

UNIVERSITE BLIDA 1

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Biotechnologie

THESE DE DOCTORAT

En Sciences Agronomiques

ETUDE DE LA TOLERANCE DU *Pistacia atlantica* Desf. ET *Pistacia vera* L. EN VUE
DE VALORISER LES SOLS SALES DES ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES.

Par

Fatma Zohra OUKARA

Devant le jury composé de :

M. BENMOUSSA	Professeur	Université Blida 1	Président
M. BELHAMRA	Professeur	Université de Biskra	Examineur
A. BENAZIZA	MCA	Université de Biskra	Examineur
O. AOUN	MCA	Université de K. Miliana	Examineur
F.Z. BENREBIHA	Professeur	Université Blida 1	Directrice de thèse
C. CHAOUIA	MCA	Université Blida 1	Co-promotrice

Blida, 24 juin 2018

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tout d'abord le Bon Dieu tout puissant pour son aide et sa bénédiction.

Ma profonde gratitude à ma Directrice de thèse M^{me} BENREBIHA F-Z. et ma Co-encadreur M^{me} CHAOUIA C. qui ont dirigé ce travail avec beaucoup d'efficacité, en faisant toujours preuve à mon égard de compréhension et de gentillesse. Leurs expériences, aides, conseils et surtout leurs encouragements ont été décisifs dans le développement de ce travail. Elles sont toujours présentes et disponibles. Un grand merci pour toute la liberté qu'elles ont accordé pour gérer mon projet de recherche et exprimer mes idées.

Je tiens à remercier M^r BENMOUSSA M. professeur à l'université Blida 1 , professeur à l'université Blida1, de l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de ma thèse.

Mes profonds remerciements aux professeurs BELHAMRA M. et BENAZIZA A. de l'université de Biskra pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail de recherche et ce malgré leurs responsabilités.

Je remercie Docteur AOUN O. de l'université de Khemis Miliana, pour le temps précieux qu'il a accordé en jugeant ce travail de doctorat.

Je tiens à assurer ma gratitude à Mr DEGAÏCHIA H. qui m'a fait profiter de ses connaissances en informatique et aider dans les traitements statistiques.

Ma gratitude va également à tout le corps administratif et enseignant du département des Biotechnologies.

Un grand merci aux petites mains, les étudiants de master que j'ai eu le plaisir de les co-encadrer et qui ont participé à ce travail, Ayoub, Rehia, Kenza, Khouloud, Hachem, Hichem, Lamia, Narimen et Asma.

J'exprime ma profonde reconnaissance à tous les chercheurs et le personnel de l'Institut National de la Recherche Forestière (INRF) et surtout ceux de la station de Médéa.

Enfin, je tiens à remercier vivement toutes les personnes qui ont participer de près comme de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'une part l'amélioration de la germination des graines de pistachier de l'Atlas et d'autre part, l'étude des effets du stress salin et hydrique sur la germination et le comportement morphologique et physiologique de pistachier de l'Atlas et pistachier vrai.

Afin d'optimiser la germination des graines du pistachier de l'Atlas, différents prétraitements ont été testés. Les résultats montrent que la stratification au froid pendant 30 jours combinée à la scarification mécanique ont permis d'améliorer le taux de germination qui a atteint 100 %.

Le test du comportement germinatif du pistachier de l'Atlas en conditions de stress salin a mis en évidence un effet hautement significatif sur le taux de germination (77%) et a révélé une tolérance de cette espèce à la salinité en NaCl de 15 g/l.

Au niveau des plantules, les résultats ont montré que la concentration de 5 g/l stimule la croissance du végétal. Une diminution significative est observée progressivement avec l'augmentation de stress. Les différentes concentrations en NaCl ont provoqué une réduction significative de la matière sèche de la partie aérienne avec une valeur de 0,224 g chez les plantules stressées par 30g/l comparé aux plantules témoins (0,442 g). Le poids sec de la partie souterraine n'a pas été affecté par le stress, on enregistre 0,232 g chez les plantules traitées à 30 g/l par rapport au témoin (0,281 g). Les teneurs en chlorophylle (a) et totale ont subi une réduction significative selon l'intensité de stress. La proline (1,96 µg/g MF) et les sucres solubles (5,60µg/g MF) sont significativement accumulés chez les feuilles des plantules stressées par 30g/l de NaCl comparé aux témoins avec respectivement 0,55 et 2,65 µg/g MF. Le stress hydrique a entraîné la diminution de la croissance de la tige. Les valeurs enregistrées, lors de prélèvement effectué au 21 jours, chez les plantules stressées est de 11,83 cm et 16,66 cm chez les plantules témoins soit une baisse de 40,82 %. La longueur de la racine principale n'a pas été affectée par le stress hydrique. Le stress hydrique a provoqué la diminution de la teneur relative en eau et la chlorophylle totale. Les teneur en proline et en sucres solubles augmentent significativement en fonction de niveau du stress. Les réponses des plantules du pistachier en pépinière contribuent efficacement aux mécanismes de tolérance de l'espèce au stress salin et hydrique.

Les plantules du pistachier vrai ayant subi un stress salin montrent que la hauteur de la tige est inhibée d'une manière significative avec l'augmentation de la concentration en sels. En présence d'une concentration de 30 g/l, la réduction de la longueur de la tige observée est de 54,81 % par rapport aux plantules témoins. Il n'a pas eu un effet significatif sur la longueur de la racine. Les rendements en matière fraîche et sèche de la plantule diminuent avec l'agressivité du sel dans le milieu. En présence de 30 g/l, le poids sec de la tige enregistré est de 0,28 g et le poids sec de la racine est de 0,14 g, soient une baisse de 79 et 63 % respectivement par rapport au témoin. Le stress hydrique a entraîné une diminution de la croissance en longueur de la partie aérienne et souterraine avec l'accumulation de la proline. Les taux de réduction enregistrés après 21 jours de stress sont 39,76 % pour la longueur de la tige et 30,56 % pour la longueur de la racine par rapport au témoin.

Mots clés : *Pistacia atlantica*, *Pistacia vera*, germination, dormance, stress salin, stress hydrique.

Abstract

This study is interested to optimize the seeding of seeds of the Atlas pistachio and in the knowledge of the potentialities of adaptation of *Pistacia atlantica* and *Pistacia vera* in the water and salt stress.

To optimize the seeding of seeds of the Atlas pistachio, various pretreatments were tested. The results show that cold stratification for 30 days combined with mechanical scarification allowed to improve the rate of seed germination which reached 100 %.

The test of the germinal behavior of the Atlas pistachio in salt stress conditions highlighted a highly significant effect on the rate of seeding (77 %) and revealed a tolerance of this species in the salinity in NaCl of 15 g/l.

At the level of seedling, the results showed that a concentration of 5 g/l stimulate plant's growth. Beyond this concentration, a significant decrease is gradually observed with the increase of stress.

Various concentrations in NaCl caused significant reduction of dry material of the aerial part with a value of 0,224 g to seedlings put under stress by 30 g/l compared with control seedlings (0.442 g).

Dry weight of root part was not affected by the stress where we note a value of 0,232 g to seedlings handled by 30 g/l compared with control (0,281 g). The contents in chlorophyll (a) and total underwent a significant reduction according to the intensity of stress. Proline (1.96 µg/g of fw) and soluble sugars (5.60 µg/g of fw) are significantly accumulated at the sheets of seedling put under stress by 30 g/l of NaCl compared to control with respectively 0,55 and 2,65 µg/g of fw. The water stress has caused the decrease of growth of the stem. The length of the stem spends of 31.16 cms to seedlings witnesses to arrive at 14.83 cms to seedlings put under stress for 21 days. The length of the taproot was not affected by water stress. The highest relative water content is observed at seedlings put under stress during 5 days with 66.92 %. The proline content of leaves increases significantly according to level of the stress and arrives at 1,99 µg/g MF during a period of 21 days. The accumulation of soluble sugars varies with the level of the stress. treatments 15 et 21 days cause a strong accumulation of soluble sugars with respectively 4,95 et 5,44 µg/g MF respectively.

Seedlings of *Pistacia vera* having undergone a salt stress that the height of the stem is inhibited in a significant way with increase of the concentration in salt. So, in the presence of a concentration of 30 g/l, the reduction of the length of the observed stem is 54.81 % compared to control seedlings. Salt stress had no significant effect on the length of the taproot. The yields in fresh and dry material of aerial and root part also decrease when the concentration of NaCl increases. In the presence of 30 g/l, the dry weight of the stem registered is 0.28 g and the dry weight of the root is 0.14 g, a reduction in 79 and 63 % respectively compared with control.

The water stress caused the decrease of the growth in length of aerial and root part and caused accumulation of proline. Rates of reduction after 21 days of stress are 39.76 % for the length of the stem and 30.56 % for the length of the root compared to control.

Keywords: *Pistacia atlantica*, *Pistacia vera*, germination, dormancy, salt stress, water stress.

ملخص

يشكل الجفاف و ملوحة التربة عواقب رئيسية تعترض نمو النباتات في المناطق القاحلة و شبه القاحلة في حوض البحر الأبيض المتوسط.

يعتبر إدخال النباتات المقاومة إحدى الأساليب الأكثر تأثيرا لتنميين هذه المناطق. الفستق الأطلسي و الفستق الحلبي يعتبران ضمن قائمة النباتات المقاومة للظروف القاسية ويملكان إمكانيات كبيرة للتطوير الدائم للمناطق الجافة.

تأثير الملح على البذور اظهر انخفاضا للبذر وفقا لارتفاع تركيزات كلوريور الصوديوم و من خلال النتائج يمكن القول إن بذور الفستق الأطلسي تستطيع البذر في وسط ذو ملوحة تصل إلي غاية 15 غ/ل. أما تأثير الملح على النباتات فقد أظهرت النتائج إن الجرعة 5 غ/ل حفزت نمو النباتات (طول الساق و سطح الأوراق) إذا يمكن القول إن للفستق الأطلسي خاصية هالوفيت ، أي النباتات المحبة للملح. كما لوحظ نقص تدريجي في نمو النباتات مع زيادة جرعات الملح.

إن مختلف تركيزات كلوريور الصوديوم أحدثت تراجعاً هاماً في إنتاج المواد الجافة للجزء الهوائي مع تسجيل 0.224 غ عند النباتات المجهد ب 30 غ /ل مقارنة مع النباتات الشاهدة 0.442 غ. الوزن الجاف للجزء الجذري لم يتأثر بفعل الإجهاد الملحي حيث سجلت قيمة 0.232 غ عند النباتات المعالجة ب 30 غ /ل مقارنة مع النباتات الشاهدة ب 0.281 غ.

إن محتوى اليخضور (أ) و اليخضور الكامل عرف تراجعاً ملحوظاً مع ارتفاع الإجهاد الملحي.

عرفت كمية البرولين (1.66 م غ/ غ) و السكريات الكلية (5.60 م غ / غ) تراكم بنسب ملحوظة عند النباتات المجهد ب 30 غ /ل مقارنة مع النباتات الشاهدة مع (0.55 م غ/ غ) و (2.65 م غ/ غ) تدريجياً.

بالنسبة للإجهاد المائي، أظهرت النتائج نقص في نمو الساق بعد 21 يوماً من الإجهاد، سجلت النباتات 11.83 سم مقارنة مع النباتات الشاهدة ب 16.66 سم، أما طول الجذر الرئيسي فلم يتأثر بالإجهاد المائي.

تم تسجيل ارتفاع محسوس في البرولين و الأميني و السكريات الذائبة على مستوى الأوراق أين سجل تدريجياً 0.77 م غ/ غ و 5.21 م غ/ غ.

إن رد الفعل المورفولوجي و الفيزيولوجي للنباتات الفستق الأطلسي في طور الشتلات أظهر فعالية آليات مقاومة هذا النوع للإجهاد الملحي و المائي .

أظهرت نباتات الفستق الحلبي المجهد بالملح وقف نمو الساق بحضور 30 غ/ل ، سجلنا 0.28 غ بالنسبة للوزن الجاف للساق و 0.14 غ بالنسبة للوزن الجاف للجذور بنسبة تراجع تقدر ب 79 % و 63% مقارنة مع النباتات الشاهدة .

أحدث الجهد المائي تراجعاً في نمو الساق و الجذور و تراكم البرولين في الأوراق.

الكلمات المفتاح: فستق أطلسي، فستق حلبي، أنثاش، إجهاد ملحي، إجهاد مائي.

TABLE DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

LISTES DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

INTRODUCTION..... 14

CHAPITRE 1 : REGIONS ARIDES ET SEMI-ARIDES 17

1.1. Notion d'aridité..... 17

1.2. Répartition géographiques des zones arides et semi-arides..... 18

1.2.1. Dans le monde..... 18

1.2.2. En Algérie 19

1.3. Climat 21

1.4. Sol 21

1.5. Végétation..... 22

CHAPITRE 2 : SOLS SALINS..... 24

2.1. Généralités 24

2.2. Répartition des sols salins 25

2.2.1. Dans le monde..... 25

2.2.2. En Algérie 26

2.3. Formation des sols salins..... 27

2.4. Origine de la salinité des sols 28

2.4.1. Salinisation primaire 28

2.4.2. Salinisation secondaire..... 28

2.5. Caractéristiques des sols salins 29

2.5.1. Salinité globale 29

2.5.2. Proportion de sodium échangeable E.S.P 30

2.5.3. pH 30

2.6. Effet de la salinité sur le sol et la végétation 31

CHAPITRE 3 : GENERALITES SUR LES ESPECES ETUDIEES 32

3.1. Pistachier de l'Atlas *Pistacia atlantica* Desf 32

3.1.1. Classification botanique..... 33

3.1.2. Aire de répartition	33
3.1.2.1. Dans le monde	33
3.1.2.2. En Algérie	33
3.1.3. Caractéristiques botaniques	35
3.1.4. Caractéristiques écologiques	37
3.1.4.1. Conditions climatiques	38
3.1.4.1. Conditions édaphiques	38
3.1.5. Intérêts de l'espèce	38
3.1.5.1. Intérêts écologiques	38
3.1.5.2. Intérêt socio-économiques	39
3.1.6. Multiplication du pistachier de l'Atlas	39
3.2. Pistachier vrai <i>Pistacia vera</i>	41
3.2.1. Classification botanique	41
3.2.2. Caractéristiques botaniques	41
3.2.3. Caractéristiques climatiques et édaphiques	42
3.2.4. Importance économique	43
3.2.4.1. Dans le monde	43
3.2.4.2. En Algérie	45
3.2.5. Multiplication du pistachier fruitier	45
CHAPITRE 4 : STRESS ABIOTIQUES	48
4.1. Notion de stress	48
4.2. Stress salin	49
4.2.1. Effets du stress salin sur les plantes	49
4.2.1. 1. Effet du stress salin sur la germination	49
4.2.1.2. Effet du stress salin sur l'absorption	50
4.2.1.3. Effet du stress salin sur la croissance et développement	51
4.2.1.4. Effet du stress salin sur la photosynthèse	51
4.2.1.5. Effet de la salinité sur la nutrition de la plante	52
4.2.2. Mécanismes de tolérances des plantes au stress salin	53
4.2.2.1. Inclusion et compartimentation des ions	53
4.2.2.2 Exclusion	54
4.2.2. 3. Ajustement osmotique	54
4.3. Stress hydrique	55
4.3.1. Effets du stress hydrique sur les plantes	55
4.3.1.1. Effet du stress hydrique sur la croissance des plantes	55

4.3.1.2. Effet du stress hydrique sur la nutrition minérale	56
4.3.1.3. Effet du stress hydrique sur l'activité photosynthétique.....	56
4.3.2. Mécanismes d'adaptation des plantes à la sécheresse	57
4.3.2.1. Mécanismes d'adaptations	57
4.3.2.1.1. Esquive	57
4.3.2.1.2. Evitement	57
4.3.2.1.3. Tolérance	58
4.3.2.2. Mécanismes d'adaptations biochimiques.....	58
CHAPITRE 5 : MATERIEL ET METHODES	60
5.1. Matériel végétal	60
5.1.1. Graines du pistachier de l'Atlas	60
5.1.1.1. Echantillonnage	61
5.1.1.2. Caractéristiques du site de récolte.....	62
5.1.2. Graines du pistachier vrai	63
5.1.2.1. Récolte	64
5.1.2.2. Caractéristiques globales du site de la récolte.....	64
5.2. Préparation du matériel végétal et conditions de culture.....	65
5.2.1. Germination.....	65
5.2.2. Obtention des plantules	66
5.2.3. Substrat.....	66
5.2.4. Conteneurs.....	67
5.2.5. Conditions de culture	67
5.3. Etude de l'effet de la contrainte saline	67
5.4. Etude de l'effet de la contrainte hydrique	68
5.5. Paramètres étudiés et techniques d'analyse	68
5.5.1. Taux de germination.....	68
5.5.2. Cinétique de germination.....	69
5.5.3. Temps moyen de germination.....	69
5.5.4. Humidité du sol.....	69
5.5.5. Paramètres morphologiques.....	70
5.5.5.1. Croissance en longueur	70
5.5.5.2. Biomasse des organes aériens et racinaires.....	70
5.5.5.3. Surface foliaire	70
5.5.6. Paramètres physiologiques.....	70

5.5.6.1. Statut hydrique des plantules	70
5.5.6.2. Dosage des chlorophylles.....	71
5.5.7. Paramètres biochimiques.....	71
5.5.7.1. Dosage de la proline	71
5.5.7.2. Dosage des sucres totaux solubles.....	72
5.5.8. Expression des résultats et analyses statistiques des données.....	72
CHAPITRE 6: RESULTATS ET DISCUSSION	74
6.1. Effet des prétraitements sur la germination	74
6.1.1. Taux de germination.....	74
6.1.2. Cinétique de germination.....	76
6.1.3. Temps moyen de germination	77
6.2. Effet de la contrainte saline chez le pistachier de l'Atlas.....	79
6.2.1. Effet du stress salin sur la germination	79
6.2.1.1. Taux de germination	80
6.2.1.2. Cinétique de germination.....	81
6.2.1.3 Temps moyen de germination	81
6.2.2. Effet du stress salin sur les plantules du pistachier de l'Atlas	83
6.2.2.1. Effet du stress salin sur les paramètres morphologiques.....	83
6.2.2.1.1. Croissance en longueur.....	84
6.2.2.1.2. Biomasse fraîche et sèche	87
6.2.2.1.3. Surface foliaire	89
6.2.2.2. Effet du stress salin sur les paramètres physiologiques.....	91
6.2.2.2.1. Teneur relative en eau.....	91
6.2.2.2.2. Teneur en pigments chlorophylliens.....	92
6.2.2.3. Effet du stress salin sur les paramètres biochimiques	93
6.2.2.3.1. Teneur en proline.....	93
6.2.2.3.2. Teneur en sucres solubles.....	95
6.2.3. Interaction entre les paramètres morphologiques et physiologiques..	97
6.2.4. Interaction entre les paramètres physiologiques et biochimiques	98
6.2.5. Interaction entre les paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques	99
6.3. Effet du stress hydrique chez les plantules du pistachier de l'Atlas.....	104
6.3.1. Humidité du sol.....	104

6.3.2. Effet du stress hydrique sur les paramètres morphologiques.....	105
6.3.2.1. Longueur de la tige.....	105
6.3.2.2. Longueur de la racine.....	106
6.3.2.3. Biomasse fraîche et sèche.....	107
6.3.3. Effet du stress hydrique sur les paramètres physiologiques.....	108
6.3.3.1. Teneur relative en eau.....	108
6.3.3.2. Teneur en pigments chlorophylliens.....	109
6.3.4. Effet du stress hydrique sur les paramètres biochimiques.....	110
6.3.4. 1. Teneur en proline.....	110
6.3.4. 2. Teneur en sucres solubles.....	111
6.3.5. Interaction entre les paramètres morphologique et physiologiques ...	112
6.3.6. Interaction entre les paramètres physiologiques et biochimiques	112
6.3.7. Interaction entre les paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques.....	113
6.4. Effet du stress salin sur la croissance des plantules du pistachier vrai .	117
6.4.1. Croissance en Longueur.....	119
6.4.2. Biomasse fraîche et sèche.....	119
6.4.3. Surface foliaire.....	121
6.5. Effet du stress hydrique sur les plantules du pistachier vrai.....	123
6.5.1. Croissance en longueur.....	123
6.5.2. Effet du stress hydrique sur l'accumulation de la proline.....	125
CHAPITRE 7: CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	129
APPENDICES.....	133
REFERANCES.....	163

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1: Zones arides dans le monde	19
Figure 1.2: Etages bioclimatiques en Algérie.....	20
Figure 2.1: Répartition des sols salins au Nord de l'Algérie	27
Figure 3.1: Aire de distribution du <i>Pistacia atlantica</i> dans le monde	34
Figure 3.2: Aire de répartition du <i>Pistacia atlantica</i> en Algérie.....	35
Figure 3.3: Caractéristiques botaniques du pistachier de l'Atlas	37
Figure 3.4: Caractéristiques botaniques du pistachier vrai	42
Figure 3.5: Répartition de la culture du pistachier dans le monde	44
Figure 3.6: Superficies occupées par le pistachier fruitier et production mondiale	44
Figure 3.7: Greffage en écusson du pistachier fruitier	47
Figure 5.1: Localisation des peuplements porte-graines.....	60
Figure 5.2: Semence du pistachier de l'Atlas.....	62
Figure 5.3: Semence du pistachier vrai (variété Achouri)	64
Figure 6.1: Evolution de la germination des graines	74
Figure 6.2: Variation du taux de germination des graines prétraitées	75
Figure 6.3: Cinétique de germination des graines prétraitées.....	76
Figure 6.4 : Variation du temps moyen de germination des graines prétraitées de <i>Pistacia atlantica</i>	77
Figure 6.5: Variation du taux de germination des graines de <i>Pistacia atlantica</i>	80
Figure 6.6: Cinétique de germination des graines de <i>Pistacia atlantica</i>	81
Figure 6.7: Variation du temps moyen de germination des graines	82
Figure 6.8: Plantules de <i>Pistacia atlantica</i> soumises au stress salin.....	84
Figure 6.9: Variation de la longueur de la tige et de la racine des plantules de <i>Pistacia atlantica</i> soumises au stress salin.....	85
Figure 6.10: Variation du rapport de la longueur racines/tige des plantules de <i>Pistacia atlantica</i> soumises au stress salin	87
Figure 6.11 : Variation de la biomasse de la partie aérienne et souterraine des plantules de <i>Pistacia atlantica</i> soumises au stress salin.....	87

Figure 6.12 : Variation de la surface foliaire des plantules de <i>Pistacia atlantica</i> soumises au stress salin	90
Figure 6.13 : Variation de la teneur relative en eau des feuilles des plantules de <i>Pistacia atlantica</i> soumises au stress salin	91
Figure 6.14 : Variation de la teneur en chlorophylle (a), (b) et totale des plantules de <i>Pistacia atlantica</i> soumises au stress salin	92
Figure 6.15 : Variation de la teneur en proline dans les différents organes (feuilles, tiges et racines) des plantules de <i>Pistacia atlantica</i> soumises au stress salin....	94
Figure 6.16 : Variation de la teneur en sucres solubles des plantules de <i>Pistacia atlantica</i> soumises au stress salin	96
Figure 6.17 : Diagramme de composantes dans l'espace après rotation (ACP de tous les paramètres)	100
Figure 6.19: Effet du stress hydrique sur la longueur de la tige des plantules	105
Figure 6.20: Effet du stress hydrique sur la longueur de la racine principale des plantules.....	106
Figure 6.21: Architecture du système racinaire en fonction de l'intensité du stress hydrique	107
Figure 6.22: Variation de la biomasse fraîche et sèche des plantules de <i>Pistacia atlantica</i> soumises au stress hydrique	108
Figure 6.22: Effet du stress hydrique sur la teneur relative en eau des feuilles de plantules.....	109
Figure 6.23: Variation de la teneur en pigments chlorophylliens des plantules de <i>Pistacia atlantica</i> soumises au stress hydrique.....	110
Figure 6.24: Effet du stress hydrique sur la teneur en proline des feuilles de plantules.....	111
Figure 6.25: Effet du stress hydrique sur la teneur en sucres solubles des feuilles de plantules.....	111
Figure 6.26: Diagramme de composantes dans l'espace après rotation (ACP de tous les paramètres)	114
Figure 6.27 : Variation de la longueur de la tige et de la racine des plantules de <i>Pistacia vera</i> soumises au stress salin	118
Figure 6.28 : Variation de la biomasse fraîche (a) et sèche (b) de la partie aérienne et souterraine chez <i>Pistacia vera</i> soumises au stress salin	120

Figure 6.29 : Variation de la surface foliaire chez les plantules de <i>Pistacia vera</i> soumises au stress salin	122
Figure 6.30 : Variation de la longueur de la tige et de la racine chez les plantules de <i>Pistacia vera</i> soumises au stress hydrique	124
Figure 6.31: Variation de la teneur en proline des plantules de <i>Pistacia vera</i> soumises au stress hydrique	126
Tableau 1.1: Classification des régions arides selon l'indice d'aridité	18
Tableau 1.2 : Superficies des zones arides d'Algérie en 10 ³ Km ²	20
Tableau 2.1: Répartition des sols salins dans le monde	25
Tableau 2.2: Mode de classement des sols salins.....	29
Tableau 5.1: Caractéristiques climatiques et bioclimatiques de la région de Ain Oussera (wilaya de Djelfa)	62
Tableau 5.2 : Caractéristiques globales du site de prélèvement des graines	63
Tableau 5.3: Caractéristiques climatiques et bioclimatiques de la région de Tighenif (wilaya de Mascara)	65
Tableau 5.4: Prétraitements testés sur les graines de <i>Pistacia atlantica</i>	66
Tableau 6.1: Croissance en longueur : test de signification de Tukey	85
Tableau 6.2: Biomasse fraîche et sèche : test de signification de Tukey	89
Tableau 6.3: Teneur relative en eau : test de signification de Tukey	92
Tableau 6.4: Teneur en chlorophylle (a),(b) et totale	93
Tableau 6.5: Teneur en proline : test de signification de Tukey	95
Tableau 6.6 : Teneur en sucres solubles : test de signification de Tukey	97
Tableau 6.7 : Matrice de corrélation entre les paramètres morphologiques et physiologiques	98
Tableau 6.8 : Matrice de corrélation entre les paramètres physiologiques et biochimiques	99
Tableau 6.9: Variation de taux d'humidité du sol en fonction de la durée du stress appliquée	105
Tableau 6.10 : Matrice de corrélation entre les paramètres morphologiques et physiologiques	112

Tableau 6.11 : Matrice de corrélation entre les paramètres physiologiques et biochimiques	113
Tableau 6.12: Croissance en longueur	119
Tableau 6.13: Biomasse fraîche et sèche : test de signification de Tukey ...	121
Tableau 6.14: Croissance en longueur	125
Tableau 6.15: Teneur en proline: test de signification de Tukey	126

INTRODUCTION

Les zones arides et semi-arides couvrent une grande partie des pays de la frange méridionale du pourtour méditerranéen. Dans ces régions, la disponibilité des eaux, leur salinité et celle des sols sont parmi les principaux facteurs limitant la productivité végétale [1].

L'Algérie, qui offre toutes les variantes du climat méditerranéen, n'échappe pas à ce phénomène, où la sécheresse, observée depuis longtemps a conduit manifestement au processus de salinisation des sols sur 3,2 millions d'hectares affectés [2]. Ces deux contraintes naturelles : sécheresse et salinité, ont modifié la stabilité des écosystèmes et sont en grande partie les causes de la désertification des sols.

En effet, la dégradation des sols et la sécheresse constituent des obstacles majeurs à la croissance des plantes qui sont souvent sujettes à des facteurs extrêmes de potentiel hydrique, température et salinité, engendrant différents types de stress [3]. Les stress environnementaux, notamment le stress salin et hydrique, limitent sérieusement la croissance des plantes ainsi que la productivité végétale [4].

Certaines plantes ont cependant développé diverses des mécanismes de protection leur permettant de survivre et de croître dans ces conditions environnementales difficiles et réagissent à ces stress par de multiples mécanismes morphologiques, physiologiques et biochimiques [5]. De ce fait, le développement des espèces végétales tolérantes aux stress abiotiques et de haute valeur socio-économique, constitue une des approches pour réhabiliter les sols salins dans les zones arides et semi-arides. Le choix d'une végétation appropriée à ces conditions, constitue la première étape pour résoudre le problème de la sécheresse et de la salinité.

Le genre *Pistacia*, appartenant à la famille des Anacardiaceae et originaire des zones tempérées à tropicales du globe principalement d'Asie et du pourtour

méditerranéen. Ce genre regroupe plusieurs espèces de pistachier intéressantes pour le développement des zones arides et semi-arides.

En Algérie, le genre *Pistacia* est représenté par quatre espèces : le pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.), le pistachier térébinthe (*Pistacia terebinthus* L.), le pistachier lentisque (*Pistacia lentiscus* L.) et le pistachier vrai (*Pistacia vera* L.) [6].

Le pistachier de l'Atlas ou bétoum (*Pistacia atlantica*) et le pistachier vrai (*Pistacia vera*) sont caractérisés du point de vue écologique par une grande tolérance aux variations climatiques. Ils peuvent croître sous des tranches pluviométriques assez faibles et s'accommodent de tous les sols [7]. De ce fait, le pistachier, avec ses deux aspects forestier et fruitier, est l'exemple type d'espèces parfaitement convenables à la valorisation des sols dégradés pour un développement durable en zones arides et semi-arides et revêtent une importance stratégique.

Le pistachier de l'Atlas considéré comme une espèce forestière rustique mérite une attention toute particulière. Il s'agit d'un arbre possédant des intérêts socio-économiques et écologiques [8; 9; 10]. De plus, il peut être utilisé comme porte greffe pour le pistachier fruitier vu sa tolérance à la salinité [11]. Ainsi, sa rusticité le rend particulièrement intéressant quant à son utilisation dans les programmes de reforestation et de sylviculture ; puisqu'il se régénère et se développe dans des sites arides où peu d'espèces d'arbres peuvent s'établir et se développer [12 ; 13].

Le pistachier fruitier fait aussi partie de ces espèces à grand potentiel. Il s'agit d'une espèce fruitière qui constitue la principale culture fruitière pour de nombreux pays méditerranéens et du proche orient.

Compte tenu de l'importance du pistachier de l'Atlas et du pistachier fruitier et des multiples utilisations de ses composantes, les études sur ces espèces ont concernées les aspects botaniques, biogéographiques, taxonomiques, écologiques et dendroécologiques [14; 15 ; 16 ; 17 ; 18 ; 19 ; 20]. La connaissance des potentialités d'adaptation de ces deux espèces aux différents stress abiotiques notamment le stress hydrique, salin et thermique est primordiale et d'un grand intérêt car peu de travaux ont été réalisés pour comprendre le phénomène de la tolérance.

Notre contribution a un double objectif : d'une part l'amélioration de la germination des graines du pistachier de l'Atlas et d'autre part, l'étude des effets du stress salin et hydrique sur la germination et le comportement morphologique et physiologique de pistachier de l'Atlas et pistachier vrai, dans le but d'identifier les mécanismes d'adaptation de celles-ci au stade plantule face à la salinité et à la rareté de l'eau.

Notre travail sera reparti en deux parties:

- La première est consacrée à une synthèse bibliographique détaillée sur les régions arides et semi-arides et les sols salins dans le monde et en Algérie.

Des données générales sur les exigences des espèces étudiées ainsi que leurs intérêts et modes de propagation et sur les stress abiotiques.

- La seconde partie concerne l'étude expérimentale qui rapporte une description détaillée du matériel utilisé et les différentes techniques expérimentales adoptées, relatives à la germination des graines, mesures biométriques, analyses physiologiques et biochimiques.

Une présentation des résultats obtenus, une discussion, une conclusion et les perspectives à entreprendre achèveront ce travail de recherche.

CHAPITRE 1 : REGIONS ARIDES ET SEMI-ARIDES

1.1. Notion d'aridité

L'aridité est l'élément commun à toutes les régions arides qui se différencient entre elles par leur climatologie, leur type de sol, leur végétation et les activités humaines qui s'y déroulent [21].

MAINGUET [22], souligne que l'aridité est un déficit pluviométrique permanent qui est liée à d'autres données climatiques spécifiques telles que : insolation forte, températures élevées, faible humidité de l'air, évapotranspiration accélérée.

Les zones arides sont les régions où les précipitations sont plus faibles que l'évapotranspiration au moins durant une période plus et ce longue de l'année [23].

En effet l'aridité n'est pas due uniquement au climat, mais essentiellement à une action humaine (le déboisement, l'incendie et le pâturage intensif). La dégradation anthropique du tapis végétal entraîne une augmentation des maximums des températures et celle du sol, elle a pour effet de diminuer les capacités de stockage de l'eau. STEWART [24], DAGET [25], POUGET [26], FLORET et PONTANIER [27], soulignent que ce type de dégradation conjugue les effets pour renforcer l'aridité d'origine climatique.

AGGOUSSINE [23], ajoute que l'aridité ne peut être définie uniquement par de faibles précipitations moyennes annuelles, mais aussi par leur irrégularité dans l'espace et dans le temps et par une forte évapotranspiration.

AUBERT [29], a subdivisé les régions arides en zone désertique (hyper aride), zone aride proprement dite et zone sub-aride (semi-aride), en fonction des conditions climatiques, et, partant, des caractères de la végétation, à chacune d'elles correspondent des sols typiques.

En fonction de la pluviométrie annuelle, les régions arides sont classées en trois domaines [30]:

Le domaine hyperaride $P < 100$ mm

Le domaine aride $100 < P < 300$ mm

Le domaine semi-aride $300-400 < P < 600$ mm

DEYGOUT et TREBOUX [31], ont classé les régions arides en fonction de l'indice d'aridité (IA) (Tableau 1.1), qui correspond au rapport entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle dont la formule est la suivante:

$$IA = P/ETP.$$

Tableau 1.1: Classification des régions arides selon l'indice d'aridité. [31].

Zones	Hyper-aride	Aride	Semi-aride	Sub-humide sèche
Indice d'aridité	< 0,03	0,03 à 0,2	0,2 à 0,5	0,5 à 0,75

1.2. Répartition géographique des zones arides et semi-arides

1.2.1. Dans le monde

Les zones arides occupent environ 1/3 de la surface terrestre soit 46 millions de km² englobant 55 % de l'Afrique et plus de 2/3 de l'Australie, qui doivent nourrir près de 700 millions d'habitants [23].

Sur une superficie totale des terres mondiales, la zone hyperaride couvre 4.2%, la zone aride 14.6 % et la zone semi-aride 12.2 %. Au nord du Sahara, celles-ci occupent plus de 600 000 km² dont 34 % en Algérie, 31% en Libye, 19 % au Maroc 11% en Tunisie et 5 % en Egypte [32].

En termes de répartition par continent, les zones sèches se trouvent essentiellement en Afrique et en Asie. Les zones hyper-arides et arides concernent essentiellement un bandeau englobant l'Afrique du Nord, le Moyen-Orient, l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique centrale (figure 1.1).

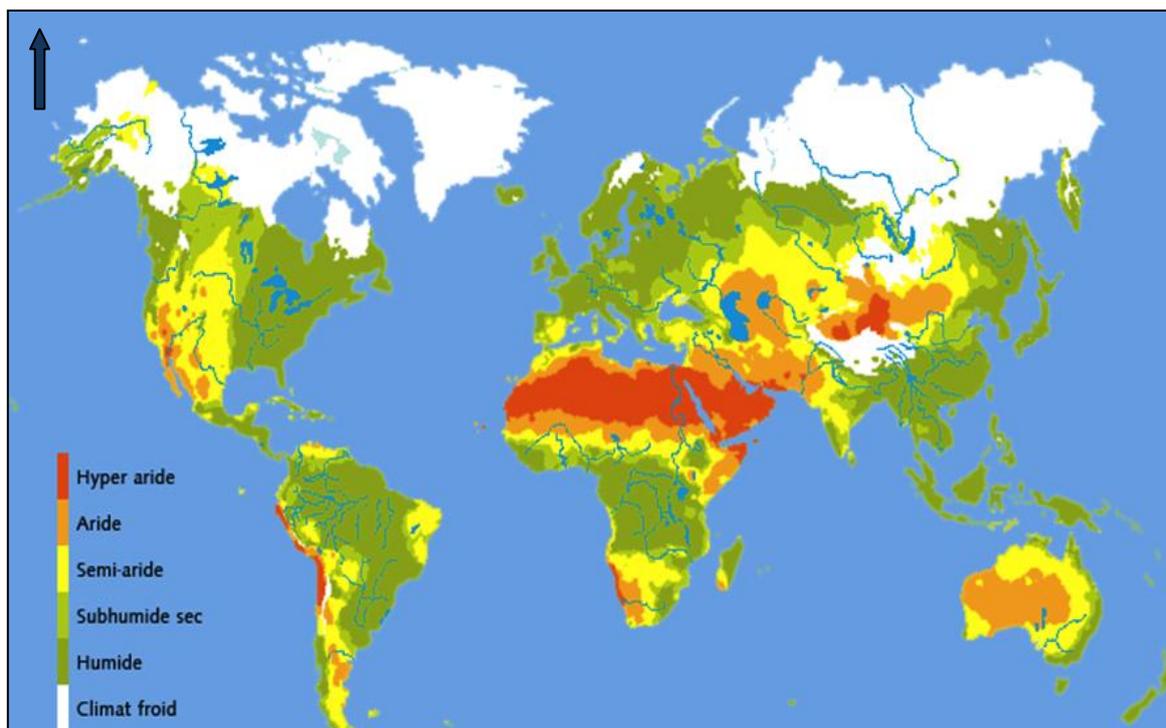


Figure 1.1: Zones arides dans le monde

Source <http://www.suds-en-ligne.ird.fr/desertif/carte.html>

1.2.2. En Algérie

Les étages du bioclimat méditerranéen définis pour l'Algérie sont le saharien, l'aride, le semi-aride, le sub-humide et l'humide (Figure 1.1). Ce zonage bioclimatique est actuellement en cours de révision par les chercheurs qui se penchent sur l'impact des changements climatiques et celui du processus de désertification sur ces limites (NEDJRAOUI et BEDRANI, 2008).

Pour les zones sèches on distingue selon NEDJRAOUI (2003) :

- Le semi- aride : 300- 600 mm.
- L'aride : 300- 100 mm.
- Le Saharien < 100 mm qui occupe 89,5% la superficie totale de l'Algérie.

HALITIM [33], ajoute que la superficie des zones arides couvre près de 95 % du territoire national, dont 80% dans le domaine hyper-aride.

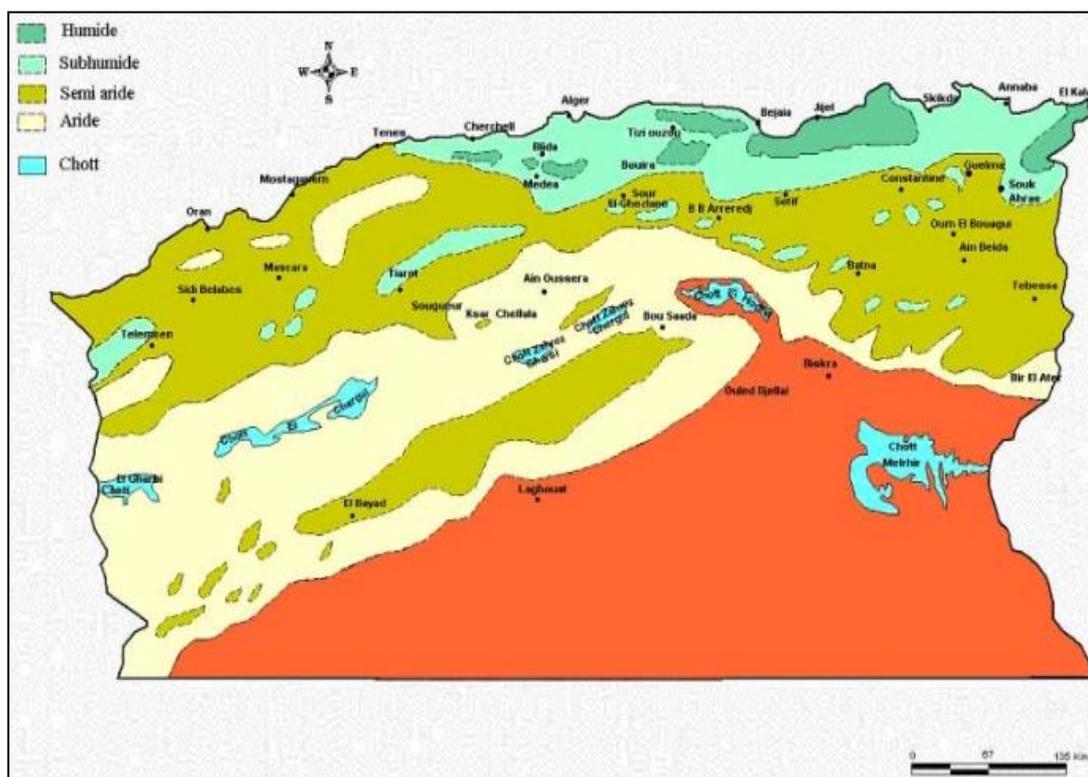


Figure 1.2: Etages bioclimatiques en Algérie (ANAT, 2004)

La superficie des zones arides en Algérie selon LE HOUEROU [32], est de 216000 km², et 386000 km² de zones hyper-arides supérieures (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Superficies des zones arides d'Algérie en 10³ km²

Pluviométrie moyenne	Superficie (10 ³ km ²)
Semi- aride à humide P> 400	181
Aride supérieur 400> P> 300	59
Aride moyenne 300> P> 200	70
Aride inférieur 200> P> 100	87
Zone aride total	216
Hyper aride supérieur	386

1.3. Climat

Les régions sèches se trouvent à toutes les latitudes entre l'équateur et le cercle polaire et même au-delà, on peut penser que les climats secs sont très variés et que la sécheresse n'a pas partout les mêmes causes [34].

La zone aride se caractérise par une chaleur excessive et une précipitation insuffisante et variable; on y trouve cependant des contrastes climatiques. Ceux-ci résultent en général des différences de température, de saison des pluies et de degré d'aridité [35].

Le climat méditerranéen, caractérisé par une période sèche estivale plus ou moins longue selon le degré d'aridité (semi-aride, aride et hyper aride). La période pluvieuse peut être en automne, en hiver ou au printemps et ce, selon la position géographique des stations [36 ; 37]. Les précipitations du climat tropical se produisent en été. Plus on est loin de l'équateur, plus la saison des pluies est courte. Les hivers sont longs et secs. au Soudan, région typique du climat tropical, la saison humide s'étend du mi-juin à la fin de septembre, suivie d'une saison sèche de près de neuf mois [35].

Quant au climat continental, les précipitations sont régulièrement réparties sur toute l'année, bien qu'il y ait une tendance à plus de pluies en été [35].

Dans les zones arides, la température se caractérise par d'importantes fluctuations journalières avec une humidité faible et affecte la croissance des plantes. L'évapotranspiration est augmentée par le vent, qui peut aussi provoquer une érosion du sol [35].

1.4. Sol

Les sols en régions arides présentent en général, un certain nombre de caractères constants : évolution lente, faible teneur en matière organique, structure faiblement définie et en général par la présence des croûtes calcaires, gypseuses et d'autres salines [29].

Selon le même auteur, les aspects importants de la formation des sols dans un climat aride sont les suivants:

- des changements journaliers importants de température, qui provoquent la désintégration mécanique ou physique des roches;
- les sables transportés par le vent qui abrasent les surfaces exposées des roches.

En fonction du niveau de sels, HALITIM [38], distingue les types des sols suivants :

- Les sols sans accumulation de sels.
- Les sols calcaires.
- Les sols gypseux.
- Les sols calcaires et gypseux.
- Les sols salés.

Les sols salins, calcaires et gypseux diffèrent surtout par leur texture, leur morphologie, le mode d'évolution pédogénique et par le niveau et le mode de salinisation. Leurs extension spatiale est très variable. Ces derniers se répartissent dans les zones arides de manière séquentielle et s'interpénètrent souvent. Ils jouent un rôle essentiel dans la genèse, le fonctionnement et le comportement des sols de ces régions [38].

1.5. Végétation

En général, la végétation des zones arides se compose de plantes annuelles éphémères (dont la croissance se limite à la courte période humide), de pérennes succulentes (pouvant stocker de l'eau pour l'utiliser en période de sécheresse) et de pérennes non succulentes qui constituent la majorité des végétaux capables de supporter le stress de l'environnement aride [35].

La végétation des zones arides se divise en végétation désertique (moins de 100 millimètres de précipitations annuelles), semi-désertique (de 100 à 300 millimètres de précipitations annuelles), savane boisée à faibles précipitations (300 à 600 millimètres) et broussaille persistante (plus de 500 millimètres) [35].

En zone aride, les formations végétales, particulièrement très fragiles, correspondent à des paysages de steppe qui se caractérise par l'importance des

espèces vivaces, ligneuses ou graminées et le développement très variable des espèces annuelles liées aux pluies ou à des paysages plus complexes allant de la pelouse à des paysages de type forestier [32].

Cependant, le couvert végétal dans les régions arides et semi-arides ne cesse de se dégrader à cause des contraintes naturelles dont les plus marquantes sont la sécheresse et la salinisation des sols et aux pressions anthropiques [39].

CHAPITRE 2 : SOLS SALINS

2.1. Généralités

Les sols salins ou halomorphes sont caractérisés par leur teneur élevée en sels solubles dans l'ensemble ou dans une partie du profil ou par la richesse de leur complexe absorbant en ions provenant de ces sels. Ces ions sont susceptibles de dégrader leurs caractéristiques et propriétés physiques, en particulier leur structure, qu'ils rendent diffuse. Certains sols salins n'ont que l'un de ces caractères, d'autres présentent les deux à la fois [40].

Le terme sols salsodiques proposé par SERVANT [41], est souvent préféré car il rend compte les deux principales manifestations de la salinité.

On parle en général de sol salin lorsque la concentration en sels des solutions dépasse 0.5 g/l. Cette concentration est le plus souvent mesurée par la conductivité électrique (CE) de la solution du sol saturée exprimée en mmhos/cm ou actuellement en décisiemens en S/m [23].

La liste des sels en cause varie selon le cas de salinité, le plus fréquent en régions arides et semi-aride sont les sulfates et les chlorures de sodium, les sulfates de magnésium et à un moindre degré les carbonates de sodium [42 ; 38].

Le sodium en excès dans le complexe absorbant du sol, peut dégrader la structure. Ces sols à structure diffuse sont souvent dénommés sols alcalins ou sodiques [40].

2.2. Répartition des sols salins

2.2.1. Dans le monde

Les estimations de la superficie totale représentée par les sols salsodiques dans le monde sont très variables selon les données des auteurs. SZABLOCS [43], mentionne que la superficie atteint 954832 millions d'hectares. Selon le même auteur la répartition des zones salsodiques est la suivante (tableau 2.1):

Tableau 2.1: Répartition des sols salins dans le monde [43].

Sols affectés par les sels des continents et sous continents (10^3 hectares)	
* Amérique du Nord	15755
* Mexique et Amérique centrale	1965
* Amérique du Sud	129163
* Afrique	80608
* Asie du Sud	87608
* Asie du Nord et du centre	211686
* Asie du Sud/Est	19983
* Australie	357330
* Europe	50804
Total	954832

A travers le monde, plus de 27 % des terres irriguées sont confrontées au phénomène de salinité [45]. Au Maghreb et au Moyen-Orient, 15 millions d'hectares de terres agricoles sont sujettes à une salinisation croissante [46]. La salinisation des sols, dans ces régions, est non seulement liée aux conditions climatiques mais également au recours souvent mal contrôlé de l'irrigation. Le fort ensoleillement et la faible pluviométrie font accumuler les sels dissous en surface [47].

La salinité se prolonge dans la méditerranée à environ 16 millions d'hectares dont 3,2 millions se trouve en Algérie [45].

2.2.2. En Algérie

En Algérie, il n'est recensé aucune étude cartographique fiable et précise permettent de délimiter les zones touchées par la salinité des terres et la quantification de la teneur des sels dans le sol [48].

Selon LE HOUEROU [49], en Algérie les sols salins occupent de vastes superficies de 3.2 millions d'hectares de la superficie totale. Ils sont localisés au Nord et au Sud. Les isohyètes 450 mm semblent être la limite supérieure des sols fortement sodiques [50].

Plusieurs types de sols salins sont rencontrés en Algérie. Ils sont localisés surtout dans les étages bioclimatiques arides et semi- arides [35].

Les études menées par l'institut national des sols, de l' irrigation et du drainage (INSID) montrent que les sols salins sont observés dans les plaines et vallées de l'Ouest du pays (Mina, Cheliff, Habra Sig, Maghnia) dans les hautes plaines de l'Est (Constantine, Sétif, Bordj Bou Areridj, Oum El Bouagui), aux abords des chotts et de Sbkhas) chott Ech Chergui, chott Gharbi, chott Hodna, chott Melghir, Sebkhha d'Oran, Benzaine, Zemmoul, Zazhrez Gharbi et Chergui) et dans le grand Sud (dans les oasis et le long des oueds) (figure 2.1)

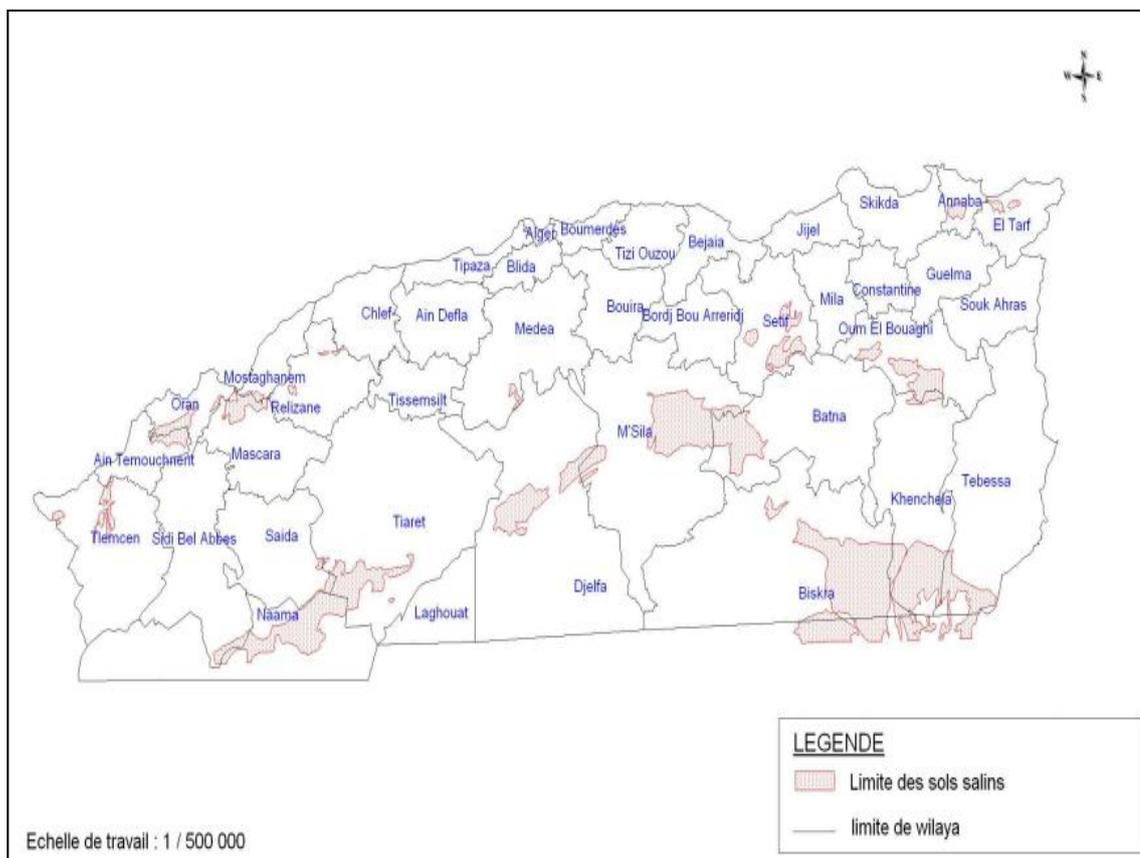


Figure 2.1: Répartition des sols salins au Nord de l'Algérie [48].

2.3. Formation des sols salins

La formation d'un sol salin résulte généralement de l'accumulation de sels dans les horizons de surface [51]. Ce processus dépend essentiellement du régime hydrique du sol et des sources de sel.

DUCHAUFOR [52] a noté que les deux conditions nécessaires à la formation des sols salsodiques sont:

- 1- Climatique : les sols sal-sodiques ne pouvant se rencontrer que dans des régions steppiques, semi-désertiques ou tropicales sèches.
- 2- Une condition de station, concernant la présence obligatoire d'une source de sodium (présence de sels ou matériau riche en sodium).

Selon le même auteur, il existe des sols sal-sodiques en zone côtière et sous climat humide. Dans ce cas la source de sodium est une nappe salée, peu profonde, d'origine marine.

2.4. Origine de la salinité des sols

Plusieurs causes sont à l'origine de la salinisation des sols. Elles sont soit naturelles dues à l'altération des roches contenant des minéraux sodiques, potassiques et magnésiques soit artificielles résultant de l'activité humaine.

Selon plusieurs auteurs, on peut distinguer deux types de salinisation :

2.4.1. Salinisation primaire

Près de 80% des terres salinisées ont une origine naturelle. On parle alors de la salinisation « primaire » [53]. Celle-ci est due essentiellement à l'altération des roches contenant des minéraux sodiques potassiques et magnésiques ou à des apports naturels externes dans les régions côtières, inondation périodique par de l'eau de mauvaise qualité ou une remontée d'une nappe phréatique salée.

D'après SZABLOCS [43] et ROBERT [23], la superficie totale concernée par la salinisation naturelle est proche de mille millions d'hectares soit près de 5 % de la surface du globe terrestre.

La salinisation enregistrée dans les écosystèmes aride et semi-aride résulte de la forte évaporation d'eau à partir du sol [54] et d'une irrégulière et insuffisante pluviométrie [55].

2.4.2. Salinisation secondaire

Près de 20 % des terres salinisées ont une origine « anthropique ». On parle dans ce cas-là de la salinisation « secondaire » induite par l'activité humaine, liée aux pratiques agricoles et en particulier à l'irrigation [53].

Chaque année, 10 millions d'hectares de terres cultivées sont abandonnées en raison de l'accumulation de sels par l'irrigation [43].

En effet, HAMDY et *al.*, [45] ont constaté que les terres irriguées affectées par la salinité correspondent à 27% de la surface irriguée dans le monde. Plus de la moitié des terres irriguées du monde sont salines ou sujettes à l'engorgement.

Les régions arides du monde ont considérablement développé l'irrigation de façon à pouvoir répondre aux besoins d'une population croissante. En conséquence, le pourcentage des terres arables irriguées a considérablement augmenté: au Pakistan, plus de 25% des surfaces irriguées sont salinisées, en Tunisie 25%, aux USA 23 %, en Inde près de 17 %, en Chine près de 15% et en Afrique de Sud près de 9% [53].

En Algérie, près de 10-15 % de terres sont irriguées et donc concernées par ces problèmes. Bien que le problème d'alcalinisation, selon DAOUD et HALITIM [56] ne se pose plus, on estime que les terres salinisées seront difficilement récupérables.

2.5. Caractéristiques des sols salins

2.5.1. Salinité globale

La salinité d'un sol se mesure par la conductivité électrique (CE) d'un extrait de pâte saturée. Elle exprime la teneur en sels solubles (salinité globale) à une température de 25°C. Les travaux de laboratoire entrepris montrent qu'un sol est considéré salin, lorsque la conductivité électrique est supérieure à 4 mmhos/cm à 25°C [57].

En se basant sur la conductivité électrique, LAMOND [58] a classé les sols salins en cinq groupes (Tableau 2.2).

Tableau 2.2: Mode de classement des sols salins [58].

Non salins	Légèrement salin	Modérément salin	Fortement salin	Très fortement salin
0-4 dS/m	4-8 dS/m	8-16dS/m	16-32 dS/m	≥ 32 dS/m

2.5.2. Proportion de sodium échangeable (E.S.P)

Il s'agit du pourcentage de sodium échangeable sur le complexe d'échange est exprimé selon la formule suivante [59].

$$\text{ESP} = (\text{Na échangeable} \times 100) / \text{CEC}$$

Un sol est qualifié de sodique si son ESP est supérieur à 15 % [57]. La limite de classe pour le taux de sodium échangeable est donnée comme suit [60]:

- ESP <5% alcalinité légère
- 5% <ESP <20 % alcalinité modérée
- 20 %< ESP < 45 % alcalinité grave
- ESP ≥45 % alcalinité très grave.

2.5.3. pH

Le pH est un indicateur de la réaction du sol. Les sols salins présentent des pH basiques (> 7) car les hydroxydes sont plus prépondérants que les hydrogènes.

Certains auteurs ont établi que l'accroissement du pH reflète la saturation du Na⁺ sur le complexe d'échange et l'état de la saturation du sol [40 ; 61].

Un pH compris entre 8 et 9 est retenu, généralement comme limite de la dégradation de la structure [40].

- La valeur de 9 est atteinte lorsque Na⁺ représente 30 % de la CEC et le pH 10 correspond à une ESP > 15 % [40].

- Le pH peut dépasser 10 ; après précipitation du carbonate de calcium, les ségrégations salines sont fortement sodiques et renferment des sels alcalins (NaHCO₃, Na₂CO₃, Na₂SO₄) [41].

2.6. Effet de la salinité sur le sol et la végétation

L'excès de sels solubles ou de sodium échangeable dans un sol modifie ses propriétés physico-chimiques. Cette modification des conditions édaphiques constitue souvent un stress pour la croissance des plantes.

Une grande quantité de sels solubles peut affecter les propriétés pédologiques, notamment la dispersion des colloïdes, la stabilité structurale et la chute de la perméabilité hydraulique [41 ; 40 ; 56].

Selon FORGES [62], la salinité constitue une gêne majeure au développement de la production végétale et même, mener à la stérilité des sols.

La richesse en sels solubles ou les mauvaises qualités physiques des sols salsodiques conduisent à une spécialisation de la végétation, et même à sa disparition totale lorsque, dans la solution du sol, la pression osmotique créée par les sels ou la toxicité spécifique de certains ions devient trop élevée comme le bore et surtout l'ion chlore [64; 65 ; 66].

CHAPITRE 3 : GENERALITES SUR LES ESPECES ETUDIEES

Le genre *Pistacia*, défini pour la première fois par Linnée en 1737, appartient à la famille des Anacardiacees qui comprend 4 sections et 11 espèces ayant en quasi-totalité une aire de distribution tropicale ou subtropicale [67]. Certains botanistes considèrent que *Pistacia* est un genre particulier des Anacardiacees et qui pouvant constituer une famille à part [68].

En Algérie, le genre *Pistacia* est représenté par quatre espèces : le pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.), le pistachier térébinthe (*Pistacia terebinthus*), le pistachier lentisque (*Pistacia lentiscus*) [6] et le pistachier vrai (*Pistacia vera*). Le pistachier de l'Atlas ou bétoum (*Pistacia atlantica*) et le pistachier vrai (*Pistacia vera*) sont caractérisés du point de vue écologique par une grande tolérance aux variations climatiques, ils peuvent croître sous des tranches pluviométriques assez faibles et s'accommodent de tous les sols [7].

3.1. Pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.)

Le pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) appelé "Bétoum" en arabe et "Iggh" en berbère a été décrit la première fois par Desfontaines en 1798. Cette espèce a fait dans le passé l'objet d'une confusion assez fréquente. Les botanistes semblent en avoir mal distingué l'originalité de l'espèce et l'appelaient "térébinthe". Par la suite BATTANDIER et TRABUT [69], ont bien séparé *Pistacia terebinthus* de *Pistacia atlantica*. Le pistachier de l'Atlas est une espèce forestière endémique de l'Afrique du Nord [70 ; 71 ; 72]. Cette espèce est commune aux deux régions méditerranéenne et irano-touranienne [67 ; 17].

3.1.1. Classification botanique

Selon EMBERGER [72] et DEYSSON [73], *Pistacia atlantica* présente la taxonomie suivante :

Embranchement : Spermaphytes

Sous embranchement : Angiospermes

Classe : Dicotylédones

Ordre : Térébinthales

Famille : Anacardiaceae

Genre : *Pistacia*

Espèce : *Pistacia atlantica* Desf.

Selon ZOHARY [67], *Pistacia atlantica* appartient à la section *Butmella* qui est subdivisée en 4 sous espèces: *cadulica*, *mutica*, *kurdica* et enfin *atlantica*. Cette dernière est la seule présente en Algérie [70].

3.1.2. Aire de répartition

3.1.2.1. Dans le monde

Le pistachier de l'Atlas est originaire des régions forestières subtropicales de l'ancienne zone méditerranéenne [74]. Il est essentiellement présent au Maghreb, mais aussi en Cyrénaïque (Libye à Benghazi), à Chypre, au Proche-Orient et aux Canaries [17] (Figure 3.1).

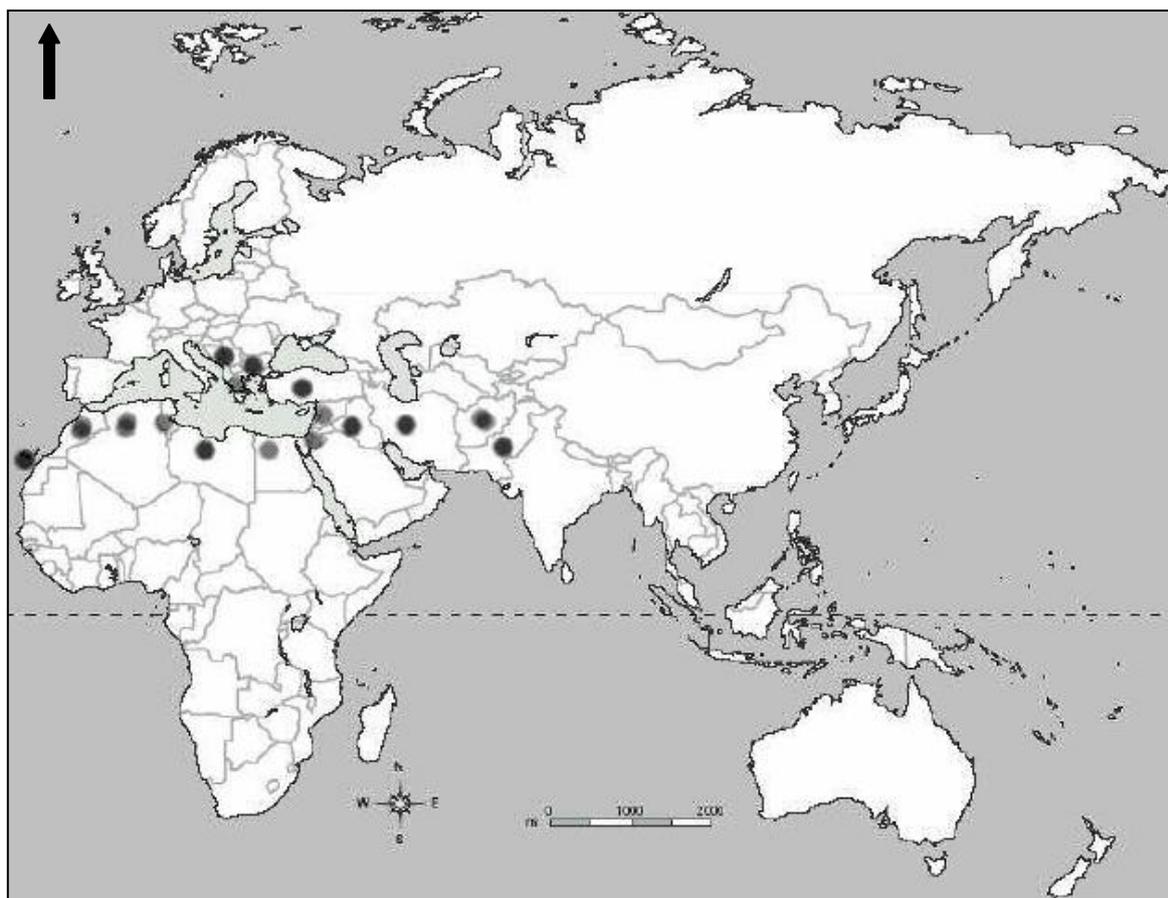


Figure 3.1: Aire de distribution du *Pistacia atlantica* dans le monde[75]

3.1.2.2. En Algérie

Le pistachier de l'Atlas possède une grande amplitude écologique, il se rencontre depuis le cœur du Sahara jusqu'aux marges du bioclimat humide [12].

KADI-BENNANE [76],, signale des peuplements à l'état relique à l'extrême Ouest, du côté de Bechar, à 60 km au Sud de Béni-Ounif et des peuplements plus importants dans la région d'Oum Chergui.

Dans le secteur algérois, l'essence fait preuve de régression notamment entre Bouira et Mechdellah, ainsi que dans les gorges de Kherrata au Sud-Ouest de Béjaïa [77].

A l'Est, l'espèce est retrouvée dans les montagnes des Aurès où elle est présente de manière très dispersée. Son aire s'étend jusqu'au Sud de Batna vers l'Est et le centre Ouest de la Tunisie [78].

La limite extrême de l'espèce se trouve en plein cœur du Hoggar où il existe à l'état de relique [70] (figure 3.2).

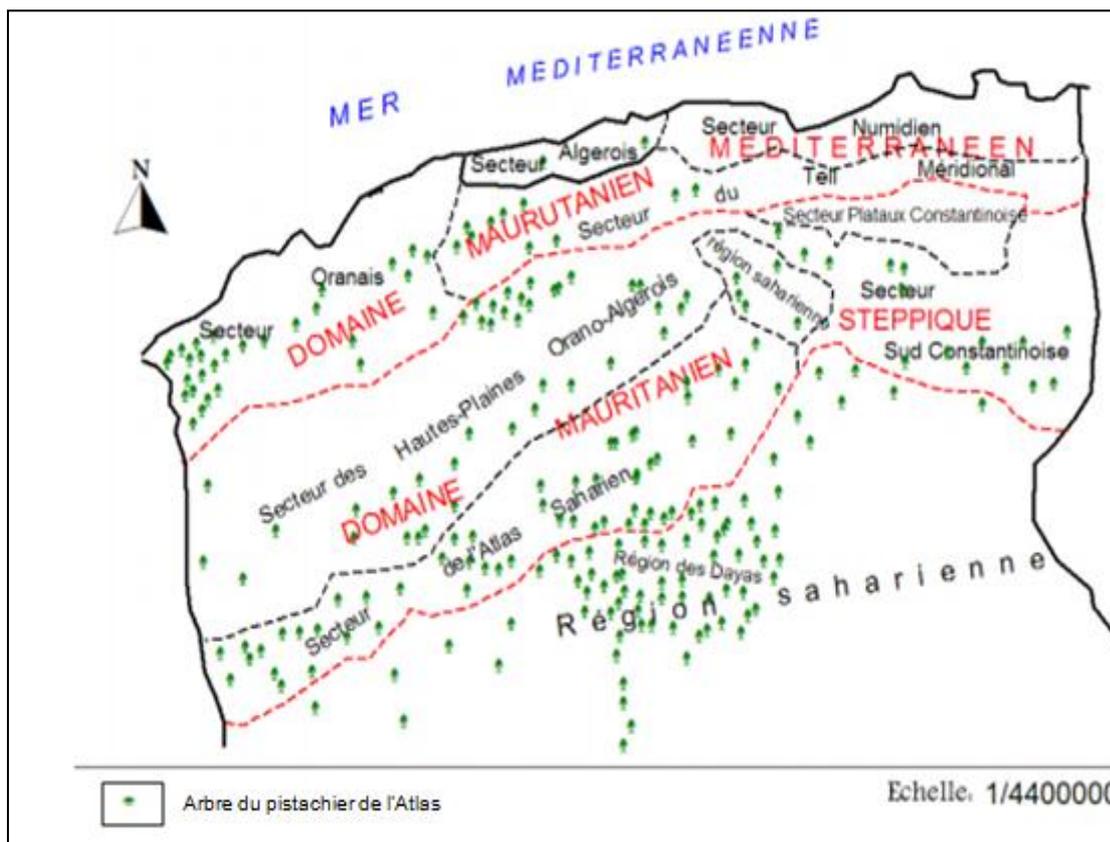


Figure 3.2: Aire de répartition du *Pistacia atlantica* en Algérie (MONJAUZE, [12] modifiée par MANSOUR, [79]).

3.1.3. Caractéristiques botaniques

Le pistachier de l'Atlas est une espèce dioïque, ligneuse et spontanée. C'est un arbre à croissance lente, pouvant atteindre 15 à 20 m de haut [14]. Il possède une cime très étalée et un tronc dont la base peut atteindre 2 à 3 mètres de circonférence (figure 3.3). Sa longévité est importante, dépassant souvent 300 ans [12]. Le port de l'arbre est arrondi à ramification étalée [9].

L'écorce est lisse à l'âge jeune et squameux à un âge très avancé. A partir de cette dernière, on extrait de la résine et du tanin. L'écorce est d'abord rouge puis grisâtre assez claire avant de devenir dure, crevassée et noirâtre [70].

Les feuilles du Pistachier de l'Atlas sont marcescentes, composées, alternées et pennées. Les folioles impaires sont au nombre de 7 à 9 de 2 à 5 cm de longueur sur 1cm de largeur, elles sont de couleur verte pâle [80]. Elles sont lancéolées et rétrécies à la base [81].

Les fleurs sont apétales, rougeâtres, groupées en grappes lâches, terminales pour les mâles et axillaires pour les femelles [70 ; 16]. La pollinisation de l'arbre est anémophile [75 ; 82].

Le fruit est appelé "EL Khodiri" par les populations locales en raison de la prédominance de la couleur verte foncée à la maturité. Il est ovale et quelque fois trapu. Il atteint sa maturation en septembre [70]. Le fruit est une drupe ovoïde, de couleur rougeâtre mesurant entre 6 à 8 mm de largeur, monosperme à endocarpe osseux et mésocarpe sec plus au moins plissé [83].

Le système racinaire du pistachier de l'Atlas est très vigoureux, pouvant atteindre 6 mètres de profondeur [84]. Il présente un type d'architecture bien hiérarchisé comportant un épais pivot vertical, orthogéotrope à croissance rapide et indéfinie et de fines racines latérales plagiotropes à croissance lente. Avec l'âge, ce pivot disparaît et laisse les racines secondaires s'organiser selon la texture du sol [85].



Arbre du pistachier de l'Atlas



Feuille composée



Grappe de fleurs mâles



Lot de fruits

Figure 3.3: Caractéristiques botaniques du pistachier de l'Atlas.

3.1.4. Caractéristiques écologiques

Le pistachier de l'Atlas est un arbre héliophile, de l'étage aride et accessoirement de l'étage semi-aride. Cela n'exclut pas de trouver quelques spécimens éparpillés dans l'étage sub-humide et humide à hiver froid et doux [86]. Il possède une amplitude écologique et une plasticité remarquable. Il se rencontre depuis le cœur du Sahara jusqu'aux marges du bioclimat humide, sur la chaîne du Rif [17]. Il s'agit d'une espèce héliophile et xérophytique qui constitue l'essentiel des formations steppiques, des savanes, des parcs forestiers et pénètre dans les environnements semi-désertiques [87].

3.1.4.1. Conditions climatiques

Le pistachier de l'Atlas a une grande amplitude thermique, il résiste aux températures très basses de l'ordre de $-12\pm 1^{\circ}\text{C}$ (Djelfa) jusqu'aux températures très élevées de plus de $49\pm 1^{\circ}\text{C}$ [88].

Il tolère les conditions les plus dures des zones arides et semi-arides notamment la sécheresse. Il se développe sous une tranche pluviométrique allant de 250 à 600 mm [70]. Cependant, sa présence dans le mont du Hoggar où les précipitations n'atteignent guère les 100 mm par an témoigne encore une fois de la plasticité exceptionnelle de cette espèce.

3.1.4.1. Conditions édaphiques

Le pistachier de l'Atlas est indifférent au type du sol [89]. Cependant, il préfère des sols argileux et argilo-limoneux [90], mais aussi les alluvions des plaines [90 ; 74]. Dans les régions montagneuses, le bétoum occupe des sols peu profonds de type rancker ou randzine [75]. Dans l'Atlas Saharien, le pistachier de l'Atlas est localisé sur les grès où les graines trouvent un milieu favorable pour germer et croître dans les fissures [91].

3.1.5. Intérêts de l'espèce

Le pistachier de l'Atlas possède des intérêts socio-économiques et écologiques [8]. Chaque partie de l'arbre; feuilles, fruits, bois et racines a des usages multiples par la population autochtone [9 ; 10].

3.2.5.1. Intérêt écologique

Le pistachier de l'Atlas occupe généralement les sols peu profonds grâce à son système racinaire puissant qui peut aller jusqu'à 5 à 6 mètres de profondeur. Il contribue favorablement à la lutte contre l'érosion et la désertification qui menace les régions arides et semi-arides [92]. L'aire de distribution de *Pistacia atlantica* correspond avec l'aire du barrage vert [93]. Son utilisation permet d'assurer un bon équilibre écologique [94].

3.1.5.2. Intérêt socio-économique

Les populations locales utilisent les semences du bétoum à des fins culinaires et médicinales [95]. Le même auteur ajoute que le fruit est riche en huile comestible. Les graines sont séchées, écrasées ou moulues et ramassées avec de l'eau sucrée et consommées en boulettes ou bien séchées et croquées telles quelles comme des cacahuètes. L'écorce produit une résine mastic qui exsude naturellement de façon abondante par temps chaud. Les populations locales s'en servent pour usage médical [70]. L'arbre fournit un bois d'artisanat et de feu, il donne un bon charbon. C'est un bois lourd et de bonne conservation [83].

Les différents organes de cette plante (feuilles, fleurs, gomme, fruits, racines et huile) possèdent des vertus thérapeutiques. Parmi les préparations couramment utilisées infusion, poudre et décoction pour traiter les maux d'estomac, les problèmes gastriques, soin des dents, helminthiases et leishmaniose [9 ; 10].

Sur le plan agro-économique, le pistachier de l'Atlas est utilisé comme porte-greffe du *Pistacia vera* [70]. Il est considéré comme le plus résistant à l'asphyxie racinaire par rapport aux autres espèces du genre *Pistacia* [96]. Il résiste aux attaques de nématodes contrairement au pistachier vrai [88].

Le pistachier de l'Atlas constitue un apport en fourrages considérable pour l'alimentation du bétail, surtout en automne. Les feuilles constituent un excellent fourrage pour les ruminants [92].

3.1.6. Multiplication du pistachier de l'Atlas

La germination des semences de *Pistacia atlantica* est difficile et capricieuse. Cette difficulté est due à plusieurs facteurs qui sont liés, soit à la semence elle-même, soit aux conditions de récolte et de conservation des graines[93].

La maturité de la semence joue un rôle important, car une immaturité à la récolte se traduit généralement par une faculté germinative faible et surtout par une inaptitude à la conservation [97]. D'après MONJAUZE [70], la semence du pistachier de l'Atlas est très huileuse pour être conservée plus d'un printemps, mais conservée en chambre froide, elle peut rester quelques années. Cependant, KHELIL et KHELLAL [93], affirment que les graines du pistachier de l'Atlas perdent leur faculté

germinative très rapidement après quelques mois de conservation au frais. D'après MORSLI [98], la reproduction sexuée du pistachier de l'Atlas aboutit le plus souvent à la production de fruits parthénocarpiques. Ce phénomène se traduit sur le terrain par une diminution de semences fertiles.

Les graines des feuillus présentent souvent des phénomènes de dormance, qui s'opposent à leur germination. C'est le cas de la graine du pistachier, qui est affectée d'une dormance embryonnaire associée à une légère inhibition tégumentaire [99]. Les mécanismes de la dormance et de son élimination ont donné lieu à un certain nombre de recherches, faisant intervenir soit des facteurs physiques soit des facteurs chimiques [100]. Selon MAZLIAK [101], le froid est un facteur important pour la levée de la dormance. Cela a été déjà signalé par MONJAUZE [12], où il note que les graines du bétoum exigent une stratification, et elles ne doivent être semées qu'après passage à une température moyenne ayant atteint au moins 12°C. Il ajoute aussi que le pourcentage de la germination est globalement au maximum après 30 jours de la stratification, mais la vitesse de germination augmente graduellement avec la durée du traitement au froid appliqué.

GASPAR [102], affirme qu'une bonne germination a été observée chez les graines du pistachier traitées avec 50 ppm de l'AG₃ et stratifiées pendant 36 jours. Selon BROUSSE [88], les coques des graines de *P. atlantica* gênent la germination et doivent être enlevées avant le semis. Le pourcentage ne dépasse pas 50% lorsque les graines en coque sont trempées pendant une journée dans de l'eau courante à 10°-15°C. Le même auteur ajoute que le mésocarpe doit être éliminé, car il est considéré comme un inhibiteur de germination.

Dans la nature le pistachier de l'Atlas ne régénère que par graine à l'ombre de *Zizyphus lotus*, dont il est l'hôte classique [70].

3.2. Pistachier vrai (*Pistacia vera* L.)

Le pistachier vrai (*Pistacia vera*) est un arbre fruitier rustique qui appartient à la famille des Anacardiaceae. Il présente des qualités écologiques, agronomiques et commerciales.

3.2.1. Classification botanique

Selon QUEZEL et SANTA [15], la classification botanique de *Pistacia vera* est la suivante:

Embranchement : Spermaphytes
 Sous embranchement : Angiospermes
 Classe : Dicotylédones
 Ordre : Spinales
 Famille : Anacardiaceae
 Genre : *Pistacia*
 Espèce : *Pistacia vera* L.

3.2.2. Caractéristiques botaniques

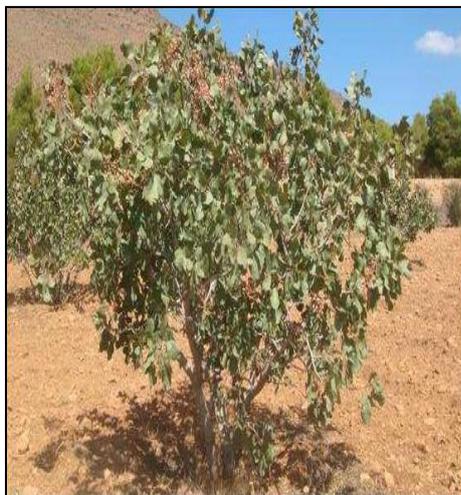
Le pistachier vrai est un arbre à feuilles caduques à port arrondi d'une taille moyenne de 6 m et qui peut atteindre 10 m dans sa région d'origine. Le tronc strié, grisâtre et court, l'écorce des branches est blanchâtre [103].

Le Pistachier vrai est une espèce dioïque. Le port du pied mâle est plus érigé que celui du pied femelle ; ce dernier a parfois un port retombant et on peut le confondre avec le figuier en dormance.

Les feuilles pennées, alternes, coriaces, composées de 3 à 5 folioles pointues avec un court pétiole rougeâtre peuvent dépasser 4 cm de largeur et sont parcourues par des nervures ramifiées saillantes au niveau de la face inférieure [104].

Les fleurs sont unisexuées et groupées en inflorescence. Cette espèce étant dioïque, les inflorescences mâles et femelles sont portées par des pieds distincts. L'inflorescence mâle est une grappe composée constituée de 450 à 500 fleurs. L'inflorescence femelle se compose de 190 à 260 fleurs [103].

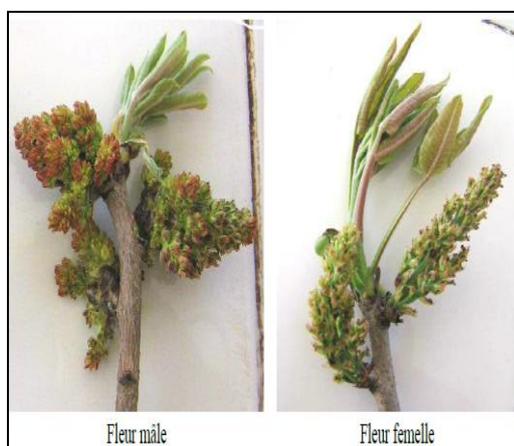
Le fruit ou pistache est une drupe sèche de la grosseur d'une belle olive, elle est monosperme, ovoïde généralement déhiscente. Elle mûrit en septembre [103] (figure 3.4).



Arbre du Pistachier vrai



Feuilles composées



Inflorescences [103]



Fruits (pistaches)

Figure 3.4: Caractéristiques botaniques du pistachier vrai.

3.2.3. Caractéristiques climatiques et édaphiques

L'une des principales caractéristiques du pistachier vrai est sa très grande résistance à la sécheresse [105 ; 106]. C'est un arbre adapté au climat des zones arides et semi-arides. Cependant, la production reste étroitement liée à la quantité d'eau disponible. Au niveau des principales zones de culture où le pistachier est

cultivé en sec, les pluviométries annuelles sont de 350 mm à Alep (Syrie) et de 420 mm à Gaziantep (Turquie) [107].

Le pistachier vrai semble également pousser sous une pluviométrie de moins de 127 mm au Sud et à l'Est de l'Iran [106] et de 200 mm à Sfax, au sud Tunisien [107]. En général des cultures très rentables ne sont pas à espérer en dessous de 400 mm de précipitations si des irrigations ne sont pas mises en place sauf en cas des sols légers et de forte hygrométrie [107]. KHELIL et KELLAL [93], ont eux retenu les isohyètes 200 et 500 mm pour délimiter les zones à vocation pistachier en Algérie.

Le pistachier vrai est une espèce assez rustique et résiste bien aux rigueurs du froid, supportant des températures de -17°C [106] à -30°C [105].

Pour produire convenablement, le pistachier a besoin d'une certaine quantité de froid. Les doses de froid reçues, en condition naturelles, se situent autour de 500 heures de température inférieures à 7.2°C pour les variétés femelles et 450°C pour les géotypes mâles appartenant à l'espèce *Pistacia vera* [108].

Bien que le pistachier se trouve planté sur une large gamme de sols, cette espèce préfère les sols argilo-sableux relativement profond et bien drainés [109]. Il faut également noter que le pistachier tolère des conditions de salinité [110] et peut ainsi valoriser de larges zones des régions arides et semi-arides où le problème de salinité se pose avec acuité.

3.2.4. Importance économique

3.2.4.1. Dans le monde

Le pistachier est très cultivé dans les pays du pourtour méditerranéen. Au Sud de l'Asie (Iran, Turquie, Syrie), il occupe la première place dans la culture des arbres fruitiers. Il pousse notamment en Afrique du nord (Tunisie, Maroc), en Italie et en Grèce. L'Iran est le premier producteur mondial de pistaches. Au xix^{e} siècle, le pistachier a été introduit au continent américain, notamment vers la Californie qui occupe actuellement la deuxième place en terme de production de pistaches (figure 3.5).

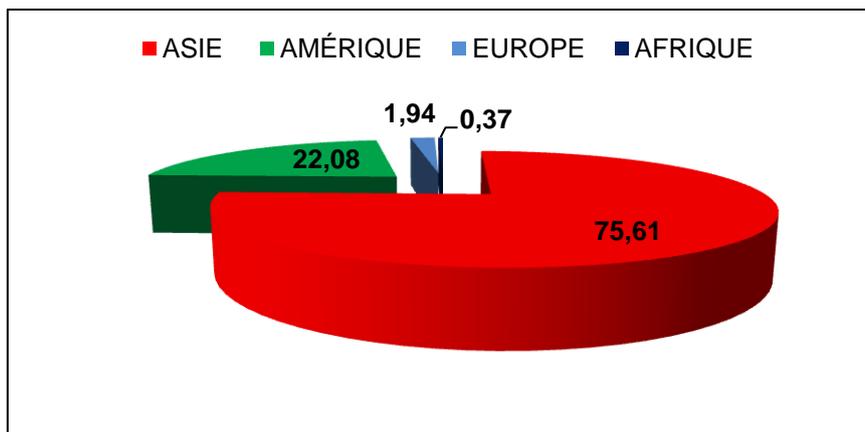


Figure 3.5: Répartition de la culture du pistachier dans le monde [111].

En 2011, la superficie totale occupée par le pistachier était 478 milles d'hectares répartis à travers le monde et 75.61 % de celles-ci sont localisées en Asie. L'Iran seul avait près de 258 milles d'hectares. De ce fait, plus de la moitié de la superficie (54%) est localisée en Iran. La production mondiale du pistaches est d'environ 938213 de tonnes en 2011[111]. Deux tiers de cette production provient de l'Asie, le reste est réparti entre l'Amérique et l'Europe. En Afrique, la production des pistaches est très réduite. L'Iran est le premier producteur mondial dont la majorité de sa récolte est destinée au séchage, marché sur lequel ce pays a le quasi-monopole. Il est suivi par les Etats unis, la Turquie, la Chine, la Syrie et enfin l'Italie (Figure 3.6).

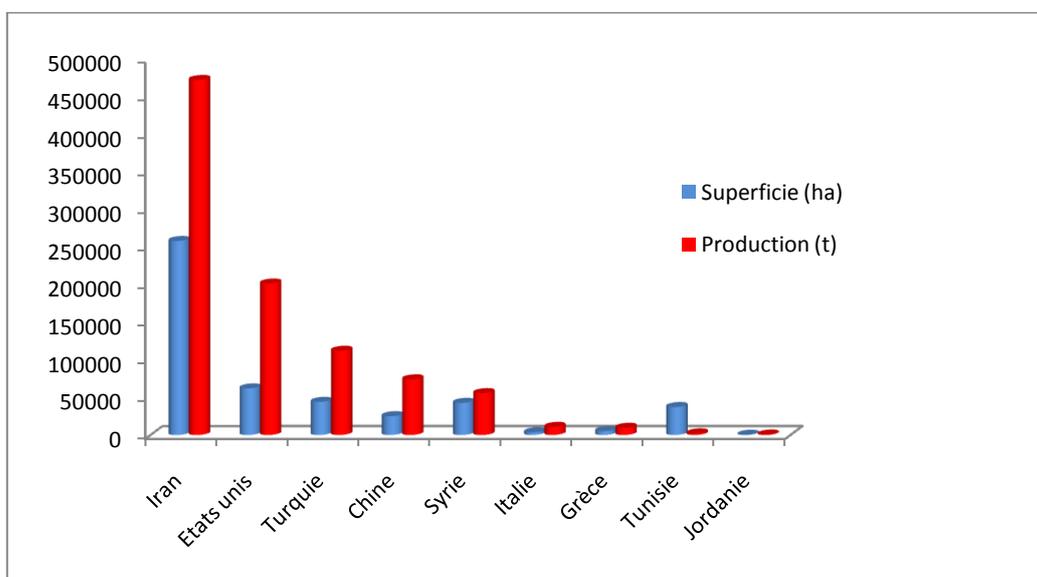


Figure 3.6: Superficies occupées par le pistachier fruitier et production mondiale [111].

3.2.4.2. En Algérie

Bien que l'espèce fût introduite en Algérie depuis fort longtemps, ce n'est que vers les années 1970 que la culture a été pratiquée dans plusieurs régions, notamment à Batna, Djelfa, Bouira, Saida et Tlemcen. Malheureusement ces vergers sont très mal exploités avec un taux d'arbres manquants importants et l'absence et l'insuffisance de pollinisateurs ainsi que la méconnaissance de la culture ce qui induit une productivité faible et irrégulière.

OUKARA et *al.*, (2012) notent qu' en Algérie la culture du pistachier est très peu répandue, et ceci malgré son adaptation aux conditions pédoclimatiques de très grandes surfaces arides et semi-arides. Ils rajoutent que les informations et les statistiques concernant les superficies et la répartition des vergers en production ne sont pas précis.

Actuellement cette culture occupe une superficie réduite et la production est faible, aléatoire et destinée à l'autoconsommation (OUKARA et *al.*, 2012).

3.2.5. Multiplication du pistachier fruitier

Bien qu'il existe plusieurs méthodes de multiplication, le pistachier fruitier se multiplie par semis suivi d'un greffage. En ce qui concerne le bouturage, de nombreuses études ont mis au point des méthodes pour étudier ce mode de multiplication mais les résultats obtenus n'ont pas donné satisfaction. Cependant ALETA et *al.*, [96] notent qu'il est possible d'obtenir des boutures semi-ligneuses de *P. atlantica*, *P. integerrima* et *P. terebinthus*, provenant de pieds-mères étiolés et ayant été traitées par une hormone (acide indol butyrique).

3.2.5.1 Récolte et conservation des graines

La récolte des graines commence au mois de septembre et s'étale jusqu'au mois d'octobre selon les régions. La maturité de la semence joue un rôle important car une immaturité à la récolte se traduit généralement par une faculté germinative faible et surtout par une inaptitude à la conservation. La couleur des graines détermine le degré de maturité de celle-ci [109].

Les graines récoltées sont séchées et conservées dans un endroit frais, à l'abri de lumière et de l'humidité [109].

3.2.5.2. Préparation de la graine au semis

La graine utilisée pour la production des porte-greffes doit être de la récolte de l'année en cours, saine et bien mûre. Elle doit être traitée à l'eau tiède pendant 48 heures. Les traitements chimiques ou mécaniques ne sont pas nécessaires [109]. Par ailleurs Les résultats obtenus par BENMAHIOUL et *al.*, [114], révèlent que les meilleurs taux de germination chez *Pistacia vera* ont été enregistrés avec le lot des graines sans téguments.

3.2.5.3. Semis

Le semis s'effectue à la fin de l'hiver ou le début du printemps. Selon [109], deux méthodes sont utilisées ; le semis direct en plein champs et le semis en sachets. Selon le même auteur le semis en sachets permet d'obtenir des plants vigoureux avec une facilité de manipulation pour les différentes opérations de mensurations et d'entretien. Le substrat utilisé pour la production des porte-greffes en sachets est composé du sable et de la tourbe [114].

L'élevage des plants en pépinière nécessite des travaux d'entretien à savoir les arrosages fréquents et les désherbages réguliers.

3.2.5.4. Greffage

Le type de greffage qui convient le mieux au pistachier est le greffage en écusson [108]. La technique consiste à insérer un œil prélevé sur un rameau de l'année dans une entaille en (T) faite sur le porte greffe. Les plants greffés sont minutieusement ligaturés au raphia en serrant modérément. L'opération du greffage est suivie directement par un écimage (figure 3.7). Le greffage se déroule pendant le mois du juin pour la greffe en écusson à œil poussant et la deuxième quinzaine de juillet et peut se prolonger jusqu'à la fin d'août pour la greffe en écusson à œil dormant [109]

Selon OUKABLI [108], plusieurs espèces du pistachier peuvent être utilisées comme porte-greffes mais l'espèce cultivée *Pistacia vera* est la plus utilisée.

En Algérie, le porte-greffe le plus utilisé est le franc des variétés Achouri et Batouri. Actuellement les recherches s'orientent vers la valorisation du pistachier de

l'Atlas comme porte-greffe vu sa rusticité et ses faibles exigences pluviométriques [109 ; OUKARA et al., (2012)].



Figure 3.7: Greffage en écusson du pistachier fruitier
(Parcelle de démonstration de Kser El Boukhari, wilaya de Médéa)

(OUKARA et al., 2012).

CHAPITRE 4 : STRESS ABIOTIQUES

4.1. Notion de stress

Le mot stress était employé en mécanique et en physique et voulait dire « force, poids, tension, charge ou effort » ce n'est qu'en 1963 que ce mot est utilisé en médecine par HANS SELYE [115]. Cet auteur définit le stress comme étant « des tensions faibles ou fortes, éprouvées toujours et déclenchées par des évènements futurs désagréables ou agréables.

En effet, tout facteur environnemental susceptible de déclencher chez les plantes des modifications chimiques ou physiques est appelé stress.

Il existe chez les plantes deux types de stress : biotiques et abiotique. Un stress biotique est un stress résultant de l'action d'un organisme vivant sur un autre organisme vivant telle qu'une attaque d'un pathogène.

Le stress abiotique est un facteur environnemental susceptible de déclencher des modifications chimiques ou physiques dommageables. La salinité des sols, la sécheresse, la température extrême, le froid, le gel, les vents, l'excès d'eau, les radiations et les produits chimiques comme les pesticides ou les métaux lourds sont tous des conditions défavorables qui affectent la croissance et le rendement des plantes [3].

Les stress hydrique et salin sont des contraintes abiotiques majeures de la production agricole. Pour pouvoir survivre, les plantes développent plusieurs stratégies adaptatives pour lutter contre ces contraintes, la capacité d'une plante à tolérer le stress peut être défini, à cet effet, comme étant sa capacité à survivre et à s'accroître et aussi à produire plus que des plantes sensibles [116].

4.2. Stress salin

Le stress salin est un excès d'ions en particulier, mais pas exclusivement, aux ions Na^+ et Cl^- [3]. Le stress salin est dû à la présence de quantités importantes de sels. Il réduit fortement la disponibilité de l'eau pour les plantes, on parle alors de milieu "physiologiquement sec" [117].

La quantité de sels dans le sol que les plantes peuvent supporter sans grand dommage pour leur culture, varie selon les genres, les familles et les espèces et/ou variétés [47].

Les conséquences d'un stress salin peuvent résulter de trois types d'effets que le sel provoque chez les plantes :

- Le stress hydrique : une forte concentration saline dans le sol est tout d'abord perçue par la plante comme une forte diminution de la disponibilité en eau. Cela nécessite un ajustement osmotique.
- Le stress ionique : En dépit d'un ajustement osmotique correct, la toxicité ionique survient lorsque l'accumulation de sels dans les tissus perturbe l'activité métabolique.
- Le stress nutritionnel : Des concentrations salines trop fortes dans le milieu provoquent une altération de la nutrition minérale. En particulier, vis-à-vis des transporteurs ioniques cellulaires, le sodium entre en compétition avec le potassium et le calcium, les chlorures avec le nitrate, le phosphate et le sulfate [47].

4.2.1. Effets du stress salin sur les plantes

4.2.1. 1. Effet du stress salin sur la germination

La germination est régulée par des caractéristiques génotypiques mais aussi par les conditions environnementales et, en particulier, par la disponibilité de l'eau et de sel dans le sol [118]. Ainsi la germination des graines est le stade le plus sensible aux stress salin et hydrique [119].

Plusieurs auteurs ont montré un retard de la germination causé par la salinité chez plusieurs espèces même chez les espèces halophytes [118 ; 119 ; 120 ; 121 ; 122 ; 123].

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 [123].

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 (altération de l'embryon).

NAIDOO et KIFT [124], notent que le sel limite la germination par un empoisonnement de l'embryon par les effets toxiques de certains ions.

Par contre ABDUL JALEEL et *al.*, [125] ajoutent que la salinité influe sur la germination en empêchant l'absorption d'eau par l'embryon à cause du haut potentiel osmotique du milieu.

4.2.1.2. Effet du stress salin sur l'absorption

Irriguer avec de l'eau chargée en sel réduit la faculté des racines à puiser de l'eau. Entre deux irrigations, alors que l'humidité du sol diminue, les sels de la solution du sol peuvent se concentrer à une hauteur de 2 à 5 fois leur valeur initiale. MAILLARD [126], explique ce phénomène par une augmentation de la pression osmotique de la solution du sol et une inhibition de l'extraction de l'eau par les racines.

Les effets osmotiques du stress salin peuvent également limiter la croissance des racines qui limite les possibilités d'absorption des éléments nutritifs du sol [127].

RAHMOUNE et *al.* [128] ont montré qu'en présence de sel, l'absorption des cations Na^+ , Ca^{+2} et Mg^{+2} dépasse souvent celle des anions Cl^- , PO_4^- et NO_3^- , ce qui engendre un déficit anionique pour le végétal.

Les mêmes auteurs ajoutent que les chlorures Cl^- sont toujours accumulés proportionnellement à la teneur globale en sels et en plus grande quantité que le Na^+ .

Le chlore, en entrant en compétition avec le NO_3^- , inhibe dans les plantes sensibles l'absorption et le transport à longue distance de cet anion vers les parties aériennes et engendre ainsi une carence nutritionnelle qui est estimée par la

différence entre la teneur globale en cations majeurs Ca^{+2} , K^+ , Mg^{+2} et Na^+ et la teneur en Cl^- [129].

4.2.1.3. Effet du stress salin sur la croissance et développement

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 [130].

Les effets de la salinité sur la croissance des plantes varient en fonction de la concentration du sel, de l'espèce, de la variété, de l'organe de la plante, ainsi que de son stade végétatif [47]. Ils se manifestent aussi par une diminution de la croissance de l'appareil végétatif, caractérisé par la faible ramification et la réduction du nombre de nœuds et des feuilles et de la longueur de la tige. Une baisse des poids de matières fraîche et sèche est aussi observée [131]. Une concentration élevée de sodium (Na^+) et des chlorures (Cl^-) peut être toxique aux plantes avec pour résultat une inhibition de la croissance [132]. 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 une variété [133].

En effet la croissance des racines s'en trouve faiblement affectée par le stress salin [2]. Le développement de la partie racinaire permet d'absorber l'eau des milieux salins et de la conserver, ce qui permet le maintien d'une teneur relative en eau plus élevée [134].

4.2.1.4. Effet du stress salin sur la photosynthèse

La salinité réduit la croissance et le processus de la photosynthèse. Cette réduction est due aux effets complexes d'interactions osmotiques, ioniques et nutritionnelles. La présence du chlorure de sodium dans le sol a généralement pour effet d'abaisser l'intensité de la transpiration des glycophytes et de nombreux halophytes en présence de toute diminution de la turgescence. GREENWAY et MUNNS [132], soulignent que la salinité affecte en premier lieu la croissance de la plante puis perturbe le processus de la photosynthèse, Particulièrement chez les

glycophytes, la présence continue de Na Cl dans le milieu de culture entraîne une augmentation d'une part de l'épaisseur des limbes (rendant la porosité stomatique limitée) et d'autre part la vitesse d'ouverture des cellules stomatiques.

La photosynthèse est réduite chez les plantes cultivées en milieu salin. MUNNS [135] signale que cet effet dépressif serait à l'origine de la diminution de la croissance. Il a alors considéré que l'accumulation de 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. Le sel peut également provoquer la modification de la densité des stomates, du nombre et du diamètre des vaisseaux du xylème chez les halophytes, ou accélérer le cycle biologique avec changement de la voie métabolique de fixation du carbone [47].

4.2.1.5. Effet de la salinité sur la nutrition de la plante

Des concentrations salines trop fortes dans le milieu provoquent une altération de la nutrition minérale. En particulier, vis-à-vis des transporteurs ioniques cellulaires, le sodium entre en compétition avec le potassium et le calcium, et le chlorure avec le nitrate, le phosphate et le sulfate [47].

L'accumulation des ions Na^+ affecte l'absorption de K^+ et ceci en fonction de la concentration du premier élément. Cependant, la présence de Na^+ en faible concentration peut augmenter l'absorption de K^+ et inversement [136].

MAILLARD [126], signale que les symptômes de toxicité typique aux ions sodium Na^{2+} sont des brûlures, dessèchement et la mort des tissus sur les bords externes des feuilles. Les symptômes causés par des ions Cl^- quant à eux, apparaissent à l'extrême pointe des feuilles.

Le même auteur ajoute que la présence excessive d'ions sodiques, chloriques et boriques peut provoquer une augmentation du pH du sol, ce qui a un effet indirect sur l'inhibition de l'absorption des ions ferreux, phosphate, zinc et manganèse indispensable pour la croissance des plantes.

4.2.2. Mécanismes de tolérance des plantes au stress salin

Une plante cultivée sur sol salin doit se défendre en développant des mécanismes au niveau de ses tissus. Le sel absorbé est soit rejeté ou accumulé par les différents organes, tissus, cellules et compartiments cellulaires. Les ions chlorure Cl^- et sodium Na^+ sont véhiculés par les racines, transportés par la sève xylémique jusqu'aux tiges et feuilles. Ces ions se trouvent soit stockés (plantes de type incluser), soit au contraire, ils sont très peu retenus dans les feuilles on parle de plantes de type excluser. L'accumulation décroît selon la séquence racines/tiges/feuilles et les ions Na^+ sont alors revéhiculés par la sève phloémique jusqu'aux racines [47].

Deux types de comportement ont pour effet d'éviter la saturation en sel :

4.2.2.1. Inclusion et compartimentation des ions

La compartimentation des ions entre les organes (racines/parties aériennes), les tissus (épiderme/mésophile), ou encore entre les compartiments cellulaires (vacuole/cytoplasme) est l'un des mécanismes d'adaptation à la contrainte saline [137]. L'inclusion et la compartimentation sont les stratégies les plus efficaces pour éviter la toxicité de Na^+ sur des sites métaboliques dans le cytoplasme [127]. La plante utilise le sel pour ajuster la pression osmotique de ses cellules. Elle capte le sel véhiculé par l'eau et parvient aux feuilles par le mouvement ascendant de la sève dans les vaisseaux. A l'intérieur des cellules, le sel est alors stocké dans les vacuoles grâce à des systèmes de "pompes" moléculaires. Les vacuoles étant des compartiments fermés au sein de la cellule, le sel est ainsi isolé des constituants cellulaires vitaux [138].

La vacuole se chargerait-elle en Na^+ grâce à l'action d'un antiport sodium-proton (Na^+/H^+), lequel serait entretenu par le fonctionnement accéléré de ces mêmes pompes (Na^+/H^+). L'existence d'un système d'échange (Na^+/H^+) est largement signalé. Il est alors admis que c'est la performance de stocker le sel dans les parties aériennes qui est déterminante dans le niveau de tolérance des espèces.

4.2.2.2 Exclusion

La plante empêche le sel de remonter dans la sève jusqu'aux feuilles. La présence de l'endoderme dans les racines ainsi que le transport sélectif, leur permet d'absorber les ions nutritifs utiles et de les réexcréter les ions Na^+ ([139]).

Quelques halophytes peuvent empêcher l'absorption excessive du sel par son exclusion du sel au niveau des racines et de la partie inférieure de la tige. Dans ce cadre, la sortie de Na^+ des vaisseaux du xylème en échange d'une entrée de K^+ venant des cellules parenchymateuses du xylème et du parenchyme avoisinant, joue un rôle important dans la tige et les racines [140]. Certaines mesures physiologiques concordent pour suggérer l'existence d'une expulsion active du sodium cytoplasmique vers l'apoplasme ou vers la vacuole, protégeant ainsi les équipements enzymatiques du cytoplasme dans les organes aériens [132].

4.2.2. 3. Ajustement osmotique

L'un des principaux caractères physiologiques de tolérance aux contraintes du milieu est l'ajustement osmotique qui peut se manifester chez la plupart des végétaux mais à des degrés variables. L'ajustement osmotique est réalisé grâce à une accumulation de composés osmorégulateurs conduisant à une réduction du potentiel osmotique permettant ainsi le maintien du potentiel de turgescence. Les métabolites impliqués dans cet ajustement sont assez variés. De fortes accumulations en potassium et en nitrates ont été mises en évidence chez le blé [141] et chez le tournesol [142]. L'ajustement peut être effectué via l'accumulation de solutés tel que les acides aminés libres (proline, glycine, betaïne), sucres solubles (glucose, fructose, saccharose) et les polyols (mannitol, sorbitol, Dononitol) [143].

La proline représente l'une des manifestations les plus remarquables des stress hydriques et osmotiques. Son rôle d'osmoticum a été rapporté par de nombreux auteurs [144 ; 145].

L'accumulation de la proline, induite par les stress, peut être le résultat de trois processus complémentaires : stimulation de sa synthèse [146 ; 147], inhibition de son oxydation [148 ; 149] et/ou altération de la biosynthèse des protéines [148].

L'ajustement osmotique peut se manifester par l'accumulation des sucres solubles. Beaucoup d'auteurs ont mis en évidence le rôle protecteur des sucres solubles dont le saccharose, glucose, fructose, sur les membranes, en particulier mitochondriales [150]. Leur présence permettrait le maintien des réactions de phosphorylation et de production d'énergie. Outre ce rôle protecteur des membranes, les hydrates de carbone protègent les processus par lesquelles les enzymes sont synthétisés, ce qui impliquerait une meilleure tolérance de la plante à la dessiccation et une meilleure résistance à la sécheresse [150].

4.3. Stress hydrique

Le stress hydrique a été défini comme une baisse de la disponibilité de l'eau. Il se traduit par une réduction de la croissance de la plante et/ou de sa reproduction par rapport au potentiel du génotype. La contrainte hydrique est le facteur ou l'ensemble des facteurs ayant pour conséquence le stress [151].

LABERCHE [152], définit le stress hydrique comme étant le rapport entre la quantité d'eau nécessaire à la croissance de la plante et la quantité d'eau disponible dans son environnement, sachant que la réserve d'eau utile pour la plante est la quantité d'eau du sol accessible par son système racinaire.

4.3.1. Effets du stress hydrique sur les plantes

4.3.1.1. Effet du stress hydrique sur la croissance des plantes

La réponse générale des plantes à la sécheresse est la réduction de la croissance. Celle-ci est une capacité adaptative nécessaire à la survie d'une plante exposée à un stress hydrique [3].

Pour expliquer ce phénomène observé chez les plantes lors de ce stress, plusieurs théories hydriques d'une part et biochimiques d'autre part, sont proposées. Les théories hydriques, sont mises en jeu pour expliquer la diminution de la croissance par une plasmolyse des cellules au niveau des tissus ; ou encore par une chute dans le gradient de potentiel hydrique nécessaire à l'entrée d'eau dans les cellules en expansion.

Les théories biochimiques considèrent que les variations de la croissance sont liées à des modifications dans l'extensibilité pariétale sous l'effet des enzymes, des

hormones de croissance comme l'acide abscissique, et/ou à des modifications chimiques comme le pH [153].

On note principalement une diminution importante de la taille, de la longueur des entre-nœuds, du nombre de feuilles et de la surface foliaire. Les plantes soumises à un déficit hydrique voient généralement leur sénescence foliaire s'accélérer. Une perte trop importante d'eau due au phénomène d'osmose peut conduire à la mort des cellules [154].

La diminution de la croissance en hauteur des plantes soumises à différentes contraintes hydriques a été observée chez beaucoup d'espèces telles que l'arganier [155], le casuarina [156], le cèdre [157]. La réduction de la hauteur de la tige peut s'expliquer par un retard dans la croissance végétative suite à une baisse de divisions cellulaires induite par un déficit hydrique.

4.3.1.2. Effet du stress hydrique sur la nutrition minérale

THOMAS et *al.*, [158], ont souligné que la réduction de la fixation d'azote est plus prononcée par le déficit hydrique. Ce dernier induit un déficit de nutrition azotée qui provient principalement des réductions de flux d'azote au niveau des racines et de la réduction des échanges entre les parties aériennes et racinaires par restriction de la transpiration [159].

Le facteur d'aridité peut affecter la nutrition phosphatée dans les zones semi-arides en réduisant de manière drastique les possibilités de désorption des ions phosphates depuis la phase solide du sol et de leur transfert vers la racine. En effet, 95% du phosphore prélevé doit être résorbé avant d'être transféré vers la plante [160].

4.3.1.3. Effet du stress hydrique sur l'activité photosynthétique

Parmi les modifications physiologiques liées au stress hydrique, la régulation stomatique qui influe sur la photosynthèse et la respiration. La baisse du potentiel hydrique de la plante se traduit principalement par une diminution de la pression de turgescence puis une régulation stomatique. Un stress hydrique provoque la fermeture des stomates et se traduit par un ralentissement de la photosynthèse en même temps que la transpiration [161].

4.3.2. Mécanismes d'adaptation des plantes à la sécheresse

Pour lutter contre le manque d'eau, les plantes développent plusieurs stratégies adaptatives qui varient en fonction de l'espèce et des conditions du milieu (Esquive, évitement et tolérance) [162]. Ces stratégies consistent à maintenir les tissus hydratés pendant la période de la sécheresse, à fonctionner avec des tissus déshydratés, ou bien encore à accomplir les différents stades de développement en dehors de la période de stress [136].

4.3.2.1. Mécanismes d'adaptations phénologiques, physiologiques et morphologiques

4.3.2.1.1. Esquive

Cette stratégie permet à la plante de ne pas subir directement la contrainte hydrique, grâce à une réalisation de son cycle en dehors des périodes sèches en particulier au cours de la phase sensible ou critique [163].

La précocité constitue un important mécanisme d'évitement au stress hydrique de fin de cycle [164]. La précocité assure une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau. En effet, en produisant la biomasse la plus élevée, les génotypes à croissance rapide et à maturité précoce utilisent mieux l'eau disponible et ils sont moins exposés aux stress environnementaux que les génotypes tardifs [165].

4.3.2.1.2. Evitement

L'évitement consiste à maintenir un état hydrique interne satisfaisant en présence d'une contrainte hydrique externe. Pour conserver un potentiel hydrique élevé, la plante contrôle les flux d'eau entrant au niveau des racines et sortant au niveau de la feuille. Ceci peut être obtenu par une réduction de la transpiration grâce à une fermeture rapide des stomates [162] et par une optimisation de l'absorption de l'eau par les racines, notamment grâce à un système racinaire profond [142 ; 162].

La plante présente la capacité d'adapter son système racinaire en condition de déficit hydrique. La croissance foliaire est rapidement inhibée par le manque d'eau, du fait de la diminution de la turgescence cellulaire, mais l'activité photosynthétique demeure peu inhibée lors des premiers stades de stress. Les produits de la photosynthèse sont alors acheminés vers le système racinaire et permettent d'assurer son développement et augmenter sa capacité à prélever l'eau [136 ; 166].

La feuille développe des réponses morphologiques et anatomiques lui permettant de limiter les pertes en eau [163]. En condition de stress, elle peut se couvrir d'une couche cireuse au niveau des cellules de l'épiderme réduisant les pertes d'eau liée à la transpiration cuticulaire [167].

Le déficit hydrique semble augmenter la croissance racinaire non seulement par rapport aux parties aériennes mais aussi dans l'absolu [168].

La réduction de la surface foliaire, quand le stress hydrique est très important, est un mécanisme de réduction des besoins en eau [169]

En période de sécheresse, une diminution de la teneur en chlorophylle est remarquée chez la plante pour limiter les pertes en eau par évaporation et aussi l'augmentation de la résistance à l'entrée du CO₂ atmosphérique nécessaire à la photosynthèse. L'économie de l'eau se traduit par une turgescence relative moins affectée par le stress conduisant à une dilution de la chlorophylle [170].

4.3.2.1.3. Tolérance

La tolérance à la sécheresse est défini par TURNER [162] comme étant le maintien de la turgescence de la plante alors que son potentiel hydrique est très négatif.

Ce phénomène permet à la plante d'assurer ses fonctions physiologiques malgré une dégradation de son état hydrique interne consécutive à la contrainte hydrique, elle s'exprime par un maintien de la turgescence [171].

L'ajustement osmotique constitue le processus majeur permettant à la cellule de maintenir sa turgescence sous la contrainte hydrique [162], grâce à l'accumulation active de molécules particulières : alcools (comme le glycérol), polyols, généralement dérivés de l'inositol, sels de potassium [172] et sucres solubles [173 ; 174].

Cependant, les substances qui ont retenu le plus l'attention des physiologistes et des sélectionneurs sont des composés contenant un azote quaternaire, comme la bétaine ou la proline [175 ; 176 ; 177].

4.3.2.2. Mécanismes d'adaptations biochimiques

L'ajustement osmotique s'effectue par l'accumulation dans la vacuole des composés inorganiques qui peuvent être toxiques pour la cellule ou des composés (osmolytes) dits compatibles [176]. Ces derniers présentent généralement une

grande solubilité dans l'eau peu chargés et à pH neutre. Ils comprennent des acides aminés, des composés ammonium quaternaires et ammonium sulfonium tertiaire et des hydrates de carbone [178].

La proline est un osmoprotecteur qui s'accumule dans le cytosol. En présence d'un stress hydrique, sa teneur augmente dans différents organes de la plante (tiges, feuilles et racines).

Dans le cas de la sécheresse l'accumulation de la proline apparait comme une des premières manifestations de la résistance du végétal. Elle a un rôle de régulateur osmotique en maintenant la pression osmotique élevée et grâce à ses hydroxyles elle stabilise la membrane [179].

Depuis longtemps, il est connu que le taux des sucres augmente considérablement chez des plantes soumises aux différents types de stress. En effet, cela a été vérifié par CHUNYANGKAIYUNWANG [180], chez des arbres adultes d'eucalyptus sous différents régimes de stress hydriques. Les sucres et leurs dérivés, les polyols s'accumulent à des niveaux élevés dans le cytoplasme pour équilibrer le fort potentiel osmotique de la vacuole lors de contrainte environnementale telle que la sécheresse [181].

Lors d'un déficit hydrique, l'induction de l'expression de différents types de gènes a été mis en évidence [182 ; 183]. Cette modification induit la synthèse de deux types de protéine, celles présentant une fonction de protection de la cellule vis-à-vis du manque d'eau et celles intervenant dans la régulation de l'expression des gènes [184].

CHAPITRE 5 : MATERIEL ET METHODES

5.1. Matériel végétal

Le matériel végétal ayant fait l'objet de notre étude sont des graines provenant de deux espèces du genre *Pistacia*. Il s'agit de l'espèce pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica*) et pistachier vrai (*Pistacia vera*).

5.1.1. Graines du pistachier de l'Atlas

Nous avons utilisé des drupes récoltées à maturité le mois de septembre à partir d'un peuplement porte-graine du pistachier de l'Atlas de Ain Oussera situé à la wilaya de Djelfa. Il s'agit d'un peuplement adulte, naturel, sélectionné pour la production de graines de bonne qualité (INRF, 2011) (figure 5.1).

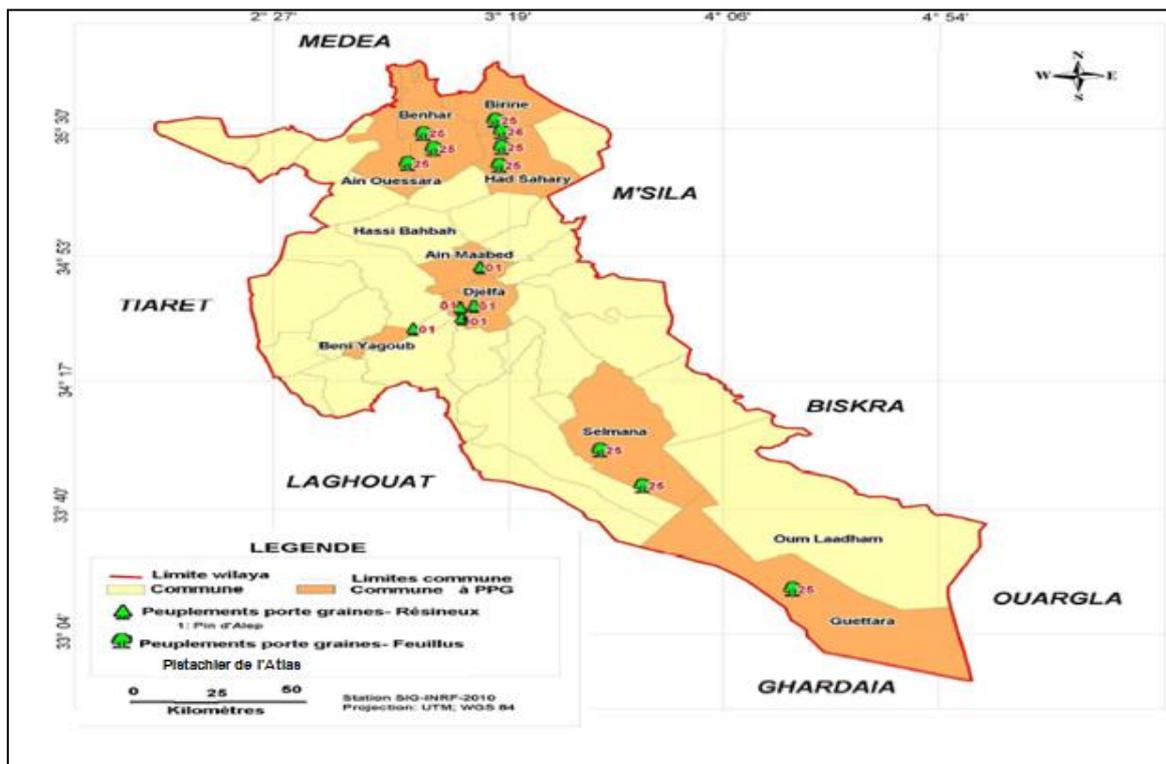


Figure 5.1: Localisation des peuplements porte-graines de la wilaya de Djelfa (INRF, 2011).

5.1.1.1. Echantillonnage

La méthode d'échantillonnage adoptée dans notre étude est la récolte à petite échelle. Celle-ci est réalisée dans le cadre de travaux de recherche et sélection des arbres (WILLAN, 1992). Elle consiste à repérer au moins 10 arbres sur 25 à 50 dans un même peuplement, espacés d'au moins 100 m. Ce peuplement doit être caractérisé sur toute son étendue par les mêmes conditions de climat, du sol, de topographie et de concurrence vitale (RONDEUX, 1977). L'ensemble des arbres sélectionnés est considéré comme une population représentative du peuplement pour l'homogénéité de ses caractéristiques.

Les individus retenus pour la récolte des graines répondent aux critères de sélection établis par l'Institut National de la recherche forestière (INRF) (INRF, 2011).

Les recommandations de l'INRF sont :

- Les arbres doivent être homogènes, sains, présentent un bon état végétatif et résistants aux aléas du milieu.
- L'abondance et la qualité de la fructification.

Les arbres sont choisis aléatoirement pour la récolte. Ils présentent un bon état végétatif, d'une hauteur moyenne de 12 m et un diamètre moyen de 2 m. Ils sont répartis sur une étendue de 1735 ha.

Les graines récoltées sont transportées au laboratoire où elles ont été séchées à l'air libre et triées soigneusement pour éliminer celles qui ne sont pas viables. Elles ont été mises dans des sachets en papier kraft et conservées dans des conditions ambiantes et à l'abri de l'humidité et de la lumière jusqu'à leurs utilisations.

Les graines utilisées sont d'une couleur marron, d'une longueur moyenne de 0,7 cm et une largeur moyenne de 0,5 cm (figure 5.2).



Figure 5.2: Semence du pistachier de l'Atlas
(a): fruit, (b): graine, (c) : coupe longitudinale de la graine.

5.1.1.2. Caractéristiques du site de récolte

La collecte du matériel végétal est faite dans la région de Ain Oussera, lieu-dit Boucedraya délimitée par 02°56'56" de longitude et 34°20'29" de latitude (INRF, 2011). Géographiquement, elle se localise au Nord du chef lieu de la wilaya de Djelfa située à 400 km au Sud d'Alger.

Les données climatiques de la station météorologique de Djelfa ont été prises comme référence [77] (tableau 5.1).

Tableau 5.1: Caractéristiques climatiques et bioclimatiques de la région de Ain Oussera (wilaya de Djelfa) [77].

Période	Précipitations (mm)	Températures		Période sèche	Q ₂	Type de bioclimat
		M (°C)	m (°C)			
1972-2011	238,2	35,8	0,5	7 à 9 mois	22	Aride frais

Le tableau (5.2) montre les caractéristiques globales du site de prélèvement des graines du pistachier de l'Atlas [INRF, 2011] ; [77].

Notons qu'autour des arbres du pistachier de l'Atlas, nous avons enregistré une flore spontanée notamment le jujubier, l'armoise et l'alfa.

Tableau 5.2 : Caractéristiques globales du site de prélèvement des graines.

Altitude (m)	Pente (%)	Élément floristique	Élément topographique	Élément géologique	Élément édaphique
700 à 900	2 à 5	- <i>Ziziphus lotus</i> - <i>Artemisia herba-alba</i> - <i>Stipa tenacissima</i>	Oueds	Alluvions récents du quaternaire	Argile (%) : 6 Sable Fin (%) : 39,82 Sable Grossier (%) : 19,68 Limon Fin (%) : 3 Limon Grossier : 31,5 pH : 7 Texture : Sablonneuse CE: 0,7 μ S/cm Calcaire/Tota: 8,1% Calcaire/Acti: 7,2% pH= 7,1

5.1.2. Graines du pistachier vrai

Les graines du pistachier vrai utilisées proviennent d'un parc semencier localisé à la ferme de démonstration de l'institut technique d'arboriculture fruitière et de la Vigne (ITAFV) de Tighenif (wilaya de Mascara). Il s'agit de graines de la variété Achouri récoltées à maturité complète sur des sujets adultes de 30 ans. Après récolte les graines sont séchées et conservées dans des sachets en papier kraft et placées dans un endroit frais à l'abri de lumière et d'humidité.

La coque des graines de la variété Achouri utilisées dans cette étude sont déhiscentes, de couleur blanche tachetée de marron, d'une longueur moyenne de 1.91cm et une largeur de 1.11 cm et d'un poids de 100 graines de 99 g [ITAFV,2016] ; [103].

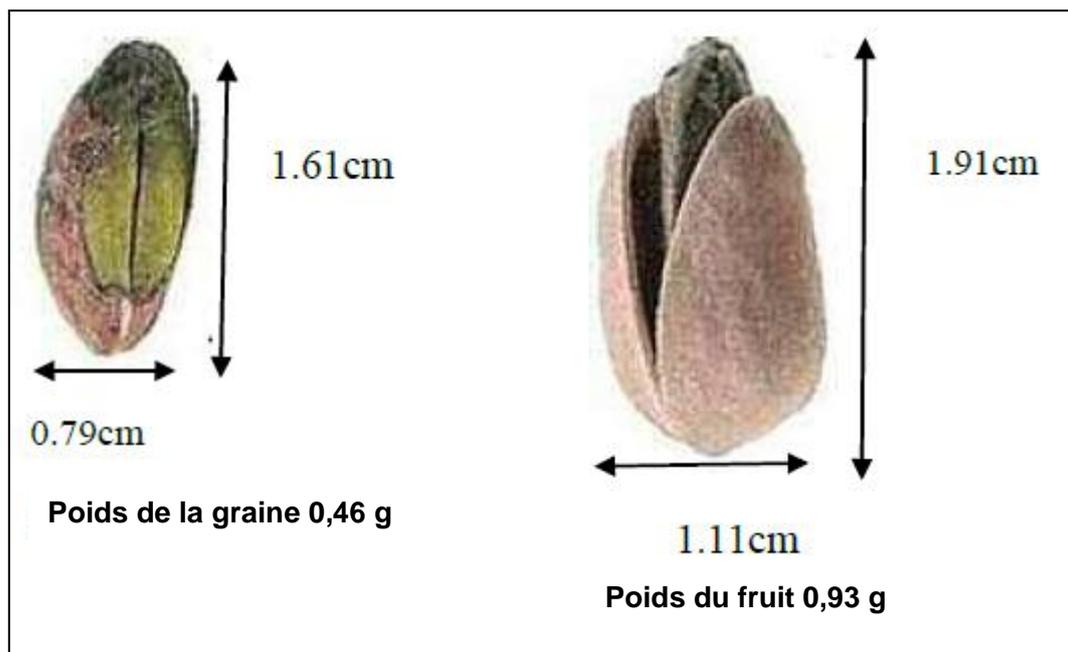


Figure 5.3: Semence du pistachier vrai
(Variété Achouri) [103].

5.1.2.1. Récolte

En général, la récolte des graines est échelonnée, elle s'effectue manuellement au mois d'octobre [108]. Au niveau des vergers de la ferme de démonstration (ITAFV) de Tighenif, la récolte peut se faire de deux façons:

- Faire 2 à 3 passages pour récolter les fruits au fur et à mesure de leur maturité. Les fruits mûrs se détachent facilement de la grappe.
- Les grappes sont cueillies et étendues sur le sol. Les fruits mûrs se détachent d'eux même tandis que les fruits vides restent attachés à la grappe.

5.1.2.2. Caractéristiques globales du site de la récolte

La collecte des graines du pistachier fruitier est faite au niveau de la ferme de démonstration de l'institut technique d'arboriculture fruitière et de la vigne de Tighenif (W. Mascara). Cette ferme est située à la plaine de Ghriss. Elle s'étend sur une superficie de 62 ha et se compose de vignobles, de vergers d'olivier et de vergers de pistachier (verger de comportement, de démonstration et de production, parc à bois et parc semencier). Elle se trouve au Sud-Est du chef-lieu de la wilaya de Mascara à une distance de 13 Km.

Les données climatiques de la station météorologique de l'ITAFV ont été prises comme référence par [103] (Tableau 5.3).

Tableau 5.3: Caractéristiques climatiques et bioclimatiques de la région de Tighenif (wilaya de Mascara) [103].

Période	Précipitations (mm)	Températures		Période sèche	Q ₂	Type de bioclimat
		M (°C)	m (°C)			
1990-2009	301,18	37,5	3,6-0,3	7 mois (avril-octobre)	30,67	Semi-aride hiver frais

5.2. Préparation du matériel végétal et conditions de culture

Avant leur utilisation, les graines des deux espèces ont subi les opérations suivantes :

- Choix des graines
- Elimination des graines vides (test de flottaison)
- Elimination de l'épicarpe après trempage des graines dans de l'eau courante pendant 24 heures.
- Levée de la dormance (étape primordiale pour les graines du pistachier de l'Atlas).
- Désinfection des graines par un trempage dans l'hypochlorite de sodium (NaClO) à 8% pendant 5 minutes pour éviter la prolifération des champignons et les contaminations.
- Rinçage à l'eau distillée (3 rinçages).

5.2.1. Germination

➤ Pistachier de l'Atlas : La germination de cette espèce est difficile. La graine est dotée d'un endocarpe osseux, imperméable, nécessitant une scarification mécanique ou chimique, et/ou une stratification au froid. Ces méthodes permettent de ramollir les téguments pour l'imbibition de la graine (ALETA et NINOT, 1996).

Pour cette raison et afin d'améliorer le taux de germination des graines du pistachier de l'Atlas, nous avons testé différents prétraitements (tableau 5.4).

Tableau 5.4: Prétraitements testés sur les graines de *Pistacia atlantica*.

Traitements	Type de prétraitement testé
T0	Aucun prétraitement
T1	Stratification au froid à $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ / 15 jours
T2	Stratification au froid à $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ /30 jours
T3	Stratification au froid à $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ /40 jours
T4	Trempage dans l' H_2SO_4 / 15 mn
T5	Trempage dans l' H_2SO_4 / 30 mn
T6	Trempage dans l' H_2SO_4 / 60 mn
T7	Scarification mécanique (Scalpel)
T8	Stratification au froid/30 jours+ scarification mécanique

➤ Pistachier vrai : La germination des graines de la variété Achouri est facile car elles possèdent une coque déhiscente (figure 5.3). Avant le semis, nous avons effectué un simple trempage des graines dans de l'eau tiède pendant 48 heures.

5.2.2. Obtention des plantules

➤ Pistachier de l'Atlas : Afin d'assurer une production rapide, homogène et massive des plantules destinées aux expérimentations, les graines prétraitées sont semées dans des alvéoles remplies de tourbe et arrosées à l'eau courante. Dès l'apparition des premières feuilles, les plantules sont repiquées individuellement dans des pots.

➤ Pistachier vrai : Le semis des graines s'effectue directement dans des pots qui sont placés sous serre. Les plantules sont arrosées tous les deux jours par l'eau courante jusqu'à l'application du stress.

5.2.3. Substrat

Le substrat utilisé est un mélange de deux volumes du sol et un volume de tourbe du modèle Stender (2V/1V). Les analyses de la conductivité électrique et du

pH ont montré que le sol est non salin (0.75 dS m⁻¹) avec un pH relativement basique (7.7).

5.2.4. Conteneurs

Nous avons utilisé des pots en plastique d'une capacité de 3,5 litres. Le fond des pots est tapissé d'une couche de graviers servant de drain.

5.2.5. Conditions de culture

La germination des graines du pistachier de l'Atlas a été conduite dans un incubateur réglé à 25±2°C. Les graines ont été mises à germer dans des boîtes de Pétri de 9 cm de diamètre contenant du coton hydrophile tapissé de papier filtre et humecté à l'eau distillée. Les graines sont dénombrées quotidiennement. L'émergence de la radicule étant l'indicateur de la germination.

Les pots contenant des plantules des deux espèces étudiées sont placées dans une serre, semi-contrôlée située au sein de laboratoire de Biotechnologies Végétales, dont l'orientation est Nord-Sud. L'aération est assurée par des fenêtres placées latéralement de part et d'autre de la serre. Le chauffage en période froide est assuré par des radiateurs à eau chaude. La température moyenne de la serre durant l'expérimentation étant 28±2°C.

5.3. Etude de l'effet de la contrainte saline

L'application du stress salin est effectuée par une solution saline obtenue en additionnant du chlorure de sodium (NaCl). Il s'agit du sel soluble généralement prédominant dans les eaux d'irrigation et dans les sols affectés par les sels en Algérie (SNOUSSI et HALITIM, 1998).

Nous nous sommes référés à la base de données établie par MAAS et HOFFMAN [187] pour le choix des concentrations de sels à appliquer. Cette dernière comporte la classification des espèces pérennes pour la tolérance à la salinité. Selon AYERS et WESTCOT [188], celle-ci sert de guide pour la tolérance relative entre les espèces qui varie selon les conditions climatiques et les pratiques culturales.

Les solutions salines sont préparées en mélangeant le chlorure de sodium (NaCl) avec de l'eau du robinet au niveau du laboratoire.

Cet essai consiste à préparer six (06) concentrations différentes avec un témoin à savoir : 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30 g/l de NaCl.

Le stress salin est appliqué au stade germinatif et plantules pour les graines du pistachier de l'Atlas. Notons que suite au manque de graines du pistachier vrai, les tests du stress salin ont été réalisés uniquement sur le stade plantule.

Les graines du pistachier de l'Atlas déjà prétraitées sont mises à germer dans des boîtes de Pétri et arrosées avec différentes concentrations en NaCl déjà préparées.

Le stress salin est appliqué aux plantules des deux espèces âgées de trois mois. Celles-ci sont arrosées un jour sur deux à raison de 100 ml/pot, avec les solutions salines déjà préparées.

5.4. Etude de l'effet de la contrainte hydrique

Le stress hydrique est appliqué aux deux espèces étudiées au stade plantule. Il est appliqué par un arrêt d'arrosage total [189]. Les plantules du lot témoin ont été arrosées à l'eau courante régulièrement jusqu'à la fin de l'expérimentation. Nous avons effectué des prélèvements sur les plantules témoins et stressées tous les 5, 10, 15 et 21 jours.

5.5. Paramètres étudiés et techniques d'analyse

Les différents paramètres étudiés, au stade germination pour les graines du pistachier de l'Atlas et au stade plantule pour les deux espèces, ont concerné:

5.5.1. Taux de germination

Une graine est considérée germée lorsque la radicule perce les téguments [190]. Le comptage des graines germées a été effectué quotidiennement pendant 40 jours. Les paramètres étudiés ont concerné:

-Taux de germination (TG) : représente le nombre des graines germées par rapport au nombre de graines mises en germination. Ce paramètre constitue un meilleur

moyen pour déterminer la faculté germinative des graines. Il est exprimé en % et calculé à partir de la moyenne :

$$\text{TG\%} = \left(\frac{n}{N}\right) \times 100$$

n : nombre de graines germées ; **N** : nombre total de graines mises en germination.

5.5.2. Cinétique de germination

La cinétique de germination est le nombre de graines germées toutes les 24 heures pendant 40 jours.

5.5.3. Temps moyen de germination

Le temps moyen de germination (TMG) est le nombre des graines germées par rapport au nombre de jours (temps). Selon Come [190], la vitesse de germination peut s'exprimer en temps moyen de germination (TMG) équivalent à l'inverse multiplié par 100 du coefficient de vélocité (Cv). Il est calculé par la formule de KOTOWSKI (1926):

$$\text{Cv} = \frac{(N_1 + N_2 + N_3 \dots + N_n) \times 100}{(N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3 \dots + N_n T_n)}$$

Avec N_n égal au nombre de semences germées entre le temps T_{n-1} et le temps T_n .

Le temps moyen de germination est calculé selon la formule suivante:

$$\text{TMG} = \left(\frac{1}{\text{Cv}}\right) \times 100$$

5.5.4. Humidité du sol

L'humidité du sol après chaque prélèvement est mesurée. Un échantillon du sol est pesé directement pour obtenir le poids frais (PF). Il est placé dans une étuve à une température de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à l'obtention d'un poids sec constant (PS). L'expression de l'humidité est alors calculée selon la formule suivante :

$$H\% = \frac{(\text{Poids frais} - \text{Poids sec})}{\text{Poids sec}} \times 100$$

5.5.5. Paramètres morphologiques

5.5.5.1. Croissance en longueur

La croissance en longueur de la partie aérienne et racinaire est évaluée après avoir arraché les plantules. Nous avons alors séparé la partie aérienne de la partie souterraine. Pour cela, nous avons lavé soigneusement les racines avant de les sécher rapidement avec du papier filtre. La longueur de la tige et de la racine principale est mesurée à l'aide d'une règle graduée en (cm).

5.5.5.2. Biomasse des organes aériens et racinaires

La biomasse a été mesurée par la masse de la matière fraîche (MF) puis sèche (MS) après séchage de 48 h à l'étuve réglée à $80\pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'au poids constant. Les pesées ont été effectuées grâce à une balance de précision et sont exprimées en (g).

5.5.5.3. Surface foliaire

La surface foliaire est estimée par la méthode de PAUL et *al.*, [190] qui consiste à :

- placer la feuille sur du papier calque et la tracer,
- découper les contours de la feuille,
- peser la partie du calque représentant la feuille (Pf),
- déterminer par peser le poids (Pq) correspondant à une surface (Sq) connue d'un carré de 3/3 du même papier calque,
- déduire la surface de la feuille (Sf) par la formule suivante :

$$\mathbf{Sf = (PfXSq)/Pq}$$

5.5.6. Paramètres physiologiques

5.5.6.1. Statut hydrique des plantules

Le statut hydrique des plantules est déterminé par leur teneur relative en eau (TRE) qui est mesurée selon la méthode de BARRS et *al.*, [191]. Le limbe foliaire excisé est pesé directement pour avoir le poids frais (Pf). Il est ensuite placé dans un tube à essai contenant de l'eau distillée pendant 24 heures. La pesée de la feuille

après la réhydratation donne un poids à pleine turgescence (Pr). Enfin, le poids sec (Ps) est déterminé après passage des échantillons dans l'étuve à 80±5°C pendant 48 heures jusqu'au poids constant. La TRE est calculée selon la formule suivante :

$$\text{TRE}(\%) = \left(\frac{\text{Pf} - \text{Ps}}{\text{Pr} - \text{Ps}} \right) \times 100$$

5.5.6.2. Dosage des chlorophylles

Pour chaque essai nous avons prélevé 0.1 mg de matière végétal sur les tiers médians des plus jeunes feuilles. les fragments végétaux sont broyés dans 10 ml d'acétone à 80%. Le mélange est mis dans des tubes à essais et placés à l'obscurité pendant 48 heures. La densité optique (DO) de la totalité de surnageant obtenu est mesurée à 470, 645 et 663 nm (spectrophotomètre Perkin Elmer Lambda 5 U.V).

La méthode utilisée pour les calculs est celle de FRANCIS et *al.*, [192] :

$$\text{Chl(a)}(\text{mg/g MF}) = 12,6 \times \text{Do } 663 - 2,59 \times \text{Do } 645 \times V / (1000 \times W)$$

$$\text{Chl(b)}(\text{mg/g MF}) = 22,9 \times \text{Do } 645 - 4,68 \times \text{Do } 663 \times V / (1000 \times W)$$

$$\text{Chl totale}(\text{mg/g MF}) = \text{Chl(a)} + \text{Chl(b)}$$

V: volume de la solution extraite.

W: poids de la matière fraîche de l'échantillon.

5.5.7. Paramètres biochimiques

5.5.7.1. Dosage de la proline

La teneur en proline des feuilles a été analysée selon la méthode de TROLL et *al.*, [193]. La proline réagit en milieu acide et chaud avec la ninhydrine, pour donner un composé de couleur rose, soluble dans le toluène. Cette technique consiste à prendre 100 mg de matière végétale sur le tiers médian de l'avant dernière feuille. Un volume de 2 ml de méthanol à 40 % est ajouté. Le mélange est chauffé au bain- Marie à 85°C pendant 60 mn. Après refroidissement, 1 ml d'extrait est prélevé auquel il faut ajouter : 1 ml d'acide acétique, 25 mg de ninhydrine et 1 ml de mélange contenant (120 ml d'eau distillée, 300 ml d'acide acétique, 80 ml d'acide ortho-phosphorique). Le mélange est porté à ébullition pendant 30 minutes où la solution vire vers le rouge. Un volume de 5 ml de toluène est ajouté à la solution

subissant une agitation par vortex. Deux phases se séparent après refroidissement et après déshydratation de la phase supérieure par l'ajout de 5 mg de sulfate de sodium. Après 48 heures, la densité optique (DO) est mesurée à 528 nm en utilisant le spectrophotomètre. La détermination de la teneur en proline est réalisée selon la formule :

$$\text{Proline}(\mu\text{g/g MF}) = \text{Do } 528 \times 0,62$$

5.5.7.2. Dosage des sucres totaux solubles

La teneur en sucres solubles dans les feuilles a été mesurée selon la méthode de DUBOIS et *al.*, [194], qui consiste à mettre 100 mg de matière fraîche végétale dans des tubes à essai puis ajouter 2 ml d'éthanol à 80%. Laisser les tubes fermés au repos pendant 48h. Faire évaporer l'alcool en mettant les tubes à essai dans un bain Marie à 70° C. Après refroidissement, un volume de 20 ml d'eau distillée est ajouté dans chaque tube à essai. Prendre 1 ml de la solution et ajouter 1 ml de phénol à 5 % et bien agiter. Ajouter 5ml d'acide sulfurique concentré, dans chaque tube à essai puis les passer au vortex, les laisser au repos pendant 10 mn puis les passer au bain Marie pendant 15 mn à 30°C. Procéder à la lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 490 nm. La détermination de la teneur des sucres solubles est réalisée selon la formule:

$$\text{Sucres totaux solubles } (\mu\text{g/gMF}) = \text{Do } 490 \times 1,657$$

5.6. Expression des résultats et analyses statistiques des données

Le dispositif expérimental adopté est un plan sans contrôle d'hétérogénéité à randomisation totale.

- Germination des graines

Chaque traitement porte sur 100 graines, soit 4 répétitions de 25 graines par boîte de Pétri.

- Stress salin

Le facteur étudié est l'effet des doses croissantes de NaCl sur la germination des graines et la croissance des plantules. 7 doses ont été testées à savoir : 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30g/l.

Pour la germination, Chaque dose est testée sur 100 graines, soit 4 répétitions de 25 graines par boîte de Pétri.

En ce qui concerne les plantules, chaque dose testée comporte 10 observations, soit au total 70 unités expérimentales.

- Stress hydrique

Trois traitements ont été testés à savoir: 5, 10 et 21 jours de stress induit par un arrêt d'arrosage. Chaque traitement testé comporte 10 observations.

Les données relatives à chaque essai ont fait l'objet d'une analyse de variance (ANOVA) à un facteur de classification et l'analyse de variance multivariée (MANOVA) à l'aide d'un logiciel SPSS© (version 20), puis un classement des moyennes a été effectué à l'aide de test de Tukey à ($\alpha=0,05$).

La corrélation de Pearson a été étudiée entre les doses de sels testées et les différents paramètres étudiés.

De même, la méthode multidimensionnelle choisie est la méthode d'analyse factorielle ou analyse en composantes principales (ACP) qui permet de dégager les relations existantes entre les variables, ce choix a été motivé par la nature des variables à analyser (variables quantitatives).

CHAPITRE 6 : RESULTATS ET DISCUSSION

6.1. Effet des prétraitements sur la germination des graines du *Pistacia atlantica*

La germination des graines de *Pistacia atlantica*, commence par le gonflement et le verdissement des embryons suivis d'une ouverture des cotylédons et de la sortie de la radicule. Après 7 jours, il y'a apparition de l'hypocotyle et l'allongement s'est achevé après 15 jours, les cotylédons sont complètement étalés et le bourgeon épicotylaire prêt à démarrer (figure 6.1).



Figure 6.1: Evolution de la germination des graines.

6.1.1. Taux de germination

Les résultats obtenus montrent que le taux de germination varie considérablement avec les différents prétraitements testés (figure 6.2). La stratification des graines au froid à $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ pendant 30 jours combinée à une scarification mécanique (T8), a permis d'atteindre le taux de germination le

plus élevé (100%). De même, la scarification chimique (T4, T5, T6) et mécanique (T7) a donné des taux de germination élevés avec respectivement 87, 95, 97 et 93%. Cependant, la stratification des graines au froid à $4\pm 1^\circ\text{C}$ à différentes périodes (T1, T2, T3) ont montré des taux de germination moyens soit respectivement 70, 74 et 77%. Les graines non traitées (T0) ont affiché le taux de germination le plus bas (34 %).

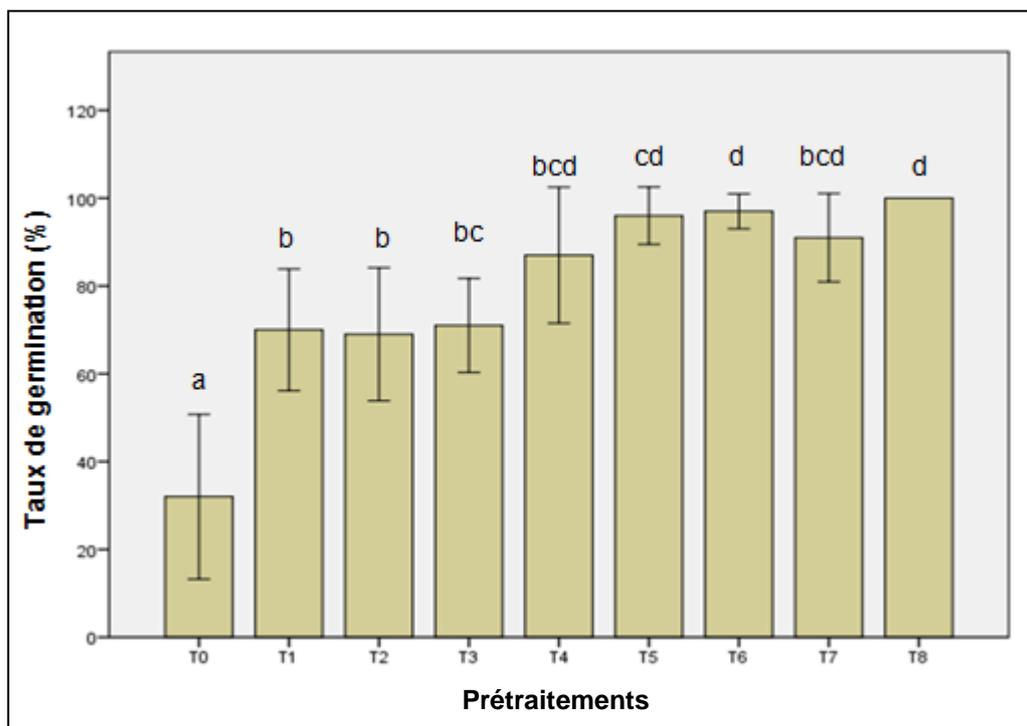


Figure 6.2: Variation du taux de germination des graines prétraitées.

L'analyse statistique a révélé une différence hautement significative entre les prétraitements et le témoin. Le test de Tukey au seuil de 5 % a permis de classer les prétraitements en quatre groupes : a, b, c et d.

Par ailleurs, la figure 6.2 montre une différence non significative entre les différentes durées de stratification au froid à $4\pm 1^\circ\text{C}$ (T1, T2, T3) (groupe b). De même, le test de Tukey a classé les traitements T4, T5 et T6, qui correspondent aux différentes durées de scarification chimique à l'acide sulfurique, dans le même groupe (c). Cependant, le prétraitements des graines par scarification chimique pendant 1 heure (T6), la scarification mécanique des graines (T7) et la combinaison entre la stratification au froid à $4\pm 1^\circ\text{C}$ pendant 30 jours et la scarification mécanique (T8) ont été classés dans le même groupe (d).

6.1.2. Cinétique de germination

La figure 6.3 présente l'évolution de la germination des graines de *Pistacia atlantica* en fonction du temps pour l'ensemble des prétraitements testés. Les résultats montrent que les prétraitements testés ont amélioré la vitesse de germination des graines et ont réduit le temps de latence en accélérant la vitesse de germination. Le lot des graines témoins (T0), n'a commencé à germer qu'à partir du 13^{ème} jour. Le taux de germination augmente progressivement et il n'a atteint son maximum (34%) qu'au 38^{ème} jour. Cependant, les graines stratifiées au froid à différentes périodes (T1, T2 et T3) ont montré une vitesse de germination plus marquée où la germination a commencé dès le 4^{ème}, 10^{ème} et 9^{ème} jour respectivement.

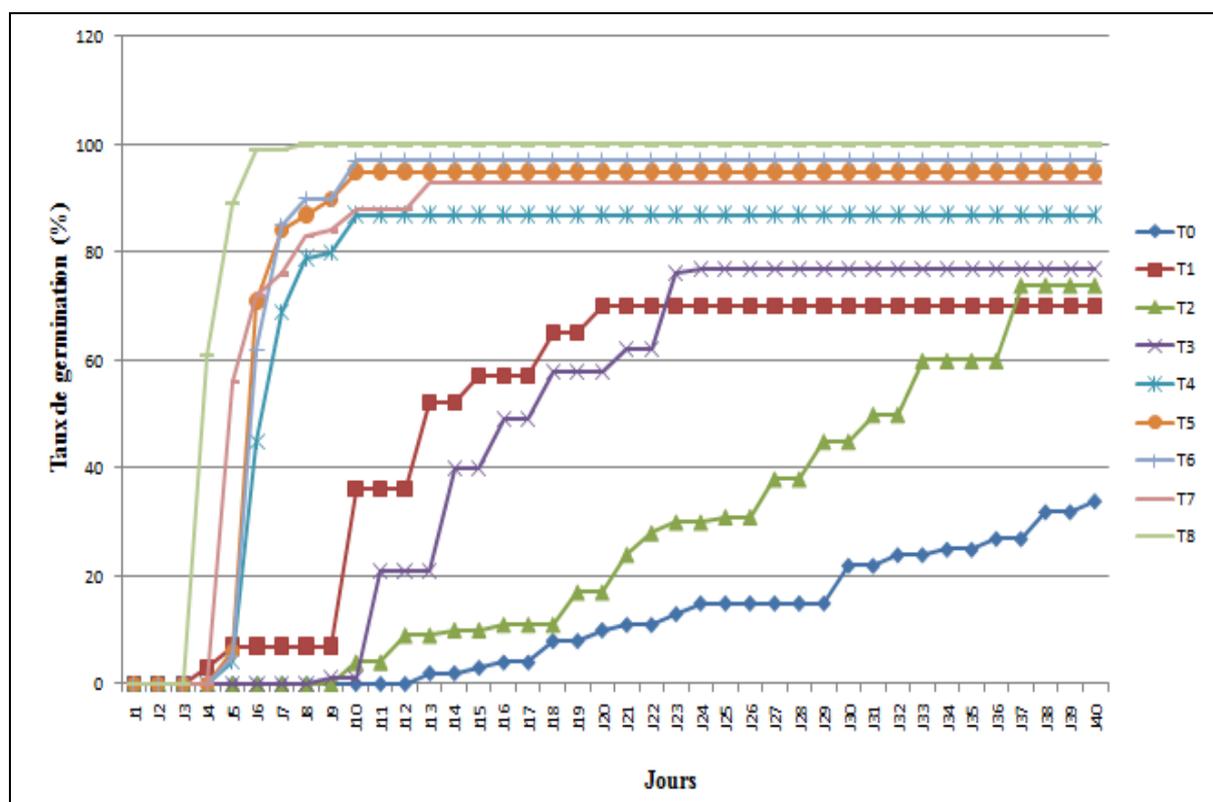


Figure 6.3: Cinétique de germination des graines prétraitées.

Les taux maximum de germination sont atteints au 20^{ème}, 37^{ème} et 24^{ème} jour respectivement pour T1, T2 et T3. Les graines scarifiées chimiquement à l'acide sulfurique et mécaniquement (T4, T5, T6 et T7), n'ont germé qu'au 5^{ème} jour et les taux maximums sont atteints au bout de 10 jours pour les graines scarifiées avec de

l'acide sulfurique et 13 jours pour les graines scarifiées mécaniquement. La vitesse de germination des graines stratifiées au froid à $4\pm 1^\circ\text{C}$ pendant 30 jours et scarifiées (T8) est la plus rapide. La germination s'est déclenchée dès le 4^{ème} jour, avec un taux maximum enregistré de 100% à partir du 8^{ème} jour.

6.1.3. Temps moyen de germination

A travers l'analyse des données de la figure 6.4, nous constatons que la germination des graines de *Pistacia atlantica*, s'étale sur une période comprise entre 4 et 26 jours pour les différents prétraitements testés. On note aussi que les graines stratifiées au froid à $4\pm 1^\circ\text{C}$ pendant 30 jours et scarifiées mécaniquement (T8), présentent le temps moyen de germination le plus court (4 jours). Les temps moyens de germination les plus longs (26 jours) sont enregistrés chez les graines témoins (T0) et celles traitées au froid pendant 30 jours. Les graines scarifiées (chimique et mécanique) présentent des temps moyens de germination similaires (6 jours).

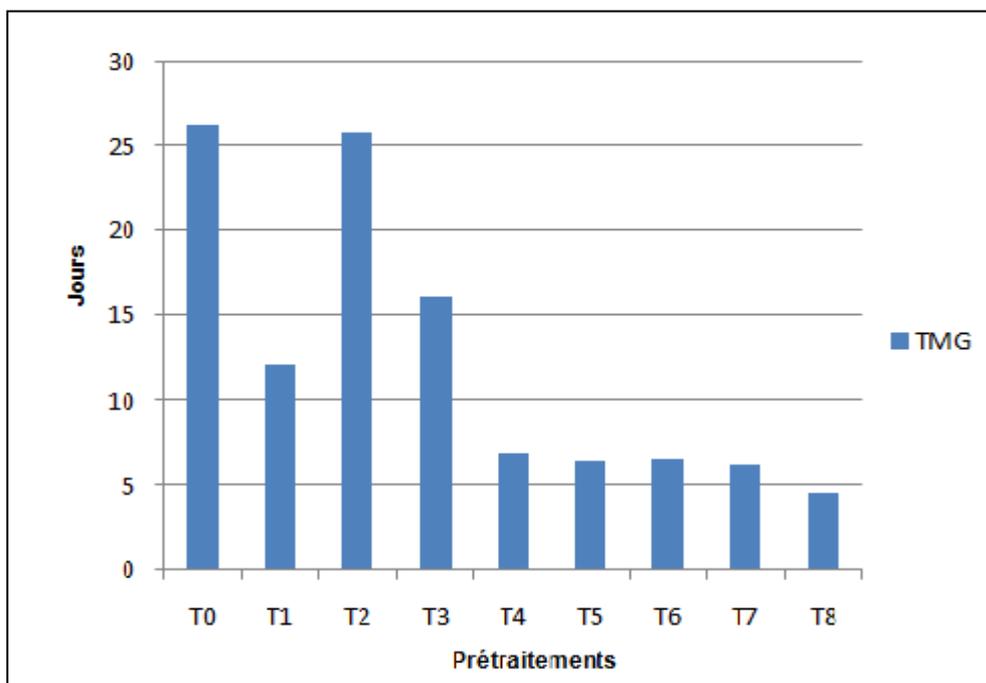


Figure 6.4 : Variation du temps moyen de germination des graines prétraitées de *Pistacia atlantica*.

Discussion

Les résultats obtenus mettent en évidence le rôle capital de la scarification mécanique et chimique pour lever l'inhibition tégumentaire des graines. La scarification chimique en immersion dans l'acide sulfurique pendant 1 heure a permis le ramollissement des téguments des graines en favorisant la germination avec un taux élevé. Ce résultat est confirmé par JAOUADI et *al.*, [197]. Cependant, ALETA et *al.*, [96] rapportent que le taux de germination des graines du pistachier de l'Atlas trempées dans l'acide sulfurique, pendant 10 minutes ne dépasse pas les 80% et ils ont enregistré seulement 30% de graines germées pour une durée d'une heure. Ces mêmes auteurs signalent que la scarification chimique peut conduire à un éclatement des graines qui peut altérer l'embryon. La durée d'immersion dans l'acide sulfurique est différente selon les espèces. Nos résultats sont similaires à ceux décrits par JAOUADI et *al.*, [197] pour les graines d'*Acacia tortilis*. Cependant, des traitements similaires sur une fabacée (*Retama monosperma*) (trempage des graines dans l'acide sulfurique pendant 1, 2 et 3 heures), n'ont permis aucune amélioration des taux de germination [198]. La durée optimale de trempage paraît être en rapport avec la dureté des téguments [199]. Chez l'arganier (*Argania spinosa* L.) réputée par des téguments plus coriaces, aucune graine trempée dans de l'H₂SO₄ concentré pendant 48 heures n'a germé [200]. Les travaux de GUERROUJ et *al.*, [201], ont montré l'effet néfaste de l'acide sulfurique sur les graines de *Medicago arborea* qui se sont montrées très sensibles à un traitement chimique par l'acide sulfurique d'une durée de 4 minutes.

La scarification mécanique a permis aussi d'obtenir un taux de germination élevé (93%) et une diminution de temps moyens de germination. Ce procédé mécanique a donné les mêmes résultats chez les graines d'*Acacia origena*, *Acacia pilispina* et *Pterotobium stellatum* [202] et chez *Parkinsonia aculeata* [203]. La scarification mécanique entraîne l'imbibition rapide du tégument des graines et l'entrée d'eau dans les réserves (albumen) ce qui permet la sortie rapide de la radicule et le déclenchement des réactions métaboliques de l'embryon et des cotylédons [204].

La stratification au froid à $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ s'est montrée également favorable sur la germination des graines du pistachier de l'Atlas. Cependant, nos résultats montrent que les différentes périodes de stratification au froid testées ont le même effet sur l'amélioration de taux de germination des graines. YAAQOBI et *al.*, [82] ont montré que la durée de stratification au froid à $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ améliore le potentiel germinatif des graines du pistachier de l'Atlas. En effet, une durée de stratification entre 14 à 30 jours a une influence significative sur le taux de germination [205 ; 206]. Nos résultats corroborent avec ces résultats cités.

D'autre part, un taux de germination très élevé (100 %), a été enregistré chez les graines du pistachier de l'Atlas après une stratification au froid à $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ pendant 30 jours suivi par une scarification mécanique. Ce résultat a permis de faire ressortir que la stratification au froid combinée à la scarification constitue une méthode efficace permettant la levée de la dormance embryonnaire et tégumentaire.

Le temps moyen de germination est fortement influencé par les différents prétraitements utilisés. Les résultats ont mis en évidence que le meilleur temps moyen de germination (4 jours) a été obtenu chez les graines qui ont subi une stratification au froid pendant 30 jours combinée à une scarification mécanique. Les graines traitées à l'acide sulfurique ont également montré un temps moyen de germination court (6 jours). Nos résultats concordent avec ceux de JAOUADI et *al.*, [197] qui ont montré que l'utilisation de l'acide sulfurique améliore le temps moyen de germination chez les graines d'Acacia.

6.2. Effet du stress salin chez le pistachier de l'Atlas

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet des différentes concentrations en NaCl sur la germination et la croissance des plantules du pistachier de l'Atlas.

6.2.1. Effet du stress salin sur la germination

L'effet des différentes concentrations en NaCl sur la germination a été estimé par la mesure des paramètres suivants:

6.2.1.1. Taux de germination

Les résultats obtenus après 23 jours de culture montrent que le taux de germination des graines stressées est réduit comparativement aux graines témoins et ceci pour toutes les concentrations testées. Ceci est confirmé par l'analyse de la variance qui a montré une différence très hautement significative entre les concentrations testées en NaCl sur la germination ($p=0,000$).

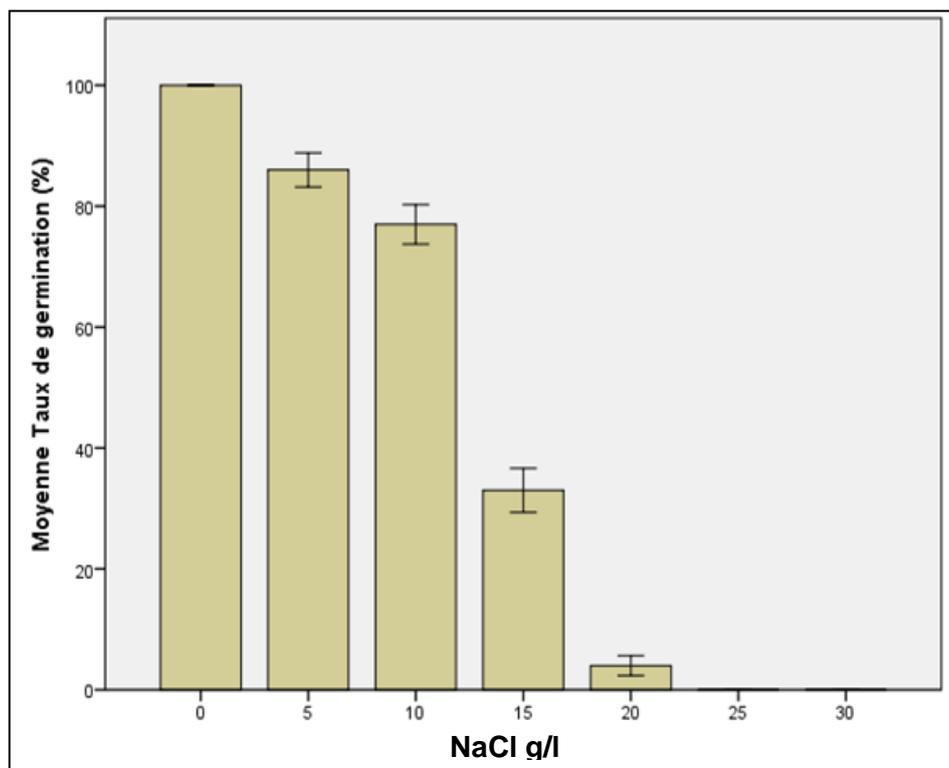


Figure 6.5: Variation du taux de germination des graines de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin.

Le pourcentage de germination diminue significativement avec l'augmentation de la concentration en NaCl. Le meilleur taux de germination est enregistré chez les graines témoins (100 %). Les graines stressées par 5 et 10 g/l de NaCl ont montré des taux de germination importants avec 86 % et 77 % respectivement. Les graines stressées avec une solution de 15% g/l de sel ont enregistré un taux de germination moyen (33%). La concentration de 20 g/l a permis d'enregistrer un taux de germination très faible de 4%. Notons que la germination est complètement inhibée à 25 et 30 g/l de solution saline.

6.2.1.2. Cinétique de germination

Les courbes de la cinétique de germination pour le témoin et le traitement 5 g/l de NaCl sont pratiquement semblable (figure 6.6).

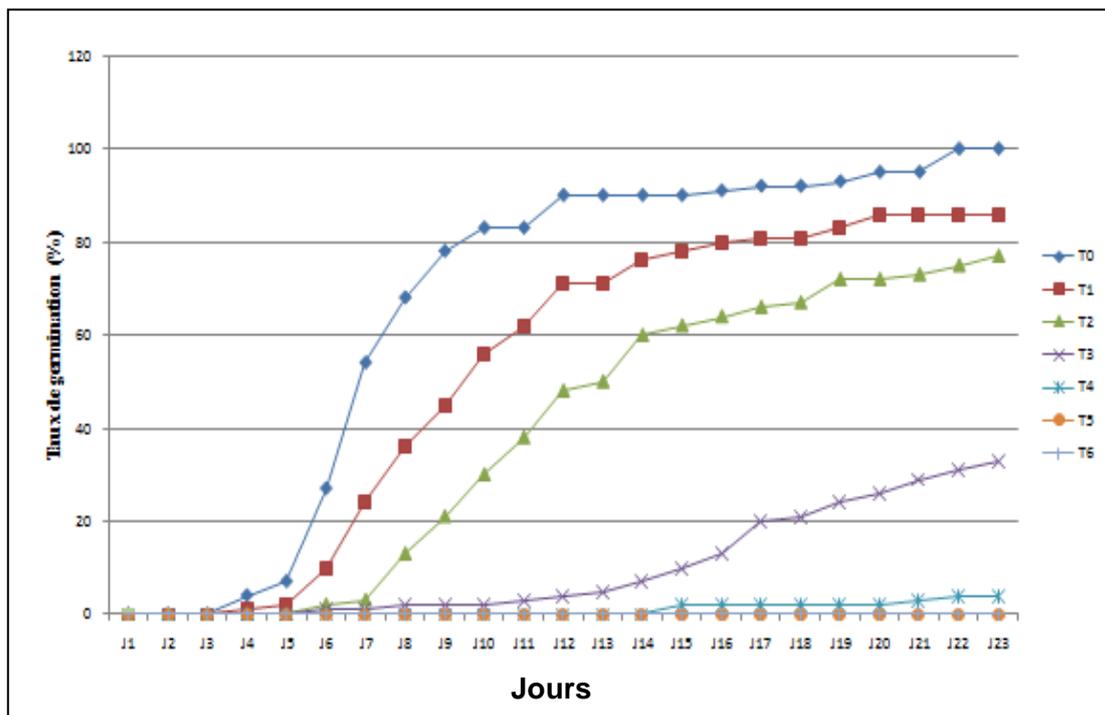


Figure 6.6: Cinétique de germination des graines de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin.

En effet, pour les trois traitements (témoin, 5 et 10 g/l de NaCl) les courbes de germination ont une allure similaire. Entre 0 et 15 jours, les pourcentages de germination augmentent fortement pour atteindre chez les graines du lot témoin 90% (15^{ème} jour) et 78% chez les graines stressées par 5 g/l et 62% chez celles traitées par 10 g/l.

6.2.1.3 Temps moyen de germination

Le temps moyen de germination augmente en fonction de l'augmentation de la concentration en NaCl. Le temps moyen de germination le plus court (8 jours) est enregistré chez les graines du lot témoin et les celles du lot traité par 5g/l (figure 6.7).

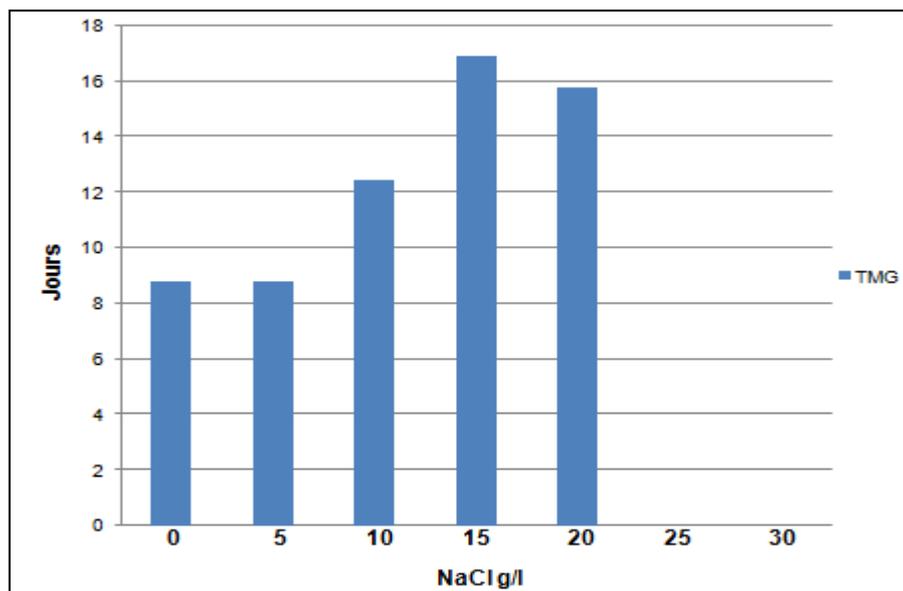


Figure 6.7: Variation du temps moyen de germination des graines de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin

Les résultats obtenus montrent que le stress salin a nettement augmenté le temps moyen de germination, il passe en moyenne de 8,78 jours chez les graines du lot témoin à 15,75 en moyenne chez les graines arrosées avec une solution de 20 g/l de NaCl.

Discussion

Les concentrations du sel ont un effet considérable sur le taux de germination. Les graines du pistachier de l'Atlas germent mieux en absence du sel ou dans un milieu à faible concentration en sel (5 g/l). Une réduction se produit sous l'augmentation des concentrations en sel. Une inhibition de la germination est observée pour les graines exposées à une forte salinité (à partir de 20 g/l de NaCl). Les résultats obtenus montrent que les graines du pistachier de l'Atlas sont tolérantes et capables de germer même en présence de fortes doses en sels atteignant jusqu'à 15 g/l. Une diminution du taux de germination est observée avec l'augmentation des concentrations en sels. Une étude effectuée sur les graines de l'arganier, REDA TAZI et al., [207] rapporte un effet hautement significatif du sel sur la germination des graines, notamment chez les amandes semées à des concentrations de 7 et 9 g/l de NaCl. D'après PRADO et al., [208], la diminution du taux de germination des graines soumises à un stress salin serait due à un

processus de dormance osmotique développé sous les conditions de stress. Les graines développent une stratégie d'adaptation à l'égard des contraintes environnementales. Selon les mêmes auteurs, la conversion de carbohydrates en sucres solubles jouant le rôle de régulation osmotique au niveau des cellules embryonnaires en phase de germination est alors inhibée.

Nos résultats corroborent avec les travaux de NDOUR et DANTHU, [209], sur *l'Acacia tortilis raddiana* qui ont montré que les graines sont particulièrement tolérantes et qu'elles sont capables de germer après un traitement allant jusqu'à 22 g/l de NaCl. D'après NDOUR et *al.*, [209], la germination de l'espèce *A. tortilis* ne s'annule que pour des concentrations en sels proches de celles de l'eau de mer (35 g/l). Dans notre étude, nous avons remarqué que la germination est inhibée à 25 g/l de NaCl. En effet, il existe une relation entre la tolérance à la salinité au moment de la germination et l'écologie de chaque espèce. Dans ce sens, NEFFATI, [199], signale que la connaissance de la tolérance de la salinité au moment de la germination est une information utile mais non suffisante pour expliquer la distribution des espèces et leur développement dans les milieux semi-arides et arides.

Par ailleurs, plusieurs auteurs montrent que la germination des graines est stimulée en présence des sels, vue la caractéristique halophyte observée notamment chez l'*Atriplex* [210 ; 211 ; 197].

6.2.2. Effet du stress salin sur les plantules du pistachier de l'Atlas

L'effet du stress salin sur la croissance des plantules du pistachier de l'Atlas, a été étudié à travers des mesures morphologiques et des analyses physiologiques et biochimiques.

6.2.2.1. Effet du stress salin sur les paramètres morphologiques

Les paramètres mesurés ont concerné la croissance en longueur et la biomasse fraîche et sèche de la partie aérienne et souterraine.

6.2.2.1.1. Croissance en longueur

Les résultats obtenus montrent que les différentes concentrations de NaCl ont un effet sur la croissance en longueur des tiges et des racines. Après un mois de stress, nous avons remarqué le début de dessèchement des feuilles âgées des plantules stressées par 20, 25 et 30 g/l de NaCl (figure 6.8). La prolongation de la durée du stress (au-delà d'un mois) a entraîné le dessèchement de l'ensemble de feuilles (jeunes et âgées) suivie par une chute.

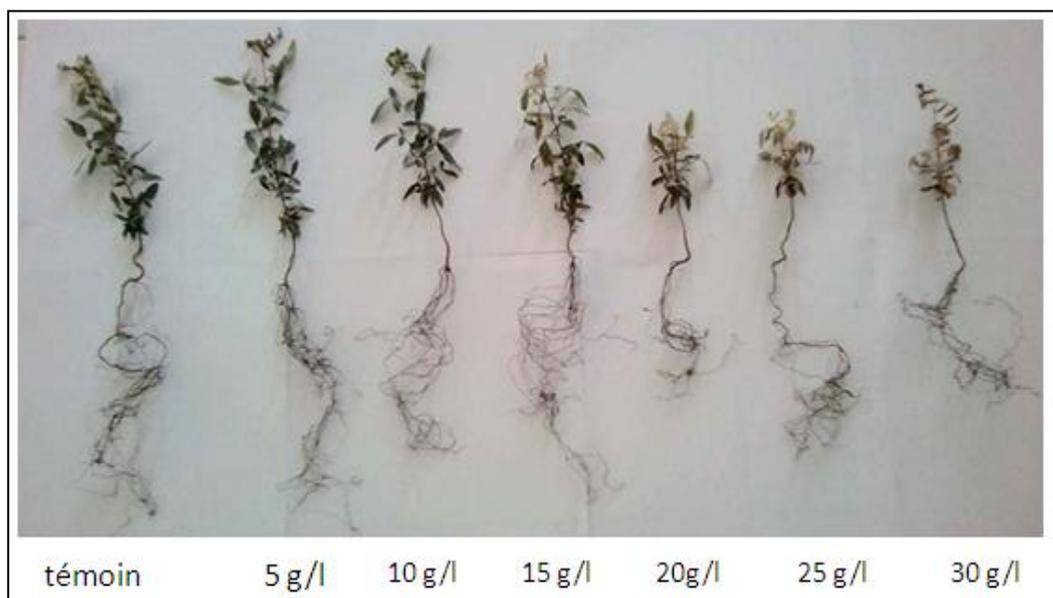


Figure 6.8: Plantules de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin durant un mois .

L'analyse de la variance à un seul critère de classification montre une différence hautement significative entre les moyennes de la longueur de la tige ($p=0,003$). Une différence significative est révélée entre les moyennes de la longueur des racines ($p<0,000$) (Annexe A).

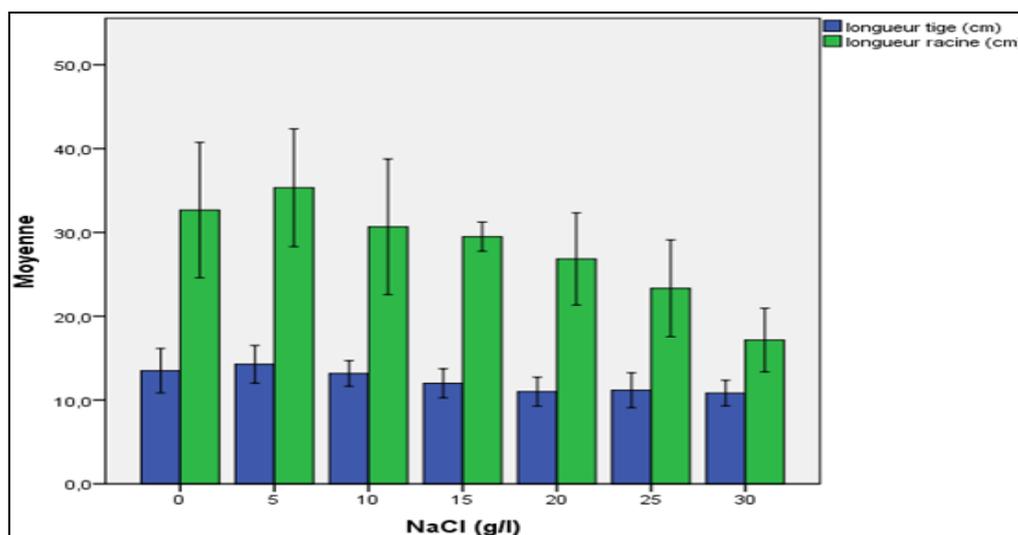


Figure 6.9: Variation de la longueur de la tige et de la racine des plantules de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin.

La dose de 5 g/l a induit un effet positif sur la croissance en longueur de la tige en provoquant une légère augmentation (14,27 cm) comparé aux plantules témoins avec une moyenne de 13,5 cm soit une hausse de 5,7%. En revanche, les concentrations supérieures à 5 g/l ont induit une diminution progressive de la longueur de la tige par rapport aux plantules témoins soit une baisse de 19,77 % en présence de 30 g/l (figure 6.9). Le test de Tukey au seuil de 5% a classé les différents traitements testés en deux groupes homogènes (tableau 6.1).

Tableau 6.1: Croissance en longueur : test de signification de Tukey à ($\alpha=0,05$).

	0 g/l	5 g/l	10 g/l	15 g/l	20 g/l	25 g/l	30 g/l
Longueur Tige (cm)	13,50	14,27	13,17	12,00	11,00	11,16	10,83
	±	±	±	±	±	±	±
	1,32	1,12	0,76	0,86	0,86	1,04	0,76
Groupes Homogènes	ab	a	ab	ab	b	b	b
Longueur Racine (cm)	32,66	35,33	30,66	29,50	26,83	23,33	17,16
	±	±	±	±	±	±	±
	2,08	3,51	1,52	0,86	2,75	2,88	1,89
Groupes Homogènes	a	a	ab	ab	ab	bc	c
Rapport racine/tige	2,42	2,48	2,33	2,46	2,44	2,11	1,59
	±	±	±	±	±	±	±
	0,16	0,27	0,31	0,23	0,20	0,41	0,25
Groupes Homogènes	a	a	ab	a	a	ab	b

Le coefficient de corrélation de *Pearson* (Annexe B) révèle une corrélation négative ($r = -0,779$) et hautement significative ($p=0,000$) entre les concentrations de NaCl et la longueur de la tige.

L'allongement le plus important de la racine est enregistré chez les plantules stressées par 5 g/l de NaCl (35,33 cm) avec une hausse de 8,18 % par rapport aux plantules témoins (32,66 cm) (figure 6.9). Une diminution progressive de la longueur de la racine est observée avec l'augmentation des concentrations en sels. La dose 30 g/l de NaCl a provoqué une réduction de la longueur racinaire estimée à 47,45 % par rapport au témoin. L'analyse de la variance à un critère de classification confirme ces résultats en montrant une différence significative entre les moyennes de la longueur des racines chez *Pistacia atlantica*. Trois groupes homogènes différents se distinguent selon le test de Tukey au seuil de 5 % (tableau 6.1).

La corrélation entre la longueur de la racine et le traitement salin est fortement prononcée ($r = -0,857$) avec une tendance négative (Annexe B).

L'analyse de l'effet de NaCl sur la longueur des tiges et des racines est complétée par l'analyse du rapport en longueur de racine/tige. Les résultats sont illustrés sur la figure (6.10). La valeur maximale du rapport (2,48) est observée chez les plantules stressées par 5 g/l de NaCl. Par ailleurs, nous remarquons que l'augmentation des concentrations en sels provoque une diminution progressive du rapport de la longueur racine/tige. L'analyse de la variance (annexe A) à un seul critère de classification montre un effet significatif des doses de sels sur le rapport racine/tige ($p=0,015$).

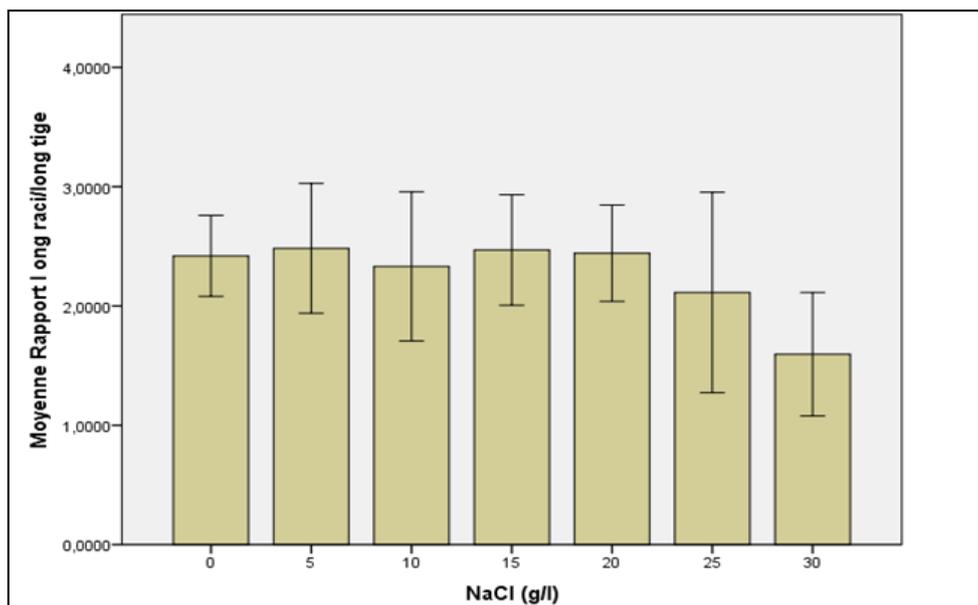


Figure 6.10: Variation du rapport de la longueur racine/tige des plantules de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin.

6.2.2.1.2. Biomasse fraîche et sèche

Les résultats de la biomasse fraîche et sèche de la partie aérienne et souterraine sont reportés sur la figure 6.11.

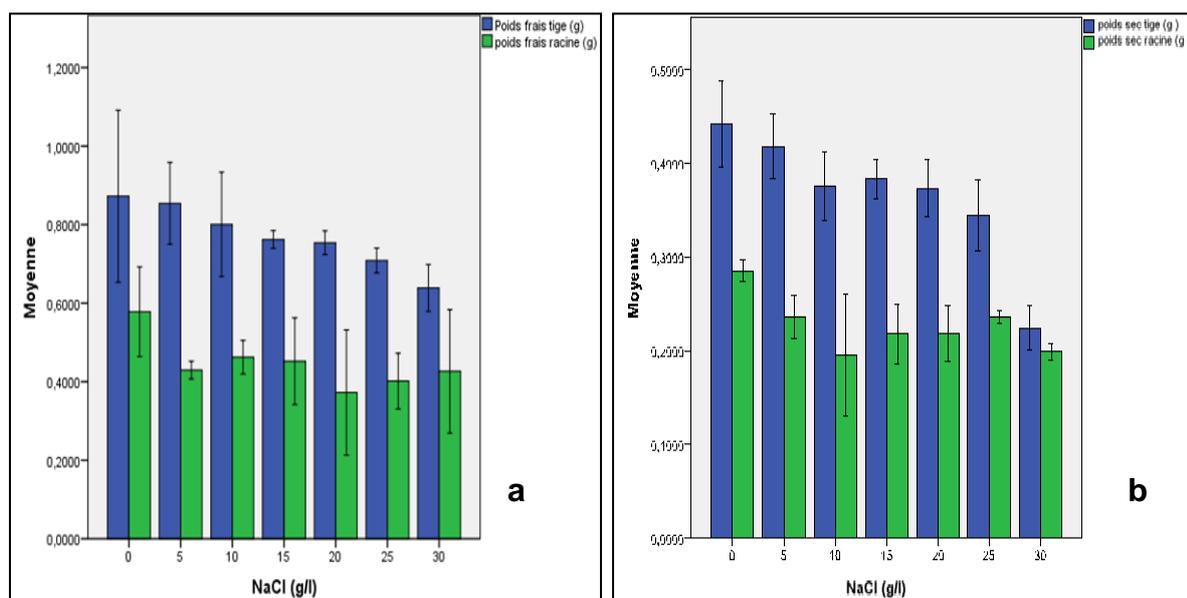


Figure 6.11 : Variation de la biomasse fraîche (a) et sèche (b) de la partie aérienne et souterraine des plantules de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin.

Les résultats obtenus montrent que le poids frais de la partie aérienne (tiges et feuilles) est caractérisé par une fluctuation due aux différentes concentrations salines. L'analyse de la variance a révélé une différence significative ($p=,002$). Ceci peut s'expliquer par une réduction significative de la production de la matière fraîche. Cependant, l'analyse de la variance ne révèle aucune différence entre les plantules témoins et celles traitées par 5, 10, 15 et 20 g/l de NaCl ($p= 0,175$). Le test de Tukey a classé ces traitements dans le même groupe (a) que le témoin (tableau 6.2). En revanche, les plantules stressées par 25 et 30 g/l élaborent moins de matière fraîche et enregistrent des valeurs voisines de 0,709 et 0,639 g respectivement. Ces deux traitements sont classés dans le même groupe (b) (tableau 6.2).

Les résultats relatifs au poids frais de la partie racinaire montrent que les différentes concentrations en NaCl, ont un effet significatif sur la production de la matière fraîche de la partie racinaire ($p=0,01$). Les plantules témoins présentent le poids moyen le plus élevé avec une valeur de 0,578 g suivies par les plantules stressées par 10 et 15 g/l de NaCl qui enregistrent des valeurs estimées à 0,462 et 0,452 g respectivement.

Le coefficient de Pearson révèle une corrélation négative ($r = -0,848$ et $r = - 0,571$) et hautement significative ($p=0,000$) entre la concentration en NaCl et la biomasse fraîche (Annexe B).

Nous relevons que les différentes concentrations en sels ont un effet significatif sur la production sèche de la partie aérienne ($p=0,003$). La réduction significative de la matière sèche se voit clairement chez les plantules stressées par 25 et 30 g/l de NaCl. En revanche, le traitement salin n'a pas eu un impact significatif sur la production de la matière sèche du système racinaire ($P= 0,201$). Les plantules témoins et celles stressées présentent des valeurs voisines qui oscillent entre 0,19 g et 0,29 g et sont toutes classées dans le même groupe selon le test de Tukey (tableau 6.2).

Le coefficient de Pearson révèle une corrélation négative ($r = - 0,774$) et hautement significative ($p=0,000$) entre la concentration en NaCl et le poids sec de la tige (Annexe B). De même, une corrélation négative ($r = - 0,252$) et non significative

($p=0,271$) a été enregistrée entre la concentration en NaCl et le poids sec de la racine.

Tableau 6.2: Biomasse fraîche et sèche : test de signification de Tukey à ($\alpha=0,05$).

	0 g/l	5 g/l	10 g/l	15 g/l	20 g/l	25 g/l	30 g/l
Poids frais							
tige (g)	0,872	0,854	0,800	0,762	0,754	0,708	0,639
	±	±	±	±	±	±	±
	0,109	0,052	0,066	0,011	0,015	0,015	0,137
Groupes Homogènes							
	a	ab	ab	abc	abc	bc	c
Poids frais							
racine (g)	0,578	0,429	0,462	0,452	0,372	0,401	0,426
	±	±	±	±	±	±	±
	0,057	0,011	0,021	0,055	0,079	0,035	0,078
Groupes Homogènes							
	a	ab	ab	ab	b	b	b
Poids sec							
tige (g)	0,442	0,442	0,402	0,370	0,356	0,344	0,224
	±	±	±	±	±	±	±
	0,077	0,053	0,063	0,033	0,052	0,019	0,035
Groupes Homogènes							
	a	a	ab	a	a	ab	b
Poids sec							
racine (g)	0,281	0,236	0,195	0,218	0,219	0,236	0,232
	±	±	±	±	±	±	±
	0,007	0,054	0,032	0,016	0,032	0,036	0,060
Groupes Homogènes							
	a	a	a	a	a	a	a

6.2.2.1.3. Surface foliaire

La figure (6.12) montre que les différentes concentrations ont un effet significatif sur la surface foliaire. La valeur maximale est enregistrée chez les plantules arrosées avec une concentration de 5 g/l de NaCl, où nous notons une

surface foliaire de 3,67 cm² avec une augmentation de 13,35% par rapport aux plantules témoins. Plus la contrainte saline devient sévère, plus la surface foliaire rétrécie.

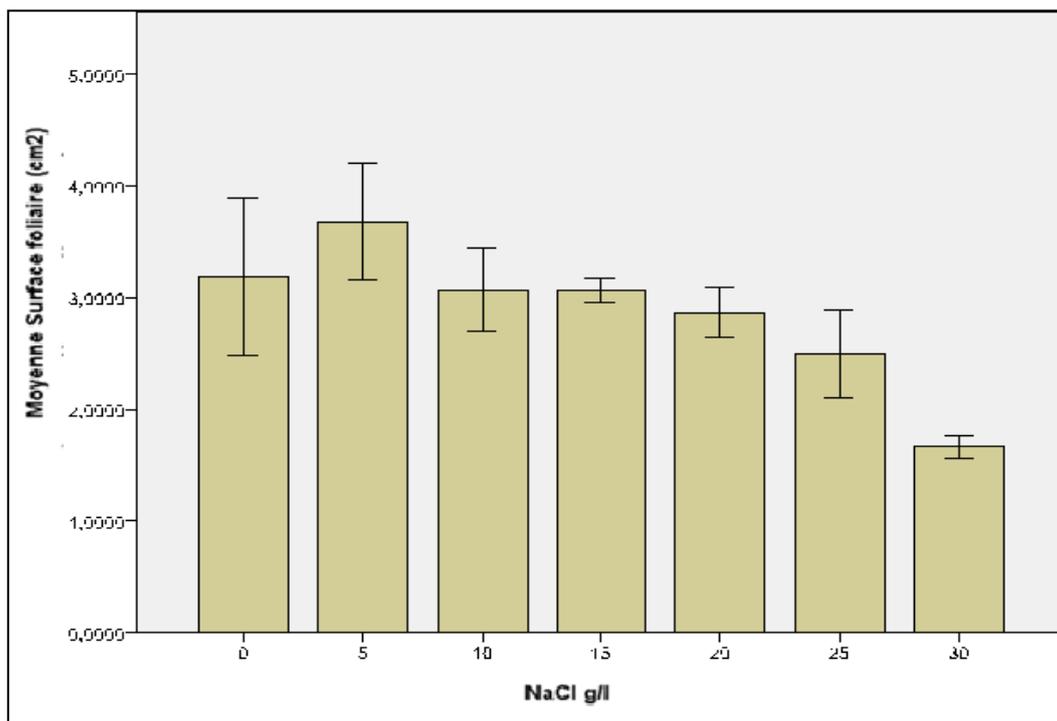


Figure 6.12 : Variation de la surface foliaire des plantules de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin.

En présence de la plus forte concentration en NaCl (30 g/l), nous assistons à une réduction de l'ordre de 62,24 % par rapport aux plantules témoins. Ces résultats sont confirmés par l'analyse de la variance au seuil de 5% (Annexe A), qui montre qu'il y'a une différence significative entre les moyennes de la surface foliaire ($p=0.019$).

Le coefficient de corrélation de *Pearson* (Annexe B) indique qu'il existe une corrélation très hautement significative entre la concentration en NaCl et la surface foliaire ($p=0,000$).

6.2.2.2. Effet du stress salin sur les paramètres physiologiques

Les paramètres analysés ont concerné la teneur relative en eau et les pigments chlorophylliens.

6.2.2.2.1. Teneur relative en eau

La figure (6.13) montre que la teneur relative en eau (TRE) des feuilles augmente jusqu'à 89,72% en moyenne en présence de 5 g/l par rapport aux plantules témoins (88,85 %). L'analyse de la variance montre une différence non significative entre ces deux traitements. La TRE baisse progressivement en fonction de l'augmentation des concentrations en NaCl. En présence de 30 g/l, la TRE chute considérablement et atteint 55,58 % soit une baisse de 59,86 % par rapport aux plantules témoins. Nous notons une différence très hautement significative au seuil de 5%. Le test de Tukey a classé les moyennes en cinq groupes homogènes (tableau 6.3)

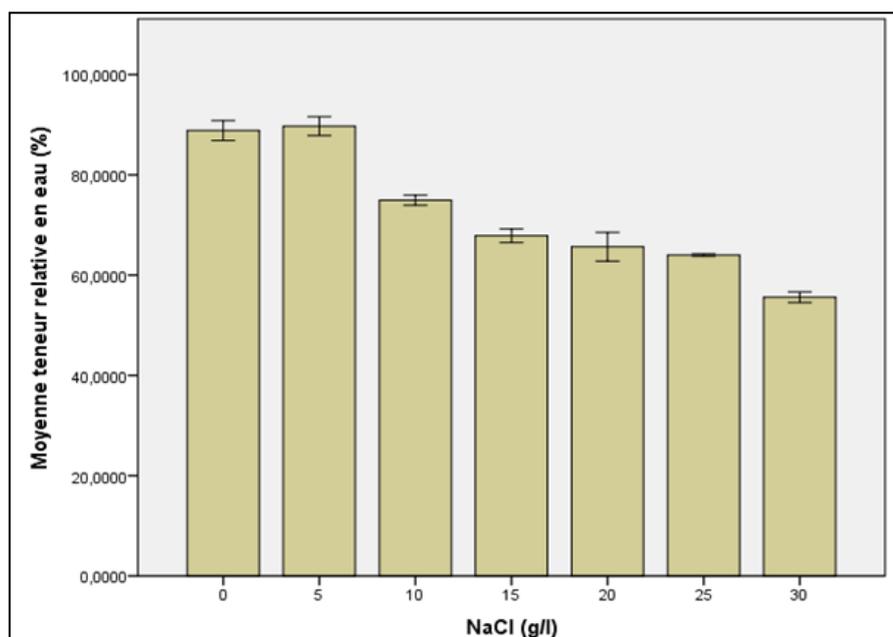


Figure 6.13 : Variation de la teneur relative en eau des feuilles des plantules de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin.

Tableau 6.3: Teneur relative en eau : test de signification de Tukey à ($\alpha = 5\%$).

	0 g/l	5 g/l	10 g/l	15 g/l	20 g/l	25 g/l	30 g/l
TRE	88,85	89,72	74,95	67,86	65,65	63,98	55,58
(%)	±	±	±	±	±	±	±
	1,993	1,901	0,502	0,677	1,443	0,110	0,535
Groupes Homogènes	a	a	b	c	cd	d	e

L'étude de la relation entre la concentration de NaCl et la teneur relative en eau montre une forte corrélation négative et hautement significative (Annexe B).

6.2.2.2.2. Teneur en pigments chlorophylliens

La figure (6.14), illustre les résultats obtenus, nous remarquons que les différentes concentrations en NaCl ont provoqué une diminution significative de teneurs en chlorophylle (a). Cependant, la teneur en chlorophylle (b) n'a pas été significativement affectée par le stress salin (tableau 6.4).

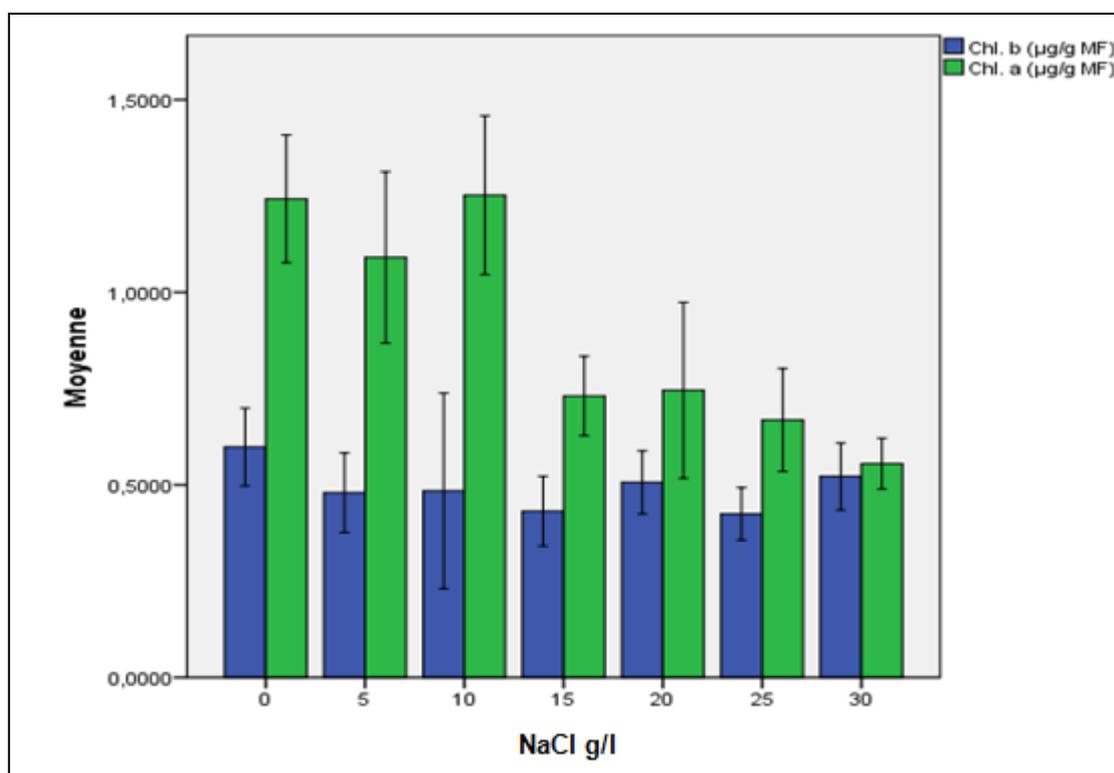


Figure 6.14 : Variation de la teneur en chlorophylle (a), (b) des plantules de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin.

Une baisse de 56 % de la teneur en chlorophylle (a) et 42% de la chlorophylle totale sont enregistrées chez les plantules en présence de 30 g/l de NaCl par rapport aux plantules témoins. L'étude de la relation entre la concentration en NaCl et les teneur en pigments chlorophylliens montre une corrélation négative (annexe B).

Tableau 6.4: Teneur en chlorophylle: test de signification de Tukey à ($\alpha = 5\%$).

	0 g/l	5 g/l	10 g/l	15 g/l	20 g/l	25 g/l	30 g/l
Teneur en chlorophylle(a) (mg/g MF)	1,24 ± 0,082	1,09 ± 0,111	1,24 ± 0,286	0,73 ± 0,051	0,74 ± 0,114	0,66 ± 0,066	0,55 ± 0,033
Groupes Homogènes	a	ab	a	bc	bc	c	c
Teneur en chlorophylle(b) (mg/g MF)	0,59 ± 0,050	0,48 ± 0,051	0,48 ± 0,127	0,43 ± 0,045	0,50 ± 0,041	0,42 ± 0,034	0,52 ± 0,043
Groupes Homogènes	a	a	a	a	a	a	a
Teneur en chlorophylle totale(a+b) (mg/g MF)	1,83 ± 0,100	1,57 ± 0,161	1,72 ± 0,238	1,16 ± 0,006	1,24 ± 0,119	1,08 ± 0,093	1,07 ± 0,075
Groupes Homogènes	a	ab	a	c	bc	c	c

6.2.2.3. Effet du stress salin sur les paramètres biochimiques

Les paramètres analysés ont concerné la teneur en proline et sucres solubles.

6.2.2.3.1. Teneur en proline

Les résultats obtenus montrent que les différentes concentrations en NaCl ont induit une augmentation progressive de la teneur en proline dans tous les organes (feuilles, racine, tige) en fonction de l'intensité du stress (figure 6.15).

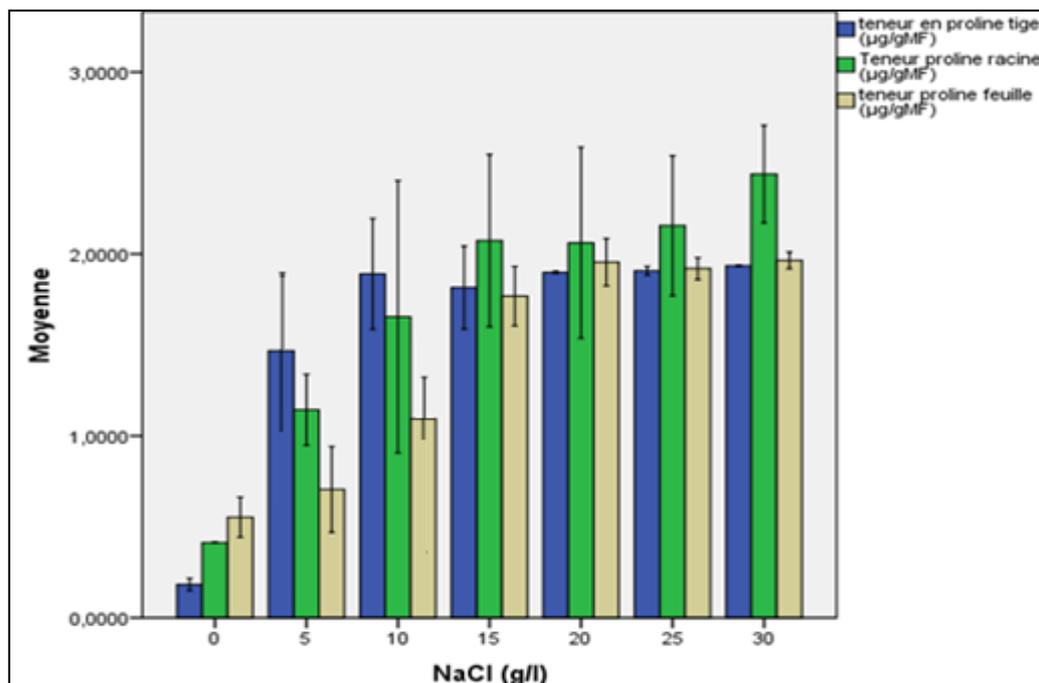


Figure 6.15 : Variation de la teneur en proline dans les différents organes (feuilles, tiges et racines) des plantules de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin.

Les teneurs en proline fluctuent selon l'organe et le traitement salin. En effet, le stress salin a provoqué une accumulation importante de la proline au niveau des racines, cette accumulation est cinq fois plus élevée dans les plantes stressées à 15, 20, 25, et 30 g/l de NaCl avec des valeurs respectives (2,06 ; 2,07 ; 2,15 et 2,43 µg/g MF) comparativement au témoin où nous enregistrons 0,41 µg/g MF. Cependant, dans les feuilles et les tiges l'accumulation de la proline est similaire ; les valeurs enregistrées sont voisines. En présence de faibles concentrations en sels (5 g/l), on note une accumulation non significative de la proline au niveau des feuilles et significative au niveau des tiges et racines. Par contre, à partir de la concentration 10 g/l de NaCl l'accumulation de la proline est hautement significative dans tous les organes de la plantule.

Le tableau (6.5) montre les différents groupes homogènes obtenus par le test de Tukey à ($\alpha = 5\%$). Une forte corrélation positive a été enregistrée entre la concentration en NaCl et l'accumulation de la proline dans les organes des plantules stressées (Annexe B).

Tableau 6.5: Teneur en proline : test de signification de Tukey à ($\alpha = 5\%$).

	0 g/l	5 g/l	10 g/l	15 g/l	20 g/l	25 g/l	30 g/l
Teneur en proline feuilles ($\mu\text{g/g MF}$)	0,55 \pm 0,055	0,71 \pm 0,117	1,09 \pm 0,3661	1,77 \pm 0,081	1,92 \pm 0,065	1,95 \pm 0,030	1,96 \pm 0,022
Groupes Homogènes	a	ab	b	c	c	c	c
Teneur en proline tige ($\mu\text{g/g MF}$)	0,18 \pm 0,016	1,47 \pm 0,427	1,89 \pm 0,1524	1,81 \pm 0,113	1,89 \pm 0,002	1,90 \pm 0,012	1,93 \pm 0,001
Groupes Homogènes	a	b	b	b	b	b	b
Teneur en proline racine ($\mu\text{g/g MF}$)	0,41 \pm 0,007	1,14 \pm 0,097	1,65 \pm 0,374	2,06 \pm 0,236	2,07 \pm 0,262	2,15 \pm 0,19	2,44 \pm 0,134
Groupes Homogènes	a	b	bc	bc	bc	bc	c

6.2.2.3. 2. Teneur en sucres solubles

Le tableau (6.6) et la figure (6.16) représentent les variations de la teneur en sucres solubles des plantules du pistachier de l'Atlas soumises aux différentes concentrations en NaCl.

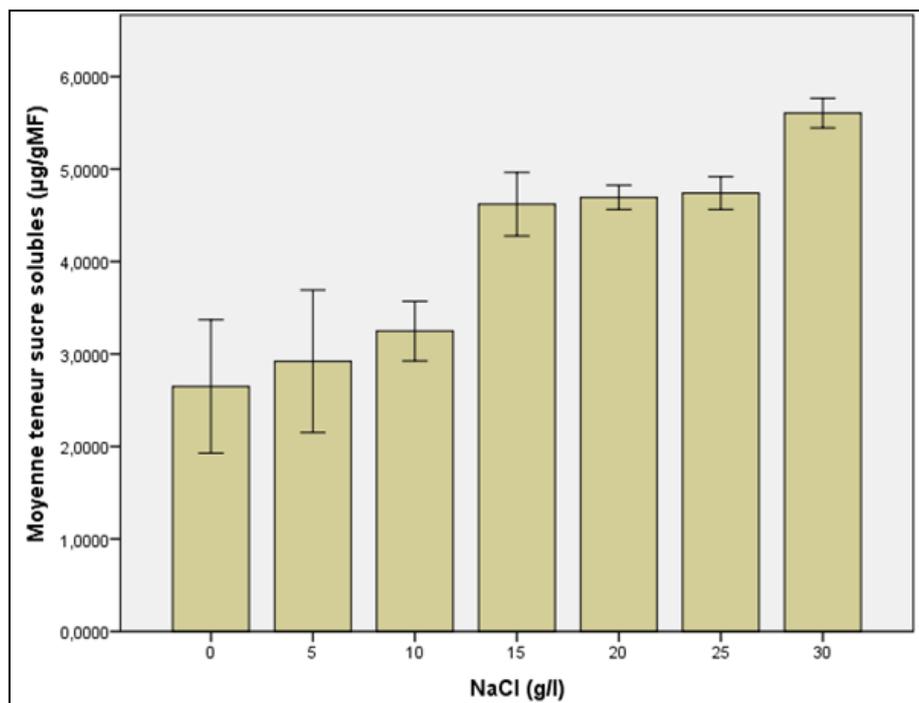


Figure 6.16 : Variation de la teneur en sucres solubles des plantules de *Pistacia atlantica* soumises au stress salin.

La teneur en sucres solubles croît significativement avec l'augmentation de la concentration en sels ($p=0,000$). Les doses 5 et 10 g/l ont induit une légère augmentation de la teneur en sucres solubles, les valeurs estimées sont 2,92 et 3,25 µg/g MF par rapport au témoin (2,65 µg/g MF). Le test de Tukey révèle une différence non significative de la teneur en sucres solubles de ces deux traitements comparés au témoin. Il classe ces traitements (5 et 10 g/l de NaCl) dans le même groupe (a) que le témoin (tableau 6.6).

L'accumulation des sucres solubles est significative à partir de la dose 15 g/l de NaCl avec une valeur de 4,62 µg/g MF soit 74 % par rapport au témoin (2,65 µg/g MF). D'après ce résultat, on remarque que la teneur en sucres solubles en présence de 15 g/l de NaCl double de valeur par rapport au témoin. A partir de cette dose, la teneur en sucres solubles a augmenté progressivement pour atteindre son maximum (5,60 µg/g MF) en présence de 30 g/l de NaCl soit une hausse qui dépasse 100 % par rapport au témoin. Le coefficient de Pearson a révélé une forte corrélation positive ($r = 0,947$) et est très hautement significative ($p = 0,000$) (Annexe B).

Tableau 6.6 : Teneur en sucres solubles : test de signification de Tukey à

(α = 5 %).

	0 g/l	5 g/l	10 g/l	15 g/l	20 g/l	25 g/l	30 g/l
Teneur en sucres solubles (µg/g MF)	2,65	2,92	3,25	4,62	4,69	4,74	5,60
	±	±	±	±	±	±	±
	0,360	0,385	0,161	0,171	0,065	0,088	0,080
Groupes Homogènes	a	a	a	b	b	b	c

6.2.3. Interaction entre les paramètres morphologiques et physiologiques

L'examen de la matrice de corrélation (tableau 6.7) entre variables révèle les résultats suivant :

- la teneur relative en eau est positivement corrélée avec la longueur de la tige et de la racine ($r = 0,813$ et $r = 0,843$ respectivement), la surface foliaire ($r = 0,699$), le poids frais et sec de la tige ($r = 0,838$ et $r = 0,749$ respectivement). Pour la biomasse de la racine, nous avons enregistré une corrélation moyenne ($r = 0,490$) entre la teneur relative en eau et le poids frais de la racine et une corrélation faible ($r = 0,288$) et non significative avec le poids sec de la racine.

- la teneur relative en eau est positivement corrélée avec celle de la chlorophylle totale ($r = 0,808$).

- la teneur en chlorophylle totale est positivement corrélée avec la longueur de la tige et de la racine ($r = 0,720$ et $r = 0,738$ respectivement), le poids frais et sec de la tige ($r = 0,787$ et $r = 0,719$ respectivement). Une faible corrélation ($r = 0,155$) non significative a été enregistrée entre la teneur en chlorophylle totale et le poids sec de la racine.

Tableau 6.7: Matrice de corrélation entre les paramètres morphologiques et physiologiques.

	LT	LR	PFT	PFR	PST	PSR	SF	TRE	Chl. T
LT	1	0,725**	0,743**	,389	,633**	-,070	,778**	0,813**	0,720**
LR		1	0,871**	,459*	,843**	0,115	,656**	0,843**	0,738**
PFT			1	,501*	,908**	0,219	,692**	0,838**	0,787**
PFR				1	,430	0,527*	,069	0,490*	0,590**
PST					1	0,254	0,623	0,749**	0,719**
PSR						1	-,122	0,288	0,155
SF							1	0,699**	,495*
TRE								1	0,808**
Chl. T									1

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

* . La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

L'analyse en composante principale a fait ressortir deux composantes. La première composante a absorbé 56,95 % (annexe C) de la variation, exprimant ainsi le plus important pourcentage de variation, cette composante associe les paramètres suivants: longueur tige (0,197), longueur racine (0,165), poids frais tige (0,156), poids sec tige (0,140), la surface foliaire (0,278). la teneur relative en eau (0,150) et la teneur en chlorophylle totale (0,126). La deuxième composante qui explique 25,79 % de la variation définit les variables: Poids frais racine (0,442) et poids sec racine (0,551).

6.2.4. Interaction entre les paramètres physiologiques et biochimiques.

L'examen de la matrice de corrélation entre variables (tableau 6.8) révèle la présence d'une forte corrélation négative entre les paramètres physiologiques et biochimiques. Les teneurs en sucres solubles sont négativement corrélées avec la teneur relative en eau ($r = - 0,952$) et la teneur en chlorophylle totale ($r = - 0,861$). De

même, Les teneurs en proline dans toutes les organes de la plantule (feuille, tige et racine) sont négativement corrélées avec la teneur relative en eau et la chlorophylle totale (tableau 6.8). Une corrélation positive est observée entre les teneurs en sucres solubles et celles de la proline.

Tableau 6.8 : Matrice de corrélation entre les paramètres physiologiques et biochimiques.

	TRE	Chl. T	TSS	TPF	TPT	TPR
TRE	1	0,808**	- 0,952**	- 0,931**	- 0,704**	- 0,910**
Chl. T		1	- 0,861**	- 0,870**	-0,615**	- 0,805**
TSS			1	0,937**	0,665**	0,871**
TPF				1	0,706**	0,853**
TPT					1	0,878**
TPR						1

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

L'analyse en composante principale a fait ressortir une seule composante qui regroupe principalement les paramètres présentant d'une part une corrélation positive importante à savoir : la teneur en sucres solubles (0,156) et la teneur en proline feuille (0,157), tige (0,131) racine (0,154); et de l'autre part une corrélation négative entre la teneur relative en eau (- 0,155) et la teneur en chlorophylle totale (- 0,152) (Annexe C).

6.2.5. Interaction entre les paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques

L'analyse en composante principale des paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques a fait ressortir trois composantes (figure 6.17). La composante 1 a absorbé 45,49 % de la variation (Annexe C), exprimant ainsi le plus important pourcentage de variation. Elle associe les paramètres présentant une corrélation positive : longueur tige (0,252), teneur relative en eau (0,113), teneur en chlorophylle (a) (0,137) et teneur en chlorophylle totale (0,111). Les autres paramètres qui participent à la formation de la composante 1, présentent une corrélation négative : teneur en sucres solubles (-0,128), teneur en proline dans les feuilles (-0,145), et les racines (-0,120). La deuxième composante a absorbé 19,86

% de la variation ; elle est positivement corrélée avec la biomasse de la racine et la chlorophylle (b) et négativement corrélée avec la surface foliaire et la teneur en proline dans la tige. La troisième composante a absorbé 18,36 % de la variation. Elle est positivement corrélée avec la longueur de la racine (0,302), le poids frais de la tige (0,185), le poids sec de la tige (0,297) et le rapport longueur racine/tige (0,577).

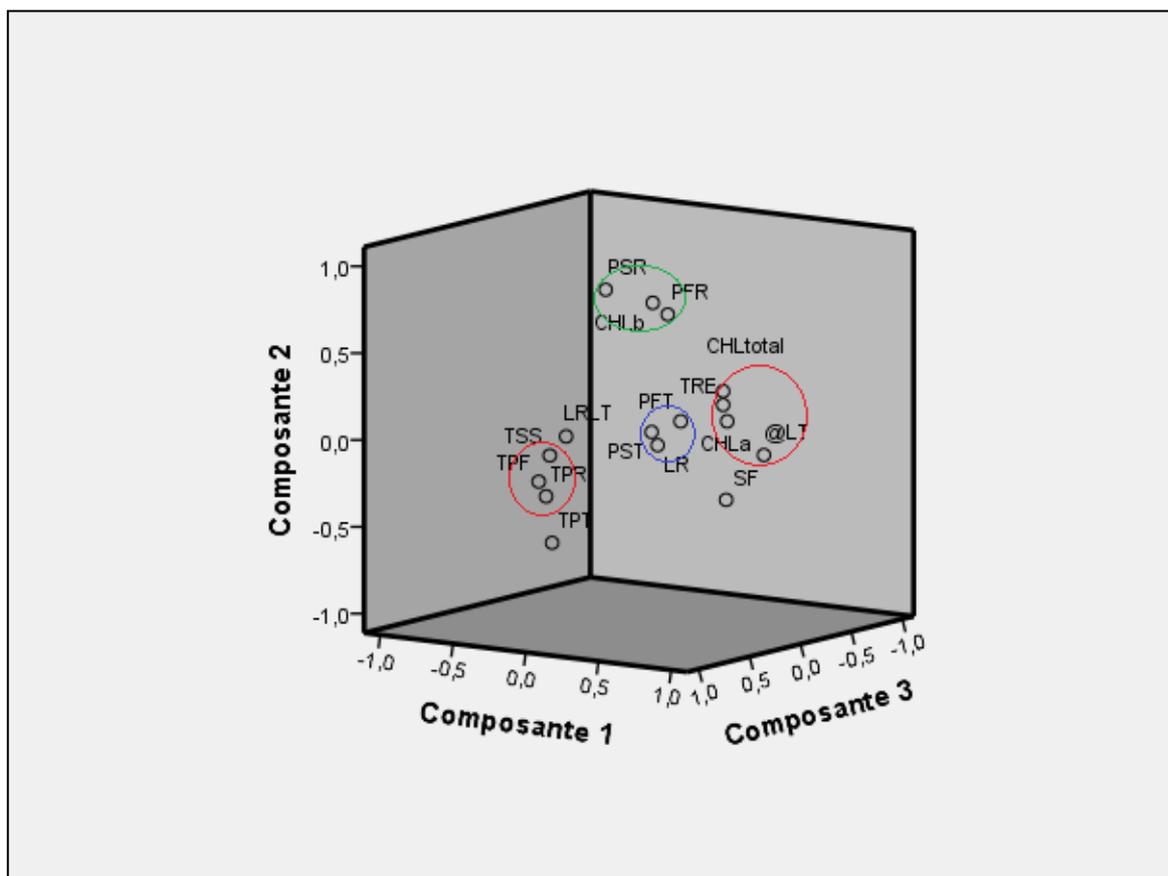


Figure 6.17 : Diagramme de composantes dans l'espace après rotation (ACP de tous les paramètres).

Discussion

L'étude de la relation entre le taux de la salinité et les paramètres morphologiques révèle des résultats importants et fortement discutés. En effet, la hauteur moyenne des tiges, la longueur racinaire et la surface foliaire varient en fonction du niveau de stress salin. Dans un premier temps les résultats obtenus ont montré que la concentration 5 g/l a stimulé la croissance en longueur de la tige et de la racine ainsi que la surface foliaire. L'augmentation des concentrations, en

revanche, provoque des effets inverses. Nos résultats concordent avec les travaux de BENMAHIOUL et *al.*, [2] qui a expliqué que la stimulation de la croissance en présence de NaCl semble une stratégie développée par le pistachier pour limiter les dégâts néfastes provoqués par le stress salin. En revanche, des études antérieures ont montré que le stress salin induit un retard de la croissance de la tige et de la racine chez le pistachier de l'Atlas [11].

Au delà de 5 g/l, nous assistons à une réduction progressive de la croissance en longueur. Cette réduction est plus marquée au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire. Nos résultats sont en accord avec plusieurs auteurs qui ont démontré que l'augmentation de la salinité induit une diminution de la partie aérienne chez beaucoup d'espèces [11 ; 212].

L'étude de la relation entre la salinité et la biomasse sèche a montré que l'effet des différentes concentrations en sels n'est pas le même pour les deux parties. La partie aérienne est beaucoup plus affectée par le stress salin que la partie souterraine. Dans des conditions expérimentales similaires, BENHASSAINI et *al.*, [11] observent également chez le pistachier de l'Atlas cette différence de réaction entre partie aérienne et souterraine.

En ce qui concerne la surface foliaire, les résultats ont montré qu'au delà de 5 g/l de NaCl une réduction de la surface foliaire est observée. Ce résultat concorde avec les travaux de recherche d'autres auteurs qui ont montré que les plantes soumises aux stress abiotiques (salin et hydrique) ont tendance à réduire la surface d'évaporation par la diminution de la surface foliaire. Cette diminution est l'une des réponses des végétaux à la déshydratation, elle contribue à la conservation des ressources en eau, ce qui permet la survie de la plante en limitant l'évaporation [154 ; 213].

La réduction de la croissance en réponse à la salinité est liée à l'accumulation ionique (Na^+ , Cl^-) qui perturbe le processus photosynthétique des feuilles et réduisant les quantités des matières organiques synthétisées (LEPENGUE 2009). Aussi l'absorption des ions Na^+ limite l'entrée des autres cations (Ca^{2+} , K^+ , Mg^+ , NO_3^- , PO_4^-) par le phénomène de compétition minérale ce qui conduit à des carences minérales et la réduction générale de la croissance [214].

Les plantules du pistachier de l'Atlas soumises au stress montrent un statut hydrique, analysé à travers la teneur relative en eau des feuilles, très appréciable. La valeur de la teneur relative en eau augmente chez les plantules stressées par 5g/l de NaCl. Au delà de cette concentration, la TRE a baissé progressivement au cours du temps de l'expérimentation. Nos résultats sont similaires à ceux obtenus par BENHASSAINI et *al.*, [11] qui ont précisé que l'application de concentrations croissantes en sels pendant trois jours influent d'une manière positive sur la teneur relative en eau ; la prolongation de la durée du stress provoque la diminution de la TRE. Cette dernière est expliquée par l'augmentation de la pression osmotique du milieu extérieur suite à la présence des fortes concentrations en sels [170 ; 215]. Le maintien d'une TRE élevée dans des conditions de stress et/ou la diminution progressive de la TRE sont considérés comme un mécanisme de résistance aux stress [216 ; 217]. L'absorption d'eau est maintenue à un niveau suffisant pour éviter la déshydratation des tissus de la plante et pouvoir ainsi diluer les sels introduits dans les cellules [218].

Une baisse importante des teneurs en pigments photosynthétiques (a et a+b) a été enregistrée chez les plantules du pistachier de l'Atlas. La diminution de la photosynthèse chez les plantes cultivées en milieu salin serait à l'origine de la diminution de la croissance [135]. Parmi les causes possibles expliquant cette réduction, la modification de la densité des stomates, du nombre et du diamètre des vaisseaux du xylème chez les halophytes, ou l'accélération du cycle biologique avec changement de la voie métabolique de fixation du carbone [47]. De même, CORNIC et GHASHGHAIE [219], ont expliqué cette réduction par la destruction des membranes thylakoïdiennes, cette perte de la compartimentation cellulaire inhibe le déroulement des grandes fonctions métaboliques.

Le comportement biochimique des plantules du pistachier de l'Atlas sous contrainte saline évalué à travers le processus d'accumulation de la proline, montre une variation de l'accumulation de ce composé organique en fonction de l'organe et l'intensité du stress. En effet, l'accumulation de la proline se fait dans le sens feuille, tige et racine chez les plantules témoins et dans le sens racines, tiges et feuilles chez celles qui sont stressées. Au niveau des feuilles, l'accumulation de la proline n'est significative qu'à partir de la dose 10 g/l de NaCl. Contrairement aux tiges et

aux racines, où cet acide aminé s'accumule d'une manière significative à partir de la concentration 5 g/l.

Nos résultats confirment ceux obtenus par BENHASSAINI et *al.*, [11] qui ont démontré que les plantules du pistachier de l'Atlas affectées par la salinité ont tendance à accumuler la proline en quantité plus importante au niveau des feuilles.

De nombreux travaux rapportent que la proline s'accumule dans la plante lorsqu'elle se trouve en conditions défavorables [220], ce qui traduit le caractère de la résistance aux stress [132]. Selon MONNEVEUX, [221], cette augmentation de la proline est une forme d'ajustement du potentiel osmotique. L'une des causes de l'accumulation de la proline serait une protéolyse membranaire. Cette dernière peut s'accumuler suite à une perturbation du métabolisme des protéines [132]. La proline peut jouer un rôle d'osmoticum dont l'accumulation cytoplasmique permet de neutraliser les effets ioniques et osmotiques de l'accumulation du sel dans la vacuole [144].

La variation de l'accumulation de la proline en fonction des organes est observée également chez l'Atriplex (plante halophyte), où celle-ci serait due à une compartimentation de l'acide aminé, d'où l'expression de sites de résistance de la plante à la contrainte saline [222]. De plus, PAQUIN, [223], a signalé que l'acquisition de la résistance aux stress est liée au transport de la proline de lieu de synthèse vers le lieu de résistance.

Concernant les résultats sur l'évolution des sucres solubles, il ressort que ses composées organiques ont aussi connu une augmentation en fonction de l'augmentation de la concentration en sels. Ce résultat traduit la capacité des plantules du pistachier de l'Atlas à synthétiser les sucres solubles et les accumuler dans les feuilles. De nombreux travaux ont montré que les sucres solubles figurent parmi les composés osmotiques les plus fréquemment accumulés au cours des stress environnementaux comme chez l'Acacia [224], l'Eucalyptus [225] et l'arganier [155]. La forte accumulation de ces composés organiques induite par le stress salin, contribue à la protection des systèmes enzymatiques et membranaires, ce qui permettrait la poursuite des processus physiologiques et biochimiques en condition de sécheresse sévère [144]. En effet, les sucres solubles jouent un rôle déterminant dans l'ajustement osmotique, ainsi qu'au niveau de la stabilisation de certaines

protéines. Cette accumulation semble induire la gélification du contenu cellulaire en saturant le milieu intracellulaire. Ce phénomène permet d'éviter la cristallisation des molécules contenues dans la cellule, et donc limite les dommages au niveau des structures cellulaires [226]. L'augmentation en sucres solubles pourrait avoir aussi un rôle de protection des membranes. Leur présence sous stress protégerait les thylakoides de l'altération irréversible des membranes et exercerait une action favorable sur la résistance protoplasmique au déficit hydrique [227].

L'analyse en composante principale (ACP) réalisée entre les paramètres révèle des résultats importants. Une corrélation positive et significative est enregistrée entre la teneur relative en eau et en chlorophylle totale d'une part et les paramètres morphologiques d'autre part. En revanche, une corrélation négative est enregistrée entre la teneur relative en eau et en chlorophylle totale d'une part et la teneur en proline et en sucres solubles d'autre part.

La réduction de la croissance des plantules observée lors de notre expérimentation est fortement corrélée à la diminution de la teneur relative en eau et en chlorophylle totale.

6.3. Effet du stress hydrique chez les plantules du pistachier de l'Atlas

6.3.1. Humidité du sol

Le taux d'humidité du sol diminue progressivement de 50,29 % chez le lot des plantules témoins jusqu'à 13,55 % chez le lot des plantules stressées pendant 21 jours. Le taux d'humidité du sol après un arrêt d'arrosage de 5 jours est de 40,97 %. Il est de 20,08 % après un arrêt d'arrosage de 15 jours. L'analyse statistique montre une différence hautement significative de l'arrêt d'arrosage sur l'humidité du sol. Quatre groupes homogènes différents se distinguent selon le test de Tukey au seuil de 5% (Tableau 6.9).

Tableau 6.9: Variation de taux d'humidité du sol en fonction de la durée du stress appliquée.

	Témoins	5 jours d'arrêt d'arrosage	15 jours d'arrêt d'arrosage	21 jours d'arrêt d'arrosage
Humidité du sol %	50,29 ± 0,17	40,97 ± 0,11	20,08 ± 0,38	13,55 ± 0,56
Groupe homogène	A	B	C	D

6.3.2. Effet du stress hydrique sur les paramètres morphologiques

6.3.2.1. Longueur de la tige

L'application du stress hydrique aux plantules de *P. atlantica* induit un impact hautement significatif sur la longueur de la tige ($p=0,000$). La valeur la plus élevée est enregistrée chez les plantules témoins avec 31,16 cm. Une diminution progressive de la longueur de la tige est observée en fonction de niveau du stress. Les valeurs enregistrées sont 16,66 - 16 et 14,83 cm, respectivement chez les plantules de trois traitements (fig. 1). Le test de Tukey au seuil de 5 %, montre deux groupes homogènes distincts (fig.6.19) :

Groupe a : plantules non stressées (Témoins)

Groupe b : plantules stressées (5,15 et 21).

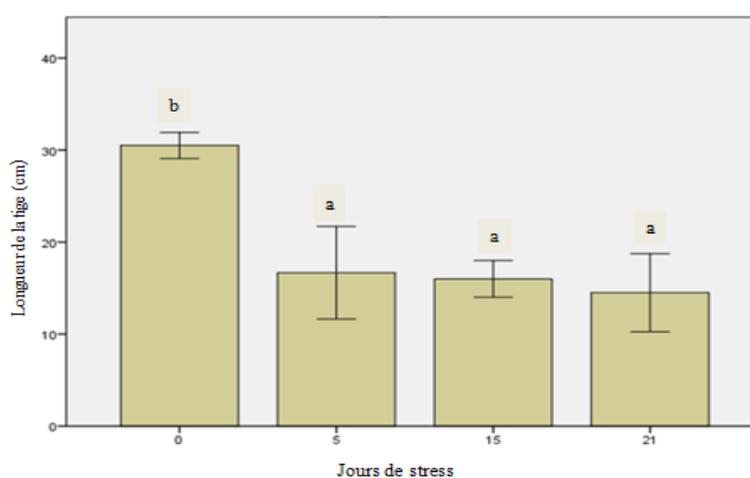


Figure 6.19: Effet du stress hydrique sur la longueur de la tige des plantules.

6.3.2.2. Longueur de la racine

La longueur de la racine principale n'a pas été affectée par le stress hydrique ($p=0,125$). Les valeurs obtenus sont 25,33 cm chez les plantules témoins et 23,67 cm chez les plantules stressées pendant 21 jours. Le test de Tukey au seuil de 5 %, classe les plantules non stressées et les celles stressées dans le même groupe a. Les plantules ont eu un comportement similaire et ceux quel que soit le traitement (fig. 6.20).

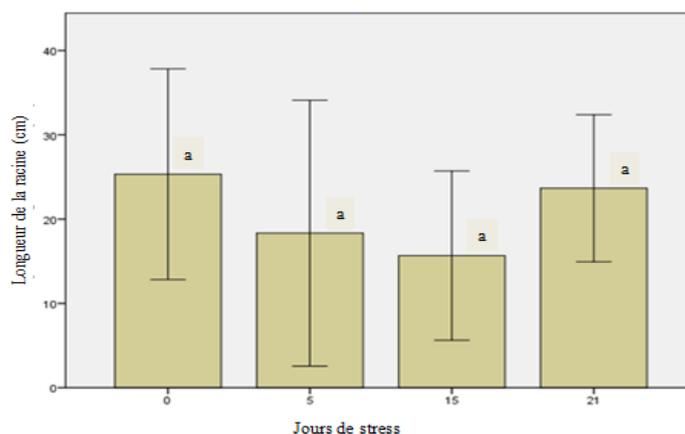


Figure 6.20: Effet du stress hydrique sur la longueur de la racine principale des plantules.

En condition de bonne alimentation hydrique, les plantules du pistachier de l'Atlas émettent une racine principale ramifiée. L'augmentation de la contrainte hydrique provoque la disparition successive des racines secondaires (fig. 6.21).

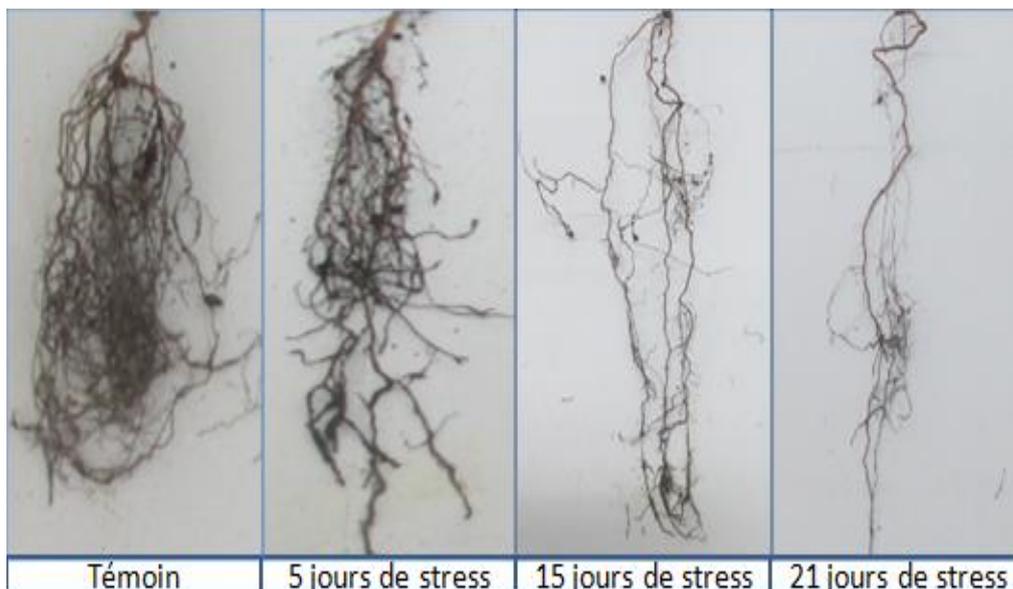


Figure 6.21: Architecture du système racinaire en fonction de l'intensité du stress hydrique.

6.3.2.3. Biomasse fraîche et sèche

Une diminution progressive de la biomasse fraîche de la tige et de la racine est observée en fonction de la sévérité du stress (figure 6.22). Cette réduction du poids frais des deux parties (aérienne et souterraine) n'est significative qu'à partir du troisième niveau de stress (15 jours). Le même résultat est observé pour la biomasse sèche, une réduction du poids sec aérien et souterrain est enregistré en fonction de l'augmentation du niveau de stress. L'analyse de la variance montre que le poids sec de la tige et de la racine est significativement affecté après 21 jours de stress ($p=0,000$)

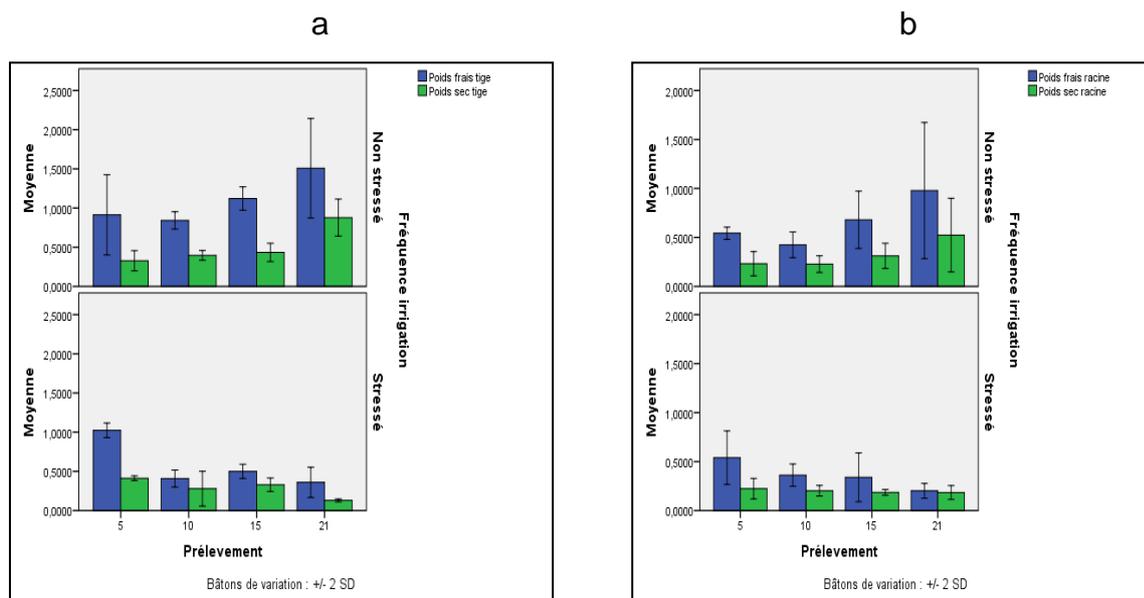


Figure 6.22: Variation de la biomasse fraîche et sèche (a: biomasse/tige ; b:biomasse/racine) des plantules de *Pistacia atlantica* soumises au stress hydrique.

6.3.3. Effet du stress hydrique sur les paramètres physiologiques

6.3.3.1. Teneur relative en eau

La variation de la teneur en eau des plantules de *P.atlantica*, montre que le premier niveau de stress entraîne une augmentation de la teneur en eau des feuilles de plantules par rapport au témoin. Le prolongement de la durée du stress entraîne une chute progressive de la teneur en eau des feuilles. La teneur moyenne est de l'ordre de 48,67 % chez les plantules témoins. Elle passe à 66,67 % chez les plantules stressées pendant 5 jours et chute brusquement et arrive jusqu'à 12,33 % pour les plantules stressées pendant 21 jours.

L'analyse statistique montre que l'effet de stress hydrique est hautement significatif ($P=0,000$) sur la teneur relative en eau des feuilles. Trois groupes homogènes différents se distinguent selon le test de Tukey au seuil de 5% (figure 6.22):

Groupe a: plantules stressées pendant 21 jours.

Groupe b: plantules témoins et plantules stressées pendant 15 jours;

Groupe c: plantules stressées pendant 5 jours.

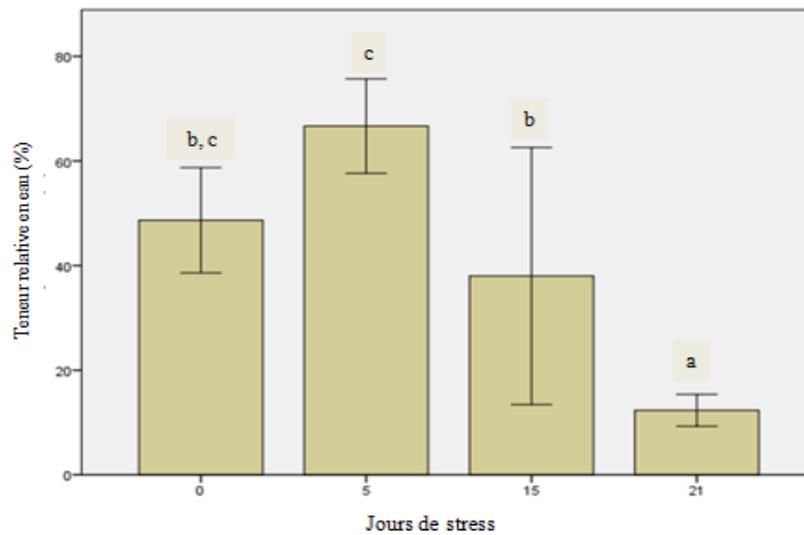


Figure 6.22: Effet du stress hydrique sur la teneur relative en eau des feuilles de plantules.

6.3.3.2. Teneur en pigments chlorophylliens

Les variations des teneurs en pigments chlorophylliens (a, b et totale) sont enregistrées dans la figure 6.23. Une diminution de la teneur en chlorophylle (a, b et totale) est observée en fonction des niveaux de stress appliqué. L'analyse de la variance montre que la teneur en chlorophylle a et totale est significativement affectée que pour les plantules stressées durant 21 jours ($p= 0,000$ et $p=0,002$ respectivement). Par contre, le stress hydrique appliqué n'a aucun effet dépressif sur la teneur en chlorophylle b par rapport aux témoins.

En condition de stress sévère 21 jours, la teneur en chlorophylle (a et totale) est fortement affectée par rapport au témoins, soient des réduction de 86,19 % pour la chlorophylle a et 116,25% pour la chlorophylle totale.

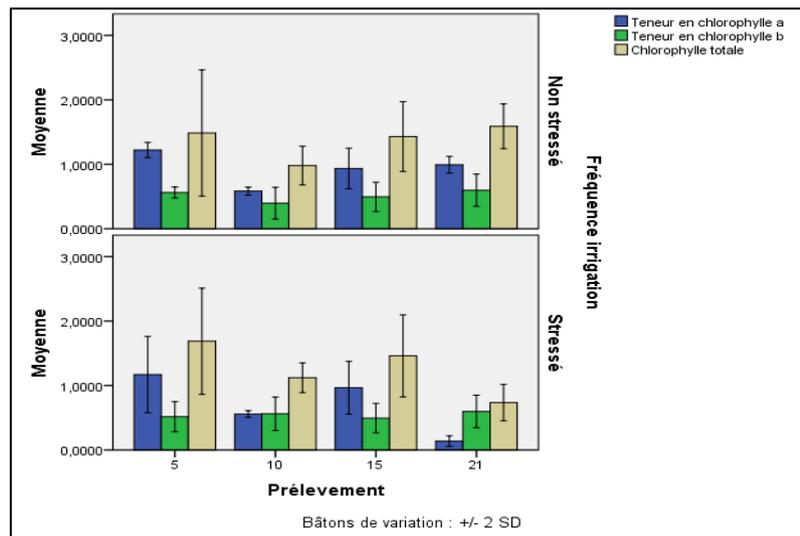


Figure 6.23: Variation de la teneur en pigments chlorophylliens des plantules de *Pistacia atlantica* soumises au stress hydrique.

6.3.4. Effet du stress hydrique sur les paramètres biochimiques

6.3.4. 1. Teneur en proline

La teneur en proline au niveau des feuilles de *P. atlantica* varie en fonction de niveau de stress. Après 5 jours de stress, on constate que la teneur en proline reste faible et proche de celle de témoin avec une valeur de 0,26 $\mu\text{g/g}$ MF. Quant aux plantules stressées pendant 15 et 21 jours, une augmentation très importante de la teneur en proline a été enregistrée avec des quantités moyenne de 1,76 et 1,99 $\mu\text{g/g}$ MF respectivement (figure 6.24).

L'analyse de la variance montre une différence hautement significative des différents traitements de stress sur la teneur en proline ($p=0,000$) où deux groupes se dégagent selon le test de Tukey au seuil de 5%:

Groupe a : teneur en proline faible, plantules témoins et celles stressées pendant 5 jours.

Groupe b : teneur en proline moyenne à forte, plantules stressées pendant 15 et 21 jours.

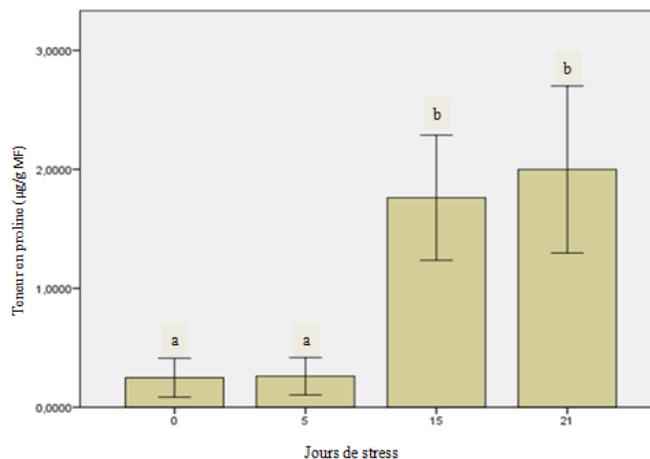


Figure 6.24: Effet du stress hydrique sur la teneur en proline des feuilles de plantules.

6.3.4. 2. Teneur en sucres solubles

Les fortes accumulations des sucres solubles sont observées au deuxième et troisième niveau de stress avec respectivement 4,95 et 5,44 µg/g MF. Par contre les faibles teneurs sont enregistrées au premier niveau de stress avec une valeur de 3,39 µg/g MF. Cette valeur est moins élevée par rapport à la valeur enregistrée chez les plantules témoins où nous avons enregistré 3,77 µg/g MF (figure 6.25).

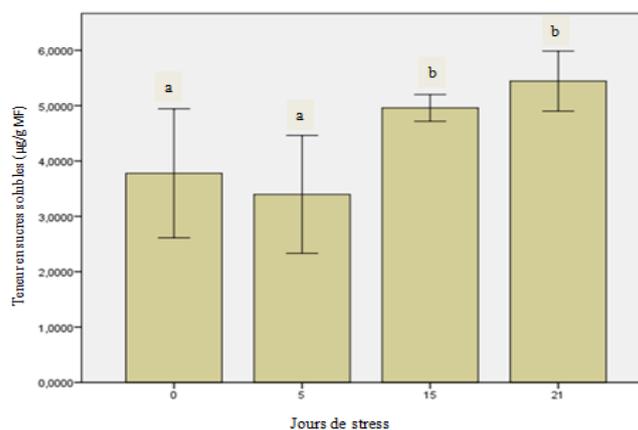


Figure 6.25: Effet du stress hydrique sur la teneur en sucres solubles des feuilles de plantules.

6.3.5. Interaction entre les paramètres morphologiques et physiologiques

La matrice de corrélation révèle une corrélation positive entre les paramètres morphologiques et physiologiques. Néanmoins, cette corrélation est différente en fonction des variables. Une corrélation moyenne est enregistrée entre la teneur relative en eau et la longueur de la tige (0,312), le poids frais de la tige (0,574) le poids frais de la racine (0,546), le poids sec de la tige (0,472) et le poids sec de la racine (0,334). On note une corrélation moyenne entre la teneur en chlorophylle totale et les autres variables (tableau 6.10), et une autre plus faible entre la teneur relative en eau et la longueur de la racine (0,030). On remarque aussi que la corrélation entre la teneur en chlorophylle totale et la longueur de la racine, est faible (0,090). On peut déduire que la teneur relative en eau et la chlorophylle totale n'agissent que faiblement sur la longueur de la racine mais avec une tendance positive.

Tableau 6.10 : Matrice de corrélation entre les paramètres morphologiques et physiologiques.

	LT	LR	PFT	PFR	PST	PSR	TRE	Chl.T
LT	1	0,382	0,636	0,627	,630	,628	0,312	0,315
LR		1	0,222	,246	,252	0,216	0,030	0,090
PFT			1	,928	,960	0,901	0,574	0,375
PFR				1	,906	0,920	0,546	0,459
PST					1	0,938	0,472	0,333
PSR						1	0,334	0,286
TRE							1	0,477
Chl.T								1

6.3.6. Interaction entre les paramètres physiologiques et biochimiques

La matrice des corrélations réalisée entre les paramètres physiologiques et biochimiques (tableau 6.11), révèle une forte corrélation négative (- 0,919) entre la teneur relative en eau et la teneur en sucres solubles. De fortes corrélations

négatives sont constatées entre la teneur relative en eau et l'accumulation de la proline dans toutes les parties de la plante. Ces dernières sont obtenues entre la teneur en chlorophylle totale, les teneurs en proline et en sucres solubles révèlent des corrélations négatives moyennes. En outre, celles obtenues entre les teneurs en sucres solubles et la teneur en proline révèlent une forte corrélation positive. Ceci montre que les deux solutés organiques s'accumulent et réagissent de la même manière.

Tableau 6.11 : Matrice de corrélation entre les paramètres physiologiques et biochimiques.

	TRE	Chl.T	TSS	TPF	TPT	TPR
TRE	1	0,477	- 0,919	- 0,890	- 0,849	- 0,947
Chl.T		1	- 0,373	- 0,503	-0,386	- 0,486
TSS			1	0,783	0,748	0,807
TPF				1	0,783	0,908
TPT					1	0,737
TPR						1

6.3.7. Interaction entre les paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques

L'ACP réalisée révèle des corrélations entre les paramètres étudiés. En effet, quatre composantes sont enregistrées (annexe C). La composante 1 représente les variables : teneur en proline (0,57), teneur en sucres solubles (0,24) et teneur relative en eau (- 0,21). On constate une corrélation négative de la teneur relative en eau qui montre que celle-ci évolue dans un sens inverse aux autres variables évoquées. La deuxième composante est positivement corrélées avec : la longueur de la tige (0,21), le poids frais de la tige et de la racine (0,19 et 0,17 respectivement) et le poids sec de la tige et de la racine (0,21 et 0,24 respectivement). La troisième composante représente une corrélation positive entre la teneur en chlorophylles (a, b et totale). La quatrième composante 4 représente une forte corrélation positive entre la longueur de la racine (0,82) et le rapport longueur de la racine /longueur de la tige (0,43) (figure 6.11).

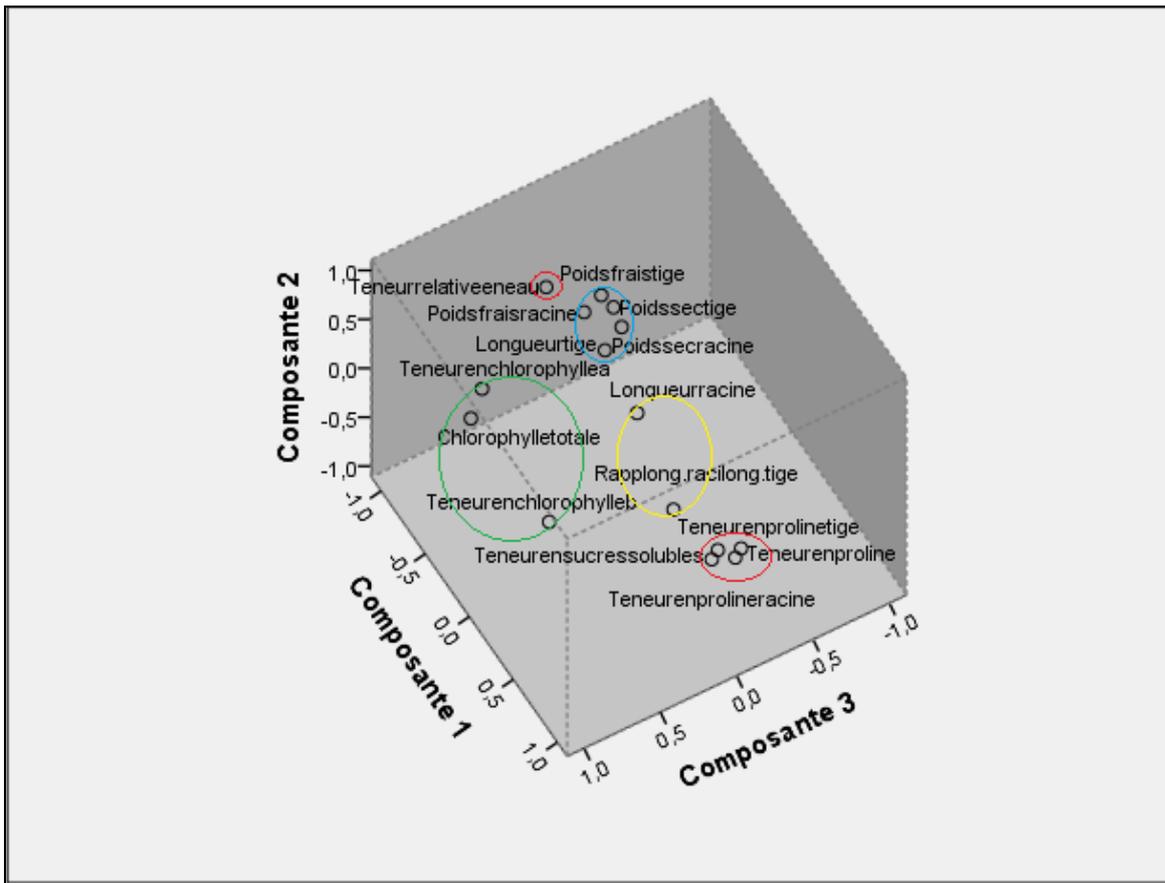


Figure 6.26: Diagramme de composantes dans l'espace après rotation
(ACP de tous les paramètres).

Discussion

L'étude de la relation entre le stress hydrique et les paramètres morphologiques a montré que le stress appliqué n'affecte pas de la même manière la partie racinaire et aérienne des plantules. Le stress hydrique a engendré la réduction de la hauteur de la tige des plantules de *P. atlantica*. Il a été rapporté que la réponse générale des plantes à la sécheresse est la réduction de la croissance. Selon HOPKINS [3], la réduction de la croissance est une capacité adaptative nécessaire à la survie d'une plante exposée à un stress hydrique. La diminution de la croissance en hauteur des plantes soumises à différentes contraintes hydriques a été observée chez d'autres espèces telle que l'arganier [155], le casuarina [156], le cèdre [157] et les porte-greffes des agrumes [158]. La réduction de la hauteur de la tige peut s'expliquer par un retard dans la croissance végétative suite à une baisse de divisions cellulaires induite par un déficit hydrique qui empêche l'absorption de l'eau par les racines. Cependant, le stress hydrique n'a pas affecté la longueur de la racine principale. En conditions de bonne alimentation en eau (plantules témoins) le

système racinaires est plus dense avec un nombre important de ramifications. Le pivot vigoureux porte des racines latérales développées. L'augmentation de la contrainte hydrique a provoqué un allongement de la racine principale accompagnée à une disparition successive des racines secondaires. L'effet du stress hydrique sur la longueur de la racine principale a été peu marqué. En effet, les plantules témoins et celles stressées durant 21 jours, qui ont le même âge (15 semaines), ont présentées des valeurs similaires. Cependant, les racines des plantules stressées sont frêles et filiformes. Le chevelu racinaire, sous conditions de déficit hydrique, est particulièrement intéressant, car la matière sèche racinaire est utilisée au profit de l'accroissement en longueur des racines favorisant ainsi une meilleure extension du système racinaire [228]. Cette réponse morphologique est fréquemment rencontrée chez les espèces ligneuses aptes à tolérer la contrainte hydrique. L'extension du système racinaire, en réponse à l'application d'une contrainte saline ou hydrique contribue à l'absorption de l'humidité des couches les plus profondes du sol [229]. Chez les plantules de *P. atlantica*, ce mécanisme d'adaptation morphologique a été observé par OUKARA *et al.*, [230] lors de l'étude de la tolérance de l'espèce au stress salin.

Le stress appliqué pendant 5 jours, a provoqué une légère diminution de la teneur relative en eau des feuilles par rapport au témoin. Le maintien de la TRE plus ou moins élevé en comparaison aux témoins serait probablement due à une osmorégulation active, suite à la mise en place d'un mécanisme de tolérance au stress hydrique à savoir l'ajustement osmotique. De plus, l'arrêt d'arrosage de 5 jours n'a pas provoqué une réduction importante concernant l'humidité du sol par rapport aux conditions de bonne alimentation en eau. En effet, l'absorption de l'eau est maintenue à un niveau suffisant pour éviter la déshydratation. BOUJNAH *et al.* [231], signalent, que l'olivier garde une capacité cruelle de récupération de l'eau malgré qu'elle soit confrontée à un stress hydrique pour une longue période. En revanche, l'augmentation de l'intensité du stress par la prolongement de la durée du stress a entraîné une chute remarquable de la teneur en eau. Ainsi, pour garder le potentiel de turgescence aussi élevé que possible, après la chute très remarquable de la teneur en eau, les plantules ont accumulé des osmotocums à l'intérieur de leurs cellules dont la proline et les sucres. La forte pression osmotique du milieu extérieur, suite à la diminution de l'humidité du sol, fait diminuer la teneur en eau chez la plante

toute entière [170]. Lors d'un stress hydrique sévère chez les plantules d'arganier les stomates restent ouverts et les plantules continuent à perdre leur eau, ce qui explique la diminution de la teneur relative en eau [155]. Le déficit hydrique provoque une baisse de la turgescence cellulaire liée à la diminution du gradient du potentiel hydrique entre les tissus de la plante et le milieu externe [232].

La diminution importante de la chlorophylle est observée durant l'application du stress hydrique. Nos résultats sont en accord avec ceux de plusieurs auteurs qui ont signalé une baisse importante en pigments chlorophylliens en fonctions de l'intensité du stress hydrique [233; 234]. Parmi les causes possibles expliquant cette réduction, la suppression d'une enzyme spécifique, responsable de la synthèse des pigments photosynthétiques [235].

La matrice de corrélation réalisée entre les paramètres morphologiques et physiologiques révèle des corrélations positives entre les variables étudiées. Ceci explique que la croissance des plantules du pistachier de l'Atlas est liée directement à l'alimentation en eau et à l'activité photosynthétique. Néanmoins, cette relation concerne beaucoup plus la partie aérienne dont on note une corrélation positive significative entre les variables évoquées précédemment et la croissance de la partie aérienne. On note une faible corrélation entre la croissance de la partie racinaire et la teneur relative en eau et la chlorophylle totale. Nos résultats ont mis en évidence que la croissance de la racine chez le pistachier de l'Atlas n'est pas affectée par le manque d'eau provoqué par le stress hydrique. HSIAO et ACEVEDO [168] ont démontré que lors d'un déficit hydrique les plantes semblent augmenter leur croissance racinaire. Ceci est expliqué par l'acheminement des produits de la photosynthèse vers le système racinaire et permettent d'assurer son développement et l'augmenter sa capacité à prélever l'eau [136 ; 166].

Le stress hydrique appliqué a provoqué une augmentation des teneurs en proline. Il est établi que l'accumulation de la proline a été fréquemment évoquée comme réponse à un type de stress abiotique [236]. La proline est considérée comme l'une des stratégies adaptatives déclenchées par la plante face aux contraintes de l'environnement [222]. Selon CECHIN et *al.*, [237], l'augmentation de la teneur en proline est reliée directement à l'application du stress hydrique. Elle agit comme soluté pour l'ajustement osmotique et sert aussi de réservoir de composés

azotés et de carbone pour une utilisation ultérieure dans la croissance. Les sucres solubles ont aussi connu une augmentation de la concentration en fonction de l'intensité du stress appliqué. De nombreux travaux ont montré que les sucres solubles figurent parmi les composés osmotiques les plus fréquemment accumulés au cours des stress environnementaux comme chez l'acacia [224] et l'arganier [155]. La forte accumulation de proline et de sucres solubles induite par le stress hydrique, contribue à la protection des systèmes enzymatiques et membranaires, ce qui permettrait la poursuite des processus physiologiques et biochimiques en condition de sécheresse sévère [144]. Les résultats obtenus concernant la réponse biochimique, analysée à travers l'expression d'accumulation de la proline et des sucres solubles sont en accord avec ceux de BENHASSAINI *et al* [11].

La matrice des corrélations réalisée révèle des fortes corrélations négatives entre la teneur relative en eau et l'accumulation de la proline et des sucres solubles. On note la même observation entre la teneur en chlorophylle totale et les teneurs en proline et en sucres solubles. Ceci explique que l'accumulation de ces deux solutés organiques augmente en condition de déficit en eau des tissus accompagné par une réduction de l'activité photosynthétique. La proline et les sucres solubles accumulés pourraient jouer un rôle d'osmoticum pour éviter la déshydratation [144; 238].

6.4. Effet du stress salin sur la croissance des plantules du pistachier vrai

Les paramètres étudiés ont concerné la longueur de la tige et de la racine, la biomasse fraîche, sèche de la partie aérienne et souterraine ainsi que la surface foliaire.

6.4.1. Croissance en Longueur

Les résultats obtenus montrent que les différentes concentrations de NaCl testées ont provoqué la diminution de la longueur de la tige (figure 6.27 et tableau 6.10). Ce résultat est confirmé par l'analyse de la variance à un seul critère de classification dont la différence de moyennes est très hautement significative ($p=0,000$). L'allongement le plus important de la tige (27 cm) est enregistré chez les plantules témoins. Une diminution progressive de la hauteur des tiges est observée en fonction de l'augmentation de la concentration en sel. En présence de la plus forte dose de NaCl (30 g/l), la longueur de la tige enregistrée est 12,66 cm, avec une

baisse de 59,75 % par rapport au témoin. Le test de Tukey ne révèle aucune différence significative ($p=0,066$) entre les concentrations en NaCl testées.

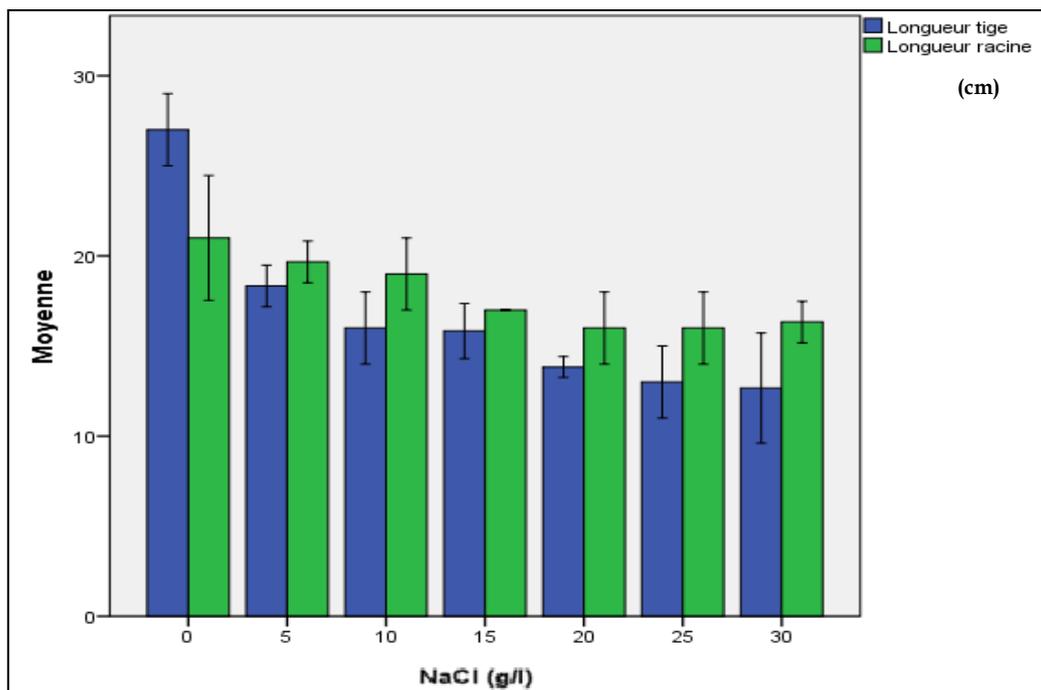


Figure 6.27 : Variation de la longueur de la tige et de la racine des plantules de *Pistacia vera* soumises au stress salin.

En ce qui concerne la longueur de la racine, les résultats montrent que les différentes concentrations en NaCl n'ont pas un effet significatif sur la croissance de la partie souterraine chez les plantules du pistachier vrai. Ceci est confirmé par l'analyse de variance à un seul critère de classification ($p=0,101$). Les valeurs de la longueur de la racine oscillent entre 21 cm chez les plantules témoins et 16,33 cm en présence de 30n g/l. Le test de Tukey à $\alpha=0,05$ classe toutes les moyennes en un seul groupe (tableau 6.12).

Tableau 6.12: Croissance en longueur : test de signification de Tukey à ($\alpha=0,05$).

	0 g/l	5 g/l	10 g/l	15 g/l	20 g/l	25 g/l	30 g/l
Longueur Tige (cm)	27	18,33	16	15,83	13,83	13	12,66
	±	±	±	±	±	±	±
	1	0,91	1	1,1	0,75	1	1,52
Groupes Homogènes	a	b	b	b	b	b	b
Longueur Racine (cm)	21	19,66	19,66	17,33	16	16	16,33
	±	±	±	±	±	±	±
	1,60	0,95	1,30	0,0005	1	1	1,11
Groupes Homogènes	a	a	a	a	a	a	a
Rapport racine/tige	0,77	1,08	1,23	1,11	1,17	1,23	1,28
	±	±	±	±	±	±	±
	0,13	0,19	0,048	0,10	0,28	0,09	0,13
Groupes Homogènes	a	b	ab	ab	a	b	b

Le tableau 6.12 montre que chez les plantules de *Pistacia vera* plus la contrainte saline devient sévère plus le rapport racine/tige augmente progressivement. Par ailleurs, la valeur maximale du rapport (1,28) est enregistrée chez les plantules en présence de 30 g/l de NaCl par rapport au témoin (0,77).

6.4.2. Biomasse fraîche et sèche

Les différentes concentrations en NaCl ont provoqué une réduction très hautement significative de la biomasse fraîche de la partie aérienne et souterraine des plantules du pistachier vrai ($P=0,000$). Les meilleurs résultats sont enregistrés chez les plantules témoins dont les valeurs estimées sont 4,11 g pour le poids frais de la tige et 1,84 g pour le poids frais de la racine. Ces valeurs diminuent progressivement en fonction de l'augmentation des concentrations en sels pour atteindre 0,83 g et 0,53 g avec une baisse de 79,80 % et 71,19 % respectivement (figure 6.28).

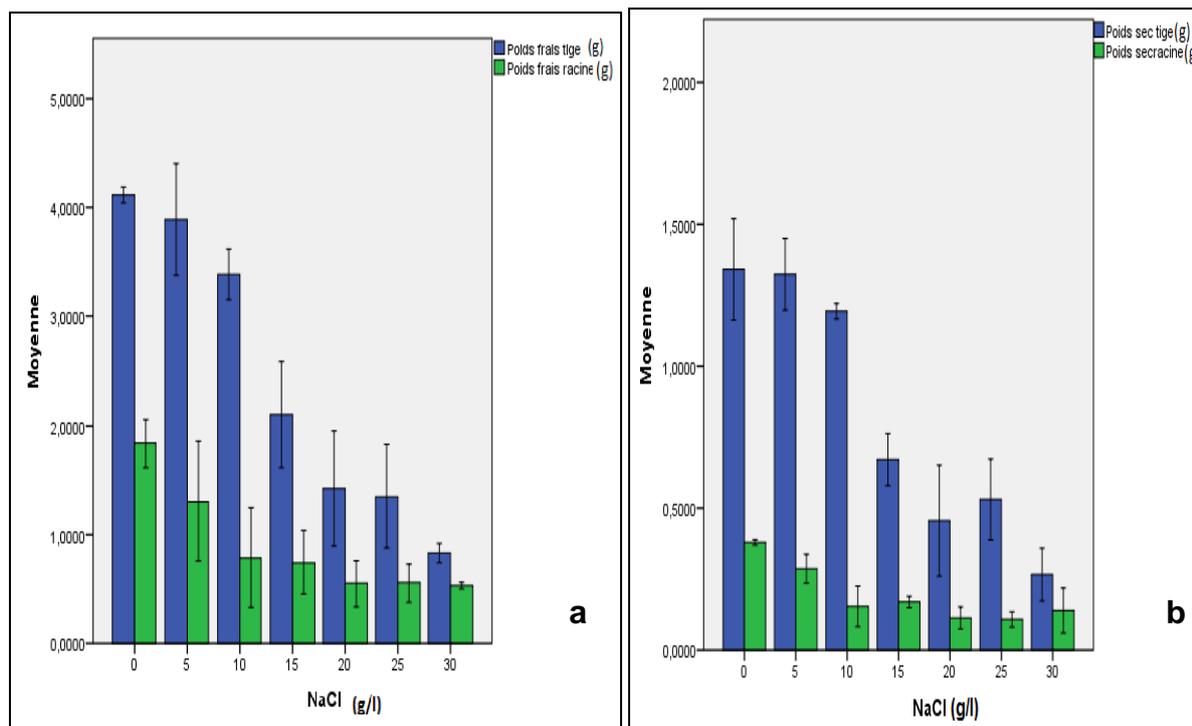


Figure 6.28 : Variation de la biomasse fraîche (a) et sèche (b) de la partie aérienne et souterraine chez *Pistacia vera* soumises au stress salin.

L'effet de NaCl s'est traduit également par une réduction très hautement significative de la matière sèche aérienne et racinaire ($p=0,000$). En absence de NaCl, les plantules de pistachier vrai donnent le rendement le plus élevé en terme de matière sèche aérienne et racinaire. En présence de sels, cette production en matière sèche baisse surtout à la plus forte concentration (30 g/l) dont le poids sec de la tige enregistré est de 0,28 g et le poids sec de la racine est de 0,14 g, soient une baisse de 79 % et 63 % respectivement par rapport au témoin (tableau 6.13).

Tableau 6.13: Biomasse fraîche et sèche : test de signification de Tukey à ($\alpha=0,05$).

	0 g/l	5 g/l	10 g/l	15 g/l	20 g/l	25 g/l	30 g/l
Poids frais tige (g)	4,11	3,85	3,28	2,10	1,42	1,35	0,83
	±	±	±	±	±	±	±
	0,035	0,278	0,269	0,244	0,264	0,265	0,043
Groupes Homogènes	a	a	ab	bc	cd	cd	d
Poids frais Racine (g)	1,84	1,31	0,79	0,75	0,55	0,56	0,53
	±	±	±	±	±	±	±
	0,111	0,271	0,226	0,145	0,106	0,089	0,014
Groupes Homogènes	a	b	c	c	c	c	c
Poids sec tige (g)	1,34	1,32	1,19	0,67	0,45	0,53	0,28
	±	±	±	±	±	±	±
	0,089	0,032	0,013	0,054	0,097	0,071	0,013
Groupes Homogènes	a	a	a	b	bc	bc	c
Poids sec racine (g)	0,38	0,29	0,15	0,17	0,11	0,11	0,14
	±	±	±	±	±	±	±
	0,004	0,025	0,035	0,010	0,019	0,013	0,039
Groupe Homogènes	a	b	c	c	c	c	c

6.4.3. Surface foliaire

La figure 6.29 montre que chez les plantules du pistachier vrai, plus la contrainte saline devienne sévère, plus la surface foliaire diminue. Par ailleurs, la valeur maximale de la surface foliaire est observée chez les plantules témoins où nous notons 2.71 cm². Une baisse considérable de la surface foliaire (0,40 cm²) est observée en présence de 30 g/l de NaCl par rapport aux plantules témoins.

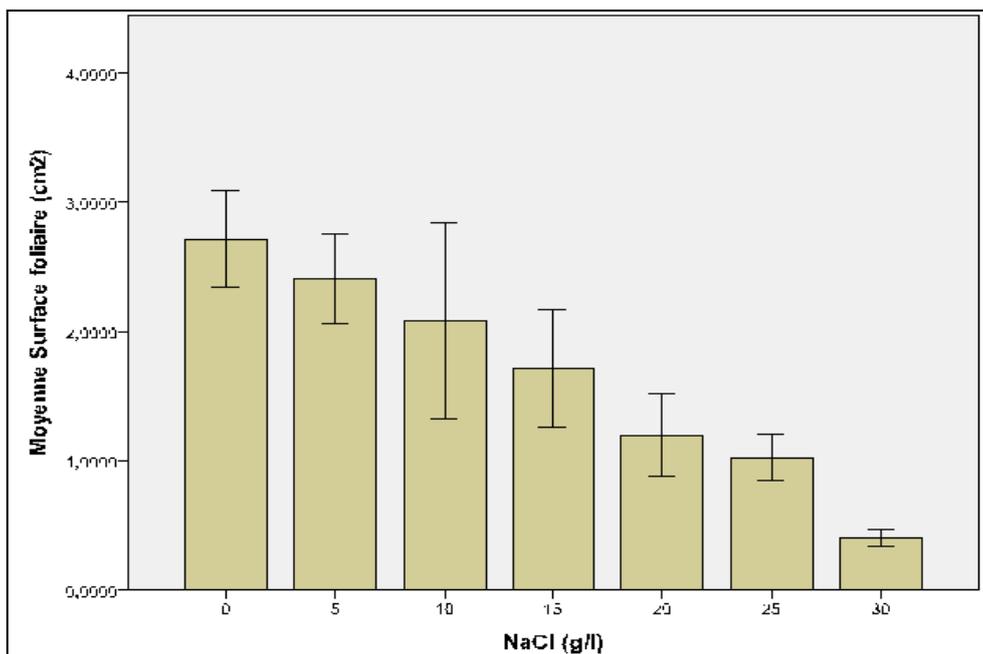


Figure 6.29 : Variation de la surface foliaire chez les plantules de *Pistacia vera* soumises au stress salin.

L'analyse de la variance à un seul critère de classification montre une différence très hautement significative ($p=0,000$).

Discussion

Chez les plantules du pistachier vrai cultivées sous stress salin, la croissance se trouve atténuée. En effet, la hauteur de la tige se raccourcit d'une manière significative avec l'augmentation de la concentration en sels. Ainsi, en présence de la plus forte concentration (30 g/l) ; la réduction de la longueur de la tige observée chez les plantules stressées par rapport aux plantules témoins est de 54,81 %. Par contre, le stress salin n'a pas un effet significatif sur la longueur de la racine. Des effets similaires ont été remarqués sur la croissance des plantules de pistachier vrai soumises à un stress salin en conditions in vivo [239] et in vitro [2].

En plus, les rendements en matière fraîche et sèche de la partie aérienne et racinaire diminuent également lorsque la concentration de NaCl augmente dans le milieu. La production en matière sèche baisse surtout à la plus forte concentration (30 g/l) dont le poids sec de la tige enregistré est de 0,28 g et le poids sec de la racine est de 0,14 g, soient une baisse de 79 et 63 % respectivement par rapport aux plantules témoins. Nos résultats montrent que le stress salin appliqué aux plantules

de *Pistacia vera*, n'a pas affecté la croissance en longueur de la racine ; mais il a affecté et d'une manière considérable la croissance en longueur de la tige et la production en biomasse dans les deux parties aérienne et souterraine. Ces résultats concordent avec les résultats de plusieurs auteurs qui ont confirmé que le stress salin appliqué aux plantules de *Pistacia vera* réduit la croissance chez cette espèce [240; 241; 2]. Depuis longtemps, il est connu que la réduction de la croissance est observée chez les plantes soumises au stress salin. REDA TAZI et *al.*, [207] et NASRI et *al.*, [212], confirment ce phénomène chez les plantules d'arganier sous différentes concentrations en sels.

Nos résultats montrent que le stress salin appliqué aux plantules de pistachier fruitier provoque une réduction significative. Ces résultats sont analogues à ceux obtenus pour la même espèce [2]. La réduction de la surface foliaire est considérée par WANG et NIL [243] comme une réponse immédiate au stress salin.

6.5. Effet du stress hydrique sur les plantules du pistachier vrai

L'étude de l'effet du stress hydrique sur les plantules du pistachier vrai ont concerné que la croissance en longueur de la tige et la racine et la teneur en proline.

6.5.1. Croissance en longueur

La variation de la longueur de la tige et de la racine chez les plantules de *Pistacia vera* soumises au stress hydrique par arrêt d'arrosage est représentée sur la figure 6.30.

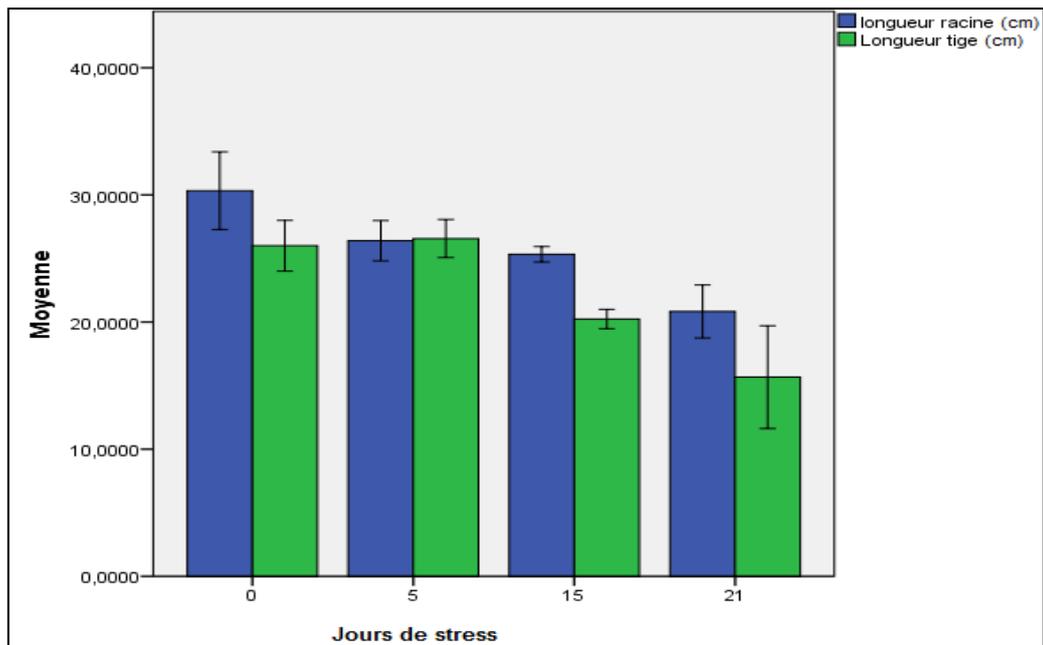


Figure 6.30 : Variation de la longueur de la tige et de la racine chez les plantules de *Pistacia vera* soumises au stress hydrique.

Le stress hydrique a entraîné une diminution non significative de la croissance en longueur de la partie aérienne ($p=0,171$) et souterraine ($p=0,321$) au niveau des trois traitements (5, 15 et 21 jours de stress) testés par rapport aux témoins. En effet, les taux de réduction enregistrés après un stress de 21 jours sont de 39,76 % pour la longueur de la tige et 30,56 % pour la longueur de la racine par rapport aux témoins.

La comparaison des moyennes par le test de Tukey fait ressortir un seul groupe homogène pour la longueur de la tige et de la racine (tableau 6. 12).

Le rapport de la longueur de la racine rapporté à celle de la tige le plus élevé (1,34) est enregistré chez les plantules stressées pendant 21 jours par rapport aux plantules témoins (1,19). Cependant, le rapport le moins élevé (0,77) est enregistré chez les plantules stressées durant 5 jours (tableau 6.14).

Tableau 6.14: Croissance en longueur : test de signification de Tukey à ($\alpha=0,05$).

Jours de stress	0 J	5 J	15 J	21 J
Longueur Tige (cm)	26,56	26,00	20,23	15,66
	±	±	±	±
	1	0,75	0,38	2,02
Groupes Homogènes	a	a	a	a
Longueur Racine (cm)	30,33	26,40	25,33	20,83
	±	±	±	±
	1,52	0,79	0,30	1,04
Groupes Homogènes	a	a	a	a
Rapport racine/tige	1,19	0,77	1,25	1,34
	±	±	±	±
	0,27	0,15	0,21	0,19
Groupes Homogènes	a	b	ab	ab

6.5.2. Effet du stress hydrique sur l'accumulation de la proline

Le stress hydrique par arrêt d'arrosage a provoqué l'augmentation de la teneur en proline dans tous les organes (feuilles, tiges et racines) de plantules de *Pistacia vera* (Figure 6.31). Cette augmentation varie en fonction de l'organe et de l'intensité du stress. Les teneurs les plus importantes en proline sont enregistrées au niveau des feuilles et tiges comparativement aux racines. Après 21 jours de stress, La teneur en proline au niveau des feuilles a été significativement plus importante avec une valeur de 1,55 $\mu\text{g/g}$ MF soit une augmentation de 260,46 % par rapport au témoin. Le même résultat est observé au niveau de la tige, une augmentation de l'ordre de 675 % est enregistrée par rapport au témoin. Au niveau de la racine, l'accumulation de la proline chez les plantules stressées durant 21 jours a augmenté de 125 % par rapport aux plantules témoins.

Ces résultats sont confirmés par l'analyse de la variance à un seul critère de classification qui montre une différence très hautement significative entre les moyennes pour les différents traitements ($p=0,000$).

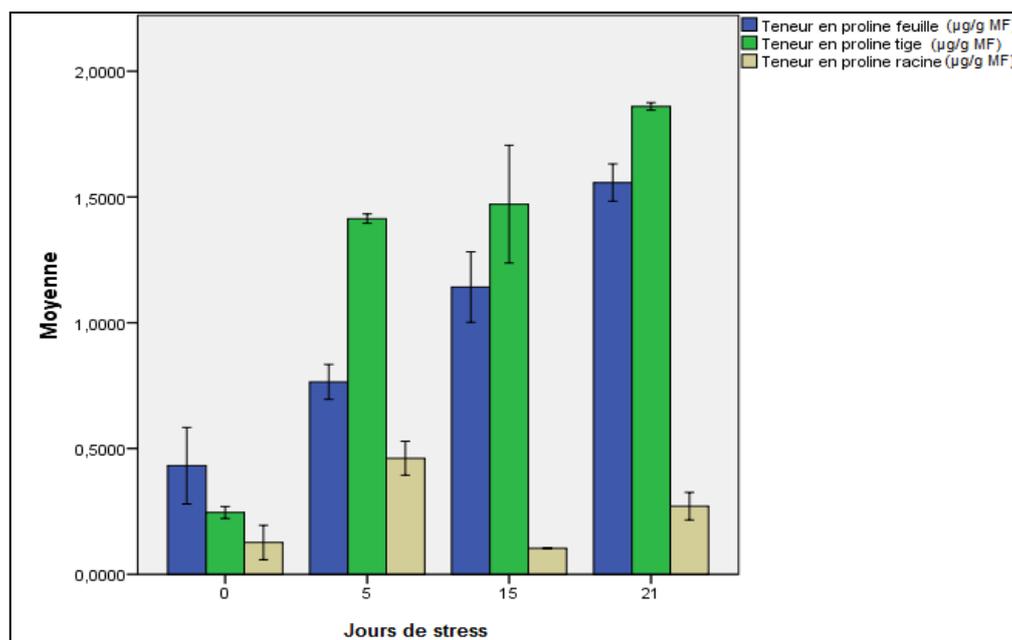


Figure 6.31: Variation de la teneur en proline des plantules de *Pistacia vera* soumises au stress hydrique.

A partir du test de Tukey à $\alpha=0,05$, la comparaison des moyennes fait ressortir selon l'intensité de stress, différents groupes homogènes pour chaque organe (tableau 6.15).

Tableau 6.15: Teneur en proline: test de signification de Tukey à ($\alpha = 5\%$).

Jours de stress	0	5	15	21
Teneur en proline feuilles (µg/g MF)	0,43 ± 0,076	0,76 ± 0,034	1,14 ± 0,07	1,55 ± 0,037
Groupes Homogènes	a	b	c	d
Teneur en proline tiges (µg/g MF)	0,24 ± 0,012	1,38 ± 0,009	1,47 ± 0,117	1,86 ± 0,007
Groupes Homogènes	a	b	b	c
Teneur en proline racines (µg/g MF)	0,12 ± 0,034	0,46 ± 0,033	0,10 ± 0,0005	0,27 ± 0,027
Groupes Homogènes	ab	c	a	b

Discussion

L'effet du stress hydrique sur les plantules de *Pistacia vera* sur la croissance en longueur de la tige et de la racine n'est pas remarquable. Les taux de réduction de la longueur de la tige et de la racine enregistrés chez les plantules stressées ne sont pas significativement importants par rapport aux témoins. Le rapport de la longueur de la racine sur la longueur de la tige est supérieur chez les plantules stressées. Ce résultat montre que la partie aérienne est plus sensible au stress hydrique que la partie racinaire. BENMAHIOUL [2], a montré que le stress hydrique a une nette influence sur la croissance in vitro des plantules de *Pistacia vera*. Il ajoute que l'appareil végétatif a été plus sensible au déficit hydrique comparativement au système racinaire. Il est commun que le rapport racine/tige augmente chez les plantes soumises au stress hydrique, ce rapport augmente parce que les racines sont moins sensibles que les tiges au stress hydrique [244]. La longueur des racines est un critère important d'adaptation pour la tolérance à la sécheresse. En effet, les variétés qui développent un système racinaire important peuvent pomper l'eau à des profondeurs considérables ce qui leur permet de tolérer des périodes sèches [245]. Des résultats analogues ont été obtenus chez d'autres espèces ligneuses : chênes [246], casuarina [156]. Cette réduction non significative de la croissance en longueur chez le pistachier fruitier peut s'expliquer par l'adaptation de l'espèce à la sécheresse.

Les plantules de pistachier vrai, soumises au stress hydrique par arrêt d'arrosage, ont montré une forte synthèse de la proline selon l'intensité de stress et l'organe étudié. Ces résultats sont en accord avec ceux de plusieurs auteurs qui ont signalé que l'accumulation de la proline est étroitement liée au manque d'eau [221]. Les teneurs les plus importantes en proline sont enregistrées au niveau des feuilles et tiges comparativement aux racines. Selon COME [247], l'accumulation de la proline se comporte différemment dans les feuilles et les racines. Nos résultats sont en accord avec les ceux de TOUABA et ALATOU [248], qui ont montré que la teneur en proline est plus marquée chez les feuilles du pin pignon soumises au stress hydrique.

L'accumulation de la proline n'est autre qu'un phénomène d'adaptation à la sécheresse, permettant à la plante de maintenir sa turgescence par la diminution du potentiel hydrique, c'est une forme d'ajustement de son potentiel osmotique [249]. Ce type de tolérance permet à la plante d'assurer normalement ses fonctions physiologiques malgré une dégradation de son état hydrique interne consécutive à la sécheresse [250].

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La salinité et la sécheresse sont parmi les principaux facteurs environnementaux limitant la croissance des plantes dans de nombreuses régions du monde. Le développement d'espèces végétales ayant une meilleure tolérance au sel et à la sécheresse est un moyen efficace pour faire face à ces contraintes.

Notre travail consiste à l'étude du comportement des graines et plantules du pistachier dans le but de déterminer son adaptation vis-à-vis du stress salin et hydrique à travers les aspects morphologiques, physiologiques et biochimiques.

L'étude de l'effet de différents prétraitements testés sur les graines du pistachier de l'Atlas a fait ressortir des signes d'une dormance embryonnaire et tégumentaire.

A cet effet, le prétraitement de graines de *Pistacia atlantica* a montré que la scarification mécanique et chimique (H_2SO_4 à 99%) en combinaison avec la stratification au froid pendant 30 jours se sont révélées efficaces pour favoriser une germination rapide et homogène. Cette étape a permis d'enregistrer les meilleurs taux de germination et d'accélérer la vitesse de germination. Ces trois prétraitements, peu coûteux et simples à réaliser, peuvent être recommandés aux pépiniéristes forestiers afin d'assurer une production rapide, homogène et massive pour son utilisation éventuelle dans les programmes de reboisement en zones arides et semi-arides.

L'étude de la contrainte saline au stade germinatif a montré que les graines du pistachier de l'Atlas peuvent germer en présence de 5 et 10 g/l de NaCl, avec des taux allant de 77 à 86%. Les graines ont montré leur capacité de germer à 15 g/l avec un taux plus faible de 33% comparé aux témoins où nous avons enregistré

100 % de graines germées. Notons que la germination est inhibée dès que la concentration en sels dépasse 20 g/l.

L'effet de la salinité chez les plantules du *P. atlantica* peut se traduire par des modifications morphologiques, biochimiques et physiologiques pour augmenter l'absorption d'eau et/ou pour diminuer la transpiration et la compétition entre les organes.

Ce travail a confirmé l'adaptation de *P. atlantica* à la salinité et sa tendance à l'halophilie. En effet, la concentration de 5 g/l de sel provoque une stimulation de la croissance chez les plantules avec des valeurs similaires aux témoins et parfois supérieures. Une baisse de la croissance est observée dès que la concentration en sel dépasse 15 g/l, ceci nous permet de constater que l'espèce résiste jusqu'à une concentration de 15 g/l. Au-delà de celle-ci le sel devient de plus en plus nocif jusqu'à atteindre la toxicité chez les plantules traitées avec 25 et 30 g/l de NaCl où des nécroses et des dessèchements sont constatés au niveau des feuilles. Le développement du système racinaire a été moins sensible.

Les plantules soumises au stress salin montrent une capacité de rétention d'eau très appréciable. Elle augmente jusqu'à 89,72% en moyenne en présence de 5 g/l par rapport aux plantules témoins (88,85%). Au delà, une diminution progressivement est observée en fonction de l'augmentation des concentrations en NaCl.

Les teneurs en chlorophylle (a) et totale ont subi une réduction significative selon l'intensité du stress salin.

La proline et les sucres solubles totaux sont accumulés en quantité relativement proportionnelle aux concentrations salines. Leurs teneurs sont corrélées négativement aux teneurs relatives en eau et de la chlorophylle totale. Ces osmotocums participent à l'ajustement osmotique des cellules du végétal en condition saline.

Les résultats obtenus, lors de cette étude pour l'essai du stress hydrique sur les plantules de *P. atlantica*, indiquent que la réponse à cette contrainte dépend de l'intensité du stress appliqué, cet effet se traduit par une réduction de la hauteur de la tige, de la teneur relative en eau et de la teneur en chlorophylle totale. Une

augmentation des quantités des solutés (proline et sucres solubles) est observée, cette augmentation est d'autant plus importante que l'intensité du stress est élevée.

Les réponses morphologiques, physiologiques et biochimiques des plantules de pistachier de l'Atlas vis-à-vis du stress hydrique contribuent efficacement au mécanisme de la tolérance de l'espèce à la sécheresse.

Les résultats obtenus lors de l'étude de l'effet de la contrainte saline et hydrique sur les plantules du pistachier vrai (*Pistacia vera*) indiquent que le sel réduit la croissance en hauteur et en biomasse fraîche et sèche et tend à maintenir le développement de son système racinaire. Le stress hydrique a provoqué une diminution non significative de la croissance en longueur et une augmentation de la teneur en proline.

A la lumière des résultats obtenus dans cette étude, on peut déduire que les deux espèces étudiées ont montré une grande résistance aux stress salin et hydrique manifestée par des modifications morphologiques, physiologiques et biochimiques.

En effet, les deux espèces tendent à réduire la croissance de ses organes aériens pour surmonter l'effet de stress salin et hydrique. Cependant, la croissance en longueur de la partie racinaire n'a pas été fortement influencée par le stress salin et hydrique. Les modifications morphologiques sont accompagnées par une forte accumulation des solutés organiques (proline, sucres solubles). Ces différents mécanismes observés sont des indices de résistance chez les plantes tolérantes.

Toutefois, il est très difficile expérimentalement de cerner précisément les caractéristiques de la sécheresse et de la salinité à laquelle le pistachier de l'Atlas et le pistachier vrai sont confrontés dans leur aire de distribution. Plusieurs autres questions restent encore posées et nécessitent d'être approfondies.

En perspective, pour mieux comprendre les mécanismes qui permettent à une plante de s'adapter à son environnement abiotique et afin de compléter ce travail de recherche, nous proposons:

- Suivre l'effet des stress abiotiques sur des graines du pistachier de l'Atlas issues de différentes provenances d'Algérie.

- Suivre l'effet des stress abiotiques sur d'autres variétés du pistachier vrai provenant d'autres sites de l'Algérie.
- Compléter notre étude avec d'autres aspects de la tolérance aux stress salin et hydrique tels la pression osmotique foliaire, les protéines solubles, le contenu des différents organes en éléments minéraux (Na^+ , Cl^- , K^+).
- Identification des mécanismes de résistance comme les systèmes antioxydants enzymatiques et non enzymatiques.
- Utilisation des techniques de biologie moléculaire afin d'identifier les gènes responsables de la tolérance aux stress abiotiques.

Nous souhaitons confirmer les résultats obtenus à des stades plus avancés en plein champ pour élucider les mécanismes d'adaptation de ces espèces à la sécheresse et à la salinité en prenant en compte les conditions pédoclimatiques réelles des zones arides et semi-arides.

Ces recommandations sont en partie en cours d'expérimentation pour des résultats de recherche futurs.

ANNEXE A

Analyse de la variance (pistachier de l'Atlas)

ANOVA à 1 facteur

Taux de germination (%)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	44386,667	6	7397,778	5690,598	,000
Intra-groupes	26,000	20	1,300		
Total	44412,667	26			

Taux de germination (%)

Test de Tukey

NaCL	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
25	4	,00					
30	3	,00					
20	4		4,00				
15	4			33,00			
10	4				77,00		
5	4					86,00	
0	4						100,00
Signification		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilisez la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,818.

b. Les effectifs des groupes ne sont pas égaux. La moyenne harmonique des effectifs des groupes est utilisée. Les niveaux des erreurs de type I ne sont pas garantis.

ANOVA à 1 facteur

longueur tige (cm)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	33,811	6	5,635	5,832	,003
Intra-groupes	13,527	14	,966		
Total	47,338	20			

longueur tige (cm)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
30	3	10,833	
20	3	11,000	
25	3	11,167	
15	3	12,000	12,000
10	3	13,167	13,167
0	3	13,500	13,500
5	3		14,267
Signification		,059	,138

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

longueur racine (cm)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	676,143	6	112,690	12,089	,000
Intra-groupes	130,500	14	9,321		
Total	806,643	20			

longueur racine (cm)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
30	3	17,167		
25	3	23,333	23,333	
20	3		26,833	26,833
15	3		29,500	29,500
10	3		30,667	30,667
0	3			32,667
5	3			35,333
Signification		,240	,114	,050

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

Poids frais tige (g)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	,120	6	,020	6,761	,002
Intra-groupes	,041	14	,003		
Total	,161	20			

Poids frais tige (g)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
30	3	,638700		
25	3	,708633	,708633	
20	3	,753867	,753867	,753867
15	3	,762100	,762100	,762100
10	3		,800600	,800600
5	3		,854333	,854333
0	3			,872567
Signification		,148	,063	,175

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

poids frais racine (g)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	,078	6	,013	4,373	,011
Intra-groupes	,041	14	,003		
Total	,119	20			

poids frais racine (g)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
20	3	,372500	
25	3	,401633	
30	3	,426467	
5	3	,429467	,429467
15	3	,452167	,452167
10	3	,462467	,462467
0	3		,578333
Signification		,441	,056

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

poids frais racine (g)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	,078	6	,013	4,373	,011
Intra-groupes	,041	14	,003		
Total	,119	20			

poids frais racine (g)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
20	3	,372500	
25	3	,401633	
30	3	,426467	
5	3	,429467	,429467
15	3	,452167	,452167
10	3	,462467	,462467
0	3		,578333
Signification		,441	,056

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

poids sec tige (g)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	,091	6	,015	5,802	,003
Intra-groupes	,037	14	,003		
Total	,128	20			

poids sec tige (g)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
30	3	,224200	
25	3	,344333	,344333
20	3	,356600	,356600
15	3		,369667
10	3		,402767
5	3		,417900
0	3		,441967
Signification		,078	,294

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilisez la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

poids sec racine (g)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	,015	6	,002	1,670	,201
Intra-groupes	,021	14	,001		
Total	,036	20			

poids sec racine (g)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05
		1
10	3	,195133
15	3	,217667
20	3	,218667
30	3	,232033
5	3	,235933
25	3	,236233
0	3	,288667
Signification		,109

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

surface foliaire (cm)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	45,755	6	7,626	492,467	,000
Intra-groupes	,217	14	,015		
Total	45,972	20			

surface foliaire (cm)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
30	3	5,093333	6,030000	7,316667	7,596667	8,503333
25	3					
20	3					
15	3					
0	3	8,503333				
10	3					
5	3	8,666667	9,716667			
Signification		1,000		1,000	,154	,680

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteurteneur sucre solubles ($\mu\text{g/g MF}$)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	22,546	6	3,758	74,663	,000
Intra-groupes	,705	14	,050		
Total	23,251	20			

teneur sucre solubles ($\mu\text{g/g MF}$)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
0	3	2,648567		
5	3	2,921800		
10	3	3,248300		
15	3		4,620800	
20	3		4,693833	
25	3		4,740067	
30	3			5,606167
Signification		,064	,993	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilisez la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteurteneur proline feuille ($\mu\text{g/gMF}$)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	6,966	6	1,161	49,764	,000
Intra-groupes	,327	14	,023		
Total	7,292	20			

teneur proline feuille ($\mu\text{g}/\text{gMF}$)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
0	3	,552800		
5	3	,705967	,705967	
10	3		1,094067	
15	3			1,768367
25	3			1,919567
20	3			1,954667
30	3			1,964967
Signification		,872	,085	,698

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteurteneur en proline tige ($\mu\text{g}/\text{gMF}$)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	7,354	6	1,226	39,096	,000
Intra-groupes	,439	14	,031		
Total	7,793	20			

teneur en proline tige ($\mu\text{g}/\text{gMF}$)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
0	3	,182900	
5	3		1,466933
15	3		1,814933
10	3		1,890367
20	3		1,898867
25	3		1,907933
30	3		1,935233
Signification		1,000	,068

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteurTeneur proline racine ($\mu\text{g/gMF}$)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	8,971	6	1,495	31,765	,000
Intra-groupes	,659	14	,047		
Total	9,630	20			

Teneur proline racine ($\mu\text{g/gMF}$)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05			
		1	2	3	4
0	3	,413333			
5	3		1,144133		
10	3		1,654733	1,654733	
20	3			2,061463	2,061463
15	3			2,073567	2,073567
25	3			2,155467	2,155467
30	3				2,439233
Signification		1,000	,125	,138	,386

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

teneur relative en eau (%)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	2990,263	6	498,377	703,705	,000
Intra-groupes	9,915	14	,708		
Total	3000,178	20			

teneur relative en eau (%)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
30	3	55,586667				
25	3		63,986667			
20	3		65,656667	65,656667		
15	3			67,860000		
10	3				74,950000	
0	3					88,850000
5	3					89,723333
Signification		1,000	,256	,072	1,000	,854

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilisez la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

teneur chlorophylle a (mg/g MF)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	1,484	6	,247	14,150	,000
Intra-groupes	,245	14	,017		
Total	1,728	20			

teneur chlorophylle a (mg/g MF)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
30	3	,555067		
25	3	,668367		
15	3	,730900	,730900	
20	3	,745433	,745433	
5	3		1,090467	1,090467
10	3			1,240400
0	3			1,242567
Signification		,589	,058	,789

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilisez la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

teneur chlorophylle b (mg/g MF)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	,062	6	,010	2,583	,067
Intra-groupes	,056	14	,004		
Total	,119	20			

teneur chlorophylle b (mg/g MF)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05
		1
25	3	,424800
15	3	,431533
5	3	,479867
10	3	,484633
20	3	,506600
30	3	,521867
0	3	,598333
Signification		,056

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilisez la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

Chloro-totale (mg/g MF)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	1,815	6	,303	17,416	,000
Intra-groupes	,243	14	,017		
Total	2,058	20			

Chloro-totale (mg/g MF)

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
30	3	1,076933		
25	3	1,093167		
15	3	1,162433		
20	3	1,252033	1,252033	
5	3		1,570333	1,570333
10	3			1,725033
0	3			1,840900
Signification		,669	,111	,226

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

a. Utilise la taille d'échantillon de la moyenne harmonique = 3,000.

ANOVA à 1 facteur

Rapport I ong raci/long tige

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	1,861	6	,310	4,033	,015
Intra-groupes	1,076	14	,077		
Total	2,937	20			

Rapport I ong raci/long tige

Test de Tukey

dose sel	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
30	3	1,595389	
25	3	2,113527	2,113527
10	3	2,331722	2,331722
0	3		2,419145
20	3		2,442029
15	3		2,469091
5	3		2,483265
Signification		,067	,666

Analyse de la variance (pistachier vrai)

ANOVA à 1 facteur

A .Longueur tige

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	444,500	6	74,083	16,291	,000
Intra-groupes	63,667	14	4,548		
Total	508,167	20			

Test de Tukey

dose de NaCl	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
30	3	12,667	
25	3	13,000	
20	3	13,833	
15	3	15,833	
10	3	16,000	
5	3	18,333	
0	3		27,000
Signification		,066	1,000

ANOVA à 1 facteur

b. Longueur racine

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	77,333	6	12,889	2,237	,101
Intra-groupes	80,667	14	5,762		
Total	158,000	20			

Test de Tukey

dose de NaCl	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05
		1
20	3	16,00
25	3	16,00
30	3	16,33
15	3	17,33
5	3	19,67
10	3	19,67
0	3	21,00
Signification		,213

ANOVA à 1 facteur

c. Poids frais tige

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	31,202	6	5,200	26,114	,000
Intra-groupes	2,788	14	,199		
Total	33,990	20			

Poids frais tige

Test de Tukey

dose de NaCl	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05			
		1	2	3	4
30	3	,835533			
25	3	1,352333	1,352333		
20	3	1,427833	1,427833		
15	3		2,103000	2,103000	
10	3			3,286667	3,286667
5	3				3,853500
0	3				4,111000
Signification		,670	,423	,067	,325

ANOVA à 1 facteur

d. Poids frais racine

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	4,351	6	,725	28,442	,000
Intra-groupes	,357	14	,025		
Total	4,708	20			

Poids frais racine

Test de Tukey

dose de NaCl	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
30	3	,531333		
20	3	,553233		
25	3	,558233		
15	3	,748133		
10	3	,789900		
5	3		1,308167	
0	3			1,835700
Signification		,464	1,000	1,000

ANOVA à 1 facteur

e. Poids sec tige

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	3,576	6	,596	53,983	,000
Intra-groupes	,155	14	,011		
Total	3,730	20			

Poids sec tige

Test de Tukey

dose de NaCl	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
30	3	,282533		
20	3	,455967	,455967	
25	3	,530600	,530600	
15	3		,673167	
10	3			1,193767
5	3			1,323933
0	3			1,341633
Signification		,124	,220	,613

ANOVA à 1 facteur

F .Poids secracine

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	,186	6	,031	51,771	,000
Intra-groupes	,008	14	,001		
Total	,194	20			

Poids sec racine

Test de Tukey

dose de NaCl	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
25	3	,107900		
20	3	,113200		
30	3	,139367		
10	3	,153867		
15	3	,169533		
5	3		,286133	
0	3			,379033
Signification		,089	1,000	1,000

ANOVA à 1 facteur

g. Rapport racine/tige

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	,521	6	,087	3,493	,025
Intra-groupes	,348	14	,025		
Total	,869	20			

Rapport racine/tige

Test de Tukey

dose de NaCl	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
0	3	,777506	
5	3	1,089015	1,089015
15	3	1,108466	1,108466
20	3	1,177419	1,177419
10	3		1,231046
25	3		1,233822
30	3		1,285048
Signification		,086	,728

ANOVA à 1 facteurk. Surface foliaire (cm²)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	12,156	6	2,026	47,929	,000
Intra-groupes	,592	14	,042		
Total	12,747	20			

Surface foliaire (cm²)

Test de Tukey

NaCl (g/l)	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
30	3	,405000					
25	3		1,025667				
20	3		1,196667	1,196667			
15	3			1,717333	1,717333		
10	3				2,082000	2,082000	
5	3					2,412333	2,412333
0	3						2,715000
Signification		1,000	,941	,087	,367	,473	,567

Stress hydrique

ANOVA à 1 facteur

a. Longueur tige (cm)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	240,097	3	80,032	2,154	,171
Intra-groupes	297,180	8	37,148		
Total	537,277	11			

Longueur tige (cm)

Test de Tukey

Jours de stress	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05
		1
21	3	15,666667
15	3	20,233333
0	3	26,000000
5	3	26,566667
Signification		,205

ANOVA à 1 facteur

b. Longueur racine (cm)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	137,323	3	45,774	1,367	,321
Intra-groupes	267,880	8	33,485		
Total	405,203	11			

Longueur racine (cm)

Test de Tukey

Jours de stress	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05
		1
21	3	20,833333
15	3	25,333333
5	3	26,400000
0	3	30,333333
Signification		,260

ANOVA à 1 facteurc. Teneur en proline feuille ($\mu\text{g}/\text{gMF}$)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	2,119	3	,706	47,201	,000
Intra-groupes	,120	8	,015		
Total	2,239	11			

Teneur en proline feuille ($\mu\text{g}/\text{gMF}$)

Test de Tukey

Jours de stress	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05			
		1	2	3	4
0	3	,431667			
5	3		,764667		
15	3			1,141667	
21	3				1,557333
Signification		1,000	1,000	1,000	1,000

ANOVA à 1 facteur

d. Teneur en proline tige

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	4,338	3	1,446	67,502	,000
Intra-groupes	,171	8	,021		
Total	4,509	11			

Teneur en proline tige

Test de Tukey

Jours de stress	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
0	3	,245667		
5	3		1,380333	
15	3		1,471333	
21	3			1,859667
Signification		1,000	,869	1,000

ANOVA à 1 facteure. Teneur en proline racine ($\mu\text{g}/\text{gMF}$)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	,247	3	,082	23,575	,000
Intra-groupes	,028	8	,003		
Total	,275	11			

Teneur en proline racine ($\mu\text{g}/\text{gMF}$)

Test de Tukey

Jours de stress	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
15	3	,100000		
0	3	,126333	,126333	
21	3		,270667	
5	3			,461333
Signification		,945	,068	1,000

f. Teneur en sucre solubles ($\mu\text{g}/\text{g MF}$)

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	,149	3	,050	,175	,910
Intra-groupes	2,264	8	,283		
Total	2,413	11			

Teneur en sucre solubles ($\mu\text{g/g MF}$)

Test de Tukey

Jours de stress	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05
		1
0	3	1,957469
15	3	2,156309
5	3	2,224799
21	3	2,234188
Signification		,917

ANNEXE B

Corrélations

		dose sel	LT
dose sel	Corrélation de Pearson	1	-,779**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
LT	Corrélation de Pearson	-,779**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	LR
dose sel	Corrélation de Pearson	1	-,857**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
LR	Corrélation de Pearson	-,857**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	PFT
dose sel	Corrélation de Pearson	1	-,848**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
PFT	Corrélation de Pearson	-,848**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	PFR
dose sel	Corrélation de Pearson	1	-,571**
	Sig. (bilatérale)		,007
	N	21	21
PFR	Corrélation de Pearson	-,571**	1
	Sig. (bilatérale)	,007	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	PST
dose sel	Corrélation de Pearson	1	-,774**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
PST	Corrélation de Pearson	-,774**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	PSR
dose sel	Corrélation de Pearson	1	-,252
	Sig. (bilatérale)		,271
	N	21	21
PSR	Corrélation de Pearson	-,252	1
	Sig. (bilatérale)	,271	
	N	21	21

Corrélations

		dose sel	SF
dose sel	Corrélation de Pearson	1	-,695**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
SF	Corrélation de Pearson	-,695**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	TSS
dose sel	Corrélation de Pearson	1	,947**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
TSS	Corrélation de Pearson	,947**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	TPF
dose sel	Corrélation de Pearson	1	,912**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
TPF	Corrélation de Pearson	,912**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	TPT
dose sel	Corrélation de Pearson	1	,721**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
TPT	Corrélation de Pearson	,721**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	TPR
dose sel	Corrélation de Pearson	1	,897**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
TPR	Corrélation de Pearson	,897**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	TRE
dose sel	Corrélation de Pearson	1	-,959**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
TRE	Corrélation de Pearson	-,959**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	CHL a
dose sel	Corrélation de Pearson	1	-,847**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
CHL a	Corrélation de Pearson	-,847**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	CHL b
dose sel	Corrélation de Pearson	1	-,302
	Sig. (bilatérale)		,184
	N	21	21
CHL b	Corrélation de Pearson	-,302	1
	Sig. (bilatérale)	,184	
	N	21	21

Corrélations

		dose sel	CHL total
	Corrélation de Pearson	1	-,849**
dose sel	Sig. (bilatérale)		,000
	N	21	21
	Corrélation de Pearson	-,849**	1
CHL total	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Corrélations

		dose sel	LR/LT
	Corrélation de Pearson	1	-,592**
dose sel	Sig. (bilatérale)		,005
	N	21	21
	Corrélation de Pearson	-,592**	1
LR/LT	Sig. (bilatérale)	,005	
	N	21	21

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

ANNEXE C

- Stress salin

1. ACP paramètres morphologiques et physiologiques

Variance totale expliquée

Composante	Somme des carrés des facteurs retenus pour la rotation		
	Total	% de la variance	% cumulés
1	3,986	56,947	56,947
2	1,775	25,355	82,302

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

Matrice des coefficients des coordonnées des composantes (Méthode de rotation : Varimax avec normalisation de Kaiser)

	Composante	
	1	2
LT	,197	-,141
LR	,165	,001
PFT	,156	,047
PFR	-,034	,442
PST	,140	,065
PSR	-,129	,551
SF	,220	-,278
TRE	,150	,060
CHL total	,126	,098

2. ACP paramètres physiologiques et biochimiques

Matrice des coefficients des coordonnées des composantes (Méthode de rotation : Varimax avec normalisation de Kaiser)

	Composante
	1
teneur sucre solubles	,156
teneur proline feuille	,157
teneur en proline tige	,131
Teneur proline racine	,154
teneur relative en eau	-,155
teneur chloro (a)	-,147
teneur chloro (b)	-,073
Chloro-totale	-,152

3. ACP tous les paramètre

Variance totale expliquée

Composante	Somme des carrés des facteurs retenus pour la rotation		
	Total	% de la variance	% cumulés
1	7,279	45,497	45,497
2	3,177	19,859	65,356
3	2,938	18,363	83,718

Matrice des coefficients des coordonnées des composantes (Méthode de rotation :
Varimax avec normalisation de Kaiser)

	Composante		
	1	2	3
long tige	,252	-,124	-,187
long racine	-,024	-,066	,302
Poids frais tige	,019	-,016	,185
poids frais racine	-,041	,260	,006
poids sec tige	-,042	-,030	,297
poids sec racine	-,179	,352	,116
surface foliaire	,193	-,217	-,033
teneur sucre solubles	-,128	,000	,026
teneur proline feuille	-,145	-,061	,113
teneur en proline tige	-,098	-,222	,203
Teneur proline racine	-,120	-,101	,101
teneur relative en eau	,113	,009	-,001
teneur chloro (a)	,137	-,031	-,028
teneur chloro (b)	-,061	,301	-,051
Chloro-totale	,111	,044	-,038
Rapport l ong raci/long tige	-,232	-,004	,577

Méthode d'extraction : Analyse en composante principales.
Méthode de rotation : Varimax avec normalisation de Kaiser
Scores composante.

- Stress hydrique

	Composante			
	1	2	3	4
Teneur en proline	0,20	0,05	-0,02	0,04
Teneur en proline tige	0,19	0,04	0,05	-0,07
Teneur en proline racine	0,18	0,02	0,01	0,07
Teneur en chlorophylle a	-0,08	-0,08	0,35	0,11
Teneur en chlorophylle b	0,15	0,01	0,46	-0,12
Chlorophylle totale	-0,04	-0,07	0,45	0,07
Longueur tige	0,08	0,21	0,03	-0,04
Longueur racine	0,03	-0,03	0,01	0,82
Rapp long.raci/long.tige	-0,06	-0,24	-0,01	0,43
Poids frais tige	0,00	0,19	-0,08	0,04
Poids frais racine	0,01	0,17	0,00	0,08
Poids sec tige	0,03	0,21	-0,08	0,08
Poids sec racine	0,08	0,24	-0,05	0,04
Teneur en sucres solubles	0,24	0,07	0,10	0,04
Teneur relative en eau	-0,21	-0,03	-0,05	-0,04

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.
Méthode de rotation : Varimax avec normalisation de Kaiser.
Scores composante.

APPENDICE D

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP: Analyse en composantes principales.
C° : Degré Celsius.
Chl a: Chlorophylle (a).
Chl b: Chlorophylle (b).
Chl T: Chlorophylle totale.
DO: Densité optique.
g : Gramme.
g /l: Gramme par litre.
ha: Hectare.
INRF: Institut National de la Recherche Forestière.
ITAFV: Institut Technique des Arbres Fruitier et de la Vigne.
INSID: Institut National des Sols, Irrigation et Drainage.
LT: Longueur de la tige.
LR: Longueur de la racine.
m: Mètre.
mm: Millimètre.
MF: matière fraîche.
mg: Milligramme.
MS: Matière sèche.
NaCl: Chlorure de sodium.
PFR: Poids frais de la racine.
PFT: Poids frais de la tige.
PSR: Poids sec de la racine.
PST: Poids sec de la tige.
SF: Surface foliaire.
SM: Somme des carrées.
s.m⁻¹: Siemens par mètre.
TG: Taux de germination.
TMG: Temps moyen de germination.
TPF: Teneur en proline dans la feuille
TPT: Teneur en proline dans la tige
TPR: Teneur en proline dans la racine.
TRE: Teneur relative en eau.
TSS: Teneur en sucres solubles.
µg/gMF: Microgramme par gramme de matière fraîche.
%: Pourcentage.

REFERANCES

- [1]. ZID, E. et GRIGNON C., "Les tests de sélection précoce pour la résistance des plantes aux stress: cas des stress salin et hydrique. II ème journées scientifiques du réseau de biotechnologie végétale. L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides", Paris (1991), 91–108.
- [2]. BENMAHIOUL, B., DAGUIN, F. et KAID-HARCHE, M., "Effet du stress salin sur la germination et la croissance *in vitro* du pistachier (*Pistacia vera* L.)", *Compte Rendues Biologies*, V. 332, n° 8, (August, 2009), 752-758.
- [3]. HOPKINS, W.G., "Physiologie végétale", Edition De Boeck Université, (2003), 514 p.
- [4]. WANG, W.X., BRAK, T., VINOCCUR, B., SHOSEYOV, O. ET ALTMAN A., "Abiotic resistance and chaperones: possible physiological role of SP1, a stable and stabilising protein from *Populus*. In: Vasil IK, *Plant biotechnology 2000 and beyond*, Kluwer, Dordrecht, (2003), 439-443.
- [5]. BOUCHENAK, F., " Stratégies adaptatives au stress hydrique et salin d'une halophyte spontanée *Atriplex hamulus* Approches physiologiques et biochimiques". Thèse doctorat; université de Blida 1, (2015) 136 p.
- [6]. BELHADJ, S., "Les pistacheraies algériennes: Etat actuel et dégradation" In : Ak, B. E., (Eds).11 GREMPA Seminar on Pistachios and Almonds, September 01-04, 1999. Sanliurfa, Turkey. *Cahiers Options Méditerranéennes*, n°56, (2001), 107-109.
- [7]. GHALEM, B. et BENHASSAINI, H., "Etude des phytostérols et des acides gras de *Pistacia atlantica*", *Afrique science*, V. 3, n ° 3, (2007), 405- 412.
- [8]. EL ZEREY-BELASKRI, A., BENHASSAINI, H., NAIMI, W. and RAHOUI, S., "Cellulosic and hemicellulosic fractions dosage of *Pistacia atlantica* Desf. subsp.

atlantica leaves in western Algeria", Natural Product Research, 27 (19), 1757-1763 doi : 10.1080/14786419.2012.755679, (May 2013), 1-7.

[9]. BENARADJ, A., BOUCHERIT, H., BOUAZZA, M. et HASNAOUI, O., "Ethnobotanique du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica*) auprès la population de Béchar (Algérie occidentale)", Journal of Advanced Research in Science and Technology, V. 2 n°1, (2015), 139-146.

[10]. DAOUDI, A., BOUTOU, H., IBIJBIJEN, J., ZAIR, T. et NASSIRI, L. "Etude ethnobotanique du pistachier de l'Atlas, *Pistacia atlantica* atlantica fruit using five techniques", dans la ville de Meknes-Maroc. ScienceLib Editions Mersenne : (2013), V. 5, n ° 13 11-13.

[11]. BENHASSAINI, H., FETATI, A., KADDOUR HOCINE, A. and BELKHODJA, M., "Effect of salt stress on growth and accumulation of proline and soluble sugars on plantlets of *Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica* used as rootstocks", Biotechnologie Agronomie Société et Environnement, V16 n°2, (2012), 159-165.

[12]. MONJAUZE, A., "Note sur la régénération du betoum par semis naturel dans la place d'essais de Kef – Lefaa", Bulletin de société d'histoire naturelle d'Afrique du Nord, Tome 57, (1968), 59-65.

[13]. BELHADJ, S., "Pistachio situation in Algeria", FAO. CIHEAM. Nucleus Newsletter, V. 8 (1999), 29-30.

[14]. EMBERGER, L., "Les arbres du Maroc et comment les reconnaître", Larousse, Paris, (1938), 318 p.

[15]. QUEZEL, P. et SANTA S., "Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales", Tome I, C.N.R.S. (1963), Paris, 618p.

[16]. ZOHARY, M., "*Pistacia* L. In: Flora Palestina. Platanaceae to Umbelliferae", Academy of Sciences and Humanities, Palestine, (1987) 2: 296-300.

[17]. QUEZEL, P. et MEDAIL, F., "Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen, Elsevier, collection environnement, (2003), Paris, 571 p.

- [18]. BELHADJ, S., DERRIDJ, A., AUDA, Y., GERS, C. et GAUQUELIN, T., "Analyse de la variabilité morphologique chez huit populations spontanées de *Pistacia atlantica* en Algérie", *Botany*, V. 86, (2008), 520-532.
- [19]. EL ZEREY-BELASKRI, A. and BENHASSAINI, H., "Morphological leaf variability in natural populations of *Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica* along climatic gradient: new features to update *Pistacia atlantica* subsp. *atlantica* key", *International Journal Biometeorology*, 60: 577–589. (2016), doi:10.1007/s00484-015-1052-4.
- [20]. HABANI, N. et MESSAOUDENE, M., "Croissance radiale et sensibilité au climat du pistachier de l'Atlas, *Pistacia atlantica* Desf., en Algérie", *Bois et forêts des tropiques*, V. 3 n° 329, (2017), 3-15.
- [21]. FAO, " **Foresterie en zones arides - Guide à l'intention des techniciens de terrain**", 1992, www.fao.org.
- [22]. MAINGUET, M., "L'homme et la sécheresse", Collection géographie, Masson, Paris, (1995), 335 p.
- [23]. ROBERT, M., "Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement", Masson, paris, (1996). 240 p.
- [24]. STEWART, P.H., "Quotient pluviométrique et dégradation bio sphérique : quelques réflexions", *Bulletin de société d'histoire naturelle d'Afrique du Nord*. Alger, V. 59, (1-4), (1968), 23- 36.
- [25]. DAGET, P.H., "le Bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modèle de caractérisation, végétation", V. 34 n° 1, (1977), 1- 20.
- [26]. POUGET, M., "Les relations sol- végétation dans les steppes sud Algéroises", *Travaux et documents de l'ORSTOM*, n° 116, (1980), Paris, 555p.
- [27]. FLORET, C.H. et PONTANIER, R., "L'aridité en Tunisie présaharienne, climat, sol, végétation et aménagement.3 Mémoire de thèse, *Travaux et documents de l'ORSTOM*, Paris, (1982), 150-544.
- [28]. AGGOUSSINE, M., "Hydrologie en régions arides et semi arides : cas du Sud-Est Marocain", *Terre et vie*, n° 65, (Juin 2003).

[29]. AUBERT, G., "Les sols de la zone aride, étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation". Actes Coll. U.N.E.S.C.O. de Paris sur les problèmes de la zone aride, (1960), 127-150.

[30]. EMBERGER, L., "Une classification biogéographique des climats", Recl. Trav. Lab. Bot. Géol. Zoo, Montpellier, série, Botanique, 7 , (1955), 3-43.

[31]. DEYGOUT, P.H. et TREBOUX M., "Systèmes de production durables en zones sèches : quels enjeux pour la coopération au développement ?", Direction générale de la mondialisation, du développement et des partenariats IRAM Direction de la communication et de la presse, (2012), www.diplomatie.gouv.fr p152

[32]. LE HOUEROU, H.N., "Bioclimatologie et Biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. Diversité biologique, développement durable et désertification" Option méditerranéenne. Série B : études et recherches n° 10, Cheam, Montpellier, (1995), 397 p.

[33]. HALITIM A., "Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes plaines steppiques de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols", Thèse doctorat. univ Rennes, (**1985**), 384 p

[34]. VIERS, G., "Climat et climats des Pyrénées orientales", Annales de Géographie, T 96, n°535, (1987), 339-343.

[35]. FAO "Utilisation des engrais par culture en Algérie", FAO Rome, (**2005**), 61 p.

[36]. LE HOUEROU, H.N., "deterioration of the ecological equilibrium in the aride zone of North Africa" FAO, Rome, (1975), 45- 57.

[37]. DJELLOUILI, Y., "Flores et climats en Algérie septentrionale. Déterminismes climatiques de la répartition des plantes", Thèse Doctorat, USTHB, Alger, (1990), 210 p.

[38]. HALITIM, A., "Sols des régions arides d'Algérie". OPU, Alger, 1988, 384 p.

[39]. HOUMANI, M., "Évolution des terres de parcours et bilan fourrager dans les zones arides algériennes", Actualité Scientifique : Biotechnologies, Amélioration des Plantes et Sécurité, Alimentaire. Collection Universités Francophones ESTEM, Paris. (1997), 175-176.

- [40]. **AUBERT, G.**, "Observation sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou sals sodiques", ORSTOM. Vol xxx n°1, (**1983**), 73-78.
- [41]. SERVANT, J.M., "Etude pédologique des sols halomorphes", Thèse Doctorat, Université, Montpellier, (1975), 194p.
- [42]. **SERVANT, J.M.**, "La salinité dans le sol et les eaux caractérisation et problèmes d'irrigation drainage", Bulletin B.R.G.M., sect III, n°2, (**1978**) 123- 142.
- [43]. SZABOLCS, I., "Soils and salinisation", In Handbook of Plant and Crop Stress, M.Pessarakali, Marcel Dekker, New York, (1994), 3–11.
- [44]. **CLAUD, G., MALHER, C., CLAUD REMY, J., BERTHELM, J. et LOUIS MOREL J.**, "Sol et environnement", Dunod, Paris, (**2005**), 609-625.
- [45]. HAMDY, A., LIETH, H. et MEZHER, Z., "Halophyte performance under high salinity levels: an overview. Saline irrigation: halophyte production and utilization" Project N°1C, 18 Ct 96-0055, (1999), 20-58.
- [46]. KINET, M., BENREBIHA, F.Z, BOUZID, S. , LAILCAHAR, S. et DUPUIT, P., - "Réseau Atriplex", Atelier biotechnologies et écologie pour une sécurité alimentaire accrue en régions arides et semi arides, Cahiers Agricultures, V.7,n°6, (1998) 505-509.
- [47]. LEVIGNERON, A., LOPEZ, F., VARISUYT, G., BERTHOMIEN, P. et CASSE-DELBAR, T., "Les plantes face au stress salin", Cahier d'agriculture, V.4: (1995), 263-273.
- [48]. ANONYME, "Les sols salés en Algérie", INSID, (2008)
- [49]. **LE HOUEROU, H.N.**, "Salt - tolerant plants for the arid region of the Mediterranean isoclimatique zone In: H. Leith et A Al Massoom, towards the rational use of high salinity tolerant plants", Kluwer academ V. 1, (**1993**), 403- 422.
- [50]. **DJILI, K.**, "Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie", Thèse doctorat, INA, Alger, (**2000**), 243 p.
- [51]. LEVY, G.J., "Sodicity" Sumner M.E. Handbook of Soil Science, (2000), 27-62.

[52]. DUCHAUFFOUR, PH., "Pédogénèse et classification, Masson, Paris, (1983), 466 p.

[53]. ANONYME, "Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation" Conférence électronique sur la salinisation organisée et coordonnée par: IPTRID (6 février au 6 Mars 2006), 20 p.

[54]. MUNNS, R, RICHARD, A.J., and LAUCHLI A., "Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals", Journal of Experimental Botany, V.57, n°. 5, (2006) 1025–1043

[55]. MEZNI, M., BIZID, E. et HAMZA, M., "Effets de la salinité des eaux d'irrigation sur la survie et la croissance de 03 variétés de luzerne pérennes", fourrages, v. 158, (1999), 169- 178.

[51]. LEVIGNERON, A., LOPEZ, F., VANSYT, G., BERTHOMIEV, P., FOURCROY, P., CSSE-M'BAREK, B., CAABANE, R., SDIRI, H., et LAID, M., "Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production en graine de quelques variétés maghrébine de blé", Sécheresse, n°12, (2001), 167-174.

[52]. DUCHAUFFOUR, P., "Abrégé De Pédologie", Masson, (1983), 220 p.

[56]. DAOUD, Y. et HALITIM, A., "Irrigation Et Salinisation Au Sahara Algérien", Sécheresse, (1994), 151-160.

[57]. U.S.S.L.S. (United State Salinity Laboratory Staff) "Diagnosis and improvement of saline and alkali soils", US Department of Agriculture, Handbook n°60, Washington DC, (1954).

[58]. LAMOND, R. et WHITNEY, D.A., "Management of saline and sodic soils", Kanas State University, Department of Agronomy MF, (1992), 1022 p.

[59]. RICHARDS, L.A., "Diagnosis and improvement of saline and alkali soils Agric", Handb, V. 1, n° 60, (1954).

[60]. FAO, "Prognosis of salinity and alkanity" FAO soils Bulletin 31, (1984), 268 p.

[61]. DUCHAUFFOUR, P.H., "Précis de pédologie", Masson. Paris, (1969), 192 p.

- [62]. FORGES, M., "Irrigation et salinité", Option méditerranéenne, n°14. (1972), 40-45
- [63]. DAOUD, Y., "Contribution à l'étude des sols des plaines de Cheliff, le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux", Thèses doctorat d'état, INA, Alger, (1993), 193 p.
- [64]. FAO, "La qualité de l'eau en agriculture". Bulletin d'irrigation et de drainage, 29 Revel, (1988), 181 p.
- [65]. AYERS, R.S., "Aspects de salinité et de la qualité de l'eau de l'irrigation goutte à goutte", Annales, INA, V. I n°3, (1978), 109- 113.
- [66]. CALVET, R., "Le sol, propriété et fonction, phénomènes physiques et chimiques", Tome 2, Agricole, France, (2003), 511p.
- [67]. ZOHARY, M., "A monographic study of the genus Pistacia", Palestine. J. Bot., Jerusalem Series, V.5, n°4, (1952), 187–228.
- [68]. GAUSSEN, H., LEROY, J.F. et OZENDA, P., "Précis de Botanique.II. Végétaux supérieurs", Masson, Paris, (1982), 600 p.
- [69]. BATTANDIER, J.A. et TRABUT, L.C., "Flore de l'Algérie", Adolphe Jourdan. Alger, (1888), 825 p.
- [70]. MONJAUZE, A., "Connaissance du bétoum Pistacia atlantica Desf. Biologie et forêt", Revue Forestière Française, V. 4 n°32, (1980), 356–363
- [71]. OZENDA, P., "Flore du Sahara". Deuxième édition C.N.R.S., Paris, (1983) 566 p.
- [72]. EMBERGER, L., "Les végétaux vasculaires", Tome II, Fascicule I, Masson et Cie, (1960), 647-650.
- [73]. DEYSSON, G., "Organisation et classification des plantes vasculaires", Cours de botanique générale, Systématique, Quatrième série, SEDES, (1979), 537 p.
- [74]. SEIGUE, A., "La forêt méditerranéenne et ses problèmes", Techniques agricoles et productions méditerranéennes. G.P. Maisonneuve et Larousse, Paris, (1985), 138-141.

[75]. ALYAFI, J., "Approche systématique et écologie du genre *Pistacia* L; dans la région Méditerranéenne", Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Faculté des sciences et technique, St Jérôme, Marseille (1979).

[76]. KADI-BENNANE, S., "Etude biosystématique et adaptative de trois populations de *Pistacia atlantica* Desf. ssp. *atlantica* (Ain oussera, Messaad et Taissa) par le biais du complexe stomatique et d'une approche anatomique", Thèse de Magister, Ins. Nat. Agr d'El Harrach, Alger, (2004), 112 p.

[77]. HABANI, N., "Etude dendroécologique du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) dans la région steppique. Cas de la wilaya de Djelfa", Thèse Magister, Université de Bab Ezzouar, (2011), 91P.

[78]. KHALDI, A. et KHOUJA M.K., "Atlas pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) in North Africa: taxonomy, geographical distribution, utilization and conservation. In: taxonomy, distribution, conservation and uses of *Pistacia* genetic resources. Proceedings of the IPGRI", Edited by S. Padulosi, T. Caruso and E. Barone. Palermo, Italy, (1996), 57-52.

[79]. MANSOUR, "Contribution a l'étude de la répartition du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) dans la wilaya de Naama - cas de Gaaloul", mémoire magister, université de Telemcen, (2011), 92p.

[80]. BENHASSAINI, H., "Contribution à l'étude de l'autoécologie de *Pistacia atlantica* Desf sp. et valorisation", Thèse de doctorat d'Etat, (2004), 82 p.

[81]. FOURNIER, P., "Flore illustrée des jardins et des parcs, Arbres et arbustes et fleurs de pleine terre", Tome II, Masson, Paris, (1952), 549 p.

[82]. YAAQOBI, A., EL HAFID, L. et HALOUI B., "Etude biologique de *Pistacia atlantica* Desf. De la région Orientale du Maroc", Biomatec Echo, V. 6 n°3, (2009) 39–49

[83]. OZENDA, P., "Flore du Sahara", 1ère édition, C.N.R.S., (1977), 622 p.

[84]. KHICHANE, M., "Etude de la morphogénèse et des rythmes de croissance du système racinaire du jojoba (*Simmondsia chinensis* Link) et du pistachier de l'Atlas

(*Pistacia atlantica* Desf.) Essai de production de plants en pépinières", Mémoire Ing. Agr. I.N.A. El Harrach, (1988), 68 p.

[85]. LIMANE, A., "Architecture racinaire du pistachier de l'Atlas en relation avec les propriétés physico-chimiques du sol sous jacent : cas de la population de la réserve nationale d'El-Mergueb" (Wilaya de M'sila), Algérie", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, (2009), 113 p.

[86]. BOUDY, P., "Économie forestière nord-africaine", Tome IV, Description forestière de l'Algérie, Larousse, Paris, (1995), 483 p.

[87]. ZOHARY, M., "The genus *Pistacia* L. In: Taxonomy, distribution, conservation and uses of *Pistacia* genetic resources", Proceedings of the IPGRI Workshop 29-30 June 1995, Edited by S. Padulosi, T. Caruso and E. Barone. Palermo, Italy, (1996), 1-11.

[88]. BROUSSE, G., "Etude bibliographique sur la culture du pistachier, polycopie INA, El Harrach, (1974), 40p.

[89]. NEGRE, R., "Petite flore des régions arides du Maroc occidentale", Tome 2, C.N.R.S., (1962), 566 p.

[90]. KHALIF, T., "la culture du pistachier en Syrie", Thèse de Doctorat, Université de Gembloux,(1959), 239 p.

[91]. KADIK, B., "Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Algérie: Ecologie, dendrométrie, morphologie", Thèse de Doctorat, université, d'Aix Marseille III, Jérôme, (1983), 313 p.

[92]. AOUDJIT, H. et MOUISSA, H., "Contribution à l'étude de la propagation végétative du Pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf)", Mémoire Ing. Agr. I.N.A. El Harrach, (1997), 61 p.

[93]. KHELLIL, A. et KHELLAL, A., "Possibilités de cultures et délimitation des zones a vocation pistachier en Algérie", Fruits V .35, n°3, (1980), 177-185.

[94]. KHELLIL, A., "L'écosystème quel avenir", Dahlab, (1997), 137 p.

[95]. BELHADJ, S., "Etude éco-botanique de *Pistacia atlantica* Desf. (Anacardiaceae) en Algérie, préalable à la conservation des ressources génétiques de l'espèce et sa

valorisation", Thèse de Doctorat d'Etat, université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, (2007), 183 p

[96]. ALETA, N.; NINOT, A.; ROUSKAS, D.; ZAKINTHINOS, G.; AVANZATO, D. et MENDES GASPAR, A., "La multiplication su Pistachier. RevOption méditerranéenne Amélioration d'espèces à fruits à coque noyer, Pistachier", série B: Etudes et recherches, n° 16 , Germain, (1997), 121-132.

[97]. MULLER, C., "Le point sur la conservation des semences forestiers et la levée de dormance", Revue Forestière Française, V. 38,n°3, (1986), 202-204.

[98]. MORSLI, A., "Analyse de la floraison et de la structure sexuelle d'un peuplement de *Pistacia atlantica Desf* dans un daya de la région de Messaad", Mémoire Ingénieur, INA, El Harrach Alger, (1992), 57p.

[99]. MULLER, C., BONNET-MASIMBERT, M. et LARROPE, E."Nouvelles voies dans le traitement des graines dormants de certains feuillus, Frêne, Merisier", Revue Forestière Française, V42, n°3, (1990), 329-345.

[100]. SUSKQ, B., "Physiological aspect of seed conservation", Annales des sciences forestières, (1989), 72-84.

[101]. MAZLIAK, P., "Physiologie végétale, croissance et développement", T.2. Hermann, (1982), 486p.

[102]. GASPAR, T., "New growth regulators in tisse culture. Proceedings of the BPTCG autumn symposium New hormone in the control of plant cell, tissue and organe culture". Ulg. November 18th (1994)

[103]. BOUALEM, S.A., "Contribution à l'amélioration des techniques de stratification et de greffage de quelques espèces du genre *Pistacia*", Thèse de doctorat, université de Mascara, (2015), 160p.

[104]. BENMAHIOUL, B., "Amélioration de la micropropagation in vitro du pistachier *Pistacia vera* en vue de l'extension des vergers en Algérie", Thèse de doctorat, université d'Oran, (2009),136 p.

[105]. SPINA, P. et PENNISI, F., "La culture du pistachier en Sicile", Ortofloro-fructicultura, Italie, (1957), 533-557.

- [106]. WOODROOF, J. G., "The nuts, Production processing products", V. III 2nd Edition, The AVI, Publishing Comp, Inc, Westport Connecticut, File// A: le % 20 au %20. Maroc, htm., (1979)
- [107]. JACQUY, P., "Multiplication du pistachier en pépinière", FAO-INRAT, Tunisie, (1 972), 60p.
- [108]. OUKABLI, A., "Le pistachier: Un arbre fruitier et forestier", Transfert de technologie en agriculture, n° 125, (2005), 1- 4.
- [109]. CHEBOUTI, Y., "Note technique sur la culture du pistachier fruitier" La forêt algérienne, n° 04, Institut Nationale de la Recherche Forestière, (2002), 32-36.
- [110]. WHITEHOUS, W.E., " pistachio nut, a new crop for the Western United States" Economic Botany, (1957), 281-321.
- [111]. FAO, "Données statistique sur la culture du pistachier" (2011), www.fao.com
- [112]. CHATIBI, A., KCHOUK, M.L., BEN ABDALLAH, ZEMNI, H. et GHORBEL, A., "Rooting improvement of *Pistacia vera* L. CV. Mateur by in vitro culture of apices and cuttings", Acta Horticulturae, 419 (1995), 213-219.
- [113]. CHATIBI, A., KCHOUK, MI., ZEMNI, H. et GHOBEL, A., "organogenèse *in vitro* du Pistachier (*Pistacia vera*) cv Mateur à partir de feuilles d'embryons zygotiques", cahier option méditerranéenne. xeme colloque du GREMPA, V. 33 Apdo 20250080, Zaragoza, Espagne, (1998), 131-138.
- [114]. BENMAHIOUL, B., KHELIL, B., KAÏD-HARCHE, M. et DAGUIN, F., "Etude de la germination et de l'effet du substrat sur la croissance de jeunes semis de *Pistacia vera* L", Acta Botanica Malacitana, V.3 n°5, (2010), 1 07-114.
- [115]. HANS SELYE, M.D., "The stress of lif". Library of Congress Catalog Card n° 58, (1963), 10432.
- [116]. KARA, Y. et BELLKHIRI, C.E., "Etude des caractéristiques d'adaptation au déficit hydrique de quelques variétés de blé dur et d'espèces sauvages apparentées: intérêt potentiel de ces variétés pour l'amélioration de la production", Courrier de Savoir, (2011), 119-126.

- [117]. TREMBLIN, G., "Comportement auto-écologique de *Halopeplis amplexicaulis*: plante pionnière des sebkhas de l'ouest algérien", *Sécheresse*, V. 11 n° 2, (2000), 109-116.
- [118]. NDOUR, P. et DANTHU, P., "Effet des contraintes hydrique et saline sur la germination de quelques acacias africains" *Projet National de Semences Forestières du Sénégal*, (2000), 11 p.
- [119]. BOULGHALAGH, J., BERRICHI, A., EL HALOUANI, H. et BOUKROUTE, A., "Effet des stress salin et hydrique sur la germination des graines du jojoba (*Simmondsia chinensis* [link] schneider). Recueil des résumés. Le Premier Congrès National sur l'Amélioration de Production Agricole, Settat, Maroc, (2006), 24p.
- [120]. BENATA, H., BERRICHI, A.B, REDA TAZI, M., ABDELMOUMEN, H. et MISBAH EL IDRISSE, M., "Effet du stress salin sur la germination, la croissance et le développement de trois espèces légumineuses *Acacia tortilis* var. raddiana, *Leucaena leucocephala* et *Prosopis juliflora*", *Le Premier Congrès National sur l'Amélioration de Production Agricole Settat*, (Recueil des résumés), 2006.
- [121]. DEBEZ, A, CHAIBI, W. et BOUZID, S., "Effet du NaCl et de régulateurs de croissance sur la germination d'*Atriplex halimus* L", *Agriculture*, V.2 n°10, (2001), 8-13.
- [122]. BAJJI, M., KINET, J.M. et LUTTS, S., "Osmotic and ionic effects of NaCl on germination, early seedling growth, and ion content of *Atriplex halimus* (*Chenopodiaceae*)", *Canadien Journal Botany*, V. 3 n°80, (2002), 297-304.
- [123]. BELKHODJA, M. et BIDAÏ, Y., "Réponse des graines d'*Atriplex halimus* L. à la salinité au stade de la germination", *Sécheresse*, V.4, n°15, (2004), 331-334.

- [124]. NAIDOO, G. et KIFT, J., "Responses of the saltmarsh rush *Juncus kraussii* to salinity and waterlogging" **Aquatic Botany V.3**, n°86, (2006), 217-225.
- [125]. ABDUL JALEEL, C., GOPI, R., SANKAR, B., MANIVANNAN, P., KISHOREKUMAR, A. SRIDHARAN, R. et PANNEERSELVAM, R. "Studies on germination, seedling vigour, lipid peroxidation and proline metabolism in *Catharanthus roseus* seedlings under salt stress", **South African Journal of Botany V. 2**, n° **73**, (April, 2007), 190-195.
- [126]. MAILLARD, J., "Le point sur l'Irrigation et la salinité des sols en zone aride : Risques et Recommandations" Handicap International, (Novembre 2001), 35p.
- [127]. JABNOUNE, M., "adaptation des plantes au stress Salin : caractérisation de la transporteur de sodium et potassium de la famille HKT chez le riz", Thèse doctorat, université Montpellier II, (2008), 127.
- [128]. RAHMOUNE, C., MAALEM, S., KADRI, K. et BEN NACEUR, M., "Etude de l'utilisation des eaux fortement salées pour l'irrigation des plantes du genre *Atriplex* en zones semi arides", Revue des régions arides, V. 21 n°2, (2008), 924-929.
- [129]. SLAMA, F., "L'effet de chlorure de sodium sur la croissance et la nutrition minérale de six espèces de plantes cultivées", Agronomie tropicale, (1986), 21-26.
- [130]. KSOURI, R., W. MEGDICHE, A., DEBEZ, H., FALLEH, C. GRIGNON and ABDELLY C., "Salinity effects on polyphénol content and antioxidant activities in leaves of the halophyte *Cakile maritima*", Plant Physiol. Biochem., n°45, (2007), 244-249.
- [131]. RUSH, D.W et EPSTEIN, E., "Breeding and selection for salt-tolerance by incorporation of wild germplasm into a domestic tomato" *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* n°106, (1981), 699-704.
- [132]. GREENWAY, H. et MUNNS, R., "Mechanism of salt tolerance in non-halophytes", Annual Review of Plant Physiology, (31), (1980), 149-190.

[133]. MISRA, N., et GUPTA, A.K., "Effect of salt stress on proline metabolism in two high yielding genotypes green gram", *Plant Sci.*, (169) (2005), 331-339.

[134]. SOUALEM, S., "Contribution à l'étude des comportements, morphophysiologiques, anatomiques et biochimiques d'une halophyte, *Atriplex halimus* L., stressée à la salinité", Thèse de Magister, Université Es-Senia, Oran, Algérie, (2005), 75p.

[135]. MUNNS, R., "Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses", *Plant Cell Environ.*, (16), (1993), 15-24.

[136]. LEVITT, J., "Responses of plants to environmental stresses. I-Chilling, freezing and high temperature", Academic Press., New York, (1980), 607 p.

[137]. OUERGHI, Z., ZID, E., HAJJI, M. et SOLTANI, A., "Comportement physiologique du blé dur (*Triticum durum* L.) en milieu salé", *CIHEAM - Options Méditerranéennes*, série A, n°40, (1998), 309- 31.

[138]. SENTENAC, H., e BERTHOMIEU, P., "Découverte d'un nouveau mécanisme de tolérance des plantes au sel" UMR Biochimie et physiologie moléculaire des plantes (Unité mixte Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier /Université/CNRS/ INRA), Service Presse INRA, (2003), 34p.

[139]. GENOUX, C., PUTZOLA, F. et MAURIN, G., "La Lagune méditerranéenne : Les plantes halophiles" TPE. 1 ère S-2, (2000), 22p.

[140]. LUTTGE, U., KLUGE, M. et BAUER, G., "Botanique". 3ème édition, Tec et Doc Lavoisier, Paris, (2002) 439- 450.

[141]. MUNNS, R., BRADY, C.J. and BRLOW, E.W.R., "Solute accumulation in the apex and leaves of wheat during water stress" *Australian Journal Plant Physiology*, 6, (1979), 379- 389.

[142]. JONES, M.M., TURNER, N.C. et OSMOND, C.B. "Mechanisms of drought tolerance In *Physiology and biochemistry of drought resistance in plants*, Acafemie (LG Paleg D. Asppinall. édts)", *Academie press*, (1981) 15-37.

- [143]. GARG, M., HERNANDEZ, JA., CAMPILLO, A., JIMENEZ, JJ., ALARCON, F. et SEVILL, A., "Reponse of antioxidant systems and leaf water relations to NaCl stress in pea plants", *New Phytol.*, n°14, (2002), 241-251.
- [144]. STEWART, C.R. et LEE, J.A., "The role of proline accumulation in halophytes", *Planta*, 120, (1974), 279-289.
- [145]. KAUSS, H., "Biochemistry of regulation" , NORTHCOTE, Review of Biochemistry, V.II, (1977), 119-139.
- [146]. MORRIS, L.C., THOMPSON, J.F. and JOHNSON, C.M., "Metabolism of glutamic and N-acetyl glutamic acid in leaf discs and cell-free extracts of higher plants", *Plant Physiology*, 44, (1969), 1023-1026.
- [147]. BOGGESE, S.F., ASPINALL, D. and PALEG, L.G., "Stress metabolism. IX. The significance of endproduct inhibition of proline synthesis and of compartmentation in relation to stress-induced proline accumulation" *Australian Journal of Plant Physiology*, V.3, (1976), 513-525.
- [148]. STEWART, C.R. ; BOGGESE, F. ; ASPINALL, D. & PALEG, I.G. Inhibition of proline oxidation by water stress. *Plant Physiol.*, 59, (1977). - 930-932.
- [149]. RAYAPATI, P.J. & STEWART, C.R., Solubilization of proline dehydrogenase from maize (*Zea mays* L.) mitochondria. *Plant Physiol.*, 95, 1991 -. 787-791
- [150]. FERNANDEZ, F.M., ARRABACA, M.C. and CARVALHO, L.M.M., "Sucrose metabolism in *Lupinus albus* L. under salt stress", *Biol.Plant.* V. 48 n°2, (2004), 317-319.
- [151]. LAMAZE, T., TOUSCH, D., SARDA, X., GRINON, C., DEPIGNY-THIS, D., MONNEVEUX, P. et BELHASSEN, E., "Résistance des plantes à la sécheresse: mécanismes physiologiques", *Le sélectionneur Français*, V.45, (1995), 75-85. LABERCHE J-C., 2004- La nutrition de la plante In *Biologie Végétale*. Dunod. 2e (éd). Paris: 1994 - 154 -163 .
- [152]. LABERCHE, J.C., "La nutrition de la plante in *Biologie Végétale* , Dunod, 2ème édition, (2004), 154-163.

- [153]. TAHI, H., "Efficience de l'utilisation de l'eau d'irrigation chez la tomate par la technique de PRD (Partial Root zone Drying) et étude des mécanismes physiologiques et biochimiques impliqués", Thèse de doctorat, Université de Cadi Ayyad, Maroc, (2008), 153p.
- [154]. LEBON, E., PELLEGRINO; A., TARDIEU, F. and LECOEUR, J., "Shoot development in grapevine is affected by the modular branching pattern of the stem and intra and inter-shoot trophic competition" *Annals of Botany*. V. 93, (2004), 263 - 274.
- [155]. BERKA, S. et AÏD F., Réponses physiologiques des plants d'*Argania spinosa* (L.) Skeels soumis à un déficit hydrique édaphique", *Sécheresse*, V. 20 n°3 , (2009), 296-302.
- [156]. ALBOUCHI, A., BEJAOUI, Z. et EL AOUNI, M.H. "Influence d'un stress hydrique modéré ou sévère sur la croissance de jeunes plants de *Casuarina glauca Sieb*", *Sécheresse*, 14, (2003), 137-142.
- [157]. AUSSENAC, G. et FINKELSTEN, D., l'influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du cèdre", *Annales des Scientifiques Forestières*, V. 40 n°1, (1983), 67-77.
- [158]. THOMAS, C.D., CAMERON A., GREEN, R.E., BAKKENES, M., BEAUMONT, L.J., COLLINGHAM, Y.C., ERASMUS, B.F.N., DE SIQUEIRA, M.F., GRAINGER, A., HANNAH, L., HUGHES, L., HUNTLEY, B., VAN JAARVELD, A.S., MIDGLEY, G.F., MILES, L., ORTEGA-HUERTA, M.A., TOWNSEND PETERSON, A., PHILLIPS, O.L. and WILLIAMS, S.E., "Extinction risk from climate change" *Nature*, 427, (2004), 145–148.
- [159]. DUGO, M.V.G., "Effet du déficit hydrique sur l'état de nutrition azotée chez les graminées fourragères", Thèse Université de Poitiers, France, (2002), 189 p.
- [160]. FARDEAU, J.C. et FROSSARD, E., "Processus de transformation du phosphore dans les sols de l'Afrique de l'Ouest semi-arides: Application au phosphore assimilable", In Tiessen H and Frossard E (eds) "Phosphorus cycles in

terrestrial and aquatic ecosystems, regional workshop 4: Africa" S.C.O.P.E.IUNEP Nairobi, Kenya, (1991), 18-22.

[161]. TEULAT, B., REKIKI, D., NACHIT, M. et MONNEVEUX, P., "a Comparative osmotic adjustments in barley and tetraploid wheats", *Plant Breeding* 116, 519-523.

[162]. TURNER, N.C., "Adaptation to water deficits" : A changing perspective. *Journal of Plant Physiology*, V. 13, (1986), 175-190.

[163]. MONNEVEUX, P. et BELHASSEN, E., "The diversity of drought adaptation in the wide in Belhassen E. (eds), *Drought tolerance in higher plants: genetical, physiological and molecular biological analysis*", Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, *Plant Growth Regulation*, V. 20, (1996), 85-92.

[164]. BEN NACEUR M.B., NAILY M., et SELMI M., "Effete d'un déficit hydrique, survenant à différents stades de développement du blé, sur l'humidité du sol, la physiologie de la plante et les composants du rendement", *Option Méditerranéenne*, n°2, (1999), 53-60.

[165]. BAJJI M., LUTTS S., KINET J.M., "La résistance au stress hydrique chez le blé dur: Comparaison des comportements au niveau cellulaire et au niveau de la plante entière", *Option Méditerranéenne*, n°40, (2000), 227-231.

[166]. TAIZ, L. et ZEIGER, E., "Plant Physiology", The Benjamin Cummings Publishing Company, Inc., California", *Stress physiology* chapter 14 (1991), 346-370 *Photosynthesis: the light reactions and carbon metabolism*, chapter 8 and 9, (1991), 179-248 *Ethylene and abscisic acid*, chapter 19, 1991 473-489.

[167]. KAISER, W.M., "Effects of water deficit on photosynthetic capacity" . *Physiology Plant*, V. 71, (1987), 142-149.

[168]. HSIAO, T.C. et ACEVEDO, E., "Plant response to water stress, water-use efficiency and drought resistance", *Agricultural Meteorology* 14, (1974), 59-84.

[169]. O'TOOLE, J.C. et CRUZ, R.T., "Response of leaf water potential, stomatal resistance, and leaf rolling to water stress", V. 65 n°3, (Mar 1980), 428-32.

[170]. SLAYTER, R., "The effect of internal water status on plant growth development and yield", *Plant responses to climatic factors*, *Proceedings of the Uppsala Symposium*, UNESCO, 1974.

- [171]. MONNEVEUX, P., THIS, D. et BELHASSEN, E., "Amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse" 121-142 In l'eau dans l'espace rural. production végétale et qualité d'eau (C.Riou, R. Bonhomme, P. Chassin, A. Neveu, F. Papy) INRA, Paris, (1997), 411p.
- [172]. FORD, C.W., and WILSON, J.R., "Changes in levels of solutes during osmotic adjustment to water stress in leaves of four tropical pasture species", *Journal of Plant Physiology*, 8, (1984), 79-91.
- [173]. ACEVEDO, E., FERERES, E., HSIAO, T.C. and HENDERSON D.W., "Diurnal growth trends, water potential, and osmotic adjustment of maize and sorghum leaves in the field" *Plant Physiology*, 64, (1979), 476-480.
- [174]. ACKERSON, R.C., "Osmoregulation in cotton in response to water stress. II. Leaf carbohydrate status in relation to osmotic adjustment", *Plant Physiology*, 67 (1981), 489-493.
- [175]. EL JAAFARI, S., PAUL, R., LEPOIVRE, P., SEMAI, J. et LAITAT E., "Résistance à la sécheresse et réponses à l'acide abscissique : analyse d'une approche synthétique", *Cahiers Agricultures*, 2, (1993), 256-263.
- [176]. MCCUE, K.F., and Hanson, A.D., "Drought and salt tolerance : towards understanding and application", *Tibtech* 8 (1990), 358-62.
- [177]. STEWART, C.R., Proline accumulation : Biochemical aspects. In : Paleg LG, Aspinall D eds. *The physiology and biochemistry of Drought Resistance in Plants*, Academic Press, Sydney (1981), 629-635.
- [178]. BOHNERT, H.J. et JENSEN, R.G., "Strategies for engineering water-stress tolerance in plants" *Tib Tech*, V.14 , (1996), 89-97.
- [179]. [RHODES, D.](#), [HANDA, S.](#) et [BRESSAN, R.A.](#), "Metabolic changes associated with adaptation of plant cells to water stress", [Plant Physiology](#), V. 82n°4, (1986), 890-903.

- [180]. CHUNYANG LI KAIYUNWAN G., "Differences in drought responses of three contrasting *Eucalyptus microtheca* F", Muell. populations, V. 179, n°1-3, (2003) 377-385
- [181]. BONHERT, H.J., NELSON, D.E. et JENSEN, R.G., "Adaptation to environmental stress", Plant Cell, V. 7 (1995), 1099-1111.
- [182]. BRAY, E.A., "Molecular responses to water deficit, Plant Physiology, V. 103, (1993), 1035-1040
- [183]. INGRAM, J. et BARTELS, D., "The molecular basis of dehydration tolerance in plants", Plant Physiology Plant Mol. Biol., V. 47, (1996), 377-403.
- [184]. SHINOZAKI, et YAMAGUCHI- SHINOZAKI, "Gene expression and signal transduction in water stress response", Plant physiology, V. 115, (1997), 327-334.
- [185]. ANONYME, Note synthétique sur les ressources génétique forestières et les peuplements porte graines. Edition: Institut National de Recherche Forestière (INRF),2011.
- [186]. SNOUSSI S. A et HALITIM A., "Valorisation des eaux salines pour la nutritionminérale des plantes cultivées : cas de l'haricot et la tomate". *Etude et gestion des sols*, 5 (4), (1998), 289-298.
- [187]. MAAS, E.V. and HOFFMAN, G. J., "Crop salt tolerance—current assessment". Journal Irrigation Drain Div. ASCE, 103: (1977),115–134.
- [188]. AYERS, R. S. and WESTCOT, D. W., Water quality for agriculture. FAO, Rome, (1985),174 p.
- [189]. **TOUMI**, M. ET **AID F.**, " Effet d'un stress hydrique par arrêt d'arrosage sur la croissance et la physiologie de deux variétés de colza (*Brassica napus* L.)", Revue des Régions Arides, n° 35, (mars, 2014), 17-19.
- [190]. COME, D., "Les Obstacles à la Germination", Masson et Cie, Paris, (1970), 162p.

[191]. KOTOWSKI, F., "Temperature Relations to Germination of Vegetable Seed", Proceedings of the American Society for Horticultural Science, 23, (1926), 176-184.

[192]. PAUL, M.H., PLANCHTON, C., ECOCHARD, R., "Etude des relations entre le développement foliaire, le cycle de développement et la productivité chez le soja", Ann. amélio. Plants, 29, (1979), 479-492.

[193]. BARRS, H.D. et WEATHERLEY, P.E. "Are-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves", Australian Journal Scientific, (1962), 15-412.

[194]. FRANCIS, BUKARD, DLASK, A., "flow networks and combinatorial", Operations research, 5472, (1970), 101-297.

[195]. TROLL, W. et LINDSLEY, J., "A photometric method for the determination of proline", Journal of Biological Chemistry, 215, (1955), 655-660.

[196]. DUBOIS, M., GILLES, K.A., L., HAMILTON, J.K., REBERS, P.A. and SMITH, F., "Colorimetric method for determination of sugar and related substance analytical", Chemistry, 28, (1956), 14-15.

[197]. JAOUADI, W., HAMROUNI, L., SOUAYEH, N. et KHOUJA M.L., "Étude de la germination des graines d'*Acacia tortilis* sous différentes contraintes abiotiques" *Biotechnologie, Agronomie et Société Environnement*, V. 14n°4, (2010), 643-652

[198]. BOUREDJA, N., ZOHEIR MEHDADI, Z., BENDIMERED, F.Z. et CHERIFI, K., "Effets de quelques prétraitements physico—chimiques sur la levée de l'inhibition tégumentaire des graines de *Retama monosperma* Boiss. et recherches des conditions thermiques optimales de germination" *Acta Botanica Gallica*, V.158 n°4, (2011), 633-643.

[199]. NEFFATI, M., "Caractérisation morpho-biologique de certaines espèces végétales nord africaines : implication pour l'amélioration pastorale", Thèse de doctorat, Université de Grand, Belgique, (1994).

[200]. BERKA, S. et HARFOUCHE, A., "Effets de quelques traitements physico-chimiques et de la température sur la faculté germinative de la graine d'Arganier", *Revue Forestière Française*, LIII, (2001), 125-130.

- [201]. GUERROUJ, K. , BOUTERFAS, M., ABDELMOUMEN, H., BOUKROUTE, A. et MISSBAH EL IDRISSE M., "Prétraitement des graines de la luzerne arborescente (*Medicago arborea*L.) et influence de la salinité et de la température sur leurs germinations", *Nature et Technologie*, n° 13, (Juin 2014), 41-46.
- [202] TEKETAY, D., "Germination of *Acacia origena*, *Acacia pilispina* and *Pterofobium stellatum* in response ta different pre-swing seed freatments , temperature and light", *Journal of Arid Environments*, n° 38, (1998), 551-560.
- [203]. BENADJAOUD, A. et AÏD F., "effets de quelques traitements physico-chimiques et de la température sur la faculté germinative des graines de *Parkinsonia aculeata* L", *Annales de l'Institut National Agronomique*, El-Harrach, V. 25, n°1 et 2, (2004).
- [204]. AHOTON, L.E., ADJAKPA, J.B., IFONTI M'PO, M.P. et AKPO, E.L., "Effet des prétraitements des semences sur la germination de *Prosopis africana* (Guill., Perrot. et Rich.) Taub., (Césalpiniciacées)", *Tropicultura*, V.27,n° 4, (2009), 233-238
- [205]. MORITA, T., MIYAMATSU, A., FUJII, M., KOKUBU, H., ABE, M., KURASHIMA, A. and MAEGAWA, M., "Germination in *Zostera japonica* is determined by cold stratification, tidal elevation and sediment type", *Aquatic Botany*, 95, (2011), 234– 241.
- [206]. REDONDO-GÓMEZ, S., ANDRADESMORENO, L., PARRA, R., MATEOSNARANJO, E. and SÁNCHEZ-LAFUENTE, A.M. "Factors influencing seed germination of *Cyperus capitatus*, inhabiting the moving sand dunes in southern Europe", *Journal of Arid Environments*, 75, (2011), 309-312.
- [207]. REDA TAZI, M., BERRICHI, A. et HALOUI, B., "Germination et croissance *in vitro* de l'arganier (*Argania spinosa* L. Skeels) des Beni-Snasse (Maroc oriental) à différentes concentrations en *NaCl*", *Actes de l'intitut d'agronomie et vétérinaire, Maroc*, V. 3n° 21, (2001), 163-168.
- [208]. PRADO, F.E., BOERO, C., GALLARDO, M. et GONZALEZ, J.A., "Effect of *NaCl* on germination, growth and soluble sugar content in *Chenopodium quinoa* Willd. Seeds", *Botanical Bulletin of Academia Sinica* 4, (2000), 27-34.

- [209]. NDOUR, P., et DANTHU, P., "Effet des contraintes hydrique et saline sur la germination de quelques acacias africains", Projet National de Semences Forestières du Sénégal, (2000), 11p.
- [210]. CHOUKR ALLAH, A., HAMDY, A., et LAHMER, F.Z., "Germination d'*Atriplex halimus* dans des milieux salins", *Physiologie des plantes*, V. 37, (1996), 101-113.
- [211]. BOUDA, S., BAAZIZ, M. et HADDIOUI, A. "Effect of salinity on germination of genus *Atriplex*. Recueil des résumés", Le Premier Congrès National sur l'Amélioration de Production Agricole, Faculté des sciences et techniques, Settat, Maroc, (2006), 151p.
- [212]. NASRI, S. et BENMAHIOUL, B., "Effet de la contrainte saline sur la germination et la croissance de quelques provenances algériennes d'arganier (*Argania spinosa* L.)", *Algerian journal of arid environment*, V. 5, n° 2, (Décembre 2015), 98-112.
- [213]. LEPENGUE, A.N., MOUARAGADJA, I., CHERIF, M., M'BATCHI, B. et Séverin AKE, S., " Effet du chlorure de sodium (NaCl) sur la croissance de la roselle au Gabon", *Afrique Science*, V. 05, n°3, (2009) 97 - 110.
- [214]. SOLTANI A., "Analyse des effets de NaCl et de la source d'azote sur la nutrition minérale de l'orge", Thèse de Doctorat d'Etat, Faculté de Sciences de Tunis, (1988), 322 p.
- [215]. SAIRAM, R.K., CHANDRASEKHAR, V. and SRIVASTAVA, G.C., "Comparison of hexaploid and tetraploid wheat cultivars in their responses to water stress", *Biologica plantarum*, 44, (2001), 89-94.
- [216]. SCOFIELD, T., EVANS J., COOOK, M.G., "Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat", *Australian Journal Plant physiology*, 4, (1988), 785 - 797.
- [217]. ZEGHIDA, A., AMRANI, R., DJENNADI, F. et al., "Etude de la variabilité de réponse des plantules de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à la salinité", *Céréaliculture*, ITGC, 42, Constantine, 2004. 5 p.
- [218]. BISSATI, S., DJERROUDI, O., MEHANI, M. et BELKHODJA, M., "effet du stress salin sur deux paramètres hydriques (turgescence et transpiration) de jeunes

plants d'*Atriplex halimus* et *Atriplex canescens*", Revue des Bio Ressources, V.1 n°1, (Juin, 2011).

[219]. CORNIC, G. and GHASHGHAIE, J., "Effect of temperature on net CO₂ assimilation and photosystem II quantum yield of electron transfer of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) leaves during drought stress", *Planta*, 185, (1991), 255-260.

[220]. SIVARAKRISHNAN, S., PATTEL, V., FLOWER, G. and PEACOCK, J., "Proline accumulation and nitrate reductase activity in contrasting sorghum lines during mid season drought stress", *Plant Physiology*, 74, (1988), 418-426.

[221]. MONNEVEUX, P., NEMMAR, M. "Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf) Étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement", *Agronomie*, 6, (1986), 583-590.

[222]. BELKHODJA, M. et BENKABLIA M., "Proline reponse of faba bean (*Vicia faba* L.) under salt stress", *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 78 (1), (2000), 185-195.

[223]. PAQUIN, R., "Effet de l'humidité du sol sur la teneur de la proline libre et des sucres totaux de la luzerne endurcie au froid et à la sécheresse". *Canadien Journal Plant Science*, 66, (1986), 95-101.

[224]. ALBOUCHI, A., GHRIR, R. et EL AOUNI, M.H., "Endurcissement à la sécheresse et accumulation de glucides solubles et d'acides aminés libres dans les phyllodes d'*Acacia Cyanophylla* Lindl", *Annales des Scientifiques Forestières*, 54, (1997), 155-168.

[225]. CHUNYANG, L., "Differences in drought reponses of three contrasting *Eucalyptus microtheca* F. Muel. populations", *University of Helsinki, Finland Forest Ecology and M anagement*, 379, (2013), 377-385.

[226]. DUBOS, C., "Réponse moléculaire de jeunes plants de pin maritime soumis à un stress hydrique en milieu hydroponique", *Thèse de doctorat en biologie Forestière, Université Henri Poincaré, Nancy I*, (2001), 54-55.

- [227]. TOUABA, C. et ALATOU, A., "Adaptation des semis de Pin pignon (*Pinus pinea* L.) au stress combiné hydrique et thermique par des marqueurs biochimiques", *Journal of Applied Biosciences*, 114, (2017), 11393-11403.
- [228]. MANSKE, G.G.B. & VLEK, P.L.G. "Root architecture- wheat as a model plant. In "Plant roots: the hidden half". (Eds Y Waisel, A Eshel, U Kafkafi)", (2002), 249-259.
- [229]. KHALDOUN, A., CHERY, J. & MONNEVEUX, P., "Etude de caractère d'enracinement et leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.)", *Agronomie*, 10, (1990), 369-379.
- [230]. OUKARA, F.Z., ASSEL, A., BAGHLAL, K. et CHAOUIA, C., Effet du NaCl sur les paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.), *Agrobiologia*, 6, (2014), 67-74.
- [231]. BOUJNAH, D., GOUIAA, M., BRAHAM, M., GUERFEL, M., ELLOUMI, O., "Essai d'irrigation de sauvegarde d'oliviers dans des conditions de sécheresse accentuée dans le semi aride : aspects ecophysiologiques de récupération", *Ezzaitouna*, 10 (1 et 2), 2004, 9-23.
- [232]. ACHOUR, A., BIDAI, Y. et BELKHODJA, M., "The impact of salinity on water and metabolic behavior of a variety of Okra (*Abelmoschus esculentus* L.)", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 12(4), (2015), 943-953.
- [233]. TOUABA, C. et ALATOU, A., "Adaptation des semis de Pin pignon (*Pinus pinea* L.) au stress combiné hydrique et thermique par des marqueurs biochimiques *Journal of Applied Biosciences* 114, (2017), 11393-11403.
- [234]. BENIKEN, "Evaluation de l'effet du stress hydrique et du porte-greffe sur la clémentine *Citrus reticulata* Swingle var (Sidi Aissa)", *Journal of applied Bioscience*, 71, (2013), 5692-5704.
- [235]. MURKUTE, A.A., SHARMA, S. ET SINGH, S.K., "Studies on salt stress tolerance of citrus rootstock genotypes with arbuscular mycorrhizal fungi", *Horticultural Science*, 33, (2006), 70-76.

- [236]. HARE, P.D., & CRESS, W.A., "Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants", *Plant Growth Regulation*, 21, (1997), 79–102.
- [237]. CECHIN, I., ROSSI, S.C., OLIVEIRA, V.C et al., "Photosynthetic responses and proline content of mature and young leaves of sunflower plants under water deficit", *Photosynthetica* 44, 1, (2006), 143-146.
- [238]. LERNER, H.R., AMZALLAG, G.N., FRIEDMAN, Y., GOLOUBINOFF, P., "The response of plants to salinity: from turgor adjustments to genome modification", *Israel Journal Plant Science*, 42 (4), (1994), 285–300.
- [239]. TAVALLALI, V., RAHEMI, M., & PANAHI, B., "Calcium induces salinity tolerance in pistachio rootstocks, *Fruits*, 63, (2008), 285-296.
- [240]. ADISH, M., FEKRI, M. AND HOKMABADI, H., " Response of Badami-Zarand Pistachio Rootstock to Salinity Stress, *International Journal Nuts Related Science*, V. 1, n° 1, (Summer, 2010), 1-11.
- [241]. MEHDI, H., CHELLI CHAABOUNI, A., BOUJNAH, D., BOUKHRIS, M. ", The response of young pistachio trees grown under saline conditions depends on the rootstock Zaragoza : CIHEAM / FAO / AUA / TEI Kalamatas / NAGREF Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n°. 94, (2010), 261- 265.
- [242]. KARIMI, R., EBADI, A., ZAMANI, Z. and FATAHI, R., "Effects of water salinity on growth indices and physiological parameters in some pistachio rootstocks", *Journal of Plant Nutrition*, 34:7, (Apr, 2011), 935-944.
- [243]. WANG, Y. & NIL, N., "Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase–oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in *Amaranthus tricolor* leaves during salt stress", *Journal Horticulture Science Biotechnology*, 75: (2000), 623– 627.
- [244]. WU, Y. & COSGROVE, D.J., "Adaptation of roots to low water potentials by changes in cell wall extensibility and cell wall proteins", *Journal Experimental. Botany*, 51(350), (2000 Sep), 1543-53.
- [245]. LYUNCH, J., & VAN BEEM, J.J., " Growth and architecture of seedling roots of common bean genotypes", *Crop Science* , 33, (1993), 1253-1257.

- [246]. KSONTINI, M., "Etude écophysiological des réponses à la contraintes hydrique du chêne liège (*Quercus suber*) dans le Nord-Tunisie: comparaison avec le chêne kermès (*Q. faginea*), Thèse de doctorat, Université de Paris XII-Val de Marne, (1996), 157p.
- [247]. COME, D, "Les végétaux et le froid", Collection Méthodes, Hermann, Paris, (1992), 600p.
- [248]. TOUABA, C. et ALATOU, A., "Adaptation des semis de Pin pignon (*Pinus pinea* L.) au stress combiné hydrique et thermique par des marqueurs biochimiques *Journal of Applied Biosciences* 114, (2017), 11393-11403.
- [249]. MONNEVEUX, P., "Quelles stratégies pour l'amélioration génétique des céréales d'hiver", *Journal of Science de l'AUPELEF*, Tunis (Tunisie), 4-9., ENSA-INRA, Montpellier, (Décembre 1989), 24p.
- [250]. DE RAISSAC, M., "Mécanismes d'adaptation à la sécheresse et maintien de la productivité des plantes cultivées", *Agronomie Tropicale*, 46(1), (1992), 29-37.