 333–341.
- Shabala S., Shabala L., Van Volkenburgh E., Newman I. (2005) Effect of divalent cations on ions fluxes and leaf photochemistry in salinized barley leaves. *J. Exp. Bot.* 415: 1369-1378.
- Shaikh F., Gul b., Li w., Liu x., Khan M.A. (2007) Effect of calcium and light on the germination of *Urochondra setulosa* under different salts. *J. Zhejiang Univ. Sci. B.* 8(1): 20-26.
- Sheng F., Xiuling C. (1997) Using shallow saline groundwater for irrigation and regulating for soil salt-water regime. *Irrig. Drain. Syst.* 11: 1–14.
- Shevyakova N.I., Rakitin V.Y., Stetsenko L.A., Aronova E.E., Kuznetsov V.V. (2006) Oxidative stress and fluctuations of free and conjugated polyamines in the halophyte *Mesembryanthemum crystallinum* L. under NaCl salinity. *Plant Growth Regul.* 50: 69-78.
- Simon L.E. (1997) Morphology, ontogeny and adaptative value of glandular mucilagene surfaces in the genus *Chinopodium* L. (Chenopodeaceae). *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Vie* 320: 615-620.
- Slama I., Messedi D., Ghnaya T., Savoure A., Abdelly C. (2006) Effects of water deficit on growth and proline metabolism in *Sesuvium portulacastrum*. *Environ. Exp. Bot.* 56: 231-238.

Slavich P.G., Petterson G.H. (1993) Estimating the electrical conductivity of saturated paste extracts from 1:5 soil: water suspensions and texture. *Aus. J. Soil Research* 31: 73-81.

Sobrado M. A. (2004) Influence of external salinity on the osmolarity of xylem sap, leaf tissue and leaf gland secretion of the mangrove *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. *Trees* 18: 422-427.

Song J., Feng G., Tian C., Zhang F. (2005) Strategies for adaptation of *Suaeda physophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to a saline environment during seed-germination stage. *Ann. Bot.* 96: 399-405.

Song J., Feng G., Zhang F. (2006a) Salinity and temperature effects on germination for three salt-resistant euhalophytes, *Halostachys caspica*, *Kalidium foliatum* and *Halocnemum Strobilaceum*. *Plant Soil* 279: 201-207.

Song J., Feng G., Tian C., Zhang F. (2006b) Osmotic adjustment traits of *Suaeda physophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* in field or controlled conditions. *Plant Sci.* 170: 113-119.

Sosa L., Llanes A., Reinoso H., Reginato M., Luna V., (2005) Osmotic and specific ion effects on the germination of *Prosopis strombulifera*. *Ann. Bot.* 96: 261-267.

Souza-Filho G.A., Ferreira B.S., Dias J.M., Queiroz K.S., Branco A.T., Bressan-Smith R.E., Oliveira J.G., Garcia A.B. (2003) Accumulation of SALT protein in rice plants as a response to environmental stresses. *Plant Sci.* 164 :623-628.

Sreenivasulu N., Sopory S.K., Kavi Kishor P.B. (2007) Deciphering the regulatory mechanisms of abiotic stress tolerance in plants by genomic approaches. *Gene* 388:1-13.

Subbarao G.V., Wheeler R.M., Levine L.H., Stutte G.W. (2001) Glycine betaine accumulation, ionic and water relations of red-beet at contrasting levels of sodium supply. *J. Plant Physiol.* 158: 767-776.

Sumner M.E. (1993) Sodic soils: New perspectives. *Aus. J. Soil Research* 31: 683-750.

Sun W., Montagu M.V., Verbruggen N. (2002) Small heat shock proteins and stress tolerance in plants. *Bioch. Biophys. Acta* 1577: 1-9.

Szabolcs I. (1994) Soils and salinisation. In: Pessarac M. (Ed.) *Plant and crop stress*. New York-Basel, Hong Kong, pp: 3-11.

**T**alamali A., Dutuit P., Le Thomas A., Gorenflot R. (2001) Polygamie chez *Atriplex halimus* L. (Chenopodiaceae). *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Vie* 324: 107-113.

Talamali A., Bajji M., Le Thomas A., Kinet J-M., Dutuit P. (2003) Flower architecture and sex determination: how does *Atriplex halimus* play with floral morphogenesis and sex genes? *New Phytol.* 157: 105-113.

Teakle N. L. Real D., Colmer T.D. (2006) Growth and ion relations in response to combined salinity and water logging in the perennial forage legumes *Lotus corniculatus* and *Lotus tenuis*. *Plant Soil* 289: 369-383.

Tester M., Davenport R. (2003) Na<sup>+</sup> tolerance and Na<sup>+</sup> transport in higher plants. *Ann. Bot.* 91: 503-527.

Touchette B.W. (2006) Salt tolerance in a *Juncus roemerianus* brackish marsh: Spatial variations in plant water relations. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 337: 1-12.

Tuna A.L., Kaya C., Ashraf M., Altunlu H., Yokas I., Yagmur B. (2007) The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress. *Environ. Exp. Bot.* 59:173-178.

Tyerman S.D., Skerrett I.M. (1999) Root ion channels and salinity. *Sci. Horti.* 78: 175-235.

Ueda A., Yamamoto-Yamane Y., Takabe T. (2007) Salt stress enhances proline utilization in the apical region of barley roots. *Bioch. Bioph. Research Comm.* 355: 61-66.

U.S.S.L (1954) *Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils*. USDA, Handbook n° 60, 160p.

Veeranagamallaiah G., Chandraobulreddy P., Jyothsnakumari G., Sudhakar C. (2007) Glutamine synthetase expression and pyrroline-5-carboxylate reductase activity influence proline accumulation in two cultivars of foxtail millet (*Setaria italica* L.) with differential salt sensitivity. *Environ. Exp. Bot.* 60: 239-244.

Veltcheva M., Svetleva D., Petkova S., Perl A. (2005) In vitro regeneration and genetic transformation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)—Problems and progress. *Sci. Horti.* 107: 2-10.

Vera-Estrella R., Barkla B.J., Garcia-Ramirez L., Pantoja O. (2005) Salt stress in *Thellungiella halophila* activates Na<sup>+</sup> transport mechanisms required for salinity tolerance. *Plant Physiol.* 139: 1507-1517.

Verslues P.E., Agarwal M., Katiyar-Agarwal S., Zhu J., Zhu J.K. (2006) Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *Plant J.* 45: 523-539.

Vranová E., Inzé D., Van Breusegem F. (2002). Signal transduction during oxidative stress. *J. Exp. Bot.* 53: 1227-1236.

Vicente O., Boscaiu M., Naranjo M.A., Estrelles E., Belles J.M., Soriano P. (2004) Responses to salt stress in the halophyte *Plantago crassifolia* (Plantaginaceae). *J. Arid Environ.* 58: 463-481.

Vickerman D.B., Shannon M.C., Bañuelos G.S., Grieve C.M., Trumble J.T. (2002) Evaluation of *Atriplex* lines for selenium accumulation, salt tolerance and suitability for a key agricultural insect pest. *Environ.Poll.* 120: 463-473.

Volkmar K.M., Hu Y., Steppuhn H. (1998) Physiological responses of plants to salinity: A review. *Can. J. Plant Sci.* 78: 19-27.

**W**alker D.J., Moñino I., González E., Frayssinet N., Correal E. (2005) Determination of ploidy and nuclear DNA content in populations of *Atriplex halimus* (Chenopodiaceae). *Bot. J. Linn. Soc.* 147: 441-448.

Wang Y., Nil N. (2000) Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase-oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in *Amaranthus tricolor* leaves during salt stress. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 75: 623-627.

Wang R.Z. (2004) Plant functional types and their ecological responses to salinization in saline grasslands, Northeastern China. *Photosynthetica* 42 (4): 511-519.

Wang Z.Q., Chen M., Wang B.S. (2007a) Betacyanin accumulation in the leaves of C<sub>3</sub> halophyte *Suaeda salsa* L. is induced by watering roots with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Plant Sci.* 172:1-7.

Wang Z.Q., Yuan Y.Z., Ou J.Q., Lin Q.H., Zhang C.F. (2007b) Glutamine synthetase and glutamate dehydrogenase contribute differentially to proline accumulation in leaves of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings exposed to different salinity. *J. Plant Physiol.* 164: 695-701.

Watanabe S., Kojima K., Ide Y., Sasaki S. (2000) Effects of saline and osmotic stress on proline and sugar accumulation in *Populus euphratica* *in vitro*. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 63: 199-206.

Watson M.C., Banuelos G.S., O'Leary J.W., Riley J.J. (1994) Trace element composition of *Atriplex* grown with saline drainage water. *Agri. Ecosys. Environ.* 48: 157-162.

Weber D.J., Ansari R., Gul B., Khan M A. (2007) Potential of halophytes as source of edible oil. *J. Arid Environ.* 68: 315-321.

Wei Y., Xu X., Tao H., Wang P. (2006) Growth performance and physiological response in the halophyte *Lycium barbarum* grown at salt-affected soil. *Ann. App. Biol.* 149: 263-269.

Wilkinson S., Davies W.J. (1997) Xylem sap pH increase: a drought signal received at the apoplastic face of guard cell that involves the suppression of saturable abscisic acid uptake by epidermal symplast. *Plant Physiol.* 113: 559-573.

Wilkinson S., Davies W.J. (2002) ABA-based chemical signalling: The co-ordination of responses to stress in plants. *Plant Cell Environ.* 25: 195-210.

Wilson C., Lesch S.M., Grieve C.M. (2000) Growth stage modulates salinity tolerance of New Zealand spinach (*Tetragonia tetragonioides*, Pall.) and red orach (*Atriplex hortensis* L.). *Ann. Bot.* 85: 501-509.

Winicov I. (1998) New molecular approaches to improving salt tolerance in crop plants. *Ann. Bot.* 82 :703-710.

**X**iong L., Schumaker K.S., Zhu J.K. (2002) Cell signalling during cold, drought, and salt stress. *Plant Cell Supp.* 14: 165-183.

Xiong L., Zhu J.K. (2002) Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress. *Plant cell Environ.* 25: 131-139

**Y**amaguchi T., Blumwald E. (2005) Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities. *Trends Plant Sci.* 10(12): 615-620.

Yamaguchi K., Takahashi Y., Berberich T., Imai A., Miyazaki A., Takahashi T., Michael A., Kusano T. (2006) The polyamine spermine protects against high salt stress in *Arabidopsis thaliana*. *FEBS Letters* 580: 6783-6788.

Yazici I., Türkan I., Sekmen A.H., Demiral T. (2007) Salinity tolerance of purslane (*Portulaca oleracea* L.) is achieved by enhanced antioxidative system, lower level of lipid peroxidation and proline accumulation. *Environ. Exp. Bot.* 61:49-57.

Yensen N. (2000) New horizons in the use of saline resources. *Nat.Res. Manag.* Special Issue: 4-8.

Yin X., Zhao Y., Luo D., Zhang H. (2002) Isolating the promoter of a stress-induced gene encoding betaine aldehyde dehydrogenase from the halophyte *Atriplex centralasiatica* Iljin. *Bioch. Biophys. Acta* 1577: 452- 456.

Yoshiba Y., Kiyosue T., Katagiri T., Ueda H., Mizoguchi T., Yamaguchi-Shinozaki K., Wad K., Harada Y., Shinozaki K. (1995) Correlation between the induction of a gene for  $\Delta^1$ -pyrroline-5-carboxylate synthetase and the accumulation of proline in *Arabidopsis thaliana* under osmotic stress. *Plant J.* 7: 751-760.

Yoshida K. (2002) Plant biotechnology - genetic engineering to enhance plant salt tolerance. *J. Biosci. Bioeng.* 94(6): 585-590.

**Z**hang J., Jia W., Yang J., Ismail A.M. (2006) Role of ABA in integrating plant responses to drought and salt stresses. *Field Crops Res.* 97: 111-119

Zhao K., Fan H., Song J., Sun M., Wang B., Zhang S., Ungar I.A. (2005) Two Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> hyperaccumulators of the Chenopodiaceae. *Acta Bot. Sinica* 47(3): 311-318.

Zhu J.K., Meinzer F.C. (1999) Efficiency of C-4 photosynthesis in *Atriplex lentiformis* under salinity stress. *Aus. J. Plant Physiol.* 26: 79-86.

Zhu J. K. (2001) Plant salt tolerance. *Trends Plant Sci.* 6: 66-71.

Zhu J.K. (2002) Salt and drought stress signal transduction in plants. *Ann. Rev. Plant Biol.* 53: 247-273.

Zhu, J.K. (2003) Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Curr. Opinion Plant Biol.* 6: 441-445.

Ziani P. (1970) *Atriplex halimus, exploitation des formations naturelles et des plantations.* Note tech. N°10, INRF, Tunis, 24p.

Zörb C., Noll A., Karl S., Leib K., Yan F., Schubert S. (2005) Molecular characterization of Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> antiporters (ZmNHX) of maize (*Zea mays* L.) and their expression under salt stress. *J. Plant Physiol.* 162: 55-66.

## ANNEXES

## Les données analytiques et les résultats des calculs statistiques pour NaCl

Annexe 1. Effet des doses croissantes de NaCl (g/l) sur le pourcentage de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii*.

NaCl (g/l)		Taux de germination (%)				Moy.	E.T.
0	100	100	100	100	100	0,00	
2	100	100	100	100	100	0,00	
4	96	95	93	90	94	2,65	
6	67	77	74	72	73	4,20	
8	63	60	57	58	60	2,65	
10	37	33	41	48	40	6,40	
12	22	26	31	21	25	4,55	
14	20	22	19	21	21	1,29	
16	7	11	5	7	8	2,52	
18	2	2	1	3	2	0,82	
20	0	2	0	1	1	0,96	

Annexe 2. Effet des doses croissantes de NaCl (g/l) sur la vitesse de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* en fonction du temps (jours).

NaCl (g/l)	Taux de germination (%)							% final
	1J	2J	3J	4J	5J	6J	7J	
0	3	77	88	98	100	100	100	100
2	2	36	47	68	89	100	100	100
4	4	22	33	57	72	92	94	94
6	3	18	28	37	61	70	73	73
8	4	12	15	33	41	58	60	60
10	2	7	10	13	22	38	40	40
12	3	7	9	13	20	21	25	25
14	2	4	7	11	12	18	21	21
16	1	2	7	7	8	8	8	8
18	0	0	2	2	2	2	2	2
20	0	0	1	1	1	1	1	1

Annexe 3. Analyse de la variance du pourcentage de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* en fonction des différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	98705,82	98705,82	10558,48	0,00
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	62193,68	6219,37	665,28	0,00
Erreur	33	308,50	9,35		
Total	43	62502,18			

Annexe 4. Poids de la matière fraîche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	Matière fraîche partie aérienne (mg/plant)											Moy.	E.T.
0	7,89	6,61	7,87	6,62	7,67	6,06	7,75	5,94	6,78	6,69	6,99	0,75	
2	11,26	10,52	9,76	9,41	9,15	10,67	10,51	9,96	11,12	8,75	10,11	0,84	
4	11,22	10,79	12,4	12,43	12,21	10,60	10,03	10,39	9,67	11,3	11,12	1,00	
6	11,65	11,08	10,4	10,41	10,26	11,40	11,75	10,77	10,36	10,5	10,87	0,56	
8	9,27	8,69	9,67	10,15	10,17	8,73	9,38	8,83	8,81	8,35	9,21	0,63	
10	8,25	10,29	7,98	9,51	10,21	8,12	9,14	9,53	8,94	8,18	9,02	0,87	
12	8,42	7,14	8,35	7,60	8,78	9,37	8,57	9,17	6,76	8,27	8,24	0,84	
14	4,64	3,95	6,27	4,56	6,01	5,11	5,34	5,09	4,82	6,12	5,19	0,75	
16	4,22	4,11	5,52	5,65	4,57	3,85	5,10	3,99	4,30	3,87	4,52	0,67	
18	2,23	3,27	2,91	2,36	2,61	2,67	3,55	4,10	2,29	3,24	2,92	0,61	
20	1,75	1,38	2,94	1,20	2,92	1,31	1,07	2,71	1,04	2,16	1,85	0,77	

Annexe 5. Analyse de la variance de la matière fraîche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	5822,401	5822,401	9949,662	0,00
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	1038,361	103,836	177,441	0,00
Erreur	99	57,933	0,585		
Total	109	1096,295			

Annexe 6. Poids de la matière fraîche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	Matière fraîche partie racinaire (mg/plant)											Moy.	E.T.
0	2,11	2,76	2,16	2,45	1,53	2,29	1,62	1,92	2,15	2,34	2,13	0,37	
2	2,64	3,27	3,36	3,56	4,31	3,48	3,84	3,19	2,29	3,24	3,32	0,57	
4	2,25	2,27	2,78	2,93	2,06	3,03	2,48	2,97	1,60	1,82	2,42	0,50	
6	3,01	3,25	1,87	1,51	2,33	2,23	2,12	1,99	1,51	2,45	2,23	0,57	
8	2,47	1,72	1,34	1,98	2,33	1,70	1,59	1,47	1,18	1,92	1,77	0,41	
10	1,03	1,49	2,12	1,48	0,91	1,06	1,43	0,85	1,39	1,48	1,32	0,38	
12	1,77	1,19	1,45	0,85	1,37	1,33	0,78	1,22	1,40	1,23	1,26	0,29	
14	1,15	0,97	1,25	1,10	1,74	1,04	1,19	1,32	1,13	0,89	1,18	0,23	
16	1,34	1,17	0,67	1,27	0,81	1,02	1,39	0,87	1,62	1,77	1,19	0,36	
18	1,59	0,72	0,87	0,65	1,06	1,31	0,83	1,85	1,44	0,75	1,11	0,42	
20	0,96	0,97	1,11	1,30	0,97	1,25	1,04	0,92	1,32	1,33	1,12	0,17	

**Annexe 7. Analyse de la variance de la matière fraîche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.**

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	329,7382	329,7382	1998,488	0,00
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	51,5111	5,1511	31,220	0,00
Erreur	99	16,3344	0,1650		
<b>Total</b>	<b>109</b>	<b>67,8455</b>			

**Annexe 8. Poids de la matière sèche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.**

NaCl (g/l)	Matière sèche partie aérienne (mg/plant)											Moy.	E.T.
0	1,83	1,97	2,16	2,24	2,57	1,67	1,76	2,11	1,76	2,25	2,03	0,28	
2	2,24	2,11	1,67	2,04	2,52	2,58	2,73	1,64	2,57	2,47	2,26	0,39	
4	1,81	2,20	2,12	2,74	2,44	1,88	2,83	2,44	2,97	2,79	2,42	0,41	
6	2,07	1,60	2,79	2,39	2,09	2,34	2,57	2,16	2,14	2,58	2,27	0,34	
8	0,83	1,34	1,36	1,47	1,28	0,82	1,32	1,47	1,12	1,13	1,21	0,24	
10	1,23	0,91	1,37	1,27	1,07	1,03	0,71	1,55	1,23	0,89	1,13	0,25	
12	0,75	0,68	0,78	0,65	0,76	0,77	0,76	0,86	0,86	0,79	0,77	0,07	
14	0,65	1,01	0,77	0,71	0,75	0,56	0,97	0,83	0,63	0,61	0,75	0,15	
16	0,57	0,55	0,54	0,67	0,58	0,57	0,63	0,58	0,49	0,47	0,57	0,06	
18	0,47	0,32	0,47	0,68	0,34	0,29	0,45	0,58	0,46	0,35	0,44	0,12	
20	0,43	0,53	0,23	0,24	0,31	0,51	0,42	0,26	0,26	0,42	0,36	0,11	

**Annexe 9. Analyse de la variance de la matière sèche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.**

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	183,4847	183,4847	2930,620	0,00
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	64,4135	6,4413	102,881	0,00
Erreur	99	6,1983	0,0626		
<b>Total</b>	<b>109</b>	<b>70,6118</b>			

Annexe 10. Poids de la matière sèche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	Matière sèche partie racinaire (mg/plant)										Moy.	E.T.
0	0,70	0,68	0,67	0,63	0,82	0,75	0,89	0,76	0,69	0,68	0,73	0,08
2	0,94	0,76	0,71	0,65	0,68	0,79	1,13	0,81	0,77	0,81	0,81	0,14
4	0,84	0,72	0,68	0,82	1,09	0,83	0,81	0,71	0,99	0,91	0,84	0,13
6	0,81	0,64	0,64	0,88	0,92	0,67	0,88	0,78	0,86	0,68	0,78	0,11
8	0,54	0,48	0,59	0,40	0,68	0,55	0,48	0,46	0,51	0,48	0,52	0,08
10	0,47	0,46	0,39	0,39	0,41	0,49	0,52	0,51	0,33	0,47	0,44	0,06
12	0,47	0,52	0,35	0,23	0,47	0,41	0,37	0,57	0,46	0,43	0,43	0,10
14	0,30	0,29	0,38	0,38	0,34	0,36	0,39	0,23	0,35	0,38	0,34	0,05
16	0,31	0,32	0,29	0,31	0,33	0,29	0,29	0,31	0,35	0,30	0,31	0,02
18	0,28	0,33	0,29	0,37	0,35	0,35	0,27	0,35	0,33	0,23	0,32	0,05
20	0,28	0,29	0,31	0,27	0,32	0,31	0,27	0,28	0,22	0,26	0,28	0,03

Annexe 11. Analyse de la variance de la matière sèche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	30,40419	30,40419	4227,766	0,00
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	4,81496	0,48150	66,953	0,00
Erreur	99	0,71196	0,00719		
Total	109	5,52692			

Annexe 12. Indice de succulence de la partie aérienne (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	Indice de succulence partie aérienne (MF/MS)										Moy.	E.T.
0	4,31	3,36	3,64	2,96	2,98	3,63	4,40	2,82	3,85	2,97	3,49	0,57
2	5,03	4,99	5,84	4,61	3,63	4,14	3,85	6,07	4,33	3,54	4,60	0,88
4	6,20	4,90	5,88	4,54	5,00	5,64	3,54	4,26	3,26	4,06	4,73	0,98
6	5,63	6,93	3,74	4,36	4,91	4,87	4,57	4,99	4,84	4,10	4,89	0,88
8	11,17	6,49	7,11	6,90	7,95	10,65	7,11	6,01	7,87	7,39	7,86	1,71
10	6,71	11,31	5,82	7,49	9,54	7,88	12,87	6,15	7,27	9,19	8,42	2,29
12	11,23	10,50	10,71	11,69	11,55	12,17	11,28	10,66	7,86	10,47	10,81	1,18
14	7,14	3,91	8,14	6,42	8,01	9,13	5,51	6,13	7,65	10,03	7,21	1,79
16	7,40	7,47	10,22	8,43	7,88	6,75	8,10	6,88	8,78	8,23	8,01	1,01
18	4,74	10,22	6,19	3,47	7,68	9,21	7,89	7,07	4,98	9,26	7,07	2,21
20	4,08	2,59	12,78	5,00	9,30	2,55	2,56	10,42	4,00	5,12	5,84	3,67

Annexe 13. Analyse de la variance de l'indice de succulence de la partie aérienne (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	4837,791	4837,791	1521,545	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	458,705	45,870	14,427	0,000000
Erreur	99	314,773	3,180		
Total	109	773,478			

Annexe 14. Indice de succulence de la partie racinaire (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	Indice de succulence partie racinaire (MF/MS)										Moy.	E.T.
0	3,01	4,06	3,22	3,89	1,87	3,05	1,82	2,53	3,12	3,44	3,00	0,75
2	2,81	4,30	4,73	5,48	6,34	4,41	3,40	3,94	2,97	4,00	4,24	1,09
4	2,68	3,15	4,09	3,57	1,89	3,65	3,06	4,18	1,62	2,00	2,99	0,92
6	3,72	5,08	2,92	1,72	2,53	3,33	2,41	2,55	1,76	3,60	2,96	1,01
8	4,57	3,58	2,27	4,95	3,43	3,09	3,31	3,20	2,31	4,00	3,47	0,86
10	2,19	3,24	5,44	3,79	2,22	2,16	2,75	1,67	4,21	3,15	3,08	1,15
12	3,77	2,29	4,14	3,70	2,91	3,24	2,11	2,14	3,04	2,86	3,02	0,71
14	3,83	3,34	3,29	2,89	5,12	2,89	3,05	5,71	3,23	2,34	3,57	1,05
16	4,32	3,66	2,31	4,10	2,45	3,52	4,79	2,81	4,63	5,90	3,85	1,13
18	5,68	2,18	3,00	1,76	3,03	3,74	3,07	5,29	4,36	3,26	3,54	1,26
20	3,43	3,34	3,58	4,81	3,03	4,03	3,85	3,29	6,00	5,12	4,05	0,96

Annexe 15. Analyse de la variance de l'indice de succulence de la partie racinaire (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	1296,711	1296,711	1286,999	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	21,292	2,129	2,113	0,060139
Erreur	99	99,747	1,008		
Total	109	121,039			

**Annexe 16.** Taux de sodium des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	Na <sup>+</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne					Na <sup>+</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire				
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.
0	102,33	129,71	147,65	126,56	22,82	25,57	39,87	42,98	36,14	9,29
2	116,92	121,37	116,90	118,40	2,58	27,55	29,11	31,29	29,32	1,88
4	136,30	135,62	112,98	128,30	13,27	26,66	25,34	22,72	24,91	2,01
6	122,32	143,66	131,53	132,50	10,70	23,34	36,24	31,38	30,32	6,51
8	183,66	166,81	181,51	177,33	9,17	39,11	38,26	32,98	36,78	3,32
10	189,64	183,60	201,11	191,45	8,89	71,54	79,31	77,19	76,01	4,02
12	212,77	191,98	204,56	203,10	10,47	71,92	77,41	82,26	77,20	5,17
14	202,30	198,96	211,53	204,26	6,51	89,69	104,79	101,73	98,74	7,98
16	313,20	297,49	342,67	317,79	22,94	112,63	112,45	101,76	108,95	6,22
18	300,40	311,80	355,43	322,54	29,05	125,31	107,65	127,7	120,22	10,95
20	356,70	323,63	368,98	349,77	23,46	144,2	108,41	144,42	132,34	20,73

**Annexe 17.** Analyse de la variance du taux de sodium des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	1407822	1407822	5071,759	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	219642	21964	79,127	0,000000
Erreur	22	6107	278		
Total	32	225749			

**Annexe 18.** Analyse de la variance du taux de sodium des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	158828,9	158828,9	2303,039	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	50808,5	5080,8	73,673	0,000000
Erreur	22	1517,2	69,0		
Total	32	52325,7			

**Annexe 19.** Taux de potassium des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	K <sup>+</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne				K <sup>+</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire				Moy.	E.T.
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.		
0	78,84	81,22	106,64	88,90	15,41	41,73	45,14	46,68	44,52	2,53
2	81,22	83,72	85,41	83,45	2,11	39,36	46,15	44,16	43,22	3,49
4	66,19	59,74	64,02	63,32	3,28	38,76	44,16	42,68	41,87	2,79
6	41,45	49,61	43,57	44,88	4,23	33,59	37,23	41,81	37,54	4,12
8	32,15	36,83	38,22	35,73	3,18	29,33	32,43	30,36	30,71	1,58
10	27,59	35,32	34,71	32,54	4,30	28,19	22,35	26,75	25,76	3,04
12	22,65	23,19	26,07	23,97	1,84	20,37	23,25	24,18	22,60	1,99
14	20,35	22,75	19,83	20,98	1,56	22,86	20,58	24,85	22,76	2,14
16	14,89	17,28	16,15	16,11	1,20	20,43	24,38	19,34	21,38	2,65
18	13,16	11,59	17,65	14,13	3,15	16,25	21,08	23,37	20,23	3,63
20	14,72	13,72	14,21	14,22	0,50	22,29	15,76	24,93	20,99	4,72

**Annexe 20.** Analyse de la variance du taux de potassium des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	52373,66	52373,66	1819,968	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	22331,20	2233,12	77,600	0,000000
Erreur	22	633,10	28,78		
Total	32	22964,30			

**Annexe 21.** Analyse de la variance du taux de potassium des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	29987,49	29987,49	3107,813	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	2878,24	287,82	29,829	0,000000
Erreur	22	212,28	9,65		
Total	32	3090,52			

**Annexe 22.** Taux de calcium des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g}$  MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	Ca <sup>2+</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g}$ MS) partie aérienne			Moy.	E.T.	Ca <sup>2+</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g}$ MS) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	99,04	90,11	94,24	94,46	4,47	62,23	64,13	54,36	60,24	5,18
2	81,54	86,38	78,77	82,23	3,85	58,55	63,78	48,73	57,02	7,64
4	75,22	57,47	72,32	68,34	9,52	44,34	45,57	48,23	46,05	1,99
6	68,21	56,63	61,44	62,09	5,82	40,52	45,87	39,81	42,07	3,31
8	50,37	62,11	49,87	54,12	6,93	29,56	33,76	32,87	32,06	2,21
10	55,34	47,65	53,67	52,22	4,04	27,98	28,65	33,38	30,00	2,94
12	45,06	59,16	52,67	52,30	7,06	27,55	22,87	30,76	27,06	3,97
14	41,45	44,67	43,39	43,17	1,62	24,05	26,49	28,18	26,24	2,08
16	33,07	36,87	32,27	34,07	2,46	24,47	29,57	33,07	29,04	4,32
18	39,27	34,31	41,47	38,35	3,67	20,33	22,98	19,98	21,10	1,64
20	35,14	36,21	40,26	37,20	2,70	24,65	27,37	29,11	27,04	2,25

**Annexe 23.** Analyse de la variance du taux de calcium des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	104346,6	104346,6	3789,629	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	11094,3	1109,4	40,292	0,000000
Erreur	22	605,8	27,5		
Total	32	11700,0			

**Annexe 24.** Analyse de la variance du taux de calcium des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	43183,00	43183,00	2965,013	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	5232,85	523,28	35,930	0,000000
Erreur	22	320,41	14,56		
Total	32	5553,26			

**Annexe 25. Rapport  $K^+/Na^+$  des tissus de la partie aérienne et racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.**

NaCl (g/l)	$K^+/Na^+$ partie aérienne			Moy.	E.T.	$K^+/Na^+$ partie racinaire			Moy.	E.T.
0	0,77	0,63	0,72	0,71	0,07	1,63	1,13	1,09	1,28	0,30
2	0,69	0,69	0,73	0,71	0,02	1,43	1,59	1,41	1,48	0,10
4	0,49	0,44	0,57	0,50	0,06	1,45	1,74	1,88	1,69	0,22
6	0,34	0,35	0,33	0,34	0,01	1,44	1,03	1,33	1,27	0,21
8	0,18	0,22	0,21	0,20	0,02	0,75	0,85	0,92	0,84	0,09
10	0,15	0,19	0,17	0,17	0,02	0,39	0,28	0,35	0,34	0,06
12	0,11	0,12	0,13	0,12	0,01	0,28	0,30	0,29	0,29	0,01
14	0,10	0,11	0,09	0,10	0,01	0,25	0,20	0,24	0,23	0,03
16	0,05	0,06	0,05	0,05	0,01	0,18	0,22	0,19	0,20	0,02
18	0,04	0,04	0,05	0,04	0,01	0,13	0,20	0,18	0,17	0,04
20	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00	0,15	0,15	0,17	0,16	0,01

**Annexe 26. Analyse de la variance du Rapport  $K^+/Na^+$  des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.**

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	2,415408	2,415408	2317,309	0,00
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	1,960370	0,196037	188,075	0,00
Erreur	22	0,022931	0,001042		
Total	32	1,983302			

**Annexe 27. Analyse de la variance du Rapport  $K^+/Na^+$  des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.**

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	17,21171	17,21171	915,1812	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	10,80962	1,08096	57,4769	0,000000
Erreur	22	0,41375	0,01881		
Total	32	11,22338			

**Annexe 28.** Taux de chlore des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	Cl <sup>-</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne			Moy.	E.T.	Cl <sup>-</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	16,3	21,63	25,12	21,02	4,44	13,79	19,65	20,87	18,10	3,78
2	21,12	28,22	13,76	21,03	7,23	20,16	28,43	18,21	22,27	5,43
4	24,51	27,23	29,45	27,06	2,47	34,21	35,01	27,35	32,19	4,21
6	36,54	37,27	28,46	34,09	4,89	36,92	40,16	31,37	36,15	4,45
8	43,04	34,71	39,28	39,01	4,17	35,67	30,97	47,76	38,13	8,66
10	44,54	38,67	42,98	42,06	3,04	43,34	46,76	48,08	46,06	2,45
12	45,05	58,77	40,54	48,12	9,49	49,22	45,87	46,21	47,10	1,84
14	69,54	62,47	60,11	64,04	4,91	40,65	45,47	52,07	46,06	5,73
16	75,24	62,56	76,05	71,28	7,57	52,36	56,18	60,03	56,19	3,84
18	96,09	87,63	80,54	88,09	7,79	63,66	66,87	67,98	66,17	2,24
20	94,45	97,67	98,98	97,03	2,33	85,88	71,97	79,33	79,06	6,96

**Annexe 29.** Analyse de la variance du taux de chlore des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	83354,20	83354,20	2503,866	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	20873,17	2087,32	62,701	0,000000
Erreur	22	732,38	33,29		
Total	32	21605,55			

**Annexe 30.** Analyse de la variance du taux de chlore des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	64811,80	64811,80	2673,126	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	9794,42	979,44	40,397	0,000000
Erreur	22	533,41	24,25		
Total	32	10327,82			

Annexe 31. Taux de phosphore des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne			Moy.	E.T.	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	35,2	40,58	36,52	37,43	2,80	19,26	21,56	18,67	19,83	1,53
2	26,27	28,77	30,46	28,50	2,11	15,21	16	17,01	16,07	0,90
4	25,47	25,02	26,3	25,60	0,65	12,1	14,5	13,01	13,20	1,21
6	21,79	26,95	26,91	25,22	2,97	8,75	9,39	10,97	9,70	1,14
8	19,82	22,5	21,89	21,40	1,40	7,79	8,89	7,82	8,17	0,63
10	15,16	16,89	16,28	16,11	0,88	7,8	5,96	8,36	7,37	1,26
12	14,05	14,59	17,47	15,37	1,84	7,27	8,15	7,08	7,50	0,57
14	12,91	15,31	12,39	13,54	1,56	6,23	5,95	6,23	6,14	0,16
16	9,02	11,41	10,27	10,23	1,20	4,78	6,74	5,69	5,74	0,98
18	9,75	9,18	10,24	9,72	0,53	6,09	5,12	5,51	5,57	0,49
20	8,83	7,83	8,32	8,33	0,50	5,03	5,51	5,67	5,40	0,33

Annexe 32. Analyse de la variance du taux de phosphore des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	12193,94	12193,94	4185,888	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	2536,92	253,69	87,086	0,000000
Erreur	22	64,09	2,91		
Total	32	2601,01			

Annexe 33. Analyse de la variance du taux de phosphore des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	2989,661	2989,661	3442,904	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	694,940	69,494	80,029	0,000000
Erreur	22	19,104	0,868		
Total	32	714,043			

Annexe 34. Taux d'azote des tissus de la partie aérienne et racinaire en (mg /g MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	N (mg /g MS) partie aérienne					N (mg /g MS) partie racinaire				
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.
0	48,70	41,60	56,20	48,83	7,30	25,40	25,6	20,7	23,90	2,77
2	38,70	42,40	47,30	42,80	4,31	23,20	16,9	21,1	20,40	3,21
4	43,20	41,40	38,10	40,90	2,59	20,20	14,6	14,8	16,53	3,18
6	38,60	32,20	35,30	35,37	3,20	17,60	16,2	11,3	15,03	3,31
8	37,80	29,00	40,30	35,70	5,94	10,80	16,4	13,3	13,50	2,81
10	33,40	27,40	32,80	31,20	3,30	12,40	11,4	11,3	11,70	0,61
12	23,80	27,60	37,60	29,67	7,13	11,30	9,6	11,6	10,83	1,08
14	26,10	36,50	28,40	30,33	5,46	10,90	11,1	9,4	10,47	0,93
16	26,60	17,70	26,30	23,53	5,05	7,40	12,3	7,5	9,07	2,80
18	19,50	26,30	26,50	24,10	3,98	8,50	7,9	8,8	8,40	0,46
20	19,30	25,90	26,70	23,97	4,06	6,70	10,3	10,2	9,07	2,05

Annexe 35. Analyse de la variance du taux d'azote des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	36613,35	36613,35	1472,189	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	2078,63	207,86	8,358	0,000019
Erreur	22	547,14	24,87		
Total	32	2625,77			

Annexe 36. Analyse de la variance du taux d'azote des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	6046,694	6046,694	1080,819	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	756,536	75,654	13,523	0,000000
Erreur	22	123,080	5,595		
Total	32	879,616			

**Annexe 37. Taux de proline des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.**

NaCl (g/l)	Proline ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) partie aérienne			Moy.	E.T.	Proline ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	0,05	0,06	0,09	0,07	0,02	0,02	0,04	0,06	0,04	0,02
2	0,17	0,16	0,23	0,19	0,04	0,11	0,17	0,18	0,15	0,04
4	0,25	0,18	0,25	0,23	0,04	0,10	0,18	0,22	0,17	0,06
6	0,21	0,28	0,28	0,26	0,04	0,19	0,15	0,25	0,20	0,05
8	0,33	0,26	0,36	0,32	0,05	0,24	0,20	0,31	0,25	0,06
10	0,31	0,34	0,37	0,34	0,03	0,26	0,24	0,31	0,27	0,04
12	0,39	0,35	0,45	0,40	0,05	0,30	0,27	0,35	0,31	0,04
14	0,4	0,46	0,45	0,44	0,03	0,28	0,31	0,34	0,31	0,03
16	0,38	0,49	0,47	0,45	0,06	0,30	0,35	0,34	0,33	0,03
18	0,43	0,49	0,52	0,48	0,05	0,40	0,30	0,42	0,37	0,06
20	0,52	0,54	0,59	0,55	0,04	0,36	0,33	0,44	0,38	0,06

**Annexe 38. Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.**

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	3,740367	3,740367	2157,904	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	0,618200	0,061820	35,665	0,000000
Erreur	22	0,038133	0,001733		
Total	32	0,656333			

**Annexe 39. Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.**

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	2,097648	2,097648	998,8802	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	0,324152	0,032415	15,4358	0,000000
Erreur	22	0,046200	0,002100		
Total	32	0,370352			

Annexe 40. Taux de sucres solubles des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

NaCl (g/l)	Sucres solubles ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) partie aérienne					Sucres solubles ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) partie racinaire				
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.
0	0,33	0,85	0,76	0,65	0,28	0,22	0,65	0,47	0,45	0,22
2	1,84	1,26	1,87	1,66	0,34	0,84	1,24	0,93	1,00	0,21
4	1,83	1,16	2,11	1,70	0,49	0,98	1,03	1,31	1,11	0,18
6	1,23	2,06	1,97	1,75	0,46	1,12	0,88	1,41	1,14	0,27
8	1,50	2,54	1,73	1,92	0,55	1,39	0,98	1,57	1,31	0,30
10	1,55	2,54	2,06	2,05	0,50	1,04	1,76	1,75	1,52	0,41
12	2,20	2,43	2,26	2,30	0,12	2,06	1,68	1,98	1,91	0,20
14	2,61	2,08	2,98	2,56	0,45	1,93	2,54	2,18	2,22	0,31
16	3,69	3,83	2,98	3,50	0,46	2,78	1,78	2,71	2,42	0,56
18	3,55	4,06	4,45	4,02	0,45	3,04	2,86	3,89	3,26	0,55
20	4,55	4,32	4,56	4,48	0,14	3,06	3,98	3,57	3,54	0,46

Annexe 41. Analyse de la variance du taux de sucres solubles des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	192,6808	192,6808	1156,022	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	39,1915	3,9191	23,514	0,000000
Erreur	22	3,6669	0,1667		
Total	32	42,8584			

Annexe 42. Analyse de la variance du taux de sucres solubles des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	107,6773	107,6773	836,7917	0,000000
Var. Facteur 1 (NaCl)	10	28,3034	2,8303	21,9954	0,000000
Erreur	22	2,8309	0,1287		
Total	32	31,1344			

## Les données analytiques et les résultats des calculs statistiques pour $\text{Na}_2\text{SO}_4$

Annexe 43. Effet des doses croissantes de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (g/l) sur le pourcentage de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii*.

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (g/l)	Taux de germination (%)				Moy.	E.T.
0	100	100	100	100	100	0,00
2	100	100	100	100	100	0,00
4	96	100	100	100	99	2,00
6	76	80	84	80	80	3,27
8	68	72	72	68	70	2,31
10	48	48	52	52	50	2,31
12	32	36	32	32	33	2,00
14	24	20	20	20	21	2,00
16	12	8	8	12	10	2,31
18	4	4	4	4	4	0,00
20	4	4	4	0	3	2,00

Annexe 44. Effet des doses croissantes de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (g/l) sur la vitesse de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* en fonction du temps (jours).

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (g/l)	Taux de germination (%)							% final
	1J	2J	3J	4J	5J	6J	7J	
0	2	75	92	98	100	100	100	100
2	3	35	68	86	92	100	100	100
4	4	28	60	75	88	96	99	99
6	6	21	33	48	62	70	80	80
8	6	17	28	40	54	63	70	70
10	5	10	14	20	29	37	50	50
12	3	9	12	15	19	22	33	33
14	2	5	8	11	14	16	21	21
16	1	3	5	7	8	9	10	10
18	0	0	1	2	3	4	4	4
20	0	0	1	2	2	3	3	3

Annexe 45. Analyse de la variance du pourcentage de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* en fonction des différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	118145,5	118145,5	30459,38	0,00
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	62878,5	6287,9	1621,09	0,00
Erreur	33	128,0	3,9		
Total	43	63006,5			

Annexe 46. Poids de la matière fraîche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/l)	Matière fraîche partie aérienne (mg/plant)										Moy.	E.T.
0	7,89	6,61	7,87	6,62	7,67	6,06	7,75	5,94	6,78	6,69	6,99	0,75
2	7,86	7,82	8,32	7,81	8,79	7,97	9,31	7,76	8,74	6,95	8,13	0,67
4	13,7	11,34	13,1	11,98	14,76	12,15	12,58	11,94	12,22	11,0	12,50	1,12
6	16,1	12,56	14,9	13,31	14,80	13,94	11,99	13,31	12,90	14,1	13,81	1,26
8	14,5	11,97	10,9	11,73	13,65	12,01	11,66	10,81	11,09	13,6	12,21	1,29
10	10,2	9,56	9,74	12,08	12,88	9,59	11,71	12,20	11,51	10,7	11,02	1,21
12	10,5	9,31	9,52	9,77	11,95	11,94	10,74	7,34	8,93	10,3	10,04	1,40
14	5,94	6,49	6,67	4,51	7,01	6,77	6,04	6,32	5,99	6,12	6,19	0,69
16	3,44	4,41	4,02	6,17	6,99	5,37	7,52	5,41	5,72	6,29	5,53	1,29
18	4,45	4,09	3,93	3,58	3,63	4,79	5,07	2,12	4,31	3,26	3,92	0,84
20	2,75	3,08	2,94	4,20	2,92	2,88	2,07	2,71	2,03	2,89	2,85	0,60

Annexe 47. Analyse de la variance de la matière fraîche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	7894,040	7894,040	7153,224	0,00
Var. Facteur 1 (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10	1360,664	136,066	123,297	0,00
Erreur	99	109,253	1,104		
Total	109	1469,917			

Annexe 48. Poids de la matière fraîche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/l)	Matière fraîche partie racinaire (mg/plant)										Moy.	E.T.
0	2,40	2,72	3,0	2,45	1,52	2,29	3,11	1,92	3,15	2,13	2,48	0,54
2	3,31	3,71	4,10	4,66	3,71	3,08	4,04	3,30	3,36	3,74	3,70	0,47
4	2,61	3,72	3,23	4,38	4,51	3,78	3,93	4,72	4,05	3,27	3,82	0,65
6	5,67	4,91	2,53	3,17	2,99	4,89	3,78	3,65	3,17	4,11	3,89	1,00
8	4,44	3,69	2,31	3,95	2,77	5,67	2,56	3,44	2,95	2,89	3,47	1,02
10	2,37	2,93	3,46	3,82	2,25	3,90	2,77	2,19	3,03	2,82	2,95	0,61
12	3,11	2,83	2,79	3,09	2,64	2,97	3,22	2,56	2,74	2,94	2,89	0,21
14	2,49	2,31	1,99	1,24	3,08	2,74	1,93	2,76	1,21	2,03	2,18	0,63
16	1,55	2,17	1,67	2,20	1,44	2,02	1,89	2,24	1,62	2,31	1,91	0,32
18	2,24	1,63	0,78	1,20	0,59	1,34	1,98	1,30	1,69	2,40	1,52	0,59
20	0,96	1,97	1,20	1,30	0,97	1,25	2,40	1,22	1,32	1,93	1,45	0,48

Annexe 49. Analyse de la variance de la matière fraîche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	813,1170	813,1170	2072,702	0,00
Var. Facteur 1 (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10	85,2822	8,5282	21,739	0,00
Erreur	99	38,8375	0,3923		
Total	109	124,1197			

Annexe 50. Poids de la matière sèche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/l)	Matière sèche partie aérienne (mg/plant)											Moy.	E.T.
0	1,83	1,97	2,16	2,24	2,57	1,67	1,76	2,11	1,76	2,25	2,03	0,28	
2	1,77	1,87	2,01	2,58	2,17	2,12	1,77	2,18	1,81	2,11	2,04	0,25	
4	2,33	2,48	2,42	2,59	1,98	2,43	2,28	1,79	2,42	2,72	2,34	0,28	
6	2,96	2,49	2,48	2,28	2,78	2,63	2,53	2,05	2,53	2,97	2,57	0,29	
8	2,11	2,61	2,59	2,39	1,92	2,74	2,64	2,16	2,58	2,08	2,38	0,29	
10	0,93	1,41	1,67	1,57	1,37	1,33	1,01	1,85	1,53	1,69	1,44	0,29	
12	1,11	0,94	1,74	1,01	1,12	1,53	1,12	1,72	1,16	1,15	1,26	0,29	
14	0,90	1,29	0,77	1,49	0,99	1,16	0,97	0,93	1,13	1,61	1,12	0,27	
16	0,77	0,65	0,74	0,67	0,58	0,87	0,63	0,88	0,49	0,77	0,71	0,12	
18	0,87	0,92	0,77	0,88	0,44	0,29	0,65	0,58	0,76	0,35	0,65	0,23	
20	0,53	0,63	0,33	0,24	0,31	0,71	0,42	0,26	0,16	0,52	0,41	0,18	

Annexe 51. Analyse de la variance de la matière sèche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	261,3320	261,3320	3943,272	0,00
Var. Facteur 1 (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10	59,2998	5,9300	89,478	0,00
Erreur	99	6,5610	0,0663		
Total	109	65,8608			

Annexe 52. Poids de la matière sèche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/l)	Matière sèche partie racinaire (mg/plant)										Moy.	E.T.
0	0,70	0,68	0,67	0,63	0,82	0,75	0,89	0,76	0,69	0,68	0,73	0,08
2	0,84	0,86	0,71	0,75	0,89	0,69	1,03	0,81	0,77	0,71	0,81	0,10
4	0,84	0,92	0,79	0,82	1,09	0,83	1,01	1,01	0,99	0,91	0,92	0,10
6	1,06	0,85	0,81	0,93	1,17	0,92	1,13	1,03	1,11	0,83	0,98	0,13
8	0,86	0,75	0,61	0,72	0,93	0,87	0,72	0,73	0,83	0,80	0,78	0,09
10	0,47	0,45	0,89	0,79	0,71	0,69	0,59	0,51	0,63	0,47	0,62	0,15
12	0,77	0,68	0,55	0,63	0,47	0,41	0,77	0,57	0,46	0,43	0,57	0,13
14	0,61	0,43	0,31	0,39	0,51	0,47	0,31	0,49	0,36	0,49	0,44	0,10
16	0,36	0,39	0,29	0,30	0,33	0,51	0,29	0,35	0,36	0,36	0,35	0,06
18	0,33	0,29	0,28	0,33	0,27	0,35	0,27	0,35	0,37	0,28	0,31	0,04
20	0,29	0,27	0,35	0,28	0,36	0,28	0,37	0,27	0,29	0,26	0,30	0,04

Annexe 53. Analyse de la variance de la matière sèche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	42,27160	42,27160	4200,219	0,00
Var. Facteur 1 (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10	5,97735	0,59773	59,393	0,00
Erreur	99	0,99635	0,01006		
Total	109	6,97370			

Annexe 54. Indice de succulence de la partie aérienne (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/l)	Indice de succulence partie aérienne (MF/MS)										Moy.	E.T.
0	4,31	3,36	3,64	2,96	2,98	3,63	4,40	2,82	3,85	2,97	3,49	0,57
2	4,44	4,18	4,14	3,03	4,05	3,76	5,26	3,56	4,83	3,29	4,05	0,68
4	5,91	4,57	5,43	4,63	7,45	5,00	5,52	6,67	5,05	4,08	5,43	1,02
6	5,47	5,04	6,02	5,84	5,32	5,30	4,74	6,49	5,10	4,76	5,41	0,56
8	6,90	4,59	4,23	4,91	7,11	4,38	4,42	5,00	4,30	6,55	5,24	1,15
10	10,99	6,78	5,83	7,69	9,40	7,21	11,59	6,59	7,52	6,36	8,00	1,99
12	9,54	9,90	5,47	9,67	10,67	7,80	9,59	4,27	7,70	8,99	8,36	2,07
14	6,60	5,03	8,66	3,03	7,08	5,84	6,23	6,80	5,30	3,80	5,84	1,64
16	4,47	6,78	5,43	9,21	12,05	6,17	11,94	6,15	11,67	8,17	8,20	2,86
18	5,11	4,45	5,10	4,07	8,25	16,52	7,80	3,66	5,67	9,31	6,99	3,85
20	5,20	4,87	8,91	17,50	9,30	4,04	4,95	10,42	12,69	5,54	8,34	4,32

Annexe 55. Analyse de la variance de l'indice de succulence de la partie aérienne (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	4373,323	4373,323	857,4685	0,000000
Var. Facteur 1 (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10	312,291	31,229	6,1230	0,000000
Erreur	99	504,927	5,100		
<b>Total</b>	<b>109</b>	<b>817,218</b>			

Annexe 56. Indice de succulence de la partie racinaire (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/l)	Indice de succulence partie racinaire (MF/MS)										Moy.	E.T.
0	3,01	4,06	3,22	3,89	1,87	3,05	1,82	2,53	3,12	3,44	3,00	0,75
2	3,94	4,31	5,77	6,21	4,17	4,46	3,92	4,07	4,36	5,27	4,65	0,81
4	3,11	4,04	4,09	5,34	4,14	4,55	3,89	4,67	4,09	3,59	4,15	0,61
6	5,35	5,78	3,12	3,41	2,56	5,32	3,35	3,54	2,86	4,95	4,02	1,19
8	5,16	4,92	3,79	5,49	2,98	6,52	3,56	4,71	3,55	3,61	4,43	1,11
10	5,04	6,51	3,89	4,84	3,17	5,65	4,69	4,29	4,81	6,00	4,89	0,99
12	4,04	4,16	5,07	4,90	5,62	7,24	4,18	4,49	5,96	6,84	5,25	1,14
14	4,08	5,37	6,42	3,18	6,04	5,83	6,23	5,63	3,36	4,14	5,03	1,22
16	4,31	5,56	5,76	7,33	4,36	3,96	6,52	6,40	4,50	6,42	5,51	1,16
18	6,79	5,62	2,79	3,64	2,19	3,83	7,33	3,71	4,57	8,57	4,90	2,10
20	3,31	7,30	3,43	4,64	2,69	4,46	6,49	4,52	4,55	7,42	4,88	1,66

Annexe 57. Analyse de la variance de l'indice de succulence de la partie racinaire (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	2338,631	2338,631	1559,073	0,000000
Var. Facteur 1 (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10	48,156	4,816	3,210	0,001297
Erreur	99	148,501	1,500		
<b>Total</b>	<b>109</b>	<b>196,657</b>			

**Annexe 58.** Taux de sodium des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (g/l)	$\text{Na}^+$ ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne			Moy.	E.T.	$\text{Na}^+$ ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	102,33	129,71	147,65	126,56	22,82	25,57	39,87	42,98	36,14	9,29
2	103,55	139,39	168,12	137,02	32,35	44,25	51,05	56,14	50,48	5,97
4	165,65	222,86	241,54	210,02	39,54	77,02	99,24	89,31	88,52	11,13
6	210,1	189,54	237,85	212,50	24,24	85,54	107,76	98,46	97,25	11,16
8	255,25	387,26	324,11	322,21	66,03	88,51	100,85	112,56	100,64	12,03
10	311,43	371,45	299,12	327,33	38,70	100,43	141,66	124,32	122,14	20,70
12	438,23	385,77	476,98	433,66	45,78	142,07	167,32	144,12	151,17	14,02
14	525,88	368,87	497,99	464,25	83,77	157,32	177,98	166,07	167,12	10,37
16	455,75	511,82	510,12	492,56	31,89	178,65	190,53	199,51	189,56	10,46
18	487,45	525,66	502,22	505,11	19,27	170,11	197,34	200,13	189,19	16,59
20	483,32	581,11	577,87	547,43	55,55	200,12	208,25	243,04	217,14	22,80

**Annexe 59.** Analyse de la variance du taux de sodium des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	3894053	3894053	1849,339	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	714075	71408	33,912	0,000000
Erreur	22	46324	2106		
Total	32	760399			

**Annexe 60.** Analyse de la variance du taux de sodium des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	541717,0	541717,0	2769,080	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	105845,0	10584,5	54,104	0,000000
Erreur	22	4303,9	195,6		
Total	32	110148,8			

**Annexe 61.** Taux de potassium des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (g/l)	$\text{K}^+$ ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne			Moy.	E.T.	$\text{K}^+$ ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	78,84	81,22	106,64	88,90	15,41	41,73	45,14	46,68	44,52	2,53
2	87,44	76,44	65,33	76,40	11,06	34,76	33,97	40,54	36,42	3,59
4	49,77	63,81	52,31	55,30	7,48	30,64	37,75	28,21	32,20	4,96
6	18,31	25,94	23,87	22,71	3,95	10,84	15,76	10,43	12,34	2,97
8	18,12	24,97	21,55	21,55	3,43	7,51	11,67	9,78	9,65	2,08
10	19,64	23,65	21,15	21,48	2,03	6,76	9,12	11,37	9,08	2,31
12	17,43	22,45	23,88	21,25	3,39	6,57	7,79	7,65	7,34	0,67
14	10,15	18,54	17,32	15,34	4,53	7,03	8,05	7,58	7,55	0,51
16	10,54	17,31	15,39	14,41	3,49	7,54	7,87	7,93	7,78	0,21
18	14,63	10,76	12,53	12,64	1,94	6,55	7,73	8,06	7,45	0,79
20	9,98	11,16	12,65	11,26	1,34	8,77	6,43	7,05	7,42	1,21

**Annexe 62.** Analyse de la variance du taux de potassium des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	35589,36	35589,36	788,0522	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	22673,45	2267,34	50,2056	0,000000
Erreur	22	993,55	45,16		
Total	32	23666,99			

**Annexe 63.** Analyse de la variance du taux de potassium des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	9009,348	9009,348	1520,880	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	5856,109	585,611	98,858	0,000000
Erreur	22	130,323	5,924		
Total	32	5986,432			

**Annexe 64.** Taux de calcium des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (g/l)	$\text{Ca}^{2+}$ ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne			Moy.	E.T.	$\text{Ca}^{2+}$ ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	99,04	90,11	94,24	94,46	4,47	62,23	64,13	54,36	60,24	5,18
2	93,76	91,94	91,88	92,53	1,07	44,76	56,12	50,84	50,57	5,68
4	80,32	97,54	87,12	88,33	8,67	40,54	47,52	51,76	46,61	5,67
6	70,26	91,02	80,12	80,47	10,38	44,63	41,45	41,52	42,53	1,82
8	56,77	55,82	63,76	58,78	4,34	31,77	39,21	36,87	35,95	3,80
10	40,54	48,34	45,87	44,92	3,99	20,42	29,75	26,32	25,50	4,72
12	30,54	37,12	38,23	35,30	4,16	20,09	23,23	23,31	22,21	1,84
14	27,77	31,03	29,46	29,42	1,63	21,77	20,53	21,34	21,21	0,63
16	22,42	29,41	27,25	26,36	3,58	19,98	21,76	22,98	21,57	1,51
18	22,43	26,42	25,87	24,91	2,16	18,85	22,91	20,24	20,67	2,06
20	20,33	19,28	22,41	20,67	1,59	17,98	16,66	20,32	18,32	1,85

**Annexe 65.** Analyse de la variance du taux de calcium des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	96922,61	96922,61	3823,720	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	26341,23	2634,12	103,919	0,000000
Erreur	22	557,65	25,35		
Total	32	26898,88			

**Annexe 66.** Analyse de la variance du taux de calcium des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	36410,45	36410,45	2761,661	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	6434,65	643,47	48,806	0,000000
Erreur	22	290,05	13,18		
Total	32	6724,70			

**Annexe 67. Rapport K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> des tissus de la partie aérienne et racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.**

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/l)	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> partie aérienne			Moy.	E.T.	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> partie racinaire			Moy.	E.T.
0	0,77	0,63	0,72	0,71	0,07	1,63	1,13	1,09	1,28	0,30
2	0,84	0,55	0,39	0,59	0,23	0,79	0,67	0,72	0,72	0,06
4	0,30	0,29	0,22	0,27	0,04	0,40	0,38	0,32	0,36	0,04
6	0,09	0,14	0,10	0,11	0,03	0,13	0,15	0,11	0,13	0,02
8	0,07	0,06	0,07	0,07	0,00	0,08	0,12	0,09	0,10	0,02
10	0,06	0,06	0,07	0,07	0,00	0,07	0,06	0,09	0,07	0,01
12	0,04	0,06	0,05	0,05	0,01	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00
14	0,02	0,05	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,05	0,05	0,00
16	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00
18	0,03	0,02	0,02	0,03	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00
20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,04	0,03	0,03	0,03	0,01

**Annexe 68. Analyse de la variance du Rapport K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.**

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	1,056295	1,056295	187,4803	0,000000
Var. Facteur 1 (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10	1,791445	0,179144	31,7961	0,000000
Erreur	22	0,123952	0,005634		
Total	32	1,915396			

**Annexe 69. Analyse de la variance du Rapport K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.**

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	2,258593	2,258593	253,1537	0,000000
Var. Facteur 1 (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10	4,774505	0,477450	53,5149	0,000000
Erreur	22	0,196280	0,008922		
Total	32	4,970785			

Annexe 70. Taux de chlore des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (g/l)	Cl <sup>-</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne			Moy.	E.T.	Cl <sup>-</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	16,3	21,63	25,12	21,02	4,44	13,79	19,65	20,87	18,10	3,78
2	15,46	17,87	18,32	17,22	1,54	11,76	10,35	12,25	11,45	0,99
4	15,33	10,46	14,22	13,34	2,55	6,88	7,66	8,74	7,76	0,93
6	14,21	11,42	11,03	12,22	1,73	4,75	7,45	7,03	6,41	1,45
8	8,39	9,64	11,84	9,96	1,75	4,23	2,77	4,64	3,88	0,98
10	9,12	8,22	10,43	9,26	1,11	2,95	2,27	3,92	3,05	0,83
12	7,03	8,63	5,91	7,19	1,37	1,87	2,99	2,09	2,32	0,59
14	8,62	6,54	8,49	7,88	1,17	2,23	2,28	2,72	2,41	0,27
16	9,11	6,25	6,32	7,23	1,63	2,11	1,94	2,45	2,17	0,26
18	5,87	6,27	6,25	6,13	0,23	1,44	1,87	1,73	1,68	0,22
20	4,31	6,03	5,02	5,12	0,86	1,86	1,67	2,11	1,88	0,22

Annexe 71. Analyse de la variance du taux de chlore des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	3704,913	3704,913	956,9049	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	735,055	73,505	18,9850	0,000000
Erreur	22	85,179	3,872		
Total	32	820,234			

Annexe 72. Analyse de la variance du taux de chlore des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	1018,370	1018,370	545,7833	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	801,964	80,196	42,9803	0,000000
Erreur	22	41,050	1,866		
Total	32	843,013			

Annexe 73. Taux de phosphore des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (g/l)	$\text{PO}_4^{3-}$ ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne			Moy.	E.T.	$\text{PO}_4^{3-}$ ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	35,2	40,58	36,52	37,43	2,80	19,26	21,56	18,67	19,83	1,53
2	33,7	32,71	31,59	32,67	1,06	16,37	18,58	19,16	18,04	1,47
4	27,27	30,31	28,81	28,80	1,52	15,61	15,72	14,18	15,17	0,86
6	24,84	26,46	27,4	26,23	1,29	13,43	14,36	11,02	12,94	1,72
8	23,77	24,62	24,2	24,20	0,43	9,26	11,42	10,53	10,40	1,09
10	20,69	24,7	22,2	22,53	2,03	6,65	7,01	7,26	6,97	0,31
12	18,45	21,46	20,89	20,27	1,60	5,04	6,26	6,11	5,80	0,67
14	15,64	16,04	18,82	16,83	1,73	5,42	6,43	5,96	5,94	0,51
16	12,56	13,33	14,41	13,43	0,93	4,66	4,99	5,05	4,90	0,21
18	14,52	10,65	12,42	12,53	1,94	3,44	5,22	3,75	4,14	0,95
20	9,58	10,77	12,25	10,87	1,34	5,16	2,82	3,43	3,80	1,21

Annexe 74. Analyse de la variance du taux de phosphore des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	16475,75	16475,75	6204,770	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	2209,81	220,98	83,221	0,000000
Erreur	22	58,42	2,66		
Total	32	2268,23			

Annexe 75. Analyse de la variance du taux de phosphore des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	3176,969	3176,969	2773,331	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	1015,241	101,524	88,625	0,000000
Erreur	22	25,202	1,146		
Total	32	1040,443			

**Annexe 76.** Taux de sulfate des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g}$  MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (g/l)	$\text{SO}_4^{2-}$ ( $\mu\text{mol} / \text{g}$ MS) partie aérienne			Moy.	E.T.	$\text{SO}_4^{2-}$ ( $\mu\text{mol} / \text{g}$ MS) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	123,14	124,67	158,12	135,31	19,77	68,23	57,32	73,31	66,29	8,17
2	147,37	135,29	186,23	156,30	26,62	55,43	77,4	75,35	69,39	12,14
4	189,04	245,87	172,87	202,59	38,34	69,35	87,15	76,21	77,57	8,98
6	236,54	249,55	257,44	247,84	10,55	75,64	81,36	82,12	79,71	3,54
8	225,75	299,65	339,23	288,21	57,60	98,36	111,53	100,51	103,47	7,07
10	278,14	283,36	333,67	298,39	30,66	88,34	164,22	144,26	132,27	39,33
12	350,21	377,24	384,59	370,68	18,10	135,76	178,24	122,74	145,58	29,02
14	328,54	427,31	406,54	387,46	52,08	155,26	156,12	158,04	156,47	1,42
16	433,52	405,67	497,52	445,57	47,10	137,34	207,32	193,22	179,29	37,01
18	467,77	487,53	478,6	477,97	9,90	200,43	178,44	237,31	205,39	29,75
20	506,77	599,78	587,82	564,79	50,60	278,13	277,03	294,39	283,18	9,72

**Annexe 77.** Analyse de la variance du taux de sulfate des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	3485846	3485846	2581,306	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	566594	56659	41,957	0,000000
Erreur	22	29709	1350		
Total	32	596303			

**Annexe 78.** Analyse de la variance du taux de sulfate des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	612507,8	612507,8	1321,648	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	137444,1	13744,4	29,657	0,000000
Erreur	22	10195,7	463,4		
Total	32	147639,8			

**Annexe 79.** Taux d'azote des tissus de la partie aérienne et racinaire en (mg /g MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/l)	N (mg /g MS) partie aérienne				N (mg /g MS) partie racinaire				Moy.	E.T.
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.		
0	48,70	41,60	56,20	48,83	7,30	25,40	25,6	20,7	23,90	2,77
2	48,90	48,10	43,90	46,97	2,69	26,50	20,3	23,3	23,37	3,10
4	40,40	48,30	46,60	45,10	4,16	23,60	18,6	19,3	20,50	2,71
6	38,70	41,40	41,50	40,53	1,59	16,40	18,7	16,7	17,27	1,25
8	32,00	39,20	38,30	36,50	3,92	16,50	19,4	20,3	18,73	1,99
10	36,60	34,60	33,30	34,83	1,66	17,40	14,6	16,9	16,30	1,49
12	38,90	34,20	33,60	35,57	2,90	12,30	9,4	11,7	11,13	1,53
14	33,20	33,70	32,50	33,13	0,60	10,90	12,2	10,7	11,27	0,81
16	30,80	21,90	30,50	27,73	5,05	9,10	12,3	9,3	10,23	1,79
18	20,70	23,50	24,70	22,97	2,05	10,20	9,4	8,8	9,47	0,70
20	28,50	26,10	20,90	25,17	3,89	6,30	9,2	11,9	9,13	2,80

**Annexe 80.** Analyse de la variance du taux d'azote des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	43056,48	43056,48	3113,472	0,000000
Var. Facteur 1 (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10	2261,24	226,12	16,351	0,000000
Erreur	22	304,24	13,83		
Total	32	2565,48			

**Annexe 81.** Analyse de la variance du taux d'azote des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	8002,825	8002,825	1875,928	0,000000
Var. Facteur 1 (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10	939,792	93,979	22,030	0,000000
Erreur	22	93,853	4,266		
Total	32	1033,645			

**Annexe 82.** Taux de proline des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (g/l)	Proline ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) partie aérienne					Proline ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) partie racinaire				
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.
0	0,05	0,06	0,09	0,07	0,02	0,02	0,04	0,06	0,04	0,02
2	0,15	0,16	0,21	0,17	0,03	0,08	0,13	0,14	0,12	0,03
4	0,12	0,15	0,22	0,16	0,05	0,14	0,12	0,13	0,13	0,01
6	0,24	0,25	0,18	0,22	0,04	0,08	0,18	0,12	0,13	0,05
8	0,18	0,19	0,24	0,20	0,03	0,15	0,17	0,07	0,13	0,05
10	0,23	0,3	0,24	0,26	0,04	0,11	0,19	0,24	0,18	0,07
12	0,29	0,38	0,36	0,34	0,05	0,10	0,18	0,23	0,17	0,07
14	0,28	0,38	0,37	0,34	0,06	0,21	0,14	0,28	0,21	0,07
16	0,34	0,41	0,38	0,38	0,04	0,32	0,28	0,20	0,27	0,06
18	0,43	0,48	0,36	0,42	0,06	0,33	0,32	0,36	0,34	0,02
20	0,47	0,38	0,49	0,45	0,06	0,34	0,38	0,35	0,36	0,02

**Annexe 83.** Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	2,487382	2,487382	1268,680	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	0,436485	0,043648	22,263	0,000000
Erreur	22	0,043133	0,001961		
Total	32	0,479618			

**Annexe 84.** Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	1,161094	1,161094	511,5634	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	0,285273	0,028527	12,5688	0,000001
Erreur	22	0,049933	0,002270		
Total	32	0,335206			

**Annexe 85.** Taux de sucres solubles des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (g/l)	Sucres solubles ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) partie aérienne					Sucres solubles ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) partie racinaire				
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.
0	0,33	0,85	0,76	0,65	0,28	0,22	0,65	0,47	0,45	0,22
2	0,98	0,87	1,05	0,97	0,09	0,61	0,57	0,72	0,63	0,08
4	0,68	0,98	0,97	0,88	0,17	0,56	0,97	0,78	0,77	0,21
6	0,83	0,74	0,98	0,85	0,12	0,75	0,79	0,79	0,78	0,02
8	0,97	0,93	1,06	0,99	0,07	0,67	0,91	1,09	0,89	0,21
10	0,98	0,83	1,09	0,97	0,13	0,93	0,97	1,01	0,97	0,04
12	1,11	1,09	1,24	1,15	0,08	1,12	1,24	1,54	1,30	0,22
14	1,12	1,21	1,19	1,17	0,05	1,27	1,48	1,76	1,50	0,25
16	1,31	2,12	1,52	1,65	0,42	1,78	1,79	1,77	1,78	0,01
18	2,12	2,87	3,64	2,88	0,76	1,87	2,31	2,43	2,20	0,29
20	3,40	3,56	3,87	3,61	0,24	2,12	2,28	2,51	2,30	0,20

**Annexe 86.** Analyse de la variance du taux de sucres solubles des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	67,65341	67,65341	766,4398	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	26,76556	2,67656	30,3225	0,000000
Erreur	22	1,94193	0,08827		
Total	32	28,70749			

**Annexe 87.** Analyse de la variance du taux de sucres solubles des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	50,27069	50,27069	1478,550	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	10	12,15381	1,21538	35,746	0,000000
Erreur	22	0,74800	0,03400		
Total	32	12,90181			

## Les données analytiques et les résultats des calculs statistiques pour $\text{CaCl}_2$

Annexe 88. Effet des doses croissantes de  $\text{CaCl}_2$  (g/l) sur le pourcentage de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii*.

$\text{CaCl}_2$ (g/l)	Taux de germination (%)				Moy.	E.T.
0	100	100	100	100	100	0,00
2	100	100	100	100	100	0,00
4	100	100	96	100	99	2,00
6	100	98	100	97	99	1,50
8	87	85	89	76	84	5,74
10	55	54	46	45	50	5,23
12	26	36	29	44	34	8,02
14	22	30	26	38	29	6,83
16	12	15	17	23	17	4,65
18	10	13	18	18	15	3,95
20	5	12	7	13	9	3,86

Annexe 89. Effet des doses croissantes de  $\text{CaCl}_2$  (g/l) sur la vitesse de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* en fonction du temps (jours).

$\text{CaCl}_2$ (g/l)	Taux de germination (%)							% final
	1J	2J	3J	4J	5J	6J	7J	
0	0	55	93	99	100	100	100	100
2	0	43	74	98	100	100	100	100
4	0	41	71	94	98	99	99	99
6	0	36	63	92	95	97	99	99
8	0	32	55	66	79	81	84	84
10	0	29	32	36	44	46	50	50
12	0	14	17	22	30	34	34	34
14	0	11	16	16	19	22	29	29
16	0	4	4	6	12	16	17	17
18	0	4	5	8	8	15	15	15
20	0	2	2	2	6	9	9	9

Annexe 90. Analyse de la variance du pourcentage de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *shweinfurthii* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	146858,3	146858,3	7038,959	0,00
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	59999,2	5999,9	287,578	0,00
Erreur	33	688,5	20,9		
Total	43	60687,7			

**Annexe 91.** Poids de la matière fraîche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	Matière fraîche partie aérienne (mg/plant)										Moy.	E.T.
0	7,89	6,61	7,87	6,62	7,67	6,06	7,75	5,94	6,78	6,69	6,99	0,75
2	7,76	7,52	8,12	6,81	7,79	8,02	7,41	7,06	7,54	7,35	7,54	0,41
4	8,07	7,94	9,11	8,28	9,06	8,25	8,38	8,27	8,32	7,92	8,36	0,41
6	9,19	8,76	8,72	9,41	10,06	9,24	8,29	9,51	8,32	9,63	9,11	0,58
8	10,6	11,97	10,9	11,73	10,85	12,01	11,41	10,81	10,79	12,6	11,38	0,68
10	12,2	11,96	12,7	13,08	12,88	12,39	11,71	12,70	11,51	12,7	12,39	0,53
12	14,8	13,61	13,8	14,07	15,25	15,34	14,04	12,94	13,23	14,6	14,18	0,83
14	13,6	12,89	13,0	11,91	13,41	13,17	12,84	12,72	12,99	12,7	12,94	0,47
16	11,7	12,31	11,8	12,47	11,29	12,67	11,82	12,71	12,02	13,1	12,20	0,55
18	11,1	10,79	10,6	10,28	10,83	11,49	11,77	9,82	11,01	9,96	10,77	0,63
20	10,1	9,68	10,3	9,45	10,32	10,01	9,87	10,11	9,43	9,79	9,92	0,33

**Annexe 92.** Analyse de la variance de la matière fraîche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	12185,32	12185,32	36511,25	0,00
Var. Facteur 1 (CaCl <sub>2</sub> )	10	547,56	54,76	164,07	0,00
Erreur	99	33,04	0,33		
Total	109	580,60			

**Annexe 93.** Poids de la matière fraîche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	Matière fraîche partie racinaire (mg/plant)										Moy.	E.T.
0	2,11	2,76	2,16	2,45	1,53	2,29	1,62	1,92	2,15	2,34	2,13	0,37
2	2,42	2,87	3,21	2,77	2,32	2,81	2,15	2,59	2,47	3,15	2,68	0,35
4	2,87	2,82	2,73	2,81	3,01	3,18	2,43	3,22	2,55	2,77	2,84	0,25
6	3,87	3,11	2,82	2,66	2,19	3,09	2,98	2,85	2,97	2,81	2,94	0,42
8	3,14	2,89	3,44	3,65	2,47	4,37	3,26	3,64	3,65	3,59	3,41	0,51
10	3,96	3,89	4,25	4,47	3,84	4,49	3,86	3,78	3,66	3,71	3,99	0,30
12	4,01	3,84	3,69	4,33	4,24	3,97	4,22	3,96	4,74	3,94	4,09	0,30
14	4,33	3,81	3,99	2,94	3,08	3,74	2,99	4,66	3,75	4,03	3,73	0,58
16	3,44	3,57	2,87	3,27	2,69	3,92	2,82	3,34	3,62	3,31	3,29	0,39
18	3,24	2,81	2,78	2,66	2,58	3,41	2,98	2,67	2,69	3,96	2,98	0,44
20	2,38	2,97	2,55	2,30	2,97	2,25	3,47	2,22	2,47	2,91	2,65	0,41

Annexe 94. Analyse de la variance de la matière fraîche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	1096,016	1096,016	6742,164	0,00
Var. Facteur 1 (CaCl <sub>2</sub> )	10	37,050	3,705	22,791	0,00
Erreur	99	16,094	0,163		
Total	109	53,143			

Annexe 95. Poids de la matière sèche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	Matière sèche partie aérienne (mg/plant)											Moy.	E.T.
0	1,83	1,97	2,16	2,24	2,57	1,67	1,76	2,11	1,76	2,25	2,03	0,28	
2	1,97	2,62	2,51	2,58	1,72	2,22	1,87	2,18	2,11	2,41	2,22	0,31	
4	2,74	2,95	2,27	2,84	2,74	2,53	2,69	1,81	2,59	2,33	2,55	0,34	
6	2,37	3,16	2,39	2,25	2,47	3,09	2,19	2,71	3,01	2,63	2,63	0,35	
8	3,03	3,06	2,77	2,67	2,97	3,01	3,11	2,75	3,33	3,46	3,02	0,25	
10	2,49	2,88	2,62	2,82	3,12	2,65	3,15	2,70	2,84	3,13	2,84	0,23	
12	2,80	1,98	2,67	2,54	2,12	2,06	2,09	2,31	2,03	1,53	2,21	0,38	
14	1,85	1,68	2,57	1,77	1,61	1,90	1,96	1,76	1,52	1,88	1,85	0,29	
16	1,87	2,02	1,87	1,98	1,54	1,39	1,75	2,48	1,56	1,89	1,84	0,31	
18	1,60	1,76	1,40	1,67	1,39	1,83	1,48	2,06	1,26	1,72	1,62	0,24	
20	1,63	1,73	1,43	1,34	1,41	1,81	1,52	1,36	1,36	1,62	1,52	0,17	

Annexe 96. Analyse de la variance de la matière sèche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	537,6489	537,6489	6328,628	0,00
Var. Facteur 1 (CaCl <sub>2</sub> )	10	24,6371	2,4637	29,000	0,00
Erreur	99	8,4106	0,0850		
Total	109	33,0476			

**Annexe 97.** Poids de la matière sèche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	Matière sèche partie racinaire (mg/plant)										Moy.	E.T.
0	0,70	0,68	0,67	0,63	0,82	0,75	0,89	0,76	0,69	0,68	0,73	0,08
2	0,95	0,93	0,73	0,68	0,99	0,75	0,95	1,21	0,97	1,05	0,92	0,16
4	0,63	0,82	0,71	1,12	1,05	0,83	1,31	1,27	0,83	0,97	0,95	0,23
6	1,06	0,95	0,86	0,93	1,05	0,93	1,17	0,89	1,04	0,63	0,95	0,15
8	1,17	0,81	0,92	1,13	1,24	1,18	1,05	0,74	0,87	1,35	1,05	0,20
10	1,68	0,76	0,81	1,23	1,02	1,05	0,96	1,13	0,94	0,88	1,05	0,26
12	1,08	0,99	0,69	0,94	0,78	1,42	1,08	0,88	0,87	1,74	1,05	0,32
14	1,25	0,92	0,85	0,91	1,05	1,11	0,85	1,25	1,12	1,03	1,03	0,15
16	1,07	0,85	0,83	0,84	0,87	1,15	0,87	0,89	0,89	0,93	0,92	0,11
18	0,73	0,96	0,75	0,93	0,94	1,02	0,64	0,82	1,04	0,87	0,87	0,13
20	0,91	0,84	0,76	0,85	0,63	0,85	0,78	0,74	0,86	0,83	0,81	0,08

**Annexe 98.** Analyse de la variance de la matière sèche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	96,82599	96,82599	2847,575	0,000000
Var. Facteur 1 (CaCl <sub>2</sub> )	10	1,12322	0,11232	3,303	0,000989
Erreur	99	3,36629	0,03400		
Total	109	4,48952			

**Annexe 99.** Indice de succulence de la partie aérienne (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	Indice de succulence partie aérienne (MF/MS)										Moy.	E.T.
0	4,31	3,36	3,64	2,96	2,98	3,63	4,40	2,82	3,85	2,97	3,49	0,57
2	3,94	2,87	3,24	2,64	4,53	3,61	3,96	3,24	3,57	3,05	3,46	0,57
4	2,95	2,69	4,01	2,92	3,31	3,26	3,12	4,57	3,21	3,40	3,34	0,56
6	3,88	2,77	3,65	4,18	4,07	2,99	3,79	3,51	2,76	3,66	3,53	0,52
8	3,51	3,91	3,95	4,39	3,65	3,99	3,67	3,93	3,24	3,65	3,79	0,32
10	4,91	4,15	4,86	4,64	4,13	4,68	3,72	4,70	4,05	4,07	4,39	0,41
12	5,32	6,87	5,18	5,54	7,19	7,45	6,72	5,60	6,52	9,57	6,60	1,32
14	7,37	7,67	5,09	6,73	8,33	6,93	6,55	7,23	8,55	6,77	7,12	0,98
16	6,28	6,09	6,32	6,30	7,33	9,12	6,75	5,13	7,71	6,94	6,80	1,08
18	6,97	6,13	7,59	6,16	7,79	6,28	7,95	4,77	8,74	5,79	6,82	1,20
20	6,23	5,60	7,23	7,05	7,32	5,53	6,49	7,43	6,93	6,04	6,59	0,71

Annexe 100. Analyse de la variance de l'indice de succulence de la partie aérienne (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	2843,060	2843,060	4262,375	0,00
Var. Facteur 1 (CaCl <sub>2</sub> )	10	273,876	27,388	41,060	0,00
Erreur	99	66,034	0,667		
Total	109	339,911			

Annexe 101. Indice de succulence de la partie racinaire (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	Indice de succulence partie racinaire (MF/MS)										Moy.	E.T.
0	3,01	4,06	3,22	3,89	1,87	3,05	1,82	2,53	3,12	3,44	3,00	0,75
2	2,55	3,09	4,40	4,07	2,34	3,75	2,26	2,14	2,55	3,00	3,01	0,80
4	4,56	3,44	3,85	2,51	2,87	3,83	1,85	2,54	3,07	2,86	3,14	0,79
6	3,65	3,27	3,28	2,86	2,09	3,32	2,55	3,20	2,86	4,46	3,15	0,64
8	2,68	3,57	3,74	3,23	1,99	3,70	3,10	4,92	4,20	2,66	3,38	0,84
10	2,36	5,12	5,25	3,63	3,76	4,28	4,02	3,35	3,89	4,22	3,99	0,83
12	3,71	3,88	5,35	4,61	5,44	2,80	3,91	4,50	5,45	2,26	4,19	1,10
14	3,46	4,14	4,69	3,23	2,93	3,37	3,52	3,73	3,35	3,91	3,63	0,51
16	3,21	4,19	3,46	3,89	3,09	3,41	3,24	3,75	4,07	3,56	3,59	0,37
18	4,44	2,93	3,71	2,86	2,74	3,34	4,66	3,26	2,59	4,55	3,51	0,79
20	2,62	3,54	3,36	2,71	4,71	2,65	4,45	3,00	2,87	3,51	3,34	0,74

Annexe 102. Analyse de la variance de l'indice de succulence de la partie racinaire (MF/MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	1307,920	1307,920	2244,379	0,000000
Var. Facteur 1 (CaCl <sub>2</sub> )	10	14,864	1,486	2,551	0,008782
Erreur	99	57,693	0,583		
Total	109	72,556			

**Annexe 103.** Taux de sodium des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	Na <sup>+</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne			Moy.	E.T.	Na <sup>+</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	102,33	129,71	147,65	126,56	22,82	25,57	39,87	42,98	36,14	9,29
2	75,54	90,76	85,92	84,07	7,78	28,43	29,81	43,76	34,00	8,48
4	66,02	55,87	67,75	63,21	6,42	31,87	32,76	34,65	33,09	1,42
6	43,87	48,86	46,18	46,30	2,50	29,12	31,25	29,96	30,11	1,07
8	28,65	38,67	37,82	35,05	5,56	22,87	32,42	31,76	29,02	5,33
10	31,56	35,47	38,07	35,03	3,28	22,87	23,76	37,98	28,20	8,48
12	32,87	34,33	35,27	34,16	1,21	26,25	29,15	22,81	26,07	3,17
14	27,84	32,28	36,06	32,06	4,11	24,67	23,48	24,12	24,09	0,60
16	29,26	31,84	32,08	31,06	1,56	22,87	19,56	29,87	24,10	5,26
18	21,65	28,92	33,61	28,06	6,03	19,87	16,25	23,87	20,00	3,81
20	26,73	23,87	30,75	27,12	3,46	17,87	12,93	23,34	18,05	5,21

**Annexe 104.** Analyse de la variance du taux de sodium des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	80320,59	80320,59	1194,758	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	28771,57	2877,16	42,797	0,000000
Erreur	22	1479,00	67,23		
Total	32	30250,58			

**Annexe 105.** Analyse de la variance du taux de sodium des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	25016,79	25016,79	806,0283	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	986,03	98,60	3,1770	0,011379
Erreur	22	682,82	31,04		
Total	32	1668,85			

**Annexe 106.** Taux de potassium des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	K <sup>+</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne				K <sup>+</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire				Moy.	E.T.
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.		
0	78,84	81,22	106,64	88,90	15,41	41,73	45,14	46,68	44,52	2,53
2	96,75	90,45	82,64	89,95	7,07	44,34	53,87	37,65	45,29	8,15
4	86,74	91,97	97,25	91,99	5,26	31,05	49,21	55,87	45,38	12,85
6	85,64	102,74	93,32	93,90	8,56	55,54	31,94	56,87	48,12	14,03
8	94,65	83,09	103,9	93,88	10,43	41,37	56,04	53,22	50,21	7,78
10	95,75	96	96,04	95,93	0,16	55,87	46,87	50,76	51,17	4,51
12	88,64	101,71	100,53	96,96	7,23	40,82	57,87	60,76	53,15	10,78
14	85,33	163,41	117,34	122,03	39,25	55,87	59,95	49,87	55,23	5,07
16	166,87	105,67	207,93	160,16	51,46	85,87	87,44	90,83	88,05	2,54
18	295,76	242,79	106,56	215,04	97,61	120,54	176,87	199,98	165,80	40,86
20	307,65	483,56	442,16	411,12	91,97	168,43	237,76	260,76	222,32	48,06

**Annexe 107.** Analyse de la variance du taux de potassium des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	663578,6	663578,6	321,2263	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	285901,8	28590,2	13,840	0,000000
Erreur	22	45446,9	2065,8		
Total	32	331348,6			

**Annexe 108.** Analyse de la variance du taux de potassium des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	412,1904	412,1904	149,7104	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	423,5531	42,3553	15,3837	0,000000
Erreur	22	60,5715	2,7533		
Total	32	484,1246			

Annexe 109. Taux de calcium des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

$\text{CaCl}_2$ (g/l)	$\text{Ca}^{2+}$ ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne					$\text{Ca}^{2+}$ ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire				
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.
0	99,04	90,11	94,24	94,46	4,47	62,23	64,13	54,36	60,24	5,18
2	68,06	106,95	87,17	87,39	19,45	58,87	62,34	64,87	62,03	3,01
4	77,52	86,59	91,84	85,32	7,24	45,7	67,81	66,54	60,02	12,41
6	64,62	105,96	82,42	84,33	20,74	53,65	53,76	76,21	61,21	12,99
8	79,34	73,87	104,81	86,01	16,51	62,34	56,98	70,65	63,32	6,89
10	89,65	96,3	72,65	86,20	12,20	48,45	82,12	64,54	65,04	16,84
12	89,15	96,05	94,35	93,18	3,59	57,34	68,13	73,22	66,23	8,11
14	88,92	100,54	122,76	104,07	17,19	97,15	87,2	71,76	85,37	12,79
16	100,36	132,16	159,11	130,54	29,41	101,1	98,55	79,46	93,04	11,83
18	127,67	170,32	198,65	165,55	35,73	126,54	116,04	77,44	106,67	25,86
20	147,54	210,76	197,54	185,28	33,35	100,63	124,28	153,14	126,02	26,30

Annexe 110. Analyse de la variance du taux de calcium des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	394260,4	394260,4	891,6283	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	37949,2	3794,9	8,5823	0,000015
Erreur	22	9728,0	442,2		
Total	32	47677,2			

Annexe 111. Analyse de la variance du taux de calcium des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	196663,9	196663,9	894,1876	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	15297,2	1529,7	6,9553	0,000078
Erreur	22	4838,6	219,9		
Total	32	20135,8			

Annexe 112. Rapport  $K^+/Na^+$  des tissus de la partie aérienne et racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $CaCl_2$ .

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> partie aérienne			Moy.	E.T.	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> partie racinaire			Moy.	E.T.
0	0,77	0,63	0,72	0,71	0,07	1,63	1,13	1,09	1,28	0,30
2	1,28	1,00	0,96	1,08	0,17	1,56	1,81	0,86	1,41	0,49
4	1,31	1,65	1,44	1,47	0,17	0,97	1,50	1,61	1,36	0,34
6	1,95	2,10	2,02	2,03	0,08	1,91	1,02	1,90	1,61	0,51
8	3,30	2,15	2,75	2,73	0,58	1,81	1,73	1,68	1,74	0,07
10	3,03	2,71	2,52	2,75	0,26	2,44	1,97	1,34	1,92	0,56
12	2,70	2,96	2,85	2,84	0,13	1,56	1,99	2,66	2,07	0,56
14	3,07	5,06	3,25	3,79	1,10	2,26	2,55	2,07	2,30	0,24
16	5,70	3,32	6,48	5,17	1,65	3,75	4,47	3,04	3,76	0,71
18	13,66	8,40	3,17	8,41	5,25	6,07	10,88	8,38	8,44	2,41
20	11,51	20,26	14,38	15,38	4,46	9,43	18,39	11,17	13,00	4,75

Annexe 113. Analyse de la variance du Rapport  $K^+/Na^+$  des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $CaCl_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	585,9880	585,9880	124,3861	0,000000
Var. Facteur 1 ( $CaCl_2$ )	10	552,3267	55,2327	11,7241	0,000001
Erreur	22	103,6429	4,7110		
Total	32	655,9695			

Annexe 114. Analyse de la variance du Rapport  $K^+/Na^+$  des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $CaCl_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	276,8624	276,8624	103,3518	0,000000
Var. Facteur 1 ( $CaCl_2$ )	10	482,4748	48,2475	18,0106	0,000000
Erreur	22	58,9344	2,6788		
Total	32	541,4092			

Annexe 115. Taux de chlore des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	Cl <sup>-</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne					Cl <sup>-</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire				
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.
0	16,3	21,63	25,12	21,02	4,44	13,79	19,65	20,87	18,10	3,78
2	21,76	31,55	48,98	34,10	13,79	28,31	20,06	30,85	26,41	5,64
4	42,65	33,71	58,76	45,04	12,69	32,68	36,92	41,47	37,02	4,40
6	44,34	43,87	56,71	48,31	7,28	36,63	49,22	37,71	41,19	6,98
8	55,22	63,76	40,45	53,14	11,79	30,44	47,36	66,54	48,11	18,06
10	54,65	68,11	75,78	66,18	10,70	48,32	55,88	52,21	52,14	3,78
12	50,07	75,31	72,82	66,07	13,91	40,54	60,22	73,55	58,10	16,61
14	70,65	107,54	83,33	87,17	18,74	51,73	75,11	68,29	65,04	12,02
16	91,75	104,67	98,31	98,24	6,46	62,3	76,32	99,19	79,27	18,62
18	100,72	130,5	144,54	125,25	22,38	77,21	90,35	115,5	94,35	19,46
20	206,33	188,33	169,84	188,17	18,25	100,4	92,41	143,88	112,23	27,70

Annexe 116. Analyse de la variance du taux de chlore des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	189100,1	189100,1	991,6649	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	68543,7	6854,4	35,9452	0,000000
Erreur	22	4195,2	190,7		
Total	32	72738,8			

Annexe 117. Analyse de la variance du taux de chlore des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	108923,5	108923,5	506,0708	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	24617,7	2461,8	11,4377	0,000001
Erreur	22	4735,1	215,2		
Total	32	29352,8			

**Annexe 118.** Taux de phosphore des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie aérienne					PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ( $\mu\text{mol} / \text{g MS}$ ) partie racinaire				
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.
0	35,2	40,58	36,52	37,43	2,80	19,26	21,56	18,67	19,83	1,53
2	20,4	21,62	23,78	21,93	1,71	19,03	14,41	16,36	16,60	2,32
4	15,87	15,72	19,61	17,07	2,20	9,65	10,54	12,43	10,87	1,42
6	11,63	14,62	12,95	13,07	1,50	6,71	8,84	7,55	7,70	1,07
8	9,07	10,09	12,24	10,47	1,62	4,08	4,51	6,91	5,17	1,53
10	5,93	7,84	8,44	7,40	1,31	4,3	3,46	4,36	4,04	0,50
12	4,58	6,04	6,98	5,87	1,21	4,41	3,63	2,47	3,50	0,98
14	2,45	4,09	3,27	3,27	0,82	3,22	2,69	3,59	3,17	0,45
16	2,63	4,21	3,45	3,43	0,79	3,16	3,30	2,45	2,97	0,46
18	2,18	3,09	3,83	3,03	0,83	2,97	3,48	3,87	3,44	0,45
20	3,18	3,09	4,03	3,43	0,52	5,04	3,81	3,05	3,97	1,00

**Annexe 119.** Analyse de la variance du taux de phosphore des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	4357,583	4357,583	1847,729	0,00
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	3402,096	340,210	144,258	0,001
Erreur	22	51,884	2,358		
Total	32	3453,979			

**Annexe 120.** Analyse de la variance du taux de phosphore des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	1800,722	1800,722	1235,389	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	1043,322	104,332	71,577	0,000000
Erreur	22	32,068	1,458		
Total	32	1075,389			

**Annexe 121.** Taux d'azote des tissus de la partie aérienne et racinaire en (mg /g MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	N (mg /g MS) partie aérienne			Moy.	E.T.	N (mg /g MS) partie racinaire			Moy.	E.T.
0	48,70	41,60	56,20	48,83	7,30	25,40	25,6	20,7	23,90	2,77
2	40,90	35,20	32,60	36,23	4,25	21,20	16,3	16,3	17,93	2,83
4	30,60	32,80	30,70	31,37	1,24	15,20	14,6	12,8	14,20	1,25
6	28,60	22,20	25,30	25,37	3,20	9,60	16,2	13,3	13,03	3,31
8	29,50	26,50	21,30	25,77	4,15	11,80	9,4	10,3	10,50	1,21
10	23,90	20,90	20,30	21,70	1,93	6,40	7,4	8,3	7,37	0,95
12	22,30	18,10	20,10	20,17	2,10	5,30	6,6	8,6	6,83	1,66
14	15,60	18,20	18,90	17,57	1,74	7,60	5,8	6,1	6,50	0,96
16	19,30	17,10	19,80	18,73	1,44	4,10	8,6	6,2	6,30	2,25
18	18,60	16,20	17,20	17,33	1,21	5,20	4,6	7,5	5,77	1,53
20	19,70	16,20	17,30	17,73	1,79	4,40	7,3	6,9	6,20	1,57

**Annexe 122.** Analyse de la variance du taux d'azote des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	21504,17	21504,17	2001,178	0,000000
Var. Facteur 1 (CaCl <sub>2</sub> )	10	2918,32	291,83	27,158	0,000000
Erreur	22	236,41	10,75		
Total	32	3154,73			

**Annexe 123.** Analyse de la variance du taux d'azote des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	3831,859	3831,859	954,7822	0,000000
Var. Facteur 1 (CaCl <sub>2</sub> )	10	1055,647	105,565	26,3035	0,000000
Erreur	22	88,293	4,013		
Total	32	1143,941			

Annexe 124. Taux de proline des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{g} / \text{g}$  MS) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	Proline ( $\mu\text{g} / \text{g}$ MS) partie aérienne					Proline ( $\mu\text{g} / \text{g}$ MS) partie racinaire				
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.
0	0,05	0,06	0,09	0,07	0,02	0,02	0,04	0,06	0,04	0,02
2	0,09	0,07	0,09	0,08	0,01	0,02	0,05	0,04	0,04	0,02
4	0,1	0,12	0,14	0,12	0,02	0,05	0,03	0,06	0,05	0,02
6	0,12	0,12	0,15	0,13	0,02	0,06	0,05	0,09	0,07	0,02
8	0,1	0,16	0,18	0,15	0,04	0,06	0,07	0,13	0,09	0,04
10	0,15	0,14	0,22	0,17	0,04	0,12	0,08	0,13	0,11	0,03
12	0,16	0,22	0,18	0,19	0,03	0,09	0,14	0,15	0,13	0,03
14	0,19	0,23	0,23	0,22	0,02	0,11	0,13	0,16	0,13	0,03
16	0,2	0,25	0,23	0,23	0,03	0,09	0,13	0,19	0,14	0,05
18	0,22	0,24	0,22	0,23	0,01	0,11	0,15	0,18	0,15	0,04
20	0,22	0,23	0,29	0,25	0,04	0,14	0,18	0,15	0,16	0,02

Annexe 125. Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	0,903382	0,903382	1159,984	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	0,112085	0,011208	14,392	0,000000
Erreur	22	0,017133	0,000779		
Total	32	0,129218			

Annexe 126. Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	0,322048	0,322048	380,9176	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	0,061152	0,006115	7,2330	0,000058
Erreur	22	0,018600	0,000845		
Total	32	0,079752			

Annexe 127. Taux de sucres solubles des tissus de la partie aérienne et racinaire en ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	Sucres solubles ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) partie aérienne					Sucres solubles ( $\mu\text{g} / \text{g MS}$ ) partie racinaire				
	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.
0	0,33	0,85	0,76	0,65	0,28	0,22	0,65	0,47	0,45	0,22
2	0,55	0,83	0,93	0,77	0,20	0,34	0,53	0,72	0,53	0,19
4	0,76	0,73	0,86	0,78	0,07	0,57	0,82	0,68	0,69	0,13
6	0,65	1,01	0,89	0,85	0,18	0,66	0,63	0,87	0,72	0,13
8	0,82	0,76	1,08	0,89	0,17	0,61	0,92	0,84	0,79	0,16
10	0,85	1,06	0,87	0,93	0,12	0,67	0,97	0,86	0,83	0,15
12	0,98	1,07	1,09	1,05	0,06	0,73	0,88	1,06	0,89	0,17
14	0,87	1,04	1,11	1,01	0,12	0,87	1,08	0,95	0,97	0,11
16	0,96	1,95	1,58	1,50	0,50	1,23	1,26	1,42	1,30	0,10
18	1,76	2,34	2,51	2,20	0,39	1,21	1,44	1,56	1,40	0,18
20	2,06	2,35	2,79	2,40	0,37	1,58	1,67	1,84	1,70	0,13

Annexe 128. Analyse de la variance du taux de sucres solubles des tissus de la partie aérienne, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	46,20917	46,20917	673,0084	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	10,65780	1,06578	15,5224	0,000000
Erreur	22	1,51053	0,06866		
Total	32	12,16833			

Annexe 129. Analyse de la variance du taux de sucres solubles des tissus de la partie racinaire, des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en  $\text{CaCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	28,76534	28,76534	1205,405	0,000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CaCl}_2$ )	10	4,43476	0,44348	18,584	0,000000
Erreur	22	0,52500	0,02386		
Total	32	4,95976			

Les résultats des calculs statistiques de la comparaison de l'effet de la nature des sels (NaCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et NaCl/CaCl<sub>2</sub>).

Annexe 130. Analyse de la variance du pourcentage de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* en fonction des différentes concentrations du NaCl et du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	216414.7	216414.7	32722.50	0.000001
Dose (g/l)	10	124746.0	12474.6	1886.19	0.000001
Type de sel	1	436.5	436.5	66.01	0.000001
Erreur	66	436.5	6.6		
Total	87	125945.3			

Annexe 131. Analyse de la variance du pourcentage de germination des graines d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* en fonction des différentes concentrations du NaCl et du CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	243180.4	243180.4	16098.20	0.000001
Dose (g/l)	10	120764.3	12076.4	799.44	0.000001
Type de sel	1	2383.7	2383.7	157.80	0.000001
Erreur	66	997.0	15.1		
Total	87	125573.6			

Annexe 132. Analyse de la variance de la matière sèche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	441.3842	441.3842	6849.411	0.000001
Dose (g/l)	10	116.8812	11.6881	181.377	0.000001
Type de sel	1	3.4325	3.4325	53.266	0.000001
Erreur	198	12.7594	0.0644		
Total	219	139.9051			

Annexe 133. Analyse de la variance de la matière sèche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	72.18805	72.18805	8366.869	0.000001
Dose (g/l)	10	10.35948	1.03595	120.070	0.000001
Type de sel	1	0.48774	0.48774	56.531	0.000001
Erreur	198	1.70831	0.00863		
Total	219	12.98836			

**Annexe 134.** Analyse de la variance de la matière sèche partie aérienne en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	674.6533	674.6533	9143.839	0.001
Dose (g/l)	10	65.6637	6.5664	88.997	0.001
Type de sel	1	46.4803	46.4803	629.965	0.001
Erreur	198	14.6089	0.0738		
Total	219	150.1397			

**Annexe 135.** Analyse de la variance de la matière sèche partie racinaire en (mg/plant) des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	117.8729	117.8729	5722.749	0.001
Dose (g/l)	10	2.7065	0.2706	13.140	0.001
Type de sel	1	9.3572	9.3572	454.295	0.001
Erreur	198	4.0783	0.0206		
Total	219	19.3737			

**Annexe 136.** Analyse de la variance du taux d'azote des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	79539.36	79539.36	4110.658	0.000001
Dose (g/l)	10	4262.52	426.25	22.029	0.000001
Type de sel	1	130.48	130.48	6.743	0.012746
Erreur	44	851.38	19.35		
Total	65	5321.72			

**Annexe 137.** Analyse de la variance du taux d'azote des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	13981.10	13981.10	2835.748	0.000001
Dose (g/l)	10	1642.79	164.28	33.320	0.000001
Type de sel	1	68.42	68.42	13.878	0.000553
Erreur	44	216.93	4.93		
Total	65	1981.68			

**Annexe 138.** Analyse de la variance du taux du phosphore des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	28508.91	28508.91	10239.46	0.000001
Dose (g/l)	10	4701.90	470.19	168.88	0.000001
Type de sel	1	160.77	160.77	57.74	0.000001
Erreur	44	122.51	2.78		
Total	65	5030.00			

**Annexe 139.** Analyse de la variance du taux du phosphore des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	6165.207	6165.207	6122.664	0.000001
Dose (g/l)	10	1664.230	166.423	165.275	0.000001
Type de sel	1	1.423	1.423	1.413	0.240961
Erreur	44	44.306	1.007		
Total	65	1755.909			

**Annexe 140.** Analyse de la variance du taux du potassium des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	87154.95	87154.95	2357.501	0.000001
Dose (g/l)	10	44339.61	4433.96	119.937	0.000001
Type de sel	1	808.08	808.08	21.858	0.000028
Erreur	44	1626.65	36.97		
Total	65	47439.37			

**Annexe 141.** Analyse de la variance du taux du potassium des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	35935.20	35935.20	4615.112	0.000001
Dose (g/l)	10	8055.92	805.59	103.461	0.000001
Type de sel	1	3061.64	3061.64	393.203	0.000001
Erreur	44	342.60	7.79		
Total	65	12138.59			

Annexe 142. Analyse de la variance du taux d'azote des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	57118.34	57118.34	3207.476	0.000001
Dose (g/l)	10	4820.36	482.04	27.069	0.000001
Type de sel	1	999.19	999.19	56.109	0.000001
Erreur	44	783.55	17.81		
Total	65	6779.68			

Annexe 143. Analyse de la variance du taux d'azote des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	9752.807	9752.807	2030.169	0.000001
Dose (g/l)	10	1791.158	179.116	37.285	0.000001
Type de sel	1	125.746	125.746	26.176	0.000007
Erreur	44	211.373	4.804		
Total	65	2149.303			

Annexe 144. Analyse de la variance du taux du phosphore des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	15565.21	15565.21	5905.474	0.000001
Dose (g/l)	10	5770.88	577.09	218.949	0.000001
Type de sel	1	986.31	986.31	374.208	0.000001
Erreur	44	115.97	2.64		
Total	65	7041.29			

Annexe 145. Analyse de la variance du taux du phosphore des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	4715.438	4715.438	4054.600	0.000001
Dose (g/l)	10	1709.864	170.986	147.024	0.000001
Type de sel	1	74.944	74.944	64.441	0.000001
Erreur	44	51.171	1.163		
Total	65	1864.377			

Annexe 146. Analyse de la variance du taux du potassium des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	544400.5	544400.5	519.8272	0.000001
Dose (g/l)	10	112505.4	11250.5	10.7427	0.000001
Type de sel	1	171551.8	171551.8	163.8082	0.000001
Erreur	44	46080.0	1047.3		
Total	65	525864.7			

Annexe 147. Analyse de la variance du taux du potassium des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	196627.7	196627.7	910.7594	0.000001
Dose (g/l)	10	44540.2	4454.0	20.6305	0.000001
Type de sel	1	39413.9	39413.9	182.5611	0.000001
Erreur	44	9499.3	215.9		
Total	65	157997.4			

Annexe 148. Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	6.164074	6.164074	3337.399	0.000001
Dose (g/l)	10	1.035209	0.103521	56.049	0.000001
Type de sel	1	0.063674	0.063674	34.475	0.000001
Erreur	44	0.081267	0.001847		
Total	65	1.199626			

Annexe 149. Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	3.190002	3.190002	1460.056	0.000001
Dose (g/l)	10	0.581382	0.058138	26.610	0.000001
Type de sel	1	0.068741	0.068741	31.463	0.000001
Erreur	44	0.096133	0.002185		
Total	65	0.774298			

Annexe 150. Analyse de la variance du taux de sucres solubles des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	244.3403	244.3403	1916.805	0.000001
Dose (g/l)	10	62.8442	6.2844	49.300	0.000001
Type de sel	1	15.9939	15.9939	125.470	0.000001
Erreur	44	5.6088	0.1275		
Total	65	87.5598			

Annexe 151. Analyse de la variance du taux de sucres solubles des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	152.5472	152.5472	1875.441	0.000001
Dose (g/l)	10	38.6680	3.8668	47.539	0.000001
Type de sel	1	5.4008	5.4008	66.399	0.000001
Erreur	44	3.5789	0.0813		
Total	65	49.4370			

Annexe 152. Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	4.160074	4.160074	3312.001	0.000001
Dose (g/l)	10	0.624476	0.062448	49.717	0.000001
Type de sel	1	0.483674	0.483674	385.072	0.000001
Erreur	44	0.055267	0.001256		
Total	65	1.269226			

Annexe 153. Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	2.031764	2.031764	1379.593	0.000001
Dose (g/l)	10	0.326303	0.032630	22.156	0.000001
Type de sel	1	0.387933	0.387933	263.412	0.000001
Erreur	44	0.064800	0.001473		
Total	65	0.838036			

Annexe 154. Analyse de la variance du taux de sucres solubles des tissus de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	213.8040	213.8040	1817.008	0.000001
Dose (g/l)	10	44.3800	4.4380	37.716	0.000001
Type de sel	1	25.0860	25.0860	213.193	0.000001
Erreur	44	5.1774	0.1177		
Total	65	80.1127			

Annexe 155. Analyse de la variance du taux de sucres solubles des tissus de la partie racinaire des plantules d'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* âgées d'un mois, cultivées *in vitro* dans des milieux contenant différentes concentrations en NaCl et en CaCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	Carrés moyens	Test F	Proba.
Ordre origine	1	123.8754	123.8754	1624.144	0.000001
Dose (g/l)	10	27.2938	2.7294	35.785	0.000001
Type de sel	1	12.5673	12.5673	164.771	0.000001
Erreur	44	3.3559	0.0763		
Total	65	48.6614			

## Conductivité électrique, pression osmotique et point de flétrissement pour les trois sels appliqués

Annexe 156. Conductivité électrique, pression osmotique et point de flétrissement des différentes concentrations de NaCl utilisées

NaCl (g/l)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
CE (dS/cm)	0	3,42	6,84	10,26	13,68	17,09	20,51	23,93	27,35	30,77	34,19
PO (atm)	0	1,23	2,46	3,69	4,92	6,15	7,38	8,62	9,85	11,08	12,31
PO (Mpa)	0	0,12	0,25	0,37	0,49	0,62	0,74	0,86	0,98	1,11	1,23
pF(Osmo)	0	3,10	3,40	3,57	3,70	3,79	3,87	3,94	4,00	4,05	4,10

Annexe 157. Conductivité électrique, pression osmotique et point de flétrissement des différentes concentrations de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> utilisées

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/l)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
CE (dS/cm)	0	1,41	2,82	4,23	5,63	7,04	8,45	9,86	11,27	12,68	14,08
PO (atm)	0	0,51	1,01	1,52	2,03	2,54	3,04	3,55	4,06	4,56	5,07
PO (Mpa)	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,41	0,46	0,51
pF(Osmo)	0	2,71	3,01	3,19	3,31	3,41	3,49	3,56	3,61	3,66	3,71

Annexe 158. Conductivité électrique, pression osmotique et point de flétrissement des différentes concentrations de CaCl<sub>2</sub> utilisées

CaCl <sub>2</sub> (g/l)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
CE (dS/cm)	0	1,80	3,61	5,41	7,21	9,02	10,82	12,62	14,43	16,23	18,03
PO (atm)	0	0,65	1,30	1,95	2,60	3,25	3,90	4,54	5,19	5,84	6,49
PO (Mpa)	0	0,06	0,13	0,19	0,26	0,32	0,39	0,45	0,52	0,58	0,65
pF(Osmo)	0	2,82	3,12	3,30	3,42	3,52	3,60	3,66	3,72	3,77	3,82

## إمكانية إستغلال الأراضي المالحة في الوسط السهبي. دراسة تحمل نبات الرغل للإجهاد الملحي.

### المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو إظهار مدى تأثير الملوحة المتزايدة للثلاث أنواع من الأملاح الذائبة ( $\text{CaCl}_2$ ،  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ،  $\text{NaCl}$ ) على الإنتاش، النمو، و تراكم بعض مركبات التعديل الأسموزي (عضوية و غير عضوية) عند نبات الرغل (*Atriplex halimus*)، والذي تم الحصول على بذوره من منطقة الجلفة (الجزائر)، العديد من التراكيز و التي تراوحت من 0 إلى 20 غ/ل استعملت لهذا الغرض. التحليل الكيميائي و قياسات نمو(المادة الرطبة والجافة) أخذت بعد 30 يوما من الزراعة على مستوى الجزء الخضري و الجزء الجذري.

النتائج المتحصل عليها بينت أن بذور هذا النوع تميزت بسرعة إنتاشها و بمقاومتها (ضعف حساسيتها) للتراكيز المرتفعة، عتبة المقاومة أو الحساسية بالنسبة للإنتاش قدرت بـ 5.25 غ/ل  $\text{NaCl}$ ، 6.06 غ/ل  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  و 7 غ/ل  $\text{CaCl}_2$ ، ما يعادل 0.32، 0.15 و 0.22 Mpa. بالنسبة للنمو فان تراكيز 4 غ/ل  $\text{NaCl}$ ، 6 غ/ل  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  و 8 غ/ل  $\text{CaCl}_2$  في الوسط بدت محفزة لنمو النبات (المادة الجافة)، فوق هذه التراكيز أثرت الأملاح سلبا على نمو النبات، هذه النتائج تؤكد على أن *Atriplex halimus* يعتبر من النباتات المحبة للملوحة.

إن إضافة كل من  $\text{NaCl}$  و  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  للوسط، يؤدي بعد شهر من الزراعة إلى نقص كمية البوتاسيوم، الكالسيوم، الفسفور و الأزوت، بينما يزداد تراكم الصوديوم، الكلور و السلفات في كل الأعضاء مع زيادة تركيز الأملاح. أما في حالة إضافة  $\text{CaCl}_2$  للوسط فانه يؤدي إلى تثبيط امتصاص الصوديوم، بينما يزداد تراكم كل من الكالسيوم، الكلور و البوتاسيوم مع زيادة تركيز كلور الكالسيوم. بالمقابل فان مجموع السكاكر البسيطة و الحمض الأميني البرولين تتراكم بشكل معتبر خاصة في أوراق هذا النوع النباتي تحت الإجهاد الملحي.

هذه النتائج تبين أن هذا النبات يمكن استعماله لاستغلال الأراضي المالحة الغير صالحة لزراعة معظم النباتات الفلاحية، وذلك لهدف مكافحة التصحر ولزيادة إنتاج الأعلاف.

**الكلمات المفاتيح:** *Atriplex halimus*، الزراعة النسيجية، علف، البرولين، الأملاح الذائبة، المناطق السهبية، السكاكر البسيطة.

Recherche sur les possibilités de valorisation des sols salés en zones steppique. Etude de la résistance d'*Atriplex halimus* aux sels solubles.

## RESUME

*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* est une halophyte à potentialités fourragère, native des zones steppiques Algériennes. Dans son biotope naturel, elle est souvent soumise à des variations de grande amplitude de la salinité et de l'hydromorphie du sol. La présente étude se propose de déterminer l'effet de trois sels solubles sur la croissance et l'accumulation ionique chez cette espèce. Des plantules d'*Atriplex halimus* sont cultivées *in vitro* pendant un mois en présence de 0 à 20g/l NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ou CaCl<sub>2</sub>. Les mesures ont portées sur la germination, la croissance, le statut ionique et l'accumulation de certains solutés organiques (proline et sucres solubles totaux) impliqués dans la protection des tissus contre le stress induit par le sel. Les résultats montrent que la capacité de germination a été significativement réduite (taux de germination de 75%) à partir de 5.25 g/l pour NaCl, 6.06 g/l pour Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et 7 g/l et pour CaCl<sub>2</sub>.

*A. halimus* exprime ces potentialités maximales de croissance à 4 g/l NaCl, 6 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et 8 g/l CaCl<sub>2</sub>. Au delà de ces doses la croissance diminue significativement sans qu'apparaissent des symptômes de toxicité, chlorose ou nécrose foliaires.

Sur le plan nutritionnel, l'influence du NaCl et du NaSO<sub>4</sub> se traduit par un enrichissement des tissus par Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> et de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, en parallèle une diminution du Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et de l'azote. Par contre, dans le cas du CaCl<sub>2</sub> la présence du calcium se traduit par une diminution du contenu en Na<sup>+</sup> et une accumulation du K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> et Ca<sup>2+</sup>. La proline et les sucres totaux sont accumulés à des quantités significatives en fonction de la concentration du sel appliqué.

La sélection des plantes tolérantes et l'amélioration de la tolérance au sel par voies classiques ou par génie génétique pourraient contribuer à l'extension des zones cultivées et l'amélioration de leur rendement ; cependant, l'apport de cette approche demeure limité compte tenu de la complexité des mécanismes impliqués dans la tolérance au sel. L'approche alternative consiste à utiliser les halophytes qui ont déjà acquis les caractéristiques requises pour tolérer le sel et assurer une bonne productivité dans les conditions contraignantes. Dans le cadre de cette approche, nous avons montré que l'*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*, est capable de maintenir des potentialités élevées de croissance lorsqu'elle est cultivée dans une gamme étendue de sels solubles.

**Mots clés:** *Atriplex halimus*; Culture *in vitro*; Fourrage; Halophyte; Proline; Sels solubles; Steppe; Sucres solubles totaux.

Valorisation of salt steppe soils. Tolerance of *Atriplex halimus* to soluble salts.

## ABSTRACT

Soil salinization is one of the major causes of declining agricultural productivity in many arid and semiarid regions of the world. Draining salinised soils or irrigating with high quality water from remote sources are extremely costly. Therefore, selecting plants tolerant to salinity is an alternative strategy for a sustainable agriculture in those marginal lands.

Salt-tolerant plants, therefore, may provide a sensible alternative for many developing countries. In some cases, successful rehabilitation of degraded land is usually preferable, in terms of resource conservation, to opening new land. Groundwater too saline for irrigating conventional crops can be used to grow salt-tolerant plants. These plants can be grown using land and water unsuitable for conventional crops and can provide fodder and wood. In this approach, we showed that *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*, is able to maintain high potentialities of growth when it is cultivated in a soluble salt range.

*Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* (Chenopodiaceae), a widely distributed perennial halophyte in the Algerian salt steppes, is of interest because of its tolerance to environmental stresses and its use as a fodder shrub for livestock in low-rainfall Mediterranean areas.

This study reports the effect of three soluble salts on germination, growth, succulence, proline, total soluble sugars and ion content of this species under *in vitro* conditions. Treatments were prepared by adding 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 and 20g/l NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> or CaCl<sub>2</sub> to the nutrient medium. Germination decreased significantly at a concentration of 5.25 g/l NaCl, 6.06 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and 7 g/l CaCl<sub>2</sub>. Optimal growth was observed at 4, 6 and 8 g/l NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> or CaCl<sub>2</sub> respectively and declined with a further increase in salinity. Potassium, Ca<sup>2+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> and nitrogen concentrations of plants decreased with increasing NaCl and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> salinity, while Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> increased. In case of CaCl<sub>2</sub>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Cl<sup>-</sup> contents in plants increased, whereas Na<sup>+</sup> and nitrogen contents decreased with an increase in salinity. Both proline and total soluble sugars content of shoots and roots increased with salinity.

In summary, *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* was a highly salt-tolerant perennial halophyte in salt zones of Algerian steppes, where a major issue is the irregularity of fodder resources. This plant can be used locally as a fodder for livestock and to stabilise sand dunes and rehabilitate salt soils.

**Key words:** *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*; Fodder crop; Halophyte; *In vitro* Culture; Proline; Soluble salts; Steppe; total soluble sugars.