

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed Zabana de RELIZANE
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Ecologie et environnement



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :

Ecologie

Intitulé

**Effet de salinité sur des boutures de trois cultivars de
grenadier local, "*Punica granatum L* "Sid Ali,
Maadem et Sefri" d'Ain Chorfa wilaya de Mascara.**

Présenté par :

Ammar Bouchra

Devant les membres de jury :

Président : Mr BENADA Mohamed

Maître Conférence (A) (U. Relizane)

Encadreur : Mr BACHIR BOUIADJRA Mohammed Amine

Maître de conférence (A) (U. Relizane)

Examineur : Mr BENCHIHA Walid

Maître de conférence (A) (U. Relizane)

Année universitaire : 2025/2026

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie le Tout-Puissant ALLAH (ﷻ), Créateur de toute chose, de m'avoir accordé la santé, la patience, la force et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadreur, **M. BACHIR BOUIADJRA Mohammed Amine**, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils, ses orientations, sa patience et ses encouragements tout au long de la réalisation de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements à **M. BENADA Mohamed**, , pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire.

J'exprime également ma profonde reconnaissance à **M. BENCHIHA Walid**, pour avoir accepté d'examiner ce travail, pour le temps qu'il lui consacre, ainsi que pour ses remarques et recommandations qui contribueront à l'amélioration de ce mémoire.

J'adresse également mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide, leur soutien et leurs encouragements durant la réalisation de ce travail.

Enfin, j'exprime ma profonde reconnaissance à ma famille, à mes proches ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire et m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

Dédicace

À moi-même,

Pour avoir cru en mes objectifs, persévéré face à l'incertitude, et trouvé en moi la force d'avancer malgré les épreuves et les doutes. Ce mémoire est bien plus qu'un simple travail académique : il est un hommage profond et sincère à mon propre courage, à ma bonté, et à l'amour inconditionnel que j'ai su donner et recevoir tout au long de ce chemin. Il marque l'aboutissement d'un parcours exigeant, et reflète mon engagement, ma rigueur et ma détermination à atteindre mes aspirations.

À mon père,

Pour ton soutien indéfectible, ta présence constante et ton aide précieuse, aussi bien morale que matérielle, sans lesquelles ce chemin n'aurait pas été possible. Merci pour ta patience infinie, ta confiance inébranlable et ta force silencieuse qui m'ont guidée dans les moments d'incertitude.

À ma mère,

Présence essentielle et apaisante, dont l'amour et le soutien ont été une source de réconfort inestimable.

À mon frère ,

Pour ton soutien discret mais constant et ta présence rassurante.

À ma sœur ,

Pour ton écoute, ta tendresse et ton accompagnement précieux.

Je souhaite également adresser mes remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Enfin, à mes enseignants et encadrants, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance pour leur encadrement rigoureux, leurs conseils éclairés et leur dévouement dans la transmission du

Sav

Résumé

Cette étude a été réalisée afin d'évaluer l'effet du stress salin sur trois cultivars locaux de grenadier (*Punica granatum L.*) cultivé traditionnellement au niveau de la région d'Ain Chorfa Wilaya de Mascara : Sefri, Maâdam et Sid Ali. Des boutures cultivées sous serre ont été réparties en deux groupes : un groupe témoin irrigué à l'eau douce et un groupe traité avec une solution saline de 200 mM de NaCl. Plusieurs paramètres morphologiques, physiologique et , biochimiques ont ensuite été analysés afin d'évaluer la réponse des cultivars à la salinité. Les résultats ont montré que la salinité affecte différemment les cultivars étudiés. Le cultivar Sid Ali s'est révélé le plus sensible, avec une diminution de la croissance, de la biomasse et des pigments photosynthétiques. En revanche, les cultivars Maâdam et Sefri ont mieux maintenu leur développement sous stress salin. Maâdam a présenté une meilleure adaptation grâce à une augmentation de la biomasse racinaire et des pigments photosynthétiques, tandis que Sefri a conservé une croissance relativement stable. Des variations des teneurs en sucres solubles, en proline et en éléments minéraux ont également été observées, traduisant l'activation de différents mécanismes de tolérance à la salinité.

En conclusion, Maâdam et Sefri apparaissent comme les cultivars les plus tolérants à la salinité, alors que Sid Ali est le plus sensible.

Mots-clés : *Punica granatum L.*, salinité, , cultivars, croissance, pigments photosynthétiques, proline, bilan minéral, tolérance variétale.

Abstract

This study was conducted to evaluate the effect of salt stress on three local pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars traditionally grown in the Ain Chorfa region, Mascara Province, Algeria: Sefri, Maâdam, and Sid Ali. Cuttings grown under greenhouse conditions were divided into two groups: a control group irrigated with fresh water and a treatment group irrigated with a 200 mM NaCl solution. Several morphological, physiological, and biochemical parameters were analyzed to assess the response of the cultivars to salinity.

The results showed that salinity affected the three cultivars differently. The Sid Ali cultivar was the most sensitive, exhibiting reduced growth, biomass, and photosynthetic pigments. In contrast, the Maâdam and Sefri cultivars maintained better growth under salt stress. Maâdam showed superior adaptation through increased root biomass and higher photosynthetic pigment contents, while Sefri maintained relatively stable growth. Variations in soluble sugar, proline, and mineral element contents were also observed, indicating the activation of different salinity tolerance mechanisms.

In conclusion, Maâdam and Sefri were identified as the most salt-tolerant cultivars, whereas Sid Ali was the most salt-sensitive.

Keywords: *Punica granatum* L., salinity, cultivars, growth, photosynthetic pigments, proline, mineral balance, varietal tolerance.

ملخص

أُجريت هذه الدراسة بهدف تقييم تأثير الإجهاد الملحي على ثلاثة أصناف محلية من الرمان *Punica granatum L* تزرع تقليدياً في منطقة عين شرفة بولاية معسكر وهي: السفري، معضم، وسيدي علي. زُرعت العقل في بيت بلاستيكي وقُسمت إلى مجموعتين: مجموعة شاهدة سقيت بالماء العذب، ومجموعة عوملت بمحلول ملحي بتركيز 200 ملي مول من كلوريد الصوديوم (NaCl). وتم تحليل عدة مؤشرات مورفولوجية وفسيولوجية وكيميائية حيوية لتقييم استجابة الأصناف للملوحة .

أظهرت النتائج أن تأثير الملوحة اثرت بدرجات متفاوتة على الأصناف المدروسة . فقد تبين أن صنف سيد علي هو الأكثر حساسية، حيث سُجل انخفاض في النمو والكتلة الحيوية والأصباغ الضوئية. في المقابل، حافظ الصنفان معضم والسفري على نمو أفضل تحت تأثير الإجهاد الملحي. كما أظهر صنف معضم قدرة تكيف أكبر من خلال زيادة الكتلة الحيوية الجذرية ومحتوى الأصباغ الضوئية، في حين حافظ صنف السفري على نمو مستقر نسبياً. كما لوحظت تغيرات في محتوى السكريات الذائبة والبرولين والعناصر المعدنية، مما يعكس تفعيل آليات مختلفة للتأقلم مع الملوحة في الختام، يُعد الصنفان معضم والسفري الأكثر تحملاً للملوحة، بينما يُعتبر سيدي علي الأكثر حساسي

الكلمات المفتاحية: الرمان (*Punica granatum L.*) ، الملوحة، أصناف الرمان، النمو النباتي، الأصباغ الضوئية، البرولين، التوازن المعدني، التحمل الصنفي .

Liste des abréviations

NaCl : Chlorure de sodium

Na⁺ : Ion sodium

Cl⁻ : Ion chlorure

K⁺ : Ion potassium

Ca²⁺ : Ion calcium

Mg²⁺ : Ion magnésium

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

DSA : Direction des Services Agricoles

MADR : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural

RWC : Relative Water Content (Teneur Relative en Eau)

PF : Poids Frais

PPT : Poids de Pleine Turgescence

PS : Poids Sec

ANOVA : Analyse de la variance

CE : Conductivité électrique

Chl a : Chlorophylle a

Chl b : Chlorophylle b

°C : Degré Celsius

cm : Centimètre

g : Gramme

kg : Kilogramme

L : Litre

mL : Millilitre

RWC : *Relative Water Content* (teneur relative en eau)

mg : Milligramme

µg : Microgramme

mM : Millimolaire

%:Pourcentage

MS : matière sèche

ppm : Parties par million (parties par million, unité de concentration)

r : Coefficient de corrélation (corrélation de Pearson)

Liste des figures

Figure 01 : Effet de la salinité sur les plantes.....	03
Figure 02 : Effet de la salinité sur la plante.....	05
Figure 03 : Effets délétères liés à la toxicité du stress salin et réponses cellulaires	07
Figure 04 : Répartition des sols salins dans le Nord de l'Algérie	08
Figure 05 : Centres d'origine et de diversité du grenadier	10
Figure 06 : Répartition de la production mondiale de la grenade	11
Figure 07 : Production de la grenade en Algérie	12
Figure 08 : Arbre de grenadier (<i>Punica granatum L.</i>).....	13
Figure 09 : Feuilles lancéolées du grenadier	14
Figure 10 : Tige, racines et tronc du grenadier.....	14
Figure 11 : Fleurs du grenadier	15
Figure 12 : Fruit de la grenade	16
Figure 13 : Graine de la grenade	16
Figure 14 : Localisation d'Aïn Chorfa (zone de prélèvement).....	19
Figure 15 : Préparation des boutures	20
Figure 16 : Préparation du substrat.....	20
Figure 17 : Mise en place de la culture et drainage	21
Figure 18 : Dispositif expérimental au niveau de la serre	21
Figure 19 : État des trois variétés avant stress salin	22
Figure 20 : Pesée de NaCl sur une balance	22
Figure 21 : Agitation de la solution saline	22
Figure 22 : Mesure de la longueur aérienne et racinaire	24
Figure 23 : Dosage de la chlorophylle et caroténoïdes.....	25
Figure 24 : Dosage des sucres solubles	26

Figure 25 : Dosage de la proline.....	27
Figure 26 : Spectrophotomètre à absorption atomique.....	28
Figure 27 : Nombre de feuilles avant et après application du stress salin.....	29
Figure 28 : Longueur de la partie racinaire et de la partie aérienne	30
Figure 29 : Poids frais des feuilles et des racines	31
Figure 30 : Poids sec des feuilles et des racines	32
Figure 31 : Teneur relative en eau (RWC %).....	33
Figure 32 : Variations des teneurs en chlorophylles.....	34
Figure 33 : Variations des teneurs en caroténoïdes	35
Figure 34 : Variations des teneurs en sucres solubles	36
Figure 35 : Teneur en proline	36
Figure 36 : Variations des teneurs en Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^{+} et K^{+}	37

Liste des tableaux

Tableau 01 : Caractéristiques des principales variétés de la grenade.....	18
Tableau 02 : Analyse de la variance ANOVA de l'effet de la salinité, cultivars et la combinaison cultivars*salinité sur les trois cultivars de grenadier, $p=0.05$	38

Table des matières

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction 01

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I. La salinité.....02

1. Définition de la salinité.....02

2. Le stress salin 02

3. Origine de la salinité.....02

4. Action de la salinité sur les plantes

4.1. Effet sur le système racinaire.....03

4.2. Effet sur les tiges et le système vasculaire.....04

4.3. Effet sur les feuilles 04

4.4. Effet sur les organes reproducteurs.....04

4.5. Effet sur la nutrition minérale.....05

5. Adaptation des plantes au stress salin.....05

5.1. Régulation osmotique et équilibre hydrique.....06

5.2. Homéostasie ionique et compartimentation.....06

5.3. Modifications morphologiques et foliaires 07

5.4. Nutrition minérale et antagonisme.....07

6. Salinité des sols en Algérie.....08

II. Le grenadier (*Punica granatum L.*) Pomegranate 09

1. Historique et importance culturelle 09

2. Origine étymologique 09

3. Origine géographique et répartition.....09

4. Production de la grenade dans le monde 10

5. Production de la grenade en Algérie.....	11
6. Description botanique.....	12
6.1. Classification taxonomique	12
6.2. Caractères morphologiques.....	13
6.2.1. L'arbre	13
6.2.2. Les feuilles.....	13
6.2.3. La tige et les rameaux.....	14
6.2.4. Le système racinaire	14
7. Appareil reproducteur.....	15
7.1. Les fleurs	15
7.2. Le fruit.....	15
7.3. Les graines.....	16
7.4. L'écorce du fruit.....	17
8. Les variétés du grenadier.....	17
9. Exigences climatiques et écologiques.....	18
9.1. Température et ensoleillement.....	18
9.2. Exigences édaphiques.....	18
Chapitre II : Matériel et méthodes	19
I. Matériel végétal.....	19
1. Prélèvement des boutures	19
2. Préparation des boutures.....	19
3. Mise en place de la culture	20
3.1. Préparation du substrat	20
3.2. Conditionnement et drainage.....	20
3.3. Dispositif expérimental.....	21
4. Préparation et application du stress salin.....	22
4.1. Préparation de la solution saline	22
4.2. Application du stress	23
II. Paramètres étudiés.....	23
1. Paramètres morphologiques.....	23
1.1. Nombre de feuilles.....	23
1.2. Longueur de la partie aérienne et racinaire.....	23
1.3. Biomasse fraîche et sèche.....	24
2. Paramètres physiologiques	24

2.1. Teneur relative en eau (RWC).....	24
3. Paramètres biochimiques	24
3.1. Pigments photosynthétiques et caroténoïdes	24
3.2. Dosage des sucres solubles.....	25
3.3. Extraction et dosage de la proline.....	26
3.4. Étude du bilan minéral.....	27
3.5. Analyse statistique	28

Chapitre IV : Résultats et interprétations

I. Paramètres morphologiques	29
1. Nombre de feuilles avant et après application de stress salin.....	29
2. Longueur de la partie aérienne et racinaire.....	30
3. Poids frais des feuilles et des racines.....	31
4. Poids sec des feuilles et racines	31
II. Paramètres physiologique	32
1. Teneur relative en eau (TRE)	32
III. Paramètres biochimiques	33
1. Teneur en chlorophylle	33
2. Teneur en caroténoïdes	34
3. Teneur en sucres solubles	35
4. Teneur en proline	36
5. Bilan minéral	37
IV. Résultats statistiques.....	38
Chapitre IV :discussion et conclusion	39

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXE

Introduction

Introduction:

La salinité du sol est un enjeu crucial qui concerne plus d'un milliard d'hectares dans plus de 100 nations à l'échelle du globale. L'excès de sels dans le sol crée un caractère salé qui met en péril la production agricole et la santé de l'environnement. **(Singh, R.P. et al. 2022)**

Et d'après les estimations récentes basées sur des données récentes de la FAO concernant la salinité des sols, 10% des terrains cultivés en irrigation et 10% des cultures de pluie sont affectés par la salinité, ce qui peut mettre en péril la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale. Selon les tendances actuelles de réchauffement, il est possible que la superficie concernée augmente jusqu'à atteindre entre 24 % et 32 % de la totalité des terres émergées. **(FAO ,2024)**

Dans le pays d'Algérie, plus d'un cinquième des sols irrigués connaît un problème de salinité. La salinisation des sols, déclenchée par des processus à la fois naturels et humains, représente une menace écologique significative et figure parmi les principales sources de dégradation des terres cultivées. Les producteurs agricoles situés dans les zones irriguées font face à une diminution alarmante et massive de la productivité de leurs sols, ce qui entraîne souvent l'abandon total de leurs terres cultivées. **(Ziane et al. 2022)**

Le grenadier (*Punica granatum L.*) est perçu comme une espèce hautement résistante à la salinité parmi les multiples cultures agricoles cultivées en Algérie. On le considère comme une des espèces les plus tolérantes à la salinité, produisant de bons rendements même dans des sols salés. **(Lahouel, 2022)**

L'objectif de ce travail est d'analyser les paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques de trois cultivars de grenadier (*Punica granatum L.*) Cette étude vise à évaluer leur comportement d'adaptation face aux conditions environnementales locales. Elle permet également d'apprécier leur réponse au stress salin. Enfin, elle cherche à déterminer leur niveau de résistance à la salinité excessive du sol afin de bien sélectionner de cultiver le plus tolérant.

Ce document est structuré en quatre chapitres La première partie détaille stress salin comme facteur abiotique et présente le grenadier (*Punica granatum L.*) sous ses aspects biologiques et économiques. Le deuxième chapitre décrit le matériel et méthodes utilisés, incluant les traitements appliqués aux trois variétés étudiées. Le troisième chapitre présente les résultats sous forme de graphiques, tandis que le quatrième chapitre est consacré à leur discussion et conclusion.

Chapitre I : Partie bibliographique

I. Salinité

1. Définition de la salinité

La salinité est un stress abiotique majeur qui impacte la croissance et le développement des plantes, avec des réponses variées selon les organes, les espèces et l'intensité du stress (**Bouassaba et al., 2018**). La salinité fait référence à l'accumulation excessive de sels solubles dans le sol, principalement le chlorure de sodium (Na Cl). Cette accumulation rend le sol « salé » et réduit ses capacités agronomiques, entraînant un stress pour les plantes (**Faye et al., 2021 ; FAO, 2022 ; Hopmans et al., 2021**).

2. Le Stress Salin

Le stress salin est le blocage ou le dommage causé au plante par un excès de sel dans le sol. Il agit en deux étapes simples : d'abord, il empêche les racines d'aspirer l'eau (ce qui crée une soif ou un dessèchement), puis les éléments du sel (Na⁺ et Cl⁻) montent vers les feuilles et deviennent toxiques pour elles, ce qui affaiblit toute la plante (**Munns et Gilliham, 2015 ; Zörb et al., 2019**).

Le stress salin désigne la souffrance d'une plante qui pousse dans une terre trop salée. Ce phénomène perturbe le végétal à travers deux phases successives :

► Le stress osmotique :

Dès le départ, la forte concentration de sel empêche les racines d'aspirer l'eau du sol, ce qui dessèche la plante (**Zaib et al., 2023**).

► La toxicité ionique :

Plus tard, le sodium et le chlorure s'accumulent dans les feuilles. Ils détruisent leurs cellules et bloquent la photosynthèse, ce qui affaiblit toute la plante (**Fang et al ., 2021**).

3. Origine de la salinité

L'origine de la salinité explication d'où vient tout ce sel qui gâche les terrains agricoles. Il y a deux grandes histoires derrière ce phénomène :

La salinité naturelle : C'est une histoire de temps et de géographie. Depuis des milliers d'années, la pluie et le vent usent les roches de la Terre, ce qui libère naturellement des sels minéraux. Dans les zones proches de la mer, le vent transporte aussi des petites gouttes d'eau salée qui se déposent sur les champs. Enfin, dans les zones sèches, le soleil brille fort, l'eau s'évapore et le sel naturel reste bloqué à la surface du sol (**Hassani et al., 2020**).

La salinité provoquée par l'homme : C'est le résultat des mauvaises habitudes en agriculture. Souvent, pour sauver ses cultures, l'homme utilise l'eau des puits qui est un peu saumâtre (salée). Si le terrain n'a pas de bons tuyaux de drainage pour évacuer l'eau, l'eau s'en

va dans l'air à cause de la chaleur, mais le sel s'accumule jour après jour, transformant un champ fertile en désert de sel (FAO, 2022).

4. Action de la salinité sur les plantes

L'action de la salinité sur les plantes se traduit par un ralentissement général de leur vie. Le sel n'attaque pas la plante d'un seul coup, mais il perturbe son fonctionnement quotidien à travers plusieurs effets visibles :

4.1. Sur le système racinaire

Sous la surface du sol, ce sont les racines qui reçoivent le premier choc, se trouvant en première ligne face à la forte concentration de sel. Ce contact agressif freine immédiatement l'allongement de la racine principale en empêchant ses cellules de se diviser normalement (Sarabia *et al.*, 2018).

En même temps, cette situation détruit les racines latérales et les fins poils absorbants, ce qui prive le végétal de ses outils essentiels pour capter l'eau et les nutriments (Julkowska & Tester, 2017).

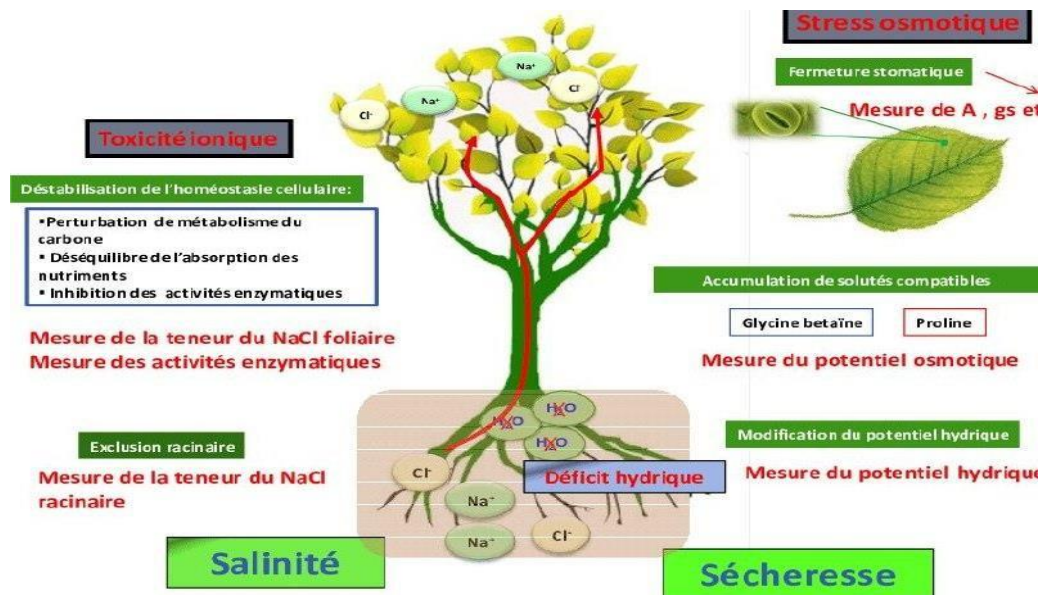


Figure 01. Effet de la salinité sur les plantes (Ben Yahmed, 2013).

4.2. Sur les tiges et le système vasculaire

Une fois le sel absorbé par le bas, le voyage des toxines continue vers le haut, impactant directement la structure de la tige et ses canaux conducteurs. Ce stress provoque d'abord un rétrécissement du diamètre de la tige, car les cellules n'ont plus assez d'eau pour se gonfler et grandir normalement (**Zhou et al., 2023**).

Au cœur de la tige, le système vasculaire (le xylème) subit une forte pression : les vaisseaux qui transportent la sève deviennent plus étroits et se bouchent parfois à cause de bulles d'air (embolie), ce qui coupe l'alimentation de la plante (**Trifilò et al., 2021**).

4.3. Sur les feuilles

Le véritable moteur énergétique de la plante, situé dans son feuillage, se retrouve gravement endommagé sous l'effet de la salinité.

Selon une étude publiée par **Zörb et al. (2019)**, l'agression saline perturbe l'anatomie même de la feuille en réduisant l'épaisseur de son limbe.

D'après **Arif et al. (2020)**, les cellules foliaires subissent un véritable stress oxydatif qui se traduit par des nécroses et un dessèchement complet de la pointe des feuilles.

De plus, selon les explications de **Zhao et al. (2020)**, la machinerie photosynthétique s'arrête presque totalement à cause de la fermeture prolongée des pores de la feuille.

Cette perte massive de surface verte, comme le soulignent **Munns & Gilliam (2021)**, diminue la capacité du végétal à respirer, conduisant souvent à une défoliation totale.

4.4. Sur les organes reproducteurs (Fleurs et Graines)

La phase de reproduction, qui est l'étape la plus sensible chez le végétal, subit de plein fouet les effets de la salinité. La présence excessive de sel dans les tissus végétaux provoque l'avortement prématuré des boutons floraux avant même qu'ils ne s'ouvrent (**Shrivastava & Kumar, 2021**).

De plus, le stress salin dérègle complètement l'apport en sucres vers les organes reproducteurs, ce qui assèche le pistil et réduit fortement les chances de pollinisation réussie (**Visual et al., 2019**).

Cette crise impacte directement la descendance de la plante car les graines récoltées souffrent d'un manque d'hormones de croissance, ce qui compromet leur qualité et leur capacité à donner une nouvelle génération saine (**Al-Janabi & Al-Khafaji, 2021**).

4.5. Sur la nutrition minérale

Dans l'intimité des cellules, l'excès de sel vient complètement fausser le menu nutritionnel de la plante, provoquant une véritable crise alimentaire. La forte présence d'ions sodium (Na^+) et chlorure (Cl^-) crée une concurrence déloyale au niveau des racines, qui se trompent et absorbent ces éléments toxiques à la place des bons nutriments (**Isayenkov et Maathuis, 2019**).

Ce phénomène bloque principalement l'assimilation du potassium (K^+), un élément pourtant vital pour l'activation des enzymes et la survie des cellules (**Arif et al., 2020**).

De plus, la salinité freine le transport du calcium (Ca^{2+}) et du magnésium (Mg^{2+}), ce qui affaiblit les parois cellulaires et diminue la fabrication de la chlorophylle (**Shrivastava et Kumar, 2021**).

Privé de ces minéraux essentiels, le végétal souffre de graves carences alimentaires qui bloquent son métabolisme et limitent son développement global (**Ambede et al., 2012**).

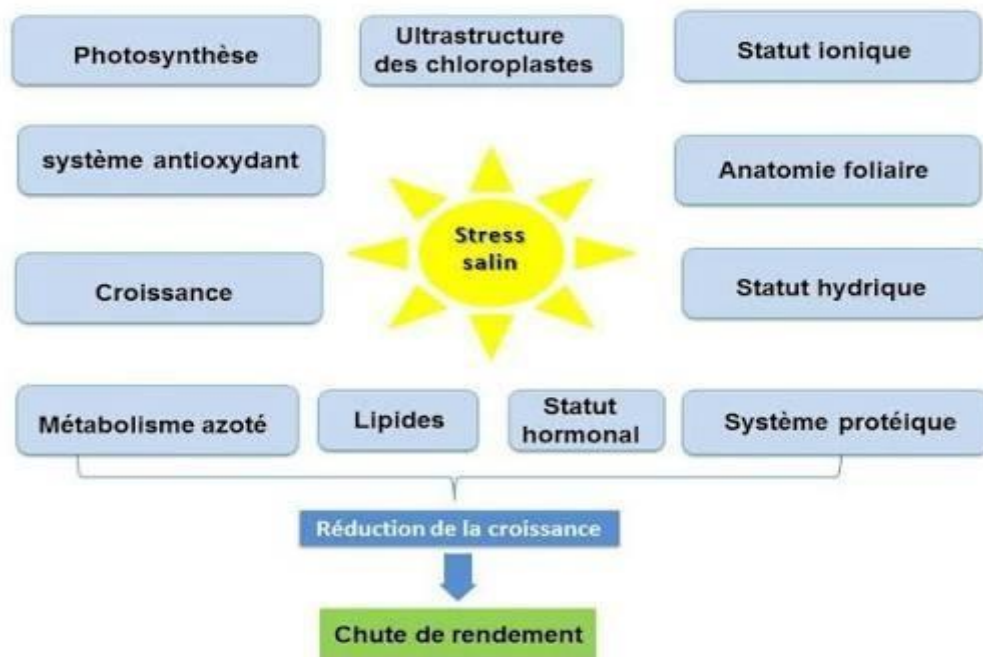


Figure02. Effet de la salinité sur la plante. (**Parida et al, 2005**).

5. L'adaptation des plantes au stress salin

La résistance face au sel repose sur une incroyable capacité de gestion interne, où chaque organe joue un rôle bien précis pour sauver l'ensemble de la plante. Une des techniques les plus efficaces consiste à intercepter le sodium voyageur et à le stocker à

l'écart dans de grands réservoirs cellulaires (les vacuoles), ce qui protège la machinerie interne de la cellule contre la toxicité directe (**Van Zelm et al., 2020**).

De plus, le végétal fait preuve d'une grande intelligence stratégique en détournant le poison vers les feuilles les plus âgées et prêtes à tomber, préservant ainsi les jeunes bourgeons et les fleurs qui assurent l'avenir de l'espèce (**Majeed & Muhammad, 2019**).

Enfin, cette adaptation globale est entièrement pilotée par des signaux hormonaux rapides qui ordonnent aux pores des feuilles de s'ajuster au millimètre près pour respirer sans perdre d'eau (**Vishwakarma et al., 2017**).

5.1. Régulation osmotique et équilibre hydrique

Quand le sel entoure les racines, il crée une sorte de sécheresse invisible en retenant l'eau dans le sol, ce qui rend son absorption extrêmement difficile pour le végétal. Pour ne pas se dessécher, la plante doit immédiatement inverser la pression en accumulant activement dans ses propres cellules des composés organiques protecteurs, comme les sucres solubles ou les bêtaïnes (**Chun et al., 2021**).

Cette stratégie, appelée ajustement osmotique, augmente la concentration interne de la cellule, agissant comme une éponge pour forcer l'eau du sol à entrer malgré la barrière de sel (**Gupta & Huang, 2014**). Grâce à ce maintien de la pression interne, les cellules foliaires restent gonflées, permettant ainsi aux tissus de ne pas flétrir et à la plante de préserver son hydratation globale (**Acosta-Motos et al., 2017**).

5.2. Homéostasie Ionique et Compartimentation

Pour éviter l'empoisonnement de son métabolisme, la cellule végétale doit faire preuve d'une organisation interne irréprochable, en contrôlant strictement les mouvements des ions. Face à l'invasion du sodium (Na^+), la plante active des transporteurs spécifiques au niveau de la membrane vacuolaire qui capturent le poison pour l'enfermer en toute sécurité à l'intérieur de la vacuole (**Almeida et al., 2017**).

Ce mécanisme de compartimentation protège le cytoplasme, là où se déroulent les réactions vitales, et permet en même temps d'utiliser ce sel piégé pour maintenir la pression osmotique (**Wu et al., 2019**).

Grâce à ce tri cellulaire rigoureux, le végétal réussit à préserver un rapport optimal entre le potassium et le sodium, ce qui empêche le blocage des enzymes indispensables à sa survie (**Assaha et al., 2017**).

5.3. Modifications morphologiques et foliaire

L'adaptation à la salinité passe par une véritable métamorphose architecturale, où chaque changement morphologique vise à économiser l'énergie de la plante. Le végétal modifie la disposition de son feuillage et réduit la longueur de ses entre-nœuds, ce qui lui donne un aspect plus compact et buissonnant, moins exposé aux vents desséchants (**Raza et al., 2023**).

Sur la surface foliaire, on assiste à une augmentation de la densité des trichomes (des petits poils protecteurs) qui piègent l'humidité et réfléchissent la lumière du soleil pour abaisser la température de la feuille (**Hedrich et al., 2018**).

Enfin, cette réorganisation morphologique s'accompagne d'un abandon programmé des vieilles feuilles chargées de sel, permettant au végétal de concentrer ses ressources uniquement sur les jeunes pousses en croissance (**Zhou & Zhang, 2023**).

5.4. Nutrition Minérale et Antagonisme

L'abondance massive du sodium dans la solution du sol crée une interférence directe avec les mécanismes de transport des nutriments essentiels. Concrètement, le sodium utilise les mêmes voies d'entrée que le potassium, provoquant un blocage systématique de ce dernier et dérégulant le rapport K^+ / Na^+ indispensable à la survie cellulaire (**Isayenkov & Maathuis, 2019**).

De la même manière, l'excès d'ions chlorures (Cl^-) exerce un effet antagoniste puissant et phosphorés nécessaires à sa croissance (**Ghassemi et al, 2022**).

Cette malnutrition forcée induit de graves carences physiologiques qui paralysent la synthèse des protéines et le développement global du végétal (**Ambede et al., 2022**).

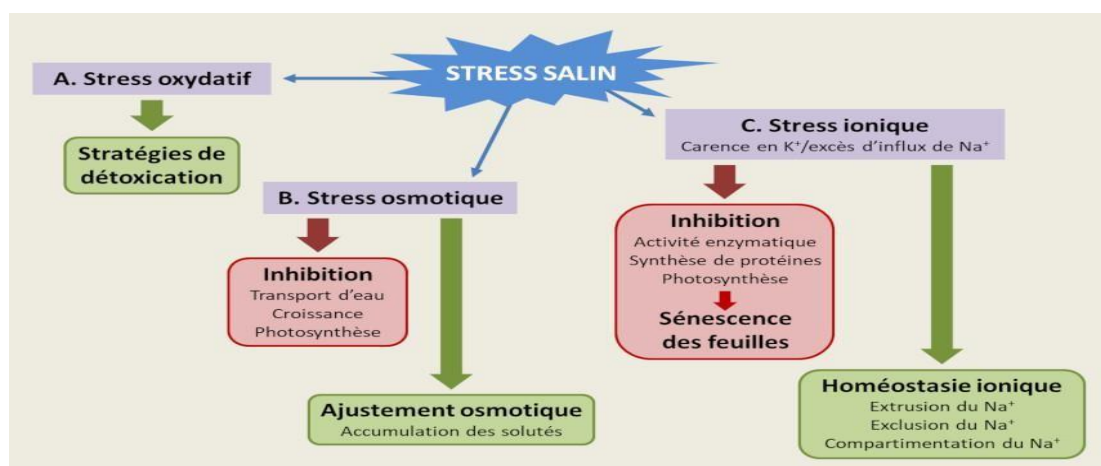


Figure 03: Effets délétères liés à la toxicité du stress salin et réponse cellulaire mise en place pour assurer la tolérance(**Munns et al, 2015**).

6. La Salinité des sols en Algérie

En Algérie, plus de 20 % des sols irrigués souffrent de salinisation, surtout dans les zones arides et semi-arides où 50 % des sols sont salins (DEHNI, 2018).

Parmi les régions les plus durement touchées, la plaine de la Mina, située dans la wilaya de Relizane, constitue un exemple frappant de cette dégradation. Dans cette zone, la combinaison d'un climat aride, d'une évaporation intense et de l'utilisation d'eaux d'irrigation hautement chargées en sel a provoqué une accumulation stérile d'ions dans les couches superficielles du sol (Benmahioul *et al.*, 2019).

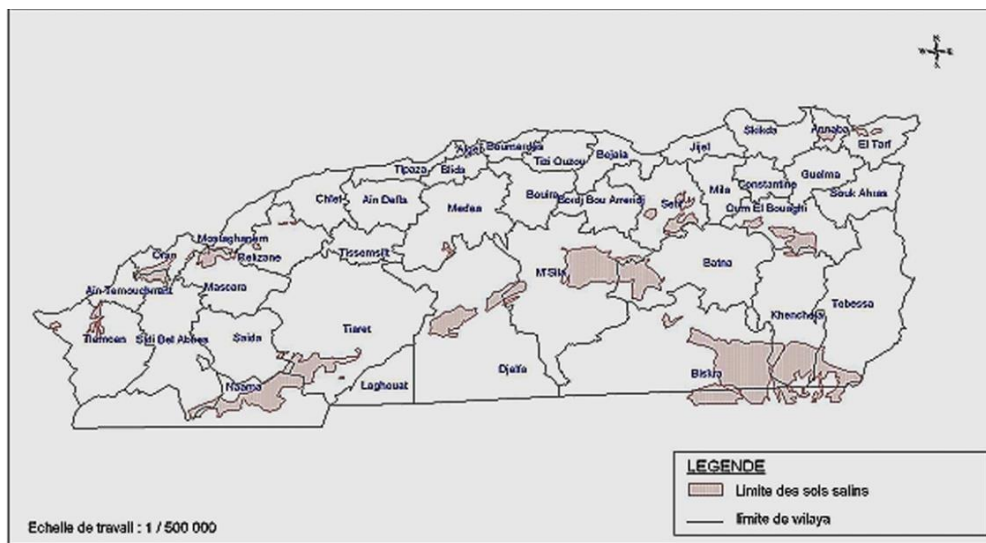


Figure04: Répartition des sols salins de Nord de l'Algérie. (source INSID, 2008)

II. Le grenadier (*Punica granatum* .L)

1. Histoire et importance culturelle du grenadier

L'histoire de la grenade est celle d'une expansion géographique fascinante, qui a transformé un fruit sauvage d'Asie en une icône de la Méditerranée. Les recherches génétiques et archéologiques confirment que l'Iran et ses régions voisines abritent la plus grande diversité de grenadiers sauvages, attestant de leur rôle de centre d'origine (**Chandra et al., 2010**).

De là, la culture s'est propagée vers l'ouest, trouvant dans l'Afrique du Nord et la péninsule ibérique une seconde patrie d'adoption idéale grâce à des conditions climatiques parfaitement adaptées à ses besoins biologiques (**Martinez-Nicolas et al., 2017**).

2. Origine étymologique

Connue sous le terme de grenadier dans la culture française, cette espèce *Punica granatum* L. s'est vu attribuer d'autres noms vernaculaires, moins courants. Le grenadier est synonyme de Balaustier, Miouganier, Arosse, Granatier, Migranier, Miougranié, Baloufié (**Wald, 2009**).

Dans chaque pays et selon les langues parlées, le nom vernaculaire de *Punica granatum* L. varie. Ainsi, le nom de cet arbre sera (**Meziane-Kaci, 2018**):

En anglais : Pomegranate ou Pome Granate.

En allemand : Granatapfelbaum, Granatbaum, Gemeine Granat, Balluster.

En espagnol : Granado coltivated, Mangrano.

En italien : Granato.

En chinois : Ngan Che Lieou, Shi Liu.

Pays arabe : Rommane.

Nom berbère : Thar'mant

En Algérie, la grenade est appelée communément romane (الرومان). (**Benmahioul et al. 2019**).

3. Origine géographique et dynamique de répartition

Bien que le grenadier soit aujourd'hui cultivé sur presque tous les continents, sa production commerciale reste fortement concentrée dans les zones subtropicales et méditerranéennes. L'Asie domine largement le marché mondial, portée par des géants agricoles qui exploitent d'immenses superficies adaptées à cet arbuste. L'Inde s'impose actuellement comme le plus grand producteur mondial de grenades, suivie de près par l'Iran, qui demeure le réservoir historique de la diversité génétique de l'espèce (**Kahramanoglu et al., 2022**).

Dans le bassin méditerranéen, des pays comme la Turquie, l'Égypte et l'Espagne se partagent le leadership, se distinguant non seulement par des volumes de production massifs, mais aussi par une forte orientation vers l'exportation vers les marchés européens (**Elsayed et al., 2023**).

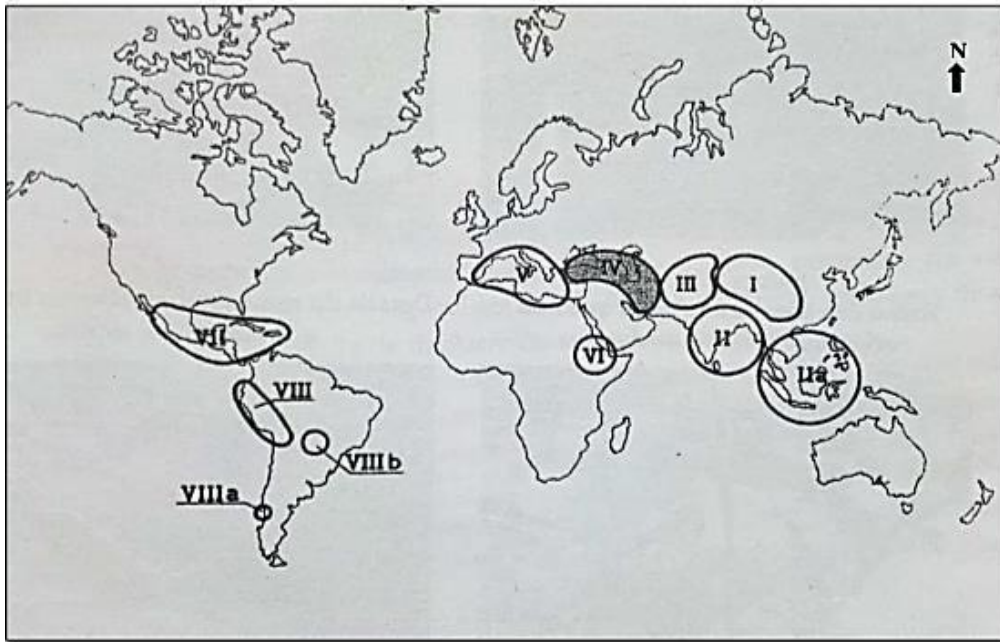


Figure 05:Centres d'origine et de diversité du grenadier selon Vavilov (1925).

(Melgarejo *et al.* 2012).

4. Production de la grenade dans le monde

L'essor de la culture du grenadier à l'échelle globale se traduit par des indicateurs économiques en nette progression. En effet, au cours de l'année 2020, la superficie totale allouée à cette filière arboricole à travers le monde a atteint environ 300 000 hectares, générant un volume de production global estimé à près de 2,5 millions de tonnes de grenades (**Bennis et al., 2021**).

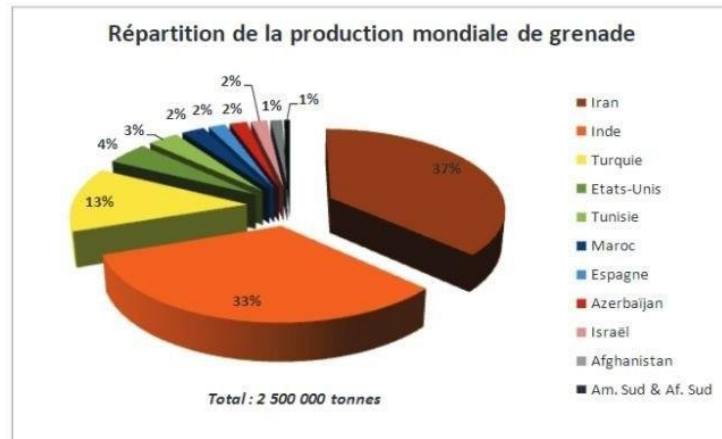


Figure 06: Répartition de la production mondiale de grenade (Estimation, 2012).

5. Production de la grenade en Algérie

la situation de l'Algérie dans le bassin méditerranéen en a fait l'un des pays les plus productifs en grenadiers avec plus de 95 762 tonnes, où la superficie cultivée a été estimée à 9 025 ha avec un rendement de 106,4 qx/ha (M.A.D.R., 2021). La part estimée de l'Algérie dans la production mondiale de grenadiers est plus de 2%, et sa superficie cultivée représente plus de 3% de la superficie totale de grenadiers dans le monde. (DSA, 2021)

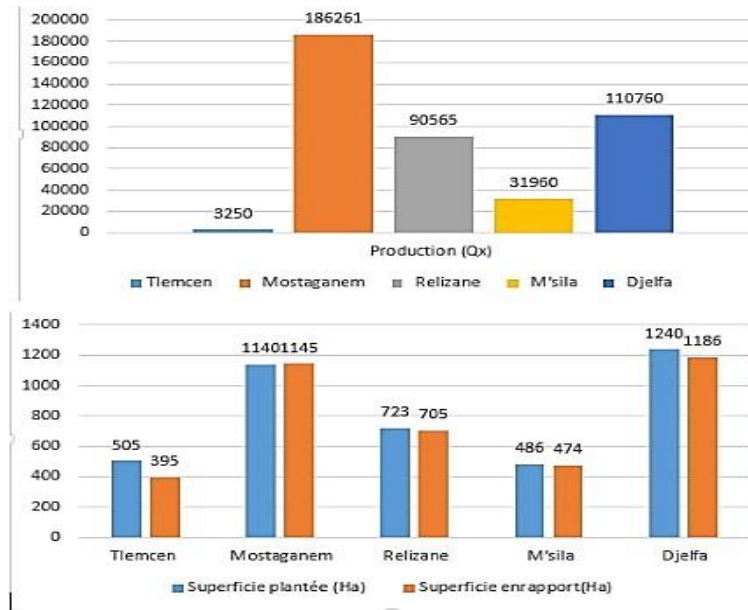


Figure 07: Production De Grenade En Algérie (DSA, 2018).

6. Description botanique du grenadier

6.1. Classification taxonomique

La classification classique et phylogénétique de *Punica granatum* L. a été établie quant à elle, elle est considérée comme la plus valable à ce jour (Meziane-Kaci, 2018):

Règne: *Plantae*

Sous-règne: *Tracheobionta* (Plantes vasculaires)

Division: *Magnoliophyta* (Angiospermes)

Classe: *Magnoliopsida* (Dicotylédones)

Sous-classe: *Rosidae*

Ordre: *Myrtales*

Famille: *Lythraceae*

Genre: *Punica*

Espèce: *Punica granatum* L.

6.2. Caractères morphologiques

6.2.1. L'arbre

Sur le plan morphologique, le grenadier se présente comme un arbuste ou un petit arbre très ramifié, dont la hauteur varie généralement entre trois et cinq mètres selon les conditions du milieu (**Melgarejo et al., 2021**).

Son tronc, souvent tortueux et recouvert d'une écorce gris-brun qui se fissure avec l'âge, développe une cime buissonnante et étalée (**Chandra et al., 2018**).

Le système racinaire du grenadier est de type traçant mais puissant, capable d'explorer les couches superficielles du sol pour capter l'eau, tout en développant quelques racines profondes pour assurer l'ancrage de la plante (**Elsayed et al., 2023**).



Figure 08: L'arbre de grenade *Punica granatum.L* (**Kahramanoglu & Usanmaz, 2016**).

6.2.2. Les feuilles

Les feuilles du grenadier présentent des caractéristiques morphologiques distinctes qui facilitent son identification botanique (**Chandra et al., 2018**).

Elles sont généralement opposées ou sub-opposées, parfois regroupées en faisceaux sur les rameaux courts (brindilles) (**Melgarejo et al., 2021**).

Le limbe de la feuille est caractérisé par une texture entière, lisse et luisante sur la face supérieure, affichant une couleur vert brillant qui vire au jaune doré juste avant la chute automnale, le grenadier étant un arbre à feuillage caduc (**Elsayed et al., 2023**).



Figure 09:Feuilles lancéolées de *Punica granatum L.* (Bouras, 2019).

6.2.3. La tige et les rameaux

La tige principale du grenadier se caractérise par un aspect tortueux et cannelé, se ramifiant généralement très bas pour donner à l'arbre son port buissonnant caractéristique (Chandra *et al.*, 2018).

L'écorce qui recouvre le tronc est de couleur gris-brun, devenant rugueuse et se détachant en plaques longitudinales minces avec l'âge (Melgarejo *et al.*, 2021).

Les rameaux (ou branches) se divisent en deux catégories morphologiques distinctes : les rameaux vigoureux à croissance indéterminée, souvent quadrangulaires et lisses lorsqu'ils sont jeunes, et les rameaux courts (brindilles) à croissance et al limitée (Elsayed, 2023).



Figure10: (A) la tige, (B) les racines (C) le tronc du grenadier.

6.2.4. Le système racinaire

L'architecture racinaire du grenadier témoigne de sa remarquable rusticité et de sa capacité d'adaptation aux sols difficiles (Melgarejo *et al.*, 2021).

Bien que les racines principales soient fortement lignifiées et vigoureuses, l'arbre produit un chevelu racinaire fin et hautement ramifié, extrêmement sensible aux variations de l'humidité du sol (**Chandra et al., 2018**).

Toutefois, cette sensibilité de surface rend l'arbre vulnérable aux excès d'eau prolongés (asphyxie racinaire), nécessitant un sol bien drainé pour un développement optimal (**Elsayed et al., 2023**).

7. Appareil reproducteur

7.1. Fleurs

L'appareil reproducteur du grenadier se distingue par une morphologie florale unique, caractérisée par la coexistence de différents types de fleurs sur le même arbre, un phénomène biologique connu sous le nom d'hétérostylie (**Chandra et al., 2018**).

Les fleurs, solitaires ou groupées en petites cymes de deux à trois unités, se développent à l'extrémité des rameaux courts (brindilles) (**Melgarejo et al., 2021**).

Elles possèdent un calice charnu, persistant, en forme de cloche ou de tube court, découpé en cinq à sept lobes triangulaires et arborant une couleur rouge orangé très vive (**Elsayed et al., 2019**).



Figure 11: Fleurs de grenadier (**Kahramanoglu & Usanmaz, 2016**).

7.2. Fruit

Le fruit du grenadier, communément appelé grenade, est une baie complexe et globuleuse qui se développe à partir d'un ovaire infère (**Chandra et al., 2018**).

L'écorce externe, ou péricarpe (épicarpe), est coriace, rigide et lisse ; sa coloration évolue au cours de la maturation, passant du vert initial à des nuances de jaune, de rose, de

rouge vif ou de pourpre foncé selon le patrimoine génétique de l'arbre (**Melgarejo *et al.*, 2011**).



Figure12: Fruit de grenade. (http://www.marche.fr/petite_annonce_jardin-nature-plantes-punica-granatumgrenadier-)

7.3. Graines

La graine de grenade présente une structure anatomique hautement spécialisée, se divisant en deux parties distinctes qui déterminent ses propriétés physiques et sensorielles (**Chandra *et al.*, 2018**).

La partie externe, appelée arille, est un tissu charnu, juteux et translucide qui se développe à partir des cellules du tégument externe de la graine (**Melgarejo *et al.*, 2011**).

La partie interne, quant à elle, correspond à la graine proprement dite (le cœur ou noyau), qui est un tissu lignifié contenant l'embryon et les réserves lipidiques nécessaires à la future germination (**Chandra *et al.*, 2018**).



Figure13: La graine de grenade
(<http://www.floridata.com/wallpaper/jpg/PomegranateFlwrs800.jpg>).

7.4. Écorce du fruit

L'écorce de la grenade, scientifiquement désignée sous le nom de péricarpe, constitue une barrière protectrice externe très robuste (**Chandra et al., 2018**).

Sa surface externe (l'épicarpe) est lisse, cireuse et parsemée de minuscules stomates indurés, ce qui limite la déshydratation du fruit après la récolte (**Elsayed et al., 2023**).

8. Les variétés (richesse génétique)

Selon les travaux de **Cauchard (2013)**, le grenadier se caractérise par un grand nombre de variétés à travers le monde. Néanmoins, seules quelques-unes d'entre elles occupent une place prédominante sur le marché international. Jusqu'à présent, les distinctions entre ces variétés ne reposent pas sur des critères agronomiques stricts, mais plutôt sur des variations visuelles bien marquées. Ces différences morphologiques majeures se situent principalement à trois niveaux :

- La coloration de l'écorce (la peau) : qui présente une large gamme de teintes, s'étendant du rouge foncé intense au jaune pâle rosé.
- La couleur des arilles : variant du rouge très foncé au rose transparent (sachant que les variétés à arilles claires restent les moins commercialisées).
- Le profil gustatif : avec des arilles offrant une saveur soit douce (sucrée), soit acide.

Par ailleurs, l'évaluation du germplasm local met en lumière l'importance de nos ressources autochtones. À ce titre, une étude menée par **Lahouel et al. (2022)** a mis en évidence la remarquable hétérogénéité des variétés de grenades cultivées dans les régions de Djelfa, Tlemcen et Sidi Bel Abbès.

Tableau 01: Caractéristiques des principales variétés de la grenade (Cauchard, 2013).

Variété	Couleur externe	Couleur des arilles	Goût des arilles
Wonderful	Rouge foncé	Rouge	Doux/Acide
Mollar d'Elche	Rose jaune	Rouge clair	Doux
Herskowitz/Hershkowitz	Rouge foncé	Rouge clair	Acide
Acco	Rouge	Rouge foncé	Doux
Emek	Rouge foncé	Rouge	Doux/Léger acide
Baghwa	Rouge clair	Rouge clair	Doux
Hicaz	Rouge	Rouge clair	Doux acide
Shani	Rouge	Rouge foncé	Doux
Early Foothill	Rouge foncé	Rouge	Acide

9. Exigences climatiques et écologiques (Écophysiologie)

Le grenadier se distingue par une plasticité écologique remarquable, ce qui lui permet de s'adapter à des environnements variés. Néanmoins, il trouve ses conditions optimales de croissance et de productivité dans les zones subtropicales et méditerranéennes.

9.1. Température et ensoleillement

Le grenadier aujourd'hui s'adapte à de nombreux climats, dans les régions subtropicales et tropicales chaudes où la période des températures élevées correspond au moment de la maturité des grenades (Erkan *et al.*, 2011).

9.2. Exigences édaphiques

Le grenadier s'adapte à de nombreux climats, des tropiques aux régions tempérées chaudes. Cependant, c'est un climat austral subtropical voire tropical qui lui convient le mieux. Les meilleurs fruits sont obtenus dans les régions subtropicales, où la période des températures élevées correspond au moment de la maturité des grenades. Il supporte très bien la sécheresse, mais cela compromet la qualité de ces fruits (Chougui, 2018).

Chapitre II : Matériel et méthodes

Ce travail a été mené au sein de la serre pédagogique de la faculté des sciences de la nature et de la vie, université Ahmed Zabana de Relizane, puis le reste de l'expérimentation est réalisé au niveau des laboratoires pédagogiques. Dans le but de déterminer l'effet du stress salin sur la croissance des boutures des trois variétés de grenadiers (Sefri, Sid ali et Maadam).

I. Matériel végétal

Le matériel végétal est constitué des boutures issues de trois cultivars locaux de grenadier (*Punica granatum L.*), collectées au niveau de la région d'AÏN CHORFA (Wilaya de MASCARA).

1 . Prélèvement des boutures

Pour choisir la plante mère, nous nous sommes basés sur trois critères principaux : la qualité de la variété, son rendement et l'absence de virus. Afin d'optimiser les chances de réussite de la multiplication, nous avons prélevé les échantillons pendant la période de dormance hivernale. Dans le cadre de cette étude, les boutures ont été prélevées le 28 janvier 2026, période propice à la phase de dormance végétative de la plante.



Figure14: Localisation D'AÏN CHORFA Wilaya de Mascara (zone de prélèvement des boutures)

2 .Préparation des boutures

Pour préparer les boutures, nous avons coupé des rameaux d'une longueur moyenne de 30 cm en marquant leur extrémité afin de garantir que la sève circule dans le bon sens physiologique.



Figure15: Préparations des boutures

3.Mise en place de la culture

3.1. Préparation du substrat

Afin de garantir la propreté du milieu de culture, le sable utilisé a été soumis à un lavage minutieux ; nous avons ainsi utilisé deux volumes de sable lavé pour un volume de tourbe.



Figure16 : Préparation du substrat

3.2. Conditionnement et drainage

- Le mélange préparé à l'avance a été réparti dans des sacs noirs d'une taille moyenne. Afin d'assurer un drainage optimal de l'eau d'arrosage et d'éviter tout risque d'asphyxie des racines, une couche de gravier a été déposée au fond de chaque sac.
- Nous avons commencé la plantation le 4 février 2026. Les boutures ont été plantées dans le sol à une profondeur de 20 cm ; nous avons enfoui deux nœuds sous le niveau du substrat et laissé un nœud dépasser de 10 cm, afin de permettre la croissance ultérieure de pousses axillaires.



Figure17: Mise en place de la culture et drainage.

Drainage: Arrosage (deux fois par semaine) avec de l'eau de robinet.

Période expérimentale : Durée totale de 10 semaines et 4 jours.

➤ Arrêt de l'irrigation à l'eau ordinaire : Le 19 avril 2026.

Changement de régime hydrique : Passage de l'eau douce vers la solution saline.

Objectif : Déclenchement de la phase expérimentale d'induction du stress.

3.3 . Dispositif expérimentale

Le dispositif regroupe 03 blocs, organisés en paires identiques, chaque groupe comprenant 30 plants. Le nombre total de plants pour l'ensemble de l'expérience s'élève ainsi à 90.



Figure18: Dispositif expérimental au niveau de la serre



Figure19: l'état des trois variétés avant l'application du stress salin.

4. préparation et l'application du stress salin

4.1. Préparation de la solution saline :

La solution a été obtenue par la dissolution de 11,68 g de chlorure de sodium (NaCl) dans 1 litre d'eau distillée, ce qui correspond à une concentration molaire finale de 200 mM.

200 mM----- 11,68g./l. (NaCl)



Figure20: Peser de NaCl sur une balance



Figure21:Agitation de solution sur un agitateur

4.2. Application du stress :

Le traitement à la solution saline a été effectué à raison de 5 plants par variété, chaque plant ayant reçu 200 mM de solution saline, selon le calendrier suivant :

Sid ali : le 21/04/2026

Maadam : le 22/04/2026

Sefri : le 23/04/2026

Parallèlement, un ensemble de cinq plantes de chaque variété a été conservé dans des conditions témoin, pour permettre une analyse comparative des résultats.

II. Les paramètres étudiés

1- les paramètres morphologiques

Les paramètres morphologiques ont été évalués sur un échantillon composé de cinq plantes témoins et de cinq plantes soumises au stress salin pour chaque variété. Les mesures ont été réalisées à deux reprises : une première fois à la 10^{ème} semaine et 4 jours de l'expérimentation, soit deux semaines avant l'application du stress salin, puis une seconde fois à la 11^{ème} semaine et 6 jours, soit une semaine après son application.

1.1. Nombre de feuilles

Le nombre total de feuilles a été déterminé par comptage direct sur chaque plante.

1.2. Longueur de la partie aérienne et racinaire

- **Partie aérienne** : la longueur de la tige a été mesurée à l'aide d'une règle graduée, du collet jusqu'à l'extrémité de la ramification la plus longue.
- **Partie racinaire** : après prélèvement des plantes, la longueur du système racinaire a été mesurée depuis le collet jusqu'à l'extrémité de la racine principal



Figure22: Mesure de longueur de la partie aérienne et racinaire après la 11^{ème} semaines et 6jours de culture.

1.3. Biomasse fraîche et sèche :

Nous avons déterminé le poids frais (PF) des feuilles et des racines à l'aide d'une balance de précision. Nous avons ensuite placé les échantillons dans une étuve à 80 °C pendant 48 heures afin d'obtenir leur poids sec (PS).

2.Paramètres physiologiques :

2.1 Teneur relative en eau (RWC)

Selon la méthode de **Scippa et al. (2004)**, l'évaluation de l'état hydrique repose sur trois mesures pondérales successives : le Poids Frais (PF) est prélevé immédiatement, suivi du Poids de Pleine Turgescence (PPT) obtenu après une réhydratation de 24 heures à 4 °C dans l'obscurité, et enfin du Poids Sec (PS) mesuré après une dessiccation à l'étuve à 80 °C durant 48 heures.

La teneur relative en eau des feuilles est déduite par la formule suivante.

Expression des résultats

$$TRE = \frac{PF - PS}{PPT - PS} \times 100$$

3. Paramètres Biochimiques

3.1. Pigments photosynthétiques et caroténoïdes (Lichtenthaler ,1987)

100 mg de matière fraîche foliaire ont été prélevés puis introduits dans des tubes contenant 10 mL d'acétone à 95 %. Les échantillons ont ensuite été maintenus à l'obscurité, à une température de 4 °C, pendant 48 heures afin d'assurer une extraction complète des pigments. Après incubation, les extraits obtenus ont été soumis à des mesures spectrophotométriques en utilisant l'acétone à 95 % comme blanc. Les densités optiques ont été relevées aux longueurs d'onde de 663 nm, 647 nm et 470 nm, correspondant respectivement à l'absorption des chlorophylles et des caroténoïdes.

Expression des résultats

Les teneurs en pigments photosynthétiques ont été déterminées selon les équations de **Lichtenthaler (1987)**. Les concentrations en chlorophylle a (Chl a), chlorophylle b (Chl b) et caroténoïdes totaux (Car) ont été calculées comme suit :

$$\bullet \quad \text{Caroténoïdes totaux } (\mu\text{g/mL}) = \frac{1000 \times \text{DO}_{470} - 1,82 \times \text{Chla} - 85,02 \times \text{Chlb}}{198}$$

Les résultats ont été exprimés en µg de pigment par mL d'extrait et, le cas échéant, rapportés à la masse fraîche de l'échantillon (mg/g MF).

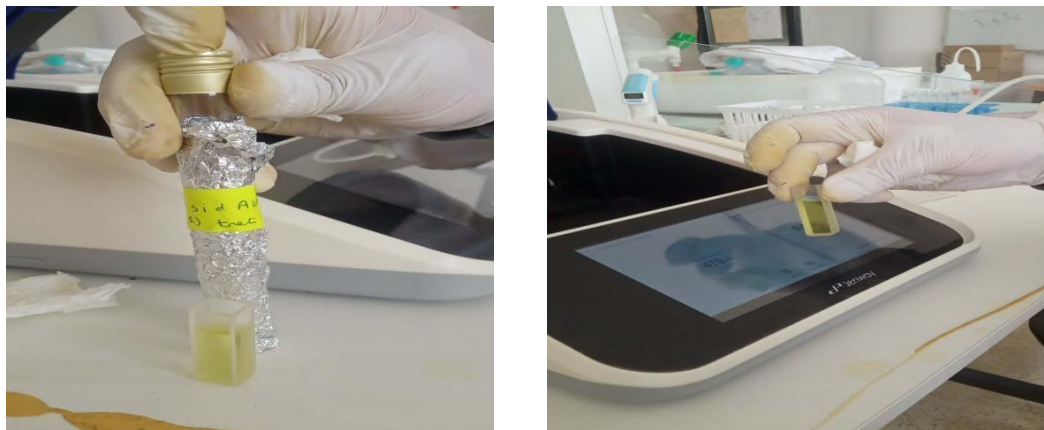


Figure23: dosage et lecture de la chlorophylle et caroténoïdes par le spectrophotomètre

3.2 Dosage des sucres solubles :

La teneur en sucres solubles totaux (saccharose, glucose, fructose, ainsi que leurs dérivés et polysaccharides) a été déterminée selon la méthode de Dubois et al. (1956). Cent milligrammes (100 mg) de matière végétale sèche ont été placés dans des tubes à essai, puis extraits avec 3 ml d'éthanol à 80 %. L'extraction a été réalisée à température ambiante

pendant 48 heures. Après extraction, les tubes ont été placés dans un bain-marie afin d'éliminer l'éthanol par évaporation. Le résidu obtenu a ensuite été repris dans 20 ml d'eau distillée.

Pour l'analyse, 2 ml de l'extrait ont été prélevés, puis additionnés de 1 ml de phénol à 5 %, suivi rapidement de 5 ml d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4 à 85 %). Le mélange a été homogénéisé à l'aide d'un vortex, donnant une coloration jaune-orangé.

Les tubes ont été incubés à température ambiante pendant 10 minutes, puis placés dans un bain-marie à 30 °C pendant 10 à 20 minutes. L'absorbance a été mesurée à 485 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.



Figure24: dosage des sucres solubles.

3.3. Extraction et de dosage de la proline

La quantification de la proline libre a été réalisée selon la méthode spectrophotométrique décrite par Bergman et **Loxley (1970)**.

La matière végétale sèche a été broyée dans 1,25 ml d'éthanol à 95 %, puis rincée à trois reprises avec de l'éthanol à 70 %. L'extraction a été réalisée selon la méthode de Bergman et **Loxley (1970)** à partir de 100 mg d'échantillon végétal.

Le surnageant obtenu a été récupéré, puis 2,5 ml ont été mélangés avec 1 ml de chloroforme et 1,5 ml d'eau distillée. L'ensemble a été conservé à 0 °C pendant une nuit.

Après séparation des phases, 1 ml de la phase supérieure a été prélevé avec précaution afin d'éviter toute contamination. À ce volume ont été ajoutés 2 ml de NaCl (5 M) et 5 ml d'eau distillée.

Après homogénéisation, 2 ml du mélange ont été transférés dans des tubes à essai, puis additionnés de 2 ml de tampon phosphate de 2 ml de réactif à la ninhydrine (0,125 g de ninhydrine dissous dans 2 ml de H_3PO_4 6 M et 3 ml d'acide acétique glacial).

Les tubes ont été agités puis incubés au bain-marie bouillant pendant 60 minutes pour le développement de la coloration. Après refroidissement, l'absorbance a été mesurée à 505 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

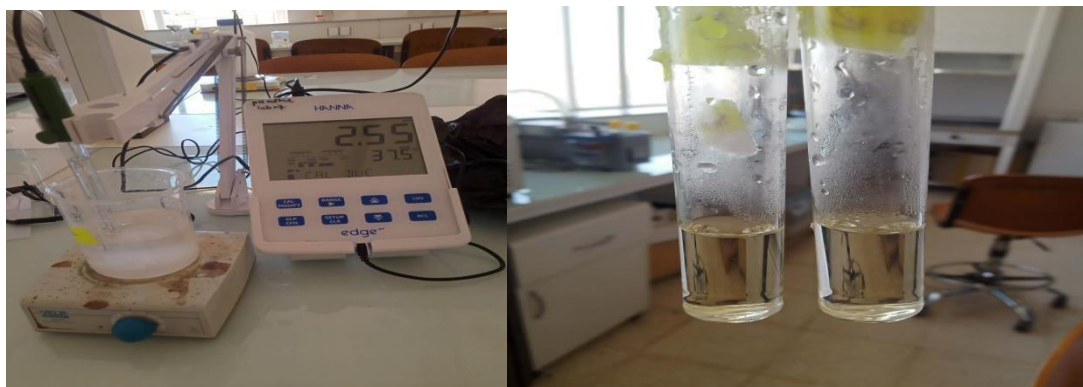


Figure25: dosage de proline

3.4. Etude du bilan minéral

0,1 g de matière sèche finement broyée, introduite dans un tube de digestion. À cet échantillon ont été ajoutés 2 mL d'acide nitrique concentré. Le mélange a été laissé à température ambiante pendant 24 heures afin de permettre une pré-digestion de la matière organique.

Les tubes ont ensuite été placés dans une étuve à 80 °C pendant 48 heures pour assurer une minéralisation complète des échantillons. Après incubation, les tubes ont été retirés de l'étuve et laissés à refroidir à température ambiante.

Les extraits minéralisés ont ensuite été ajustés à un volume final de 10ml à l'aide d'eau distillée, puis filtrés afin d'éliminer les éventuelles particules en suspension. Les solutions obtenues ont été conservées dans des flacons appropriés jusqu'à leur analyse.

La détermination des éléments minéraux a été effectuée par lecture des absorbances à l'aide d'un spectrophotomètre, selon les longueurs d'onde spécifiques à chaque élément étudié. Les concentrations ont été calculées à partir de courbes d'étalonnage établies à l'aide de solutions standards.



Figure26: Spectrophotomètre absorption atomique

Pour bien interpréter nos résultats, la matrice finale des données obtenus a fait l'objet d'une étude statistique à l'aide de logiciel STATISTICA, pour faire ressortir les groupes homogènes, et bien cerner les différences significatives. Un Test Anova est réalisé pour voir l'effet de la salinité, les cultivars et la combinaison salinité*cultivars sur l'ensemble des résultats. Puis on a clôturé notre étude statistique par la corrélation de Pearson. Le calcul des moyennes et les écarts-types est fait auparavant par Microsoft Excel.

Chapitre III: Résultats et interprétations

I-Paramètres morphologique

1. Nombre de feuilles avant et après application de stress salin

La figure 27 illustre l'évolution du nombre de feuilles chez trois cultivars de grenadier (*Punica granatum L.*): Sid ali, Maadam et Sefri, exposés à deux niveaux de salinité (0 mM et 200 mM). Les résultats montrent une augmentation du nombre de feuilles aussi bien chez les plantes témoins que chez celles traitées avec 200 mM de NaCl. Cependant, cette augmentation diffère selon les cultivars de grenadier.

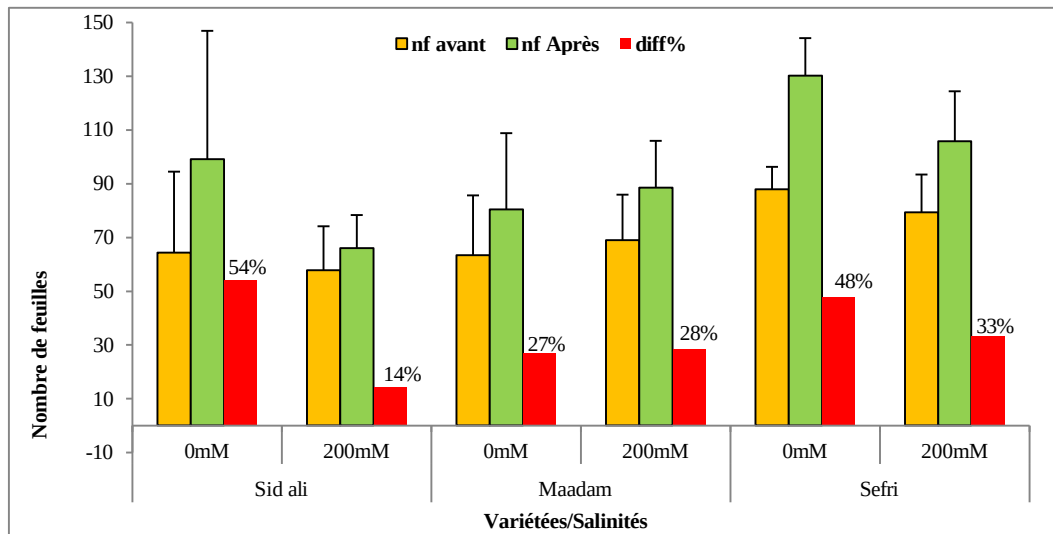


Figure 27: Nombre de feuilles avant et après application de stress salin des trois cultivars de grenadier *Punica granatum L.*

En absence de NaCl, le cultivar Sid Ali présente le taux d'augmentation le plus élevé (54 %), suivi de Sefri (48 %), tandis que Maadam enregistre la plus faible augmentation (27 %).

La solution saline de 200 mM de NaCl réduit l'augmentation du nombre de feuilles chez Sid Ali et Sefri, dont les valeurs atteignent respectivement 14 % et 33 %. Il est important de noter que Maadam maintient un taux d'augmentation pratiquement stable sous l'effet de la salinité (28 % contre 27 % en absence de NaCl).

Par ailleurs, Sefri conserve le nombre de feuilles le plus élevé avant et après l'application de NaCl. À l'inverse, Sid Ali apparaît comme le cultivar le plus affecté par la salinité, puisqu'il présente la diminution la plus importante de l'augmentation relative du nombre de feuilles.

2. Longueur de la partie aérienne et racinaire

La figure 28 présente l'effet de la salinité (0 mM et 200 mM NaCl) sur la longueur des racines et la longueur de la partie aérienne chez trois variétés de grenadier (Sid ali, Maadam et Sefri).

L'analyse de la longueur des racines et de la partie aérienne indique que la réponse à la salinité varie selon les cultivars et selon l'organe étudié.

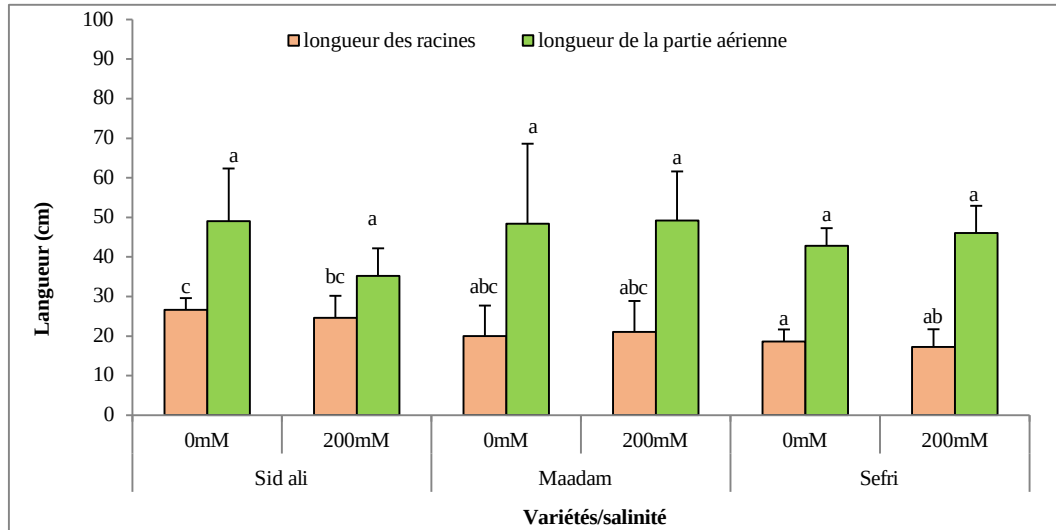


Figure 28: Longueur de la partie racinaire et partie aérienne des trois cultivars de grenadier *Punica granatum L* sous l'effet de la salinité.

Au niveau racinaire, les valeurs les plus élevées sont observées chez le cultivar Sid Ali, avec une longueur d'environ 26 cm en absence de NaCl. La présence de 200 mM de NaCl entraîne une diminution de la longueur racinaire chez Sid ali et Sefri, dont les valeurs atteignent respectivement 24 cm et 16 cm. Il est important de noter que le cultivar Maadam présente une légère augmentation de ce paramètre, la longueur des racines passant d'environ 20 cm à 22 cm.

Concernant la partie aérienne, les réponses observées sont différentes. La diminution la plus marquée est enregistrée chez Sid ali, dont la longueur passe d'environ 48 cm à 35 cm. Par ailleurs, les cultivars Maadam et Sefri maintiennent une bonne croissance aérienne en présence de NaCl. La longueur de la partie aérienne demeure pratiquement stable chez Maadam, avec des valeurs comprises entre 48 et 49 cm, tandis qu'une légère augmentation est observée chez Sefri, passant d'environ 42 cm à 45 cm.

À l'inverse de Sid ali, qui apparaît comme le cultivar le plus affecté par la salinité, Maadam et Sefri montrent une meilleure stabilité de croissance, particulièrement au niveau de la partie aérienne.

3. Poids frais des feuilles et racine

Le cultivar Sefri présente les valeurs les plus élevées de poids frais, avec environ 6,5 g pour les feuilles et 3,5 g pour les racines en absence de salinité.

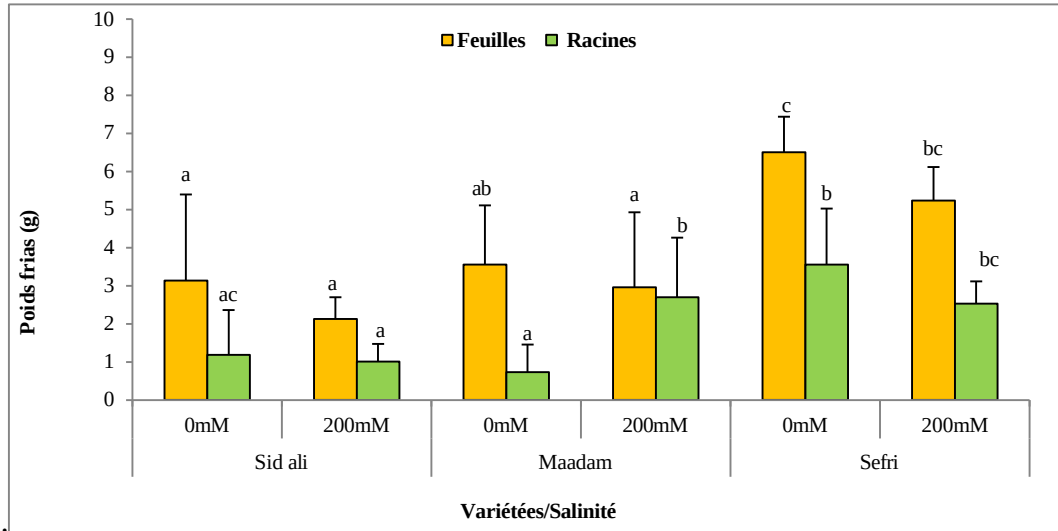


Figure29: Poids frais des feuilles et des racines des trois cultivars de grenadier *Punica granatum L* sous l'effet de la salinité.

Avec 200 mM de NaCl on a remarqué une diminution du poids frais chez Sid ali et Sefri. La réduction la plus marquée est observée chez Sid ali au niveau foliaire, les valeurs passant d'environ 3,1 g à 2,1 g. Maadam présente une augmentation importante du poids frais racinaire, qui passe d'environ 0,8 g à 2,7 g sous l'effet de la salinité, qui semble mieux s'adapter à la salinité grâce à l'amélioration de sa biomasse racinaire. Malgré la diminution observée, Sefri conserve les valeurs de poids frais les plus élevées.

4. Poids sec des feuilles et racines

La figure 30 présente l'évolution du poids sec des feuilles et des racines des trois cultivars de grenadier (Sid ali, Maadam et Sefri) soumis à un traitement salin de (200 mM NaCl), comparativement au témoin irrigué à l'eau ordinaire (0 mM).

L'analyse du poids sec des feuilles et des racines montre que la réponse à la salinité varie selon les cultivars.

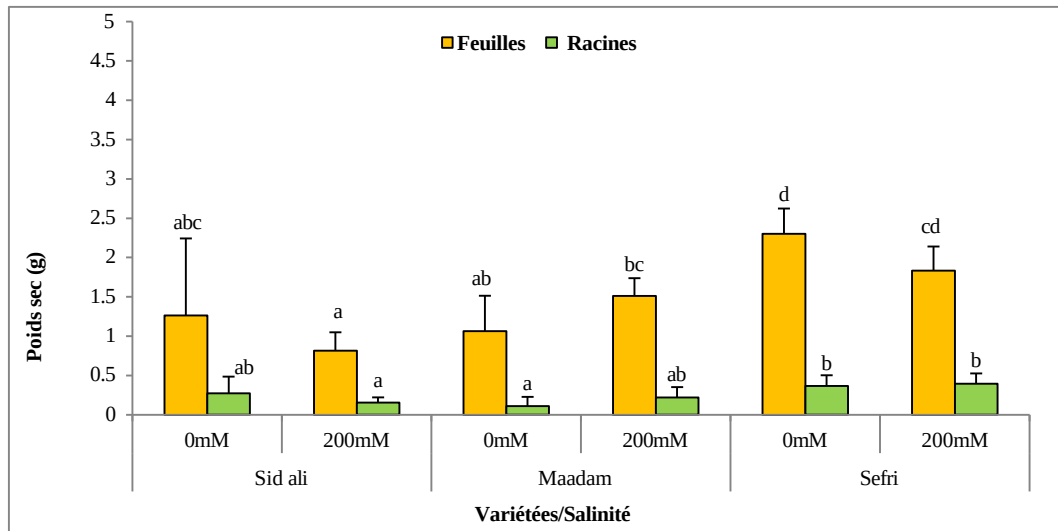


Figure30: Poids sec des feuilles et des racines des trois cultivars de grenadier *Punica granatum* L sous l'effet de la salinité.

Au niveau des feuilles, une diminution est observée chez Sid ali et Sefri sous l'effet de 200 mM de NaCl, la réduction la plus importante étant enregistrée chez Sefri, dont les valeurs passent d'environ 2,3 g à 1,8 g. En revanche, le cultivar Maadam présente une augmentation du poids sec foliaire, passant d'environ 1,0 g à 1,5 g.

Concernant les racines, les variations sont moins marquées. Une légère diminution est observée chez Sid Ali, tandis que Sefri maintient des valeurs relativement stables. Comme résultat marquant on note une augmentation du poids sec racinaire en présence de NaCl au niveau de cultivar Maadam.

II. Paramètre physiologique

1. Teneur relative en eau (RWC)

La figure 31 montre que la salinité a affecté différemment la teneur relative en eau (RWC %) des feuilles selon le cultivar.

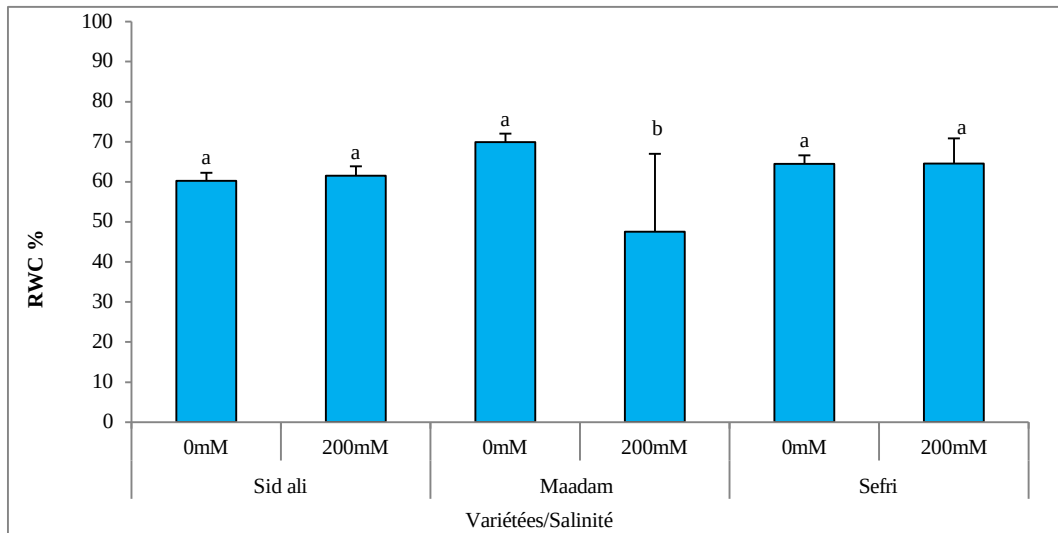


Figure 31: Teneur en eau des feuilles (RWC%) des trois cultivars de grenadier *Punica granatum L* sous l'effet de la salinité.

La présence de 200 mM de NaCl n'entraîne pas de variation importante chez Sid ali et Sefri, dont les valeurs demeurent relativement stables, autour de 62 % et 65 %, respectivement. Par contre Maadam présente une diminution marquée du RWC sous l'effet de la salinité, sa valeur passant d'environ 70 % à moins de 49%.

III. Paramètres biochimiques

1- Teneur en chlorophylle

La figure 32 présente les variations des teneurs en chlorophylles a (Chl a) et b (Chl b) chez les trois cultivars de grenadier (*Punica granatum L.*) (Maadam, Sid ali et Sefri) exposés à deux niveaux de salinité (0 mM et 200 mM de NaCl).

L'examen des teneurs en chlorophylles a et b montre que la réponse à la salinité varie selon les cultivars et selon le type de pigment étudié.

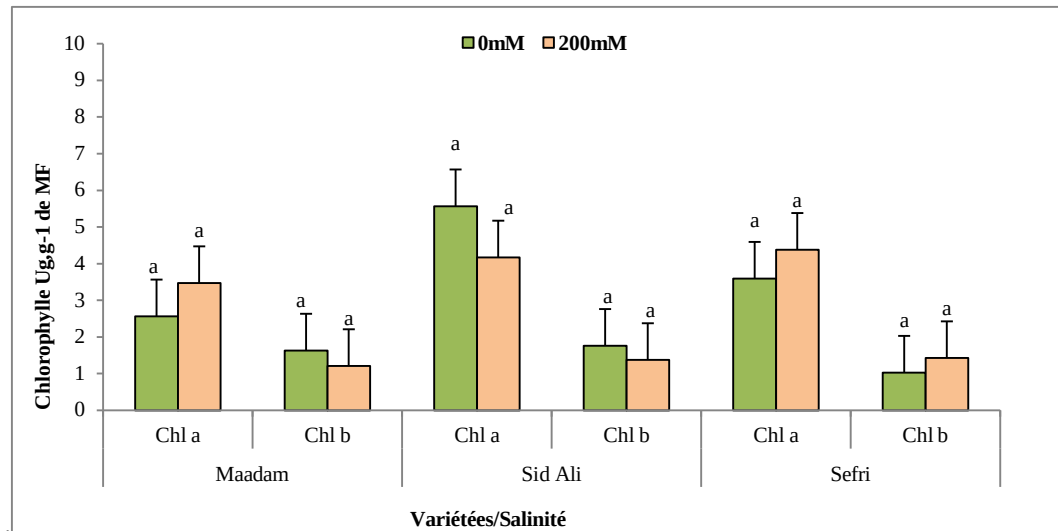


Figure32: Variations des teneurs en Chlorophylles des trois variétés de grenadier *Punica granatum L.* sous l'effet de la salinité.

Les teneurs les plus élevées en chlorophylle a sont observées chez Sid ali en absence de NaCl ($5,5 \mu\text{g.g}^{-1} \text{MF}$), tandis que les plus faibles sont enregistrées chez maadam ($2,4 \mu\text{g.g}^{-1} \text{MF}$).

La présence de 200 mM de NaCl entraîne une diminution des teneurs en chlorophylles a et b chez Sid ali, alors qu'une augmentation de la chlorophylle a est observée chez Maadam. Il est important de noter que le cultivar Sefri présente une augmentation des chlorophylles a et b sous l'effet de la salinité.

À l'inverse de Sid ali, qui enregistre une diminution des pigments chlorophylliens, Sefri semble mieux maintenir son activité photosynthétique en présence de NaCl.

2- Teneur en caroténoïdes

La figure33 présente les variations des teneurs en caroténoïdes chez les trois cultivars de grenadier (*Punica granatum L.*) (Maadam, Sid ali et Sefri) exposés à deux niveaux de salinité (0 mM et 200 mM l) .

Les résultats montrent que l'effet de la salinité sur la teneur en caroténoïdes diffère selon le cultivar.

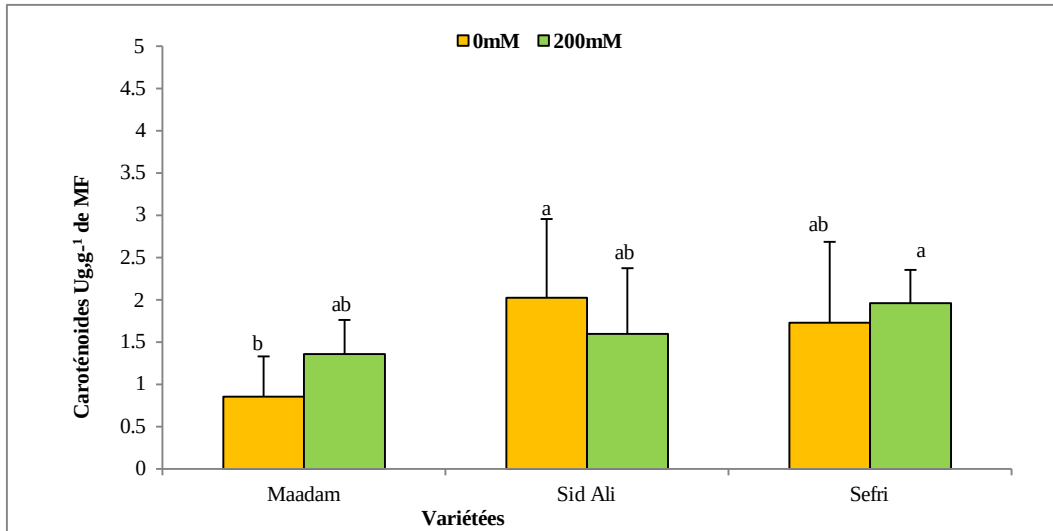


Figure33: Variations des teneurs en caroténoïdes des trois variétés de grenadier *Punica granatum L.* sous l'effet de la salinité.

La teneur la plus élevée est observée chez Sid ali en absence de NaCl, avec environ 2,0 µg/g MF.

La présence de 200 mM de NaCl entraîne une diminution de la teneur en caroténoïdes chez Sid ali 1,6 µg/g MF. , tandis qu'une augmentation est observée chez Maadam et Sefri. Cette augmentation est plus marquée chez Maadam, dont la teneur passe d'environ 0,9 à 1,4 µg/g MF. Maadam et Sefri accumulent davantage de caroténoïdes en présence de NaCl. À l'inverse, Sid ali présente une diminution de ce pigment sous l'effet de la salinité.

3- Teneur en sucres solubles

L'examen des résultats montre que la teneur la plus élevée est observée chez Maâdam en absence de NaCl, avec environ 510 µg/g de matière fraîche. La présence de 200 mM de NaCl entraîne une légère diminution des sucres solubles chez Sid ali, tandis que la teneur reste pratiquement stable chez Sefri. En revanche, Maâdam enregistre la diminution la plus importante, sa teneur passant d'environ 510 à 300 µg/g.

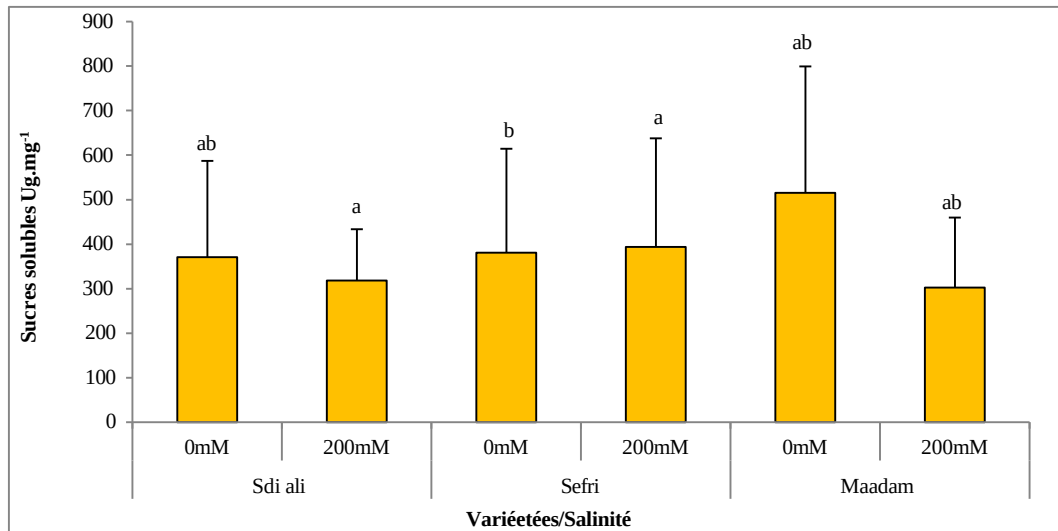


Figure34: Variations des teneurs en sucres solubles des trois variétés de grenadier *Punica granatum L.* sous l'effet de la salinité.

Il est important de noter que Sefri maintient une teneur en sucres solubles relativement stable en présence de NaCl.

4. Teneur en proline

La figure35 présente la teneur en proline des trois variétés de grenadier (Sid ali, Maadam et Sefri) soumises à une salinité de(200 mM NaCl), comparativement au témoin irrigué à l'eau douce(0mM NaCl).

L'examen de la teneur en proline montre que la réponse à la salinité varie selon les cultivars.

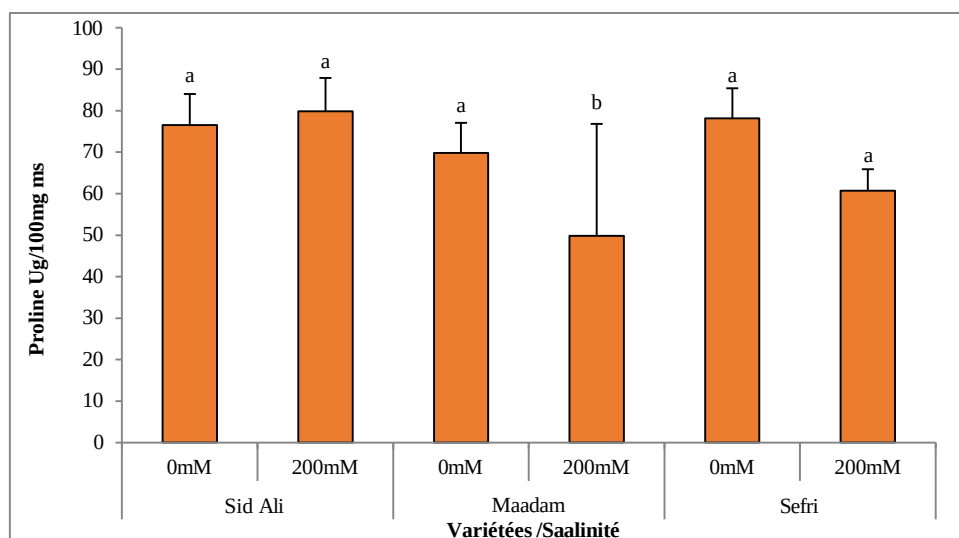


Figure 35 : Teneur en proline au niveau des feuilles des trois cultivars de grenadier, *Punica granatum L.* sous l'effet de la salinité.

Une légère augmentation est observée chez Sid ali, dont la teneur passe d'environ 76 à 80 $\mu\text{g}/100 \text{ mg MS}$. En revanche, une diminution est enregistrée chez Maadam et Sefri, les valeurs passant respectivement de 69 à 49 $\mu\text{g}/100 \text{ mg MS}$ et de 78 à 60 $\mu\text{g}/100 \text{ mg MS}$. Sid ali est le seul cultivar à accumuler davantage cette osmolyte en présence de NaCl. À l'inverse, Maadam et Sefri présentent une diminution de ce composé sous l'effet de la salinité.

5. Bilan minérale

La figure36 présente les variations des teneurs en magnésium (Mg^+), sodium (Na^+), calcium (Ca^{+2}) et potassium (K^+) chez les jeunes boutures des trois variétés de grenadier (Sid Ali, Maadam et Sefri) soumises à un stress salin de (200 mM NaCl), en comparaison avec le témoin irrigué à l'eau douce (0 mM NaCl).

L'examen des teneurs en éléments minéraux montre que la réponse à la salinité varie selon les cultivars et les éléments étudiés.

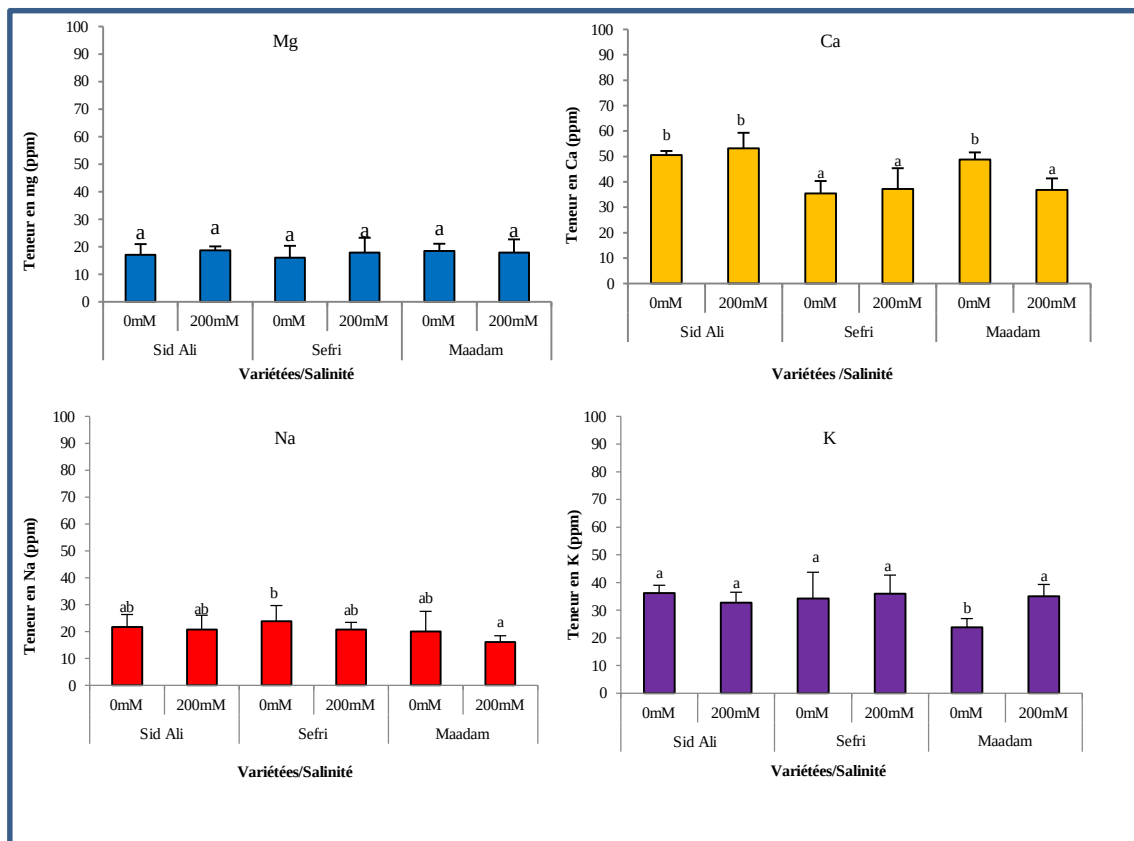


Figure36: Variations des teneurs en Mg^+ , Ca^{+2} , Na^+ et K^+ chez les jeunes boutures des trois variétés de grenadier *Punica granatum L.* sous l'effet de la salinité.

Les teneurs en magnésium(Mg^{+})demeurent globalement stables chez les trois cultivars. Concernant le calcium(Ca^{+2}), une légère augmentation est observée chez Sid ali (50 à 55 ppm) et Sefri (35 à 38 ppm), alors qu'une diminution est enregistrée chez Maâdam, dont la teneur passe d'environ 50 à 38 ppm.

Les teneurs en sodium (Na^{+}) diminuent chez l'ensemble des cultivars, la réduction la plus importante étant observée chez Maâdam (19 à 15 ppm).

En revanche, les réponses du potassium (K^{+}) diffèrent selon les cultivars : une légère diminution est observée chez Sid ali (35 à 33 ppm), tandis qu'une augmentation est enregistrée chez Sefri (34 à 35 ppm) et surtout chez Maâdam (23 à 32 ppm).

Il est important de noter que Maâdam présente la plus forte augmentation du potassium ainsi que la plus forte diminution du sodium sous l'effet de la salinité. À l'inverse de Sid ali, Maâdam semble mieux maintenir son équilibre minéral en présence de NaCl.

IV. Résultats statistique

L'enquête statistique a montré l'existence d'un effet significatif des cultivars ($p < 0,001$). Cependant, la salinité montré un effet non significatif ($p > 0,05$). De plus, l'interaction Cultivars $\times$ Salinité a également montré un effet significatif ($p < 0,05$). Ces résultats confirment les observations obtenues pour l'ensemble des paramètres étudiés au cours de l'étude.

Tableau 02 : Analyse de la variance ANOVA de l'effet de la salinité, cultivars et la combinaison cultivars*salinité sur les trois cultivars de grenadier, $p=0.05$.

	Test	Value	F	Effect	Error	p
Intercept	Wilks	0,000251	2243,159	16	9	0,000000
Cultivars	Wilks	0,008690	5,472	32	18	0,000188
Salinité	Wilks	0,201346	2,231	16	9	0,111768
Cultivars*Salinité	Wilks	0,033519	2,510	32	18	0,021264

Chapitre IV:

Discussion et conclusion

I. Discussion

Les résultats obtenus montrent que la réponse au stress salin varie considérablement selon les cultivars de grenadier étudiés. Cette variabilité confirme l'existence d'une diversité génétique dans les mécanismes de tolérance à la salinité chez *Punica granatum* L. L'analyse statistique a révélé un effet hautement significatif du facteur cultivar ainsi qu'une interaction significative entre cultivar et salinité, indiquant que chaque cultivar réagit différemment à l'augmentation de la concentration en NaCl des acquis similaire ont été rapporté par **(Wang et al., 2023)**et **(Sun et al., 2018)** .

Sur le plan morphologique, l'application de 200 mM de NaCl a généralement réduit la croissance végétative, notamment chez le cultivar Sid Ali. Cette diminution de la longueur racinaire, de la partie aérienne ainsi que des biomasses fraîche et sèche s'explique essentiellement par le stress osmotique et le déséquilibre ionique.

Le stress osmotique limite l'absorption de l'eau en réduisant le potentiel hydrique du milieu, ce qui diminue la turgescence cellulaire et freine l'élongation des cellules. En parallèle, l'accumulation de Na^+ et Cl^- perturbe l'équilibre minéral, notamment en réduisant la disponibilité du K^+ , ce qui affecte les fonctions cellulaires et ralentit la croissance.

Ces deux mécanismes combinés expliquent la baisse globale de la croissance observée, particulièrement chez le cultivar Sid Ali. Ces résultats concordent avec ceux rapportés chez le grenadier par **Sun et al. (2024)** et **Liu et al. (2020)**.

Les fortes corrélations positives observées entre les différents paramètres biométriques témoignent d'une étroite relation entre la croissance foliaire et racinaire. Ainsi, le poids frais des feuilles est fortement associé au poids sec des feuilles ($r = 0,89$), tandis que le poids frais des racines est positivement corrélé au poids sec des feuilles ($r = 0,71$) et au poids sec des racines ($r = 0,64$).

Les résultats montrent une variabilité entre les cultivars face au stress salin. Certains maintiennent une croissance plus stable avec un bon équilibre entre la biomasse foliaire et racinaire, tandis que d'autres présentent une croissance plus importante mais moins régulière et moins stable sous stress. Dans ce contexte, les cultivars Maâdam et Sefri ont montré une meilleure stabilité de croissance.

Chez Maâdam, l'augmentation de la biomasse racinaire signifie que la plante, sous stress salin, oriente davantage sa croissance vers les racines. Cela améliore l'absorption de l'eau et des sels

minéraux, ce qui lui permet de mieux supporter le stress et de maintenir une croissance plus stable. **(Kaur et al., 2023).**

Sur le plan physiologique, le contenu relatif en eau (RWC) est resté relativement stable chez Sid Ali et Sefri, ce qui suggère une meilleure capacité à maintenir l'état hydrique sous stress salin. En revanche, chez Maâdam sous stress salin s'explique par la réduction du potentiel osmotique du milieu, qui limite l'absorption de l'eau par les racines. Cependant, malgré cette baisse du RWC, le cultivar maintient une croissance relativement satisfaisante, ce qui indique qu'il ne dépend pas uniquement du maintien de l'état hydrique pour assurer sa croissance. La corrélation négative entre la salinité et le RWC ($r = -0,34$) confirme cet effet.

Cette performance peut être liée à des mécanismes de tolérance au stress, tels que l'ajustement osmotique (accumulation de solutés compatibles) ou une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau, permettant à la plante de continuer ses fonctions métaboliques même avec une teneur en eau réduite **(Liu et al., 2020).**

L'analyse du bilan minéral et des pigments photosynthétiques montre que les différences entre cultivars sont liées à leur capacité d'adaptation au stress salin, notamment au niveau de la régulation ionique et du maintien de la photosynthèse.

La stabilité du magnésium indique le maintien de la structure de la chlorophylle et donc une certaine préservation de l'activité photosynthétique. En revanche, chez Maâdam, l'augmentation du potassium et la réduction du sodium traduisent une meilleure sélectivité ionique au niveau des racines, limitant l'entrée du Na^+ toxique et favorisant l'accumulation du K^+ essentiel. Ce maintien d'un rapport K^+ / Na^+ élevé permet de préserver l'activité enzymatique, la régulation osmotique et la stabilité des membranes cellulaires, ce qui réduit les effets négatifs du stress salin. Cela explique également les corrélations positives observées entre le potassium, les caroténoïdes et la biomasse racinaire fraîche, montrant que un bon équilibre ionique est directement lié à une meilleure protection photosynthétique et à une croissance plus efficace sous stress **(Liu et al., 2020 ; Wang et al., 2023).**

Cette amélioration de l'équilibre ionique est étroitement liée aux réponses photosynthétiques observées, comme en témoignent les corrélations positives entre le potassium et les caroténoïdes ($r = 0,52$), ainsi qu'entre le potassium et la biomasse fraîche racinaire ($r = 0,52$), soulignant son rôle dans le maintien de la performance physiologique.

Parallèlement, les pigments photosynthétiques ont été différemment affectés selon les cultivars. Une diminution des chlorophylles et des caroténoïdes chez Sid Ali reflète une altération de

l'appareil photosynthétique induite par le stress oxydatif lié à l'accumulation de Na^+ , susceptible de perturber la structure des chloroplastes, d'inhiber la synthèse des pigments et d'accélérer leur dégradation (**Wang et al., 2024**). À l'inverse, Sefri et, dans une moindre mesure, Maâdam ont montré une augmentation ou un maintien des pigments, suggérant une meilleure protection du système photosynthétique. Les caroténoïdes, en particulier, contribuent à la photoprotection en limitant les dommages oxydatifs, tandis que la stabilité des chlorophylles traduit une préservation de l'activité photosynthétique. Cette réponse coordonnée est confirmée par les corrélations positives entre chlorophylle a et caroténoïdes ($r = 0,82$), ainsi qu'entre chlorophylles a et b ($r = 0,58$).

Le maintien des teneurs en chlorophylle chez Maâdam signifie que le stress salin n'a pas fortement dégradé les chloroplastes ni accéléré la dégradation des pigments photosynthétiques. Cela indique une meilleure protection des membranes chloroplastiques contre le stress oxydatif induit par l'accumulation de Na^+ et Cl^- .

Ainsi, la plante parvient à conserver une activité photosynthétique relativement stable, ce qui reflète une capacité de tolérance au stress salin au niveau physiologique.

La diminution des sucres solubles peut s'expliquer par leur utilisation comme substrats énergétiques et osmoprotecteurs. En effet, sous stress salin, les plantes mobilisent ces composés pour fournir de l'énergie aux mécanismes d'adaptation (transport ionique, maintien de l'équilibre osmotique) et pour soutenir les processus de croissance.

La diminution du calcium peut perturber la stabilité des membranes cellulaires, car le Ca^{2+} joue un rôle essentiel dans la cohésion des phospholipides et dans la protection de l'intégrité membranaire. Il intervient aussi dans la signalisation cellulaire, notamment dans la transmission des signaux de stress.

Cependant, chez Maâdam, les effets négatifs de cette baisse semblent être partiellement compensés par d'autres mécanismes de tolérance, tels que la régulation ionique (maintien d'un bon rapport K^+ / Na^+) et l'activation de systèmes d'adaptation au stress, ce qui permet de limiter les dommages et de préserver les fonctions physiologiques essentielles. (**Dichala et al., 2022 ; Sami et al., 2016**). Cette interprétation est appuyée par les corrélations positives observées entre les sucres solubles et la biomasse fraîche racinaire ($r = 0,42$) ainsi que la biomasse sèche aérienne ($r = 0,29$), indiquant leur contribution au maintien de la croissance sous stress.

Toutefois, chez le cultivar Sid Ali, les teneurs relativement élevées en eau, en sucres solubles et en calcium ne doivent pas être interprétées comme un signe de meilleure tolérance à la salinité. Elles traduisent plutôt l'activation de mécanismes de défense visant à limiter les effets du stress osmotique et ionique. En effet, malgré l'accumulation de ces composés, ce cultivar a présenté les réductions les plus importantes de croissance et une altération des pigments photosynthétiques. Ces résultats suggèrent que les réponses osmotiques et minérales mises en place demeurent insuffisantes pour compenser les effets négatifs de la salinité. Ainsi, l'accumulation de sucres, de calcium et le maintien d'un niveau hydrique relativement élevé doivent être considérés comme des indicateurs d'un stress important plutôt que comme des marqueurs de tolérance.

L'accumulation de la proline chez Sid Ali s'explique par l'activation d'une réponse de stress face à la salinité. La proline agit comme osmoprotecteur en contribuant à la régulation du potentiel osmotique, à la stabilisation des protéines et des membranes, ainsi qu'à la protection contre le stress oxydatif. Cependant, son augmentation importante est généralement associée à un stress plus sévère qu'à une réelle tolérance, ce qui indique que Sid Ali subit davantage les effets de la salinité. Cette interprétation est appuyée par les résultats de corrélation, où la proline présente une relation négative avec la salinité ($r = -0,42$), suggérant que son accumulation varie en fonction du niveau de stress imposé, mais aussi de la capacité du cultivar à réguler ses réponses physiologiques.

En revanche, chez Maâdam et Sefri, la diminution de la proline peut s'expliquer par une meilleure tolérance au stress salin, réduisant ainsi l'intensité du stress perçu par la plante. Grâce à une régulation ionique plus efficace, notamment le maintien d'un meilleur rapport K^+ / Na^+ , ainsi qu'à un ajustement osmotique assuré par d'autres composés compatibles, ces cultivars n'ont pas besoin d'accumuler fortement la proline. Cette idée est renforcée par les corrélations positives observées entre la proline et certains paramètres de croissance et de statut hydrique, notamment le RWC ($r = 0,29$) et la biomasse fraîche des racines ($r = 0,42$), ce qui suggère que la proline contribue au maintien des fonctions physiologiques dans les situations de stress modéré.

De plus, la proline peut être rapidement mobilisée et consommée dans les processus métaboliques liés à l'adaptation au stress, ce qui contribue à la baisse de son niveau (**Dichala et al., 2022 ; Kaur et al., 2023**). Ainsi, la faible accumulation de proline traduit un stress cellulaire mieux contrôlé et une adaptation plus efficace à la salinité par rapport à Sid Ali.

II. Conclusion

L'étude de la tolérance des cultures au stress salin suscite un intérêt croissant en raison de ses impacts importants sur la croissance, le développement et la productivité des plantes, notamment dans les régions arides et semi-arides. Dans ce contexte, le grenadier (*Punica granatum L.*) constitue une espèce fruitière d'intérêt, largement cultivée et présentant une variabilité génétique importante vis-à-vis des contraintes environnementales.

Notre étude s'inscrit dans cette dynamique et constitue une contribution à l'évaluation de l'effet du stress salin sur la croissance ainsi que sur les réponses physiologiques, biochimiques de trois cultivars locaux de grenadier, à savoir Sefri, Maâdam et Sid Ali, dans le but de mieux comprendre leurs mécanismes d'adaptation à la salinité.

Les résultats obtenus ont montré que la salinité affecte différemment les cultivars étudiés. Le cultivar Sid Ali s'est révélé le plus sensible au stress salin, avec une diminution de plusieurs paramètres de croissance, de la biomasse et des pigments photosynthétiques. En revanche, les cultivars Maâdam et Sefri ont présenté une meilleure capacité d'adaptation en maintenant une croissance relativement stable sous l'effet du NaCl. L'analyse des paramètres biochimiques a également mis en évidence des variations des teneurs en chlorophylles, caroténoïdes, sucres solubles et proline, traduisant l'activation de mécanismes physiologiques impliqués dans la tolérance au stress. Par ailleurs, les modifications observées au niveau du bilan minéral confirment l'existence de stratégies d'adaptation propres à chaque cultivar face à l'accumulation des sels.

Dans l'ensemble, les cultivars Maâdam et Sefri apparaissent comme les plus tolérants à la salinité, tandis que Sid Ali se montre plus sensible. Ces résultats mettent en évidence l'existence d'une variabilité génétique intéressante au sein des cultivars locaux de grenadier et soulignent leur potentiel pour la culture dans les zones affectées par la salinité et la possibilité de l'utilisation de ces taxons comme portes les variétés les moins tolérances.

Ainsi, nous proposons les perspectives suivantes :

- Étudier l'effet de différents niveaux de salinité afin de déterminer les seuils de tolérance de chaque cultivar ;
- Évaluer les réponses physiologiques et biochimiques à plus long terme et à différents stades de développement ;

- Approfondir l'étude des mécanismes moléculaires et génétiques impliqués dans la tolérance à la salinité ;
- Valoriser les cultivars les plus performants dans les programmes de sélection destinés aux régions touchées par la salinisation des sols.

En somme, cette étude confirme que les cultivars locaux de grenadier présentent des capacités d'adaptation différentes face au stress salin, Maâdam et Sefri constituant les géotypes les plus prometteurs pour une utilisation dans les environnements salins.

Références

Références bibliographiques

- Acosta-Motos, J. R., Ortuño, M. F., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M. J., & Hernández, J. A. (2017). Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7(1), Article 18.
- Al-Janabi, T. K., & Al-Khafaji, B. K. (2021). Effects of salinity on growth, physiological and biochemical responses of tomato. *Plant Archives*, 21(2), 727–734.
- Almeida, D. M., Oliveira, M. M., & Saibo, N. J. M. (2017). Regulation of Na⁺ and K⁺ homeostasis in plants: Towards improved salt stress tolerance in crop plants. *Genetics and Molecular Biology*, 40(1), 326–345.
- Almeida, P., et al. (2017). Vacuolar compartmentalization and ion transporters under salinity stress. *Plant Cell Reports*, 36(5), 711–724.
- Ambede, J. G., Netondo, G. W., Mwai, G. N., & Musyimi, D. M. (2012). NaCl salinity affects germination, growth, physiology, and biochemistry of Bambara groundnut. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 24, 151–160.
- Anas, B., Bajoub, A., & El Amine, A. (2021). La culture du grenadier au Maroc : un levier pour le développement, à quelles conditions ? *Agriculture du Maghreb*, 138, 65–68.
- AOAC. (2019). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (21e éd.). Gaithersburg, MD, USA.
- Arif, I., Batool, M., & Schenk, P. M. (2020). Plant microbiome engineering: Expected benefits for improved crop growth and resilience. *Trends in Biotechnology*, 38(12), 1367–1377.
- Assaha, D. V. M., Ueda, A., Saneoka, H., Al-Yahyai, R., & Yaish, M. W. (2017). The role of Na⁺ and K⁺ transporters in salt stress adaptation in glycophytes. *Frontiers in Physiology*, 8, Article 509.
- Ben Yahmed, J. (2013). *Étude des propriétés de tolérance au déficit hydrique et au stress salin de génotypes appartenant au genre Poncirus et au groupe des mandariniers* (Thèse de doctorat). Université de Corse-Pascal Paoli, France.
- Benmahioul, B., et al. (2019). Salinisation des terres agricoles dans la plaine de la Mina (Wilaya de Relizane). *Cahiers de l'Agriculture*, 28, 45–53.
- Benziouche, S., & Bouguedoura, R. (2023). Dynamique de relance stratégique de la phéniculture de la grenade en Algérie. *Journal Algérien des Régions Arides (JARA)*, 15(1), 34–49.

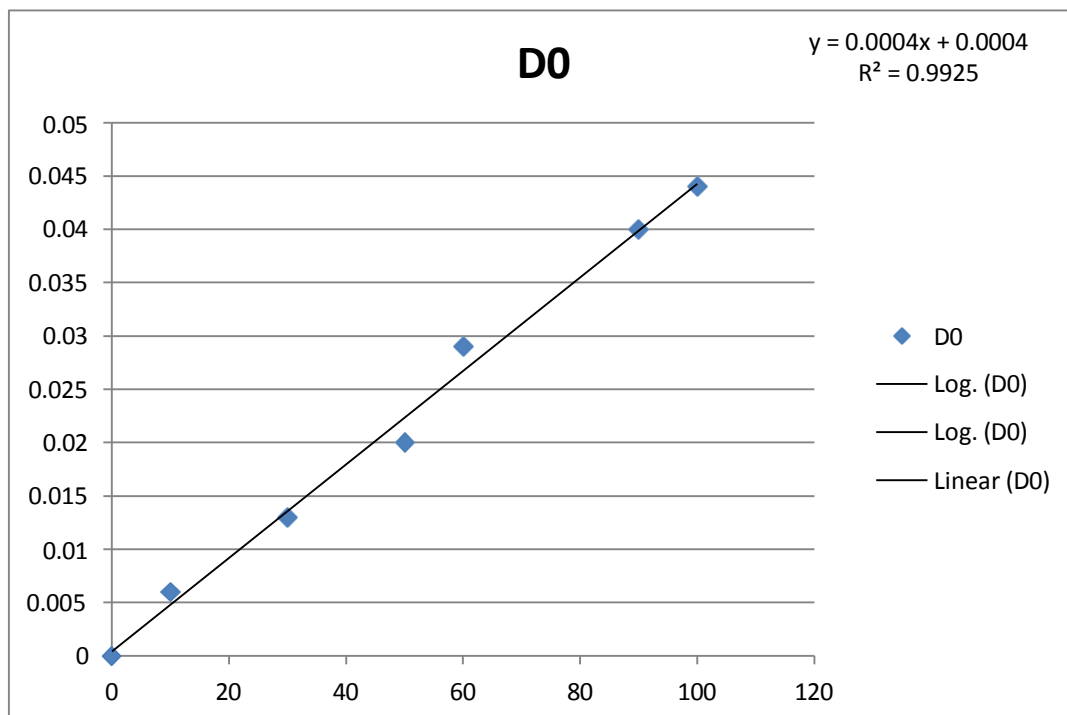
- Bergman, I., & Loxley, R. (1970). New spectrophotometric method for the determination of proline in tissue hydrolysates. *The Analyst*.
- Bouassaba, K., & Chougui, S. (2018). Effet du stress salin sur le comportement biochimique et anatomique chez deux variétés de piment (*Capsicum annuum* L.) à Mila/Algérie. *European Scientific Journal*, 14(15), 159–174.
- Bouras, N. (2019). *Le grenadier (Punica granatum) : fleur historique et évolutions thérapeutiques récentes*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1.
- Caverzan, A., Casassola, A., & Brammer, S. P. (2016). Antioxidant responses of wheat plants under stress. *Genetics and Molecular Biology*, 39(1), 1–6.
- Chougui, H. (2018). *Étude du comportement physiologique avec application d'hormones de boutures de quatre variétés de grenadier*. Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem.
- Dehni, A. (2018). *Télédétection de la salinité des sols à l'aide des techniques de traitement d'images satellitaires*.
- Dichala, O., Giannakoula, A. E., & Therios, I. (2022). Effect of salinity on physiological and biochemical parameters of leaves in three pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars. *Applied Sciences*, 12(17), 8675.
- DSA. (2018). *Rapport annuel des statistiques agricoles*. Ministère de l'Agriculture, Alger.
- DSA. (2021). *Statistiques sur l'arboriculture fruitière et rustique*. Wilaya de Djelfa, Algérie.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356.
- Elsayed, M. M. A. M. (2019). *Éclatement et qualité du fruit de la grenade (Punica granatum L.)*. Mémoire de Master 2, CIHEAM-IAMM / Université Paul Valéry de Montpellier.
- Erkan, M., & Kader, A. A. (2011). Pomegranate (*Punica granatum* L.). In *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits* (pp. 287–313). Woodhead Publishing.
- Fang, S., Hou, X., & Liang, X. (2021). Thermodynamic balance, osmotic barriers, and ionic toxicity phase in plants. *Trends in Plant Science*, 26(5), 452–464.
- Farhangi-Abriz, S., & Torabian, S. (2018). Effect of biochar on growth and ion contents of bean plant under saline condition. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(12), 11556–11564.

- Faye, E., Sane, S. K., Ba, A., & Camara, B. (2021). Comportement sous serre de *Casuarina equisetifolia*, *Gossypium hirsutum* et *Jatropha curcas* soumis au stress salin. *Journal of Applied Biosciences*, 160, 16521–16535.
- FAO. (2022). *Global status of salt-affected soils: Distribution, threat and chemical degradation of topsoil*. Rome, Italie.
- FAO (2024). *Excess salt in soil impacts 1.4 billion hectares globally*. International Soil and Water Forum, Bangkok. (Rapport FAO 2024)
- Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*.
- Ghassemi, S., Ghassemi, A., & Farhangi-Abri, S. (2022). Alleviating negative effects of salinity stress in summer savory. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(4), 4512–4524.
- Gupta, B., & Huang, B. (2014). Mechanism of salinity tolerance in plants. *International Journal of Genomics*, 2014, 701596.
- Hassani, A., Azapagic, A., & Shokri, N. (2020). Predicting long-term dynamics of soil salinity. *PNAS*, 117(52), 33017–33027.
- Hedrich, R., & Shabala, S. (2018). Stomata in a saline world. *Current Opinion in Plant Biology*, 46, 87–95.
- Hopmans, J. W., et al. (2021). Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity. *Advances in Agronomy*, 169, 1–44.
- Huang, C. J., et al. (2015). Responses of gas exchange, chlorophyll synthesis and ROS-scavenging systems to salinity stress. *Photosynthetica*, 53(3), 455–463.
- Isayenkov, S. V., & Maathuis, F. J. M. (2019). Plant salinity stress: Many unanswered questions remain. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 80.
- Julkowska, M. M., et al. (2017). Genetic components of root architecture remodeling in response to salt stress. *The Plant Cell*, 29(12), 3198–3213.
- Kahramanoglu, I., & Usanmaz, S. (2016). *Pomegranate Production and Marketing*. CRC Press.
- Lahouel, M., & Belhadj, S. (2022). Morphological variability of the fruits of seven pomegranate cultivars grown in Messaad region in central Algeria. *BASE*, 16–29.
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350–382.

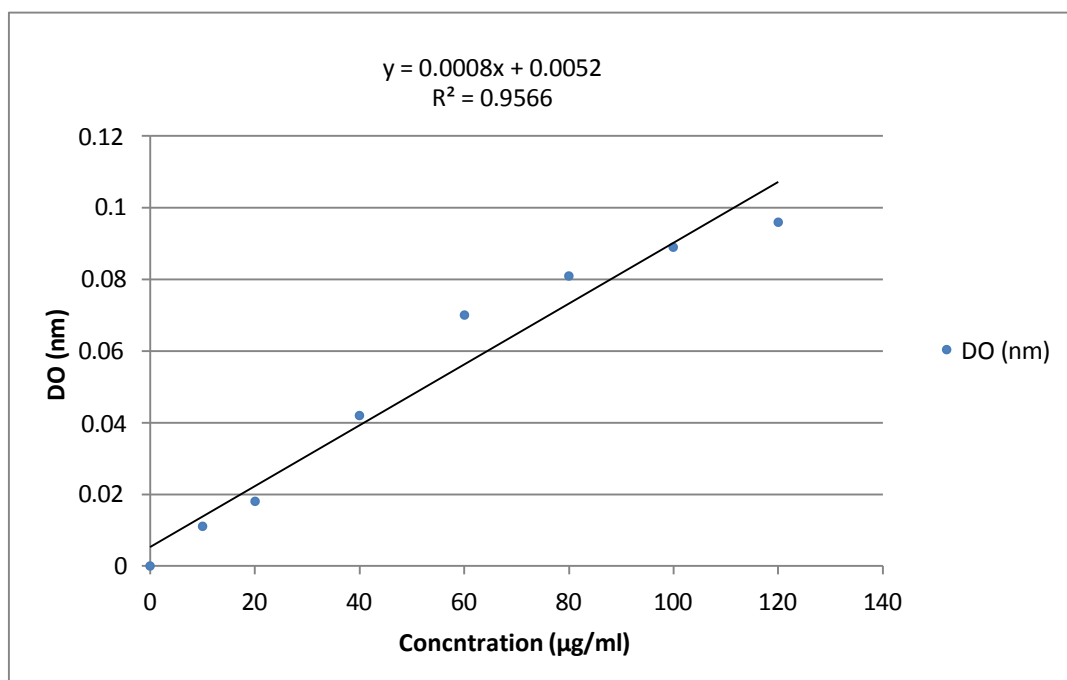
- Liu, C., Zhao, X., Yan, J., Yuan, Z., & Gu, M. (2019). Effects of salt stress on growth, photosynthesis, and mineral nutrients of 18 pomegranate cultivars. *Agronomy*, 10(1), 27.
- Majeed, A., & Muhammad, Z. (2019). Salinity: A major agricultural problem. In *Plant Abiotic Stress Tolerance* (pp. 83–99). Springer.
- Melgarejo, P., Artés, F., Tomás-Barberán, F. A., & Gil, M. I. (2011). Volatile composition of pomegranates from 9 Spanish cultivars. *Journal of Food Science*, 76(1), C134–C139.
- Meziane-Kaci, Z. (2018). *Valorisation de l'écorce de trois cultivars de fruit de la grenade*. Université Saad Dahleb - Blida 1.
- Munns, R., & Gilliam, M. (2015). Salinity tolerance of crops—What is the cost? *New Phytologist*, 208, 668–673.
- Munns, R., & Gilliam, M. (2021). Two-phase growth response to salinity. *New Phytologist*, 230(2), 435–444.
- Negrão, S., Schmöckel, S. M., & Tester, M. (2017). Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Annals of Botany*, 119(1), 1–11.
- Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324–349.
- Raza, A., et al. (2023). Smart reprogramming of plants against salinity stress. *Critical Reviews in Biotechnology*, 43(7), 1035–1062.
- Sami, F., Yusuf, M., Faizan, M., Faraz, A., & Hayat, S. (2016). Role of sugars under abiotic stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109, 54–61.
- Scippa, G. S., et al. (2004). The response of *Quercus pubescens* to water stress. *Plant Biosystems*, 138(2), 141–152.
- Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 123–131.
- Singh, R.P. et al. (2022). Soil salinity: A global threat to sustainable development. Soil Use and Management, Wiley Online Library.
- Singh, A., Mann, A., Kumar, R., & Yadav, R. K. (2023). Delineating eco-physiological traits linked to salt tolerance and fruit yield in pomegranate. *Scientia Horticulturae*, 322, 112422.
- Sun, Y., Niu, G., & Masabni, J. G. (2024). Growth, gas exchange, and mineral nutrition of pomegranate irrigated with saline water. *Technology in Horticulture*, 4(1).

- Sun, Y., Niu, G., Masabni, J. G., & Ganjegunte, G. (2018). Relative salt tolerance of 22 pomegranate cultivars. *HortScience*, 53(10), 1513–1519.
- Trifilò, P., Petruzzellis, F., Abate, E., & Nardini, A. (2021). The extra-vascular water pathway regulates dynamic leaf hydraulic decline. *Physiologia Plantarum*, 172(4), 1916–1927.
- Van Zelm, E., Zhang, Y., & Testerink, C. (2020). Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual Review of Plant Biology*, 71(1), 403–433.
- Vishwakarma, K., et al. (2017). Absciscic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 8, Article 161.
- Wald, E. (2009). *Le grenadier (Punica granatum) : plante historique et évolutions thérapeutiques récentes*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy 1.
- Wu, L., Yang, H., Li, Z., Wang, L., & Peng, Q. (2022). Effects of salinity stress on seed germination and growth physiology. *Agronomy*, 12(5), Article 1193.
- Ziane, A., Douaoui, A., Yahiaoui, I., Pulido, M., Larid, M., Gulakhmadov, A., & Chen, X. (2022). Upgrading the salinity index estimation and mapping quality of soil salinity using artificial neural networks in the Lower-Cheliff Plain of Algeria in North Africa. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 48(2), 182–196.
<https://doi.org/10.1080/07038992.2021.2010523>
- Zaib, M., et al. (2023). Water stress in crop plants. *Journal of Environmental & Agricultural Sciences*, 25(1–2), 37–50.
- Zarbakhsh, S., Shahsavari, A. R., Afaghi, A., & Hasanuzzaman, M. (2024). Predicting and optimizing reactive oxygen species metabolism in *Punica granatum*. *BMC Plant Biology*, 24(1), 65.
- Zhou, H., et al. (2023). Insights into plant salt stress signaling and tolerance. *Journal of Genetics and Genomics*, 51.
- Zhou, Y., & Zhang, Q. (2023). Mechanisms of salt tolerance and molecular breeding of salt-tolerant ornamental plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4), 3121.
- Zörb, C., Geilfus, C.-M., & Dietz, K.-M. (2019). Salinity and crop yield. *Plant Biology*, 21, 31–38.

Annexe



Annexe 1 – Courbe d'étalonnage de la proline



Annexe 2 – Courbe d'étalonnage des sucres solubles

**Annexe03 : Matrice de corrélation de Pearson (p=0.05) entre salinité, cultivars, LPA LPR
PFPA, PFPR, PSPA, PSPR, RWC, Chla , Chlb ,Car ,SS, PRO, Na⁺ ,Mg⁺ ,
Ca²⁺,K⁺ .**

	Cultivars	Salinité	LPA	LPR	PFPA	PFPR	PSPA	PSPR	RWC	Chla	Chlb	Car	SS	PRO	Na	Mg	Ca	K
Cultivars	1,00	0,00	0,08	-0,52	0,66	0,56	0,63	0,42	0,14	-0,15	-0,16	0,02	0,25	-0,26	0,08	-0,11	-0,77	0,04
Salinité	0,00	1,00	-0,14	-0,07	-0,24	0,09	-0,12	0,02	-0,34	0,02	-0,08	0,07	-0,23	-0,42	-0,25	0,13	-0,15	0,25
LPA	0,08	-0,14	1,00	0,37	0,37	0,18	0,40	0,27	0,01	0,59	0,35	0,32	0,06	-0,30	0,27	0,00	-0,08	0,04
LPR	-0,52	-0,07	0,37	1,00	0,04	-0,24	-0,04	-0,01	0,19	0,45	0,15	0,15	-0,23	0,08	-0,05	0,17	0,34	0,13
PFPA	0,66	-0,24	0,37	0,04	1,00	0,49	0,89	0,59	0,43	0,28	0,00	0,30	0,21	0,02	0,25	0,06	-0,48	0,13
PFPR	0,56	0,09	0,18	-0,24	0,49	1,00	0,71	0,64	-0,41	0,21	-0,04	0,32	0,42	-0,17	0,10	-0,17	-0,62	0,52
PSPA	0,63	-0,12	0,40	-0,04	0,89	0,71	1,00	0,64	-0,01	0,24	-0,06	0,29	0,29	-0,09	0,22	-0,03	-0,59	0,30
PSPR	0,42	0,02	0,27	-0,01	0,59	0,64	0,64	1,00	0,04	0,27	-0,01	0,33	0,22	-0,11	0,09	-0,11	-0,38	0,39
RWC	0,14	-0,34	0,01	0,19	0,43	-0,41	-0,01	0,04	1,00	0,11	0,19	0,10	-0,12	0,29	0,17	0,23	0,19	-0,32
Chla	-0,15	0,02	0,59	0,45	0,28	0,21	0,24	0,27	0,11	1,00	0,58	0,82	-0,01	0,02	0,31	0,10	0,18	0,27
Chlb	-0,16	-0,08	0,35	0,15	0,00	-0,04	-0,06	-0,01	0,19	0,58	1,00	0,58	0,05	0,03	0,50	0,21	0,19	0,08
Car	0,02	0,07	0,32	0,15	0,30	0,32	0,29	0,33	0,10	0,82	0,58	1,00	0,15	0,07	0,50	0,21	0,00	0,52
SS	0,25	-0,23	0,06	-0,23	0,21	0,42	0,29	0,22	-0,12	-0,01	0,05	0,15	1,00	-0,06	0,32	0,15	-0,32	0,15
PRO	-0,26	-0,42	-0,30	0,08	0,02	-0,17	-0,09	-0,11	0,29	0,02	0,03	0,07	-0,06	1,00	0,29	-0,29	0,39	-0,04
Na	0,08	-0,25	0,27	-0,05	0,25	0,10	0,22	0,09	0,17	0,31	0,50	0,50	0,32	0,29	1,00	0,18	0,05	0,20
Mg	-0,11	0,13	0,00	0,17	0,06	-0,17	-0,03	-0,11	0,23	0,10	0,21	0,21	0,15	-0,29	0,18	1,00	0,18	0,16
Ca	-0,77	-0,15	-0,08	0,34	-0,48	-0,62	-0,59	-0,38	0,19	0,18	0,19	0,00	-0,32	0,39	0,05	0,18	1,00	-0,32
K	0,04	0,25	0,04	0,13	0,13	0,52	0,30	0,39	-0,32	0,27	0,08	0,52	0,15	-0,04	0,20	0,16	-0,32	1,00