

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences agronomiques



Mémoire de Master Académique / Professionnel

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences agronomiques

Spécialité : protection de ressources Sol, Eau et Environnement

THEME

**Effet de la salinité sur la germination des
graines de *Senegalia laeta***

Présenté par :

M^{elle} Aichaoui Hadja Ikram

M^{elle} kherroubi wissame

Soutenu publiquement :

Le 21/06/2025

Devant le jury :

M ^{me} . DERAOUI Naima	Présidente	MCA	UKM Ouargla
M ^{me} . LAMRANI Cherifa	Promotrice	MAA	UKM Ouargla
M ^r MENSOUSS Mohamed	Co-promoteur	MCB	UKM Ouargla
M ^{me} . BENBRAHIM Keltoum	Examinatrice	MCA	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à ma directrice de mémoire, Madame Cherifa Lamrani, qui a été la lumière éclairant mon chemin tout au long de la préparation de ce mémoire. Son soutien constant, ses précieux conseils et sa grande patience ont été une source d'inspiration pour moi afin de réaliser cet accomplissement. Je la remercie du fond du cœur pour le temps et les efforts qu'elle a consacrés à mon égard, et je prie Dieu de la guider et de bénir ses pas.

Je remercie également l'assistant universitaire Monsieur Mensous pour son soutien continu, sa supervision scientifique remarquable et ses conseils avisés.

Je remercie Madame Benbrahim Kalthoum pour sa responsabilité dans la gestion de ce mémoire.

Je remercie aussi Madame Daraoui Naima pour avoir accepté d'examiner ce travail académique.

Je remercie enfin le personnel du CRPC pour leur aide précieuse.

Merci.

Dédicace

C'est avec tout mon amour que je dédie ma réussite à tous ceux qui m'ont accompagné tout au long de ce parcours...

À moi-même, la personne la plus précieuse à mes yeux,

À mes bien-aimés et mes plus grands soutiens dans ce succès,

À ceux qui sont présents dans mon cœur avant tout lieu, je vous adresse tout mon amour et ma gratitude. Que Dieu vous récompense pour chaque lettre apprise, la meilleure récompense pour Ses serviteurs fidèles. (À mon cher père).

À celle qui m'a appris à tenir le stylo et qui n'a cessé de m'encourager avec fierté, amour et joie à chaque réussite,

(Ma chère mère, que Dieu la protège, je lui souhaite une santé et un bien-être durables).

À ma colonne vertébrale, mon refuge et la personne la plus chère à mon cœur, mes sœurs :

Mohamed Al-Kamel Ismail Al-Haj Ibrahim,

Hanan, Ahlam, Ishraq, Maryam, Nour Al-Yaqin.

À mes beaux-frères Sufyan, Khaled, Hicham,

À mes belles-sœurs Hadjar et Wiam,

À mes enfants Lujain, Umm Salama, Rehana, Bashayer, Asia, Bara'a, Abdul Nour, Safwan, Anas.

À ceux que mon cœur se souvient mais que ma plume n'a pas mentionnés, je vous adresse mes plus sincères remerciements et ma profonde reconnaissance pour tout le soutien que vous m'avez apporté.

À mes compagnons de route, ceux qui ont tracé le chemin du succès et l'ont parcouru avec moi avec passion et amour (mes amies)

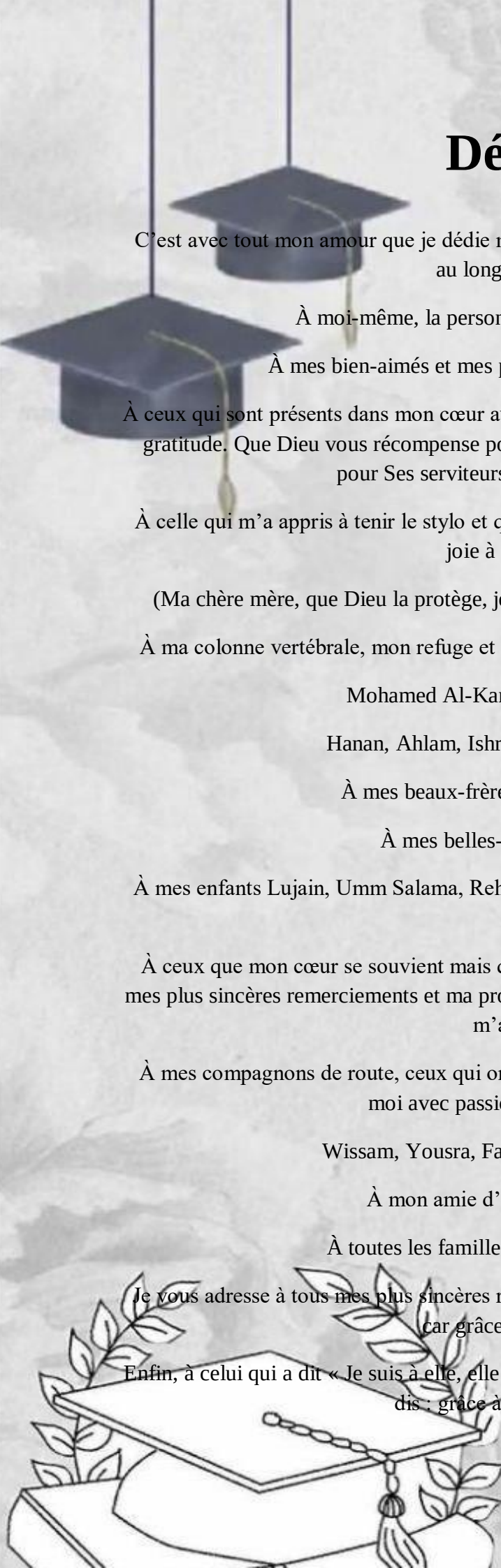
Wissam, Yousra, Fatima, Ibtilhal, Sundus, Amina.

À mon amie d'enfance, Nour Al-Wiam,

À toutes les familles de ma mère et de mon père.

Je vous adresse à tous mes plus sincères remerciements et j'espère que vous serez tous fiers, car grâce à vous, je suis ici.

Enfin, à celui qui a dit « Je suis à elle, elle est à moi, et même si elle refuse, je la prendrai », je dis : grâce à Dieu, je l'ai obtenue.



Dédicace

Celui qui a dit « Je l'ai » l'a accompli.

Le chemin n'était pas court, et il n'était pas censé l'être. Le rêve était loin d'être proche, et la route n'était pas pavée de facilités. Mais je l'ai fait et je l'ai accompli.

Louange à Dieu, avec toute ma gratitude et ma gratitude, car aujourd'hui je vois un rêve tant attendu devenir réalité et je suis fier.

À mon ange pur, ma force après Dieu, mon premier et éternel soutien, « ma mère », je te dédie cet accomplissement, reconnaissant que Dieu t'ait choisi pour moi parmi tous les êtres. Tu es le meilleur soutien et la meilleure compensation.

À celui qui m'a soutenu sans limites et m'a donné sans rien attendre en retour.

« Mon père ». À celui dont il a été dit : « Nous te fortifierons avec ton frère. »

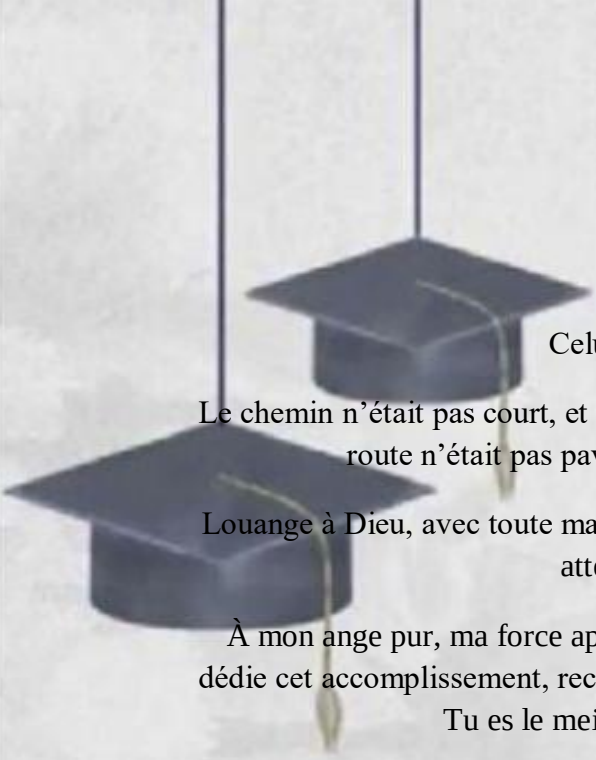
À celui qui m'a tendu la main sans relâche dans mes moments de faiblesse, « mon frère Hamza ». Que Dieu te garde comme un soutien indéfectible pour moi.

À celle qui a cru en mes capacités et en la sécurité de mes jours, « ma sœur Hajar ». À tous mes frères et sœurs : Zuleikha, Abdul Hakim, Halima Al-Sadia, Abdullah, Saif Al-Islam et Mohamed Riad.

À mes amis, dans les bons comme dans les mauvais moments, qui ont toujours été un soutien indéfectible : « Sondos, Amina, Balqis, Itidal et Sarah ».

À mon cousin et à une partie de mon cœur, qui a toujours été et sera toujours cette épaule inébranlable : « Entsar ».

À toute ma famille élargie et à tous ceux qui m'ont aimé et qui ont souhaité me voir ici, merci pour cette réussite, grâce à toi, mon bien-aimé



Résumé

La salinisation des sols et des eaux représente une contrainte abiotique majeure qui menace la productivité agricole et la stabilité des écosystèmes, particulièrement dans les régions arides et semi-arides. L'identification d'espèces locales tolérantes est cruciale pour les programmes de réhabilitation écologique. Ce mémoire s'inscrit dans ce contexte et a pour objectif d'évaluer la réponse de *Senegalia laeta*, une espèce ligneuse sahélienne à haute valeur écologique et socio-économique, au stress salin durant la phase critique de la germination. Pour ce faire, une expérimentation a été menée en laboratoire en conditions contrôlées. Les graines de *S. laeta* ont été soumises à un gradient de salinité croissant, incluant de l'eau filtrée (témoin), deux eaux de forage de salinités différentes (Conductivité Électrique CE = 2,99 et 6,43 dS/m) et trois solutions de NaCl à 5, 10 et 20 g/L dont les CE sont respectivement de (12,15 , 16,29 et 29.92 dS/m,). Les paramètres mesurés comprenaient le pourcentage final de germination (PFG), le temps moyen de germination (TMG), l'indice de taux de germination (ITG), ainsi que la croissance (longueur de la racine et de l'hypocotyle) et la biomasse (poids frais et sec) des plantules. Les résultats révèlent une tolérance remarquable de *S. laeta* à une salinité modérée. Le PFG est resté élevé (70-78 %) jusqu'à une CE de 6,43 dS/m, ne chutant significativement qu'à la CE 12.15 dS/m. Cependant, la vitesse et la vigueur de la germination (TMG et ITG) ont été progressivement réduites avec l'augmentation de la salinité, indiquant un coût physiologique même à des niveaux de stress non létaux. L'analyse de la croissance des plantules a mis en lumière une stratégie d'allocation différentielle des ressources : tandis que la croissance de l'hypocotyle était fortement inhibée par le sel, la longueur de la racine a montré une stimulation (effet hormétique) à salinité modérée, suggérant un investissement préférentiel dans l'exploration du sol. Fait notable, le poids sec final n'a pas montré de différence significative entre les traitements, indiquant une gestion active de la teneur en eau par la plantule. En conclusion, *Senegalia laeta* déploie une stratégie d'adaptation plastique et opportuniste face au stress salin. Elle est capable de maintenir une bonne capacité de germination en conditions modérément salines, tout en ajustant sa morphologie pour maximiser ses chances de survie. Ces résultats confirment son fort potentiel pour la restauration de sites modérément dégradés par la salinité.

Abstract

Soil and water salinization is a major abiotic stress that threatens agricultural productivity and ecosystem stability, particularly in arid and semi-arid regions. Identifying tolerant local species is crucial for ecological restoration programs. This thesis fits within this context and aims to evaluate the response of *Senegalia laeta*, a Sahelian woody species of high ecological and socio-economic value, to salt stress during the critical germination phase. To this end, a laboratory experiment was conducted under controlled conditions. *S. laeta* seeds were subjected to an increasing salinity gradient, including filtered water (control), two borehole waters with different salinities (Electrical Conductivity EC = 2.99 and 6.43 dS/m), and three NaCl solutions at 5, 10, and 20 g/L, with respective ECs of 12.15, 16.29, and 29.92 dS/m. The measured parameters included the final germination percentage (FGP), mean germination time (MGT), germination rate index (GRI), as well as seedling growth (radicle and hypocotyl length) and biomass (fresh and dry weight). The results reveal a remarkable tolerance of *S. laeta* to moderate salinity. The FGP remained high (70-78%) up to an EC of 6.43 dS/m, only dropping significantly at an EC of 12.15 dS/m. However, germination speed and vigor (MGT and GRI) were progressively reduced with increasing salinity, indicating a physiological cost even at non-lethal stress levels. The analysis of seedling growth highlighted a differential resource allocation strategy: while hypocotyl growth was strongly inhibited by salt, radicle length showed stimulation (a hormetic effect) at moderate salinity, suggesting a preferential investment in soil exploration. Notably, the final dry weight showed no significant difference between treatments, indicating active management of water content by the seedling. In conclusion, *Senegalia laeta* deploys a plastic and opportunistic adaptation strategy to salt stress. It is capable of maintaining a high germination capacity under moderately saline conditions while adjusting its morphology to maximize its chances of survival. These findings confirm its strong potential for the restoration of sites moderately degraded by salinity.

يمثل تملح التربة والمياه إجهادًا لأحيانًا رئيسيًا يهدد الإنتاجية الزراعية واستقرار النظم البيئية، خاصة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. ويُعد تحديد الأنواع المحلية المتحملة للملوحة أمرًا بالغ الأهمية لبرامج إعادة التأهيل البيئي. تندرج هذه الدراسة في هذا السياق، وتهدف إلى تقييم استجابة نبات (*Senegalia laeta*) ، وهو نوع خشبي ساحلي ذو قيمة بيئية واجتماعية واقتصادية عالية، للإجهاد الملحي خلال مرحلة الإنبات الحرجة. لتحقيق ذلك، أُجريت تجربة مخبرية في ظروف مضبوطة. تم تعريض بذور نبات *S. laeta* لتدرج متزايد من الملوحة، شمل ماءً مرشحًا (الشاهد)، ومياه بئرين بملوحة مختلفة (الموصلية الكهربائية $EC = 2.99$ و 6.43 ديسيمنز/متر)، وثلاثة محاليل من كلوريد الصوديوم (NaCl) بتركيزات 5 و 10 و 20 جم/لتر، والتي تبلغ موصليتها الكهربائية على التوالي 12.15، و 16.29، و 29.92 ديسيمنز/متر. شملت المؤشرات التي تم قياسها النسبة المئوية النهائية للإنبات (PFG) ، ومتوسط زمن الإنبات (TMG)، ومؤشر سرعة الإنبات (ITG) ، بالإضافة إلى نمو البادرات (طول الجذير والسويقة تحت الفلقية) وكتلتها الحيوية (الوزن الرطب والجاف). تكشف النتائج عن تحمل ملحوظ لنبات *S. laeta* للملوحة المعتدلة. فقد بقيت النسبة المئوية النهائية للإنبات مرتفعة (70-78%) حتى موصلية كهربائية تبلغ 6.43 ديسيمنز/متر، ولم تنخفض بشكل معنوي إلا عند الموصلية 12.15 ديسيمنز/متر. ومع ذلك، انخفضت سرعة وقوة الإنبات (TMG) و ITG تدريجيًا مع زيادة الملوحة، مما يشير إلى وجود تكلفة فسيولوجية حتى في مستويات الإجهاد غير المميتة. وقد أبرز تحليل نمو البادرات استراتيجية للتخصيص التفاضلي للموارد: فبينما تم تثبيط نمو السويقة تحت الفلقية بشدة بفعل الملح، أظهر طول الجذير تحفيزًا (أثر منشط أو Hormesis) عند الملوحة المعتدلة، مما يوحي باستثمار تفضيلي في استكشاف التربة. ومن الجدير بالذكر أن الوزن الجاف النهائي لم يُظهر فرقًا معنويًا بين المعالجات المختلفة، مما يدل على إدارة نشطة للمحتوى المائي من قبل البادرة. في الختام، يتبنى نبات *Senegalia laeta* استراتيجية تكيف مرنة وانتهازية في مواجهة الإجهاد الملحي. فهو قادر على الحفاظ على قدرة إنبات جيدة في الظروف المعتدلة الملوحة، مع تكيف شكله المورفولوجي لزيادة فرصه في البقاء على قيد الحياة إلى أقصى حد. تؤكد هذه النتائج إمكاناته العالية للاستخدام في استصلاح المواقع المتدهورة بشكل معتدل بفعل الملوحة

Table des matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur <i>Senegalia laeta</i>	3
I-1Généralités sur <i>Senegalia laeta</i>	3
I-1-1 Caractéristiques morphologiques.....	4
I-1-2 Distribution et écologie:.....	4
I-1-3 Utilisations:.....	4
I-1-4 Systématique :	4
Chapitre II : Matériel et méthodes	6
II-1 Matériel	6
II-1-1 Origine et récolte des graines.....	6
II-1-2 Choix des eaux et des salinités utilisées dans le travail	6
II-1-3 Matériel de germination	6
II-2.Méthodes :	7
II-2-1 Préparation des graines :.....	7
II-2-2 Mise en place des expériences de germination.....	7
II-2-4 Mesure de la CE et du pH des eaux utilisées.....	8
II-2-5 Paramètres de germination.....	9
II-2-5-2 Temps moyen de germination (TMG):	9
II-2-6 Les paramètres de l'émergence des semis mesurés.....	10
II-3 Analyse statistique des données.....	10
Chapitre III : Résultats et discussion	12
III-1 Salinité et pH des eaux utilisées dans l'étude.....	12
III-1-1 Classification des eaux et des solutions de NaCl selon les normes d'irrigation	12
III-1-2 Impact prévisible sur la germination des graines de <i>Senegalia laeta</i>	13
III-1-3 Effet des différents types d'eau sur les paramètres de germination.....	15
II-1-4 Discussion Générale	27
Conclusion générale.....	29
Références bibliographiques.....	31

Liste des figures

Figure 1: a) Arbuste et b) fruits de <i>senegalia laeta</i>	3
Figure 2: Dispositif expérimental au laboratoire	8
Figure 3 : Mesure de la CE et de pH des eaux utilisées.	9
Figure 4: Effet de la salinité sur le pourcentage final de germination des graines de <i>S. laeta</i>	16
Figure 5: Effet de la salinité sur le Temps moyen de germination des graines de <i>S. laeta</i>	18
Figure 6: Effet de la salinité sur l'Indice de taux de germination des graines de <i>S. laeta</i>	20
Figure 7: Effet de la salinité sur la longueur moyenne de la racicule de <i>S. laeta</i>	22
Figure 8 : Effet de la salinité sur la longueur moyenne de l'hypocotyle de <i>S. laeta</i>	24
Figure 9 : Effet de la salinité sur le Poids moyen frais (g) de <i>S. laeta</i>	25
Figure 10 : Effet de la salinité sur le Poids moyen sec (g) de <i>S. laeta</i>	26

Liste des tableaux

Tableau 1: La conductivité électrique et le pH des eaux utilisées dans l'étude.....	12
Tableau 2: Effet de la salinité sur les paramètres étudiés	15

Introduction

Générale

Introduction Générale

La salinisation des sols et des ressources en eau représente l'une des menaces environnementales les plus graves pour la sécurité alimentaire et la stabilité des écosystèmes, particulièrement dans les régions arides et semi-arides du globe. Ce phénomène, exacerbé par les changements climatiques et les pratiques d'irrigation non durables, se traduit par une accumulation excessive de sels solubles dans la rhizosphère, compromettant la productivité de plus de 20 % des terres irriguées mondiales (Hassani et al., 2021). Le stress salin impose aux végétaux une double contrainte : un stress osmotique, qui réduit la disponibilité de l'eau pour la plante, et un stress ionique, dû à la toxicité d'ions tels que le Na^+ et le Cl^- , qui perturbent les processus métaboliques et nutritionnels (Yang & Guo, 2018).

La germination et l'établissement des plantules constituent les stades les plus critiques et les plus vulnérables du cycle de vie d'une plante. La réussite de ces étapes initiales est une condition sine qua non pour la survie et la régénération des populations végétales. Sous conditions de salinité, la germination est souvent retardée ou complètement inhibée, car l'absorption d'eau par la graine (imbibition) est freinée et l'accumulation d'ions toxiques peut endommager l'embryon (Munns & Tester, 2008). Comprendre les mécanismes de réponse des espèces végétales à la salinité durant cette phase précoce est donc fondamental pour développer des stratégies de restauration écologique et de valorisation des terres dégradées.

Dans ce contexte, l'identification et l'utilisation d'espèces locales tolérantes à la salinité (halophytes ou glycophytes tolérantes) apparaissent comme une solution agro-écologique prometteuse. Ces espèces, adaptées à leur environnement, peuvent jouer un rôle clé dans la réhabilitation des écosystèmes salinisés en stabilisant les sols, en améliorant leur fertilité et en fournissant des ressources précieuses pour les communautés locales.

Parmi les espèces ligneuses des zones arides africaines, *Senegalia laeta* (R.Br. ex Benth.) Kyal. & Boatwr., anciennement *Acacia laeta*, se distingue par sa grande plasticité écologique et sa résilience. Espèce endémique des régions sahélo-sahariennes, elle est reconnue pour sa tolérance à la sécheresse et à une salinité modérée, ainsi que pour ses multiples usages en tant que fourrage de haute qualité, bois d'œuvre, source de gomme et plante médicinale (Tchoundjeu et al., 2010). Ces atouts en font une candidate de choix pour les programmes de reboisement et de restauration des terres arides et salinisées.

Introduction générale

Cependant, bien que la tolérance de *Senegalia laeta* au stade adulte soit reconnue, les connaissances sur sa réponse au stress salin durant la phase critique de germination restent parcellaires. La quantification précise de son seuil de tolérance, l'impact de la salinité sur la vitesse et la vigueur de sa germination, ainsi que sur l'allocation des ressources durant le développement précoce de la plantule, sont des informations cruciales pour prédire son potentiel d'établissement dans des milieux contraignants.

Le présent travail vise ainsi à apporter une contribution à l'étude de l'effet de la salinité sur la germination des graines de *Senegalia laeta*. L'objectif principal est d'évaluer, en conditions contrôlées de laboratoire, la réponse de cette espèce à un gradient de salinité généré par des eaux d'irrigation de différentes qualités et des solutions de NaCl. Nous chercherons plus spécifiquement à :

1. Déterminer le pourcentage et le temps moyen de germination en réponse à différents niveaux de stress salin.
2. Analyser l'impact de la salinité sur la vigueur de la germination et la croissance initiale de la radicule et de l'hypocotyle.
3. Évaluer l'effet du stress sur l'accumulation de biomasse fraîche et sèche des jeunes plantules.

Cette étude permettra de mieux cerner les limites de tolérance et les stratégies d'adaptation de *Senegalia laeta* au stress salin, offrant ainsi des bases scientifiques solides pour son utilisation raisonnée dans les programmes de lutte contre la désertification et de réhabilitation des écosystèmes dégradés par la salinité.

Chapitre I :
Généralités sur
Senegalia laeta

Chapitre I : Généralités sur *Senegalia laeta*

Ce chapitre propose une revue des connaissances sur *Senegalia laeta*, une espèce ligneuse polyvalente et tolérante à la salinité. Nous examinerons en détail sa distribution géographique, sa classification systématique, sa description morphologique, son écologie et ses diverses utilisations. Une attention particulière sera accordée à la sensibilité de ses graines à la germination dans des conditions de salinité élevée, facteur déterminant pour son utilisation dans les programmes de reboisement des zones arides et salinisées.

Cette synthèse vise à fournir une compréhension approfondie des caractéristiques et des potentialités de *Senegalia laeta*, afin de mieux exploiter ses atouts dans les projets de restauration écologique et de développement durable.

I-1 Généralités sur *Senegalia laeta*

Senegalia laeta est une espèce d'arbuste épineux qui appartient à la famille des Fabaceae. Elle est originaire d'Afrique et se trouve dans les régions sèches et arides. Cette plante est connue pour sa capacité à résister à la sécheresse et à la salinité, ce qui la rend idéale pour les projets de reboisement et de restauration écologique dans les zones arides.



Figure 1: a) Arbuste et b) fruits de *senegalia laeta*

I-1-1 Caractéristiques morphologiques

- **Hauteur:** 4-10 mètres
- **Écorce :** grise verdâtre, apparaissant noire à distance ;
- **Feuilles :** Bipennées, avec 2-5 paires de folioles par penne ;
- **Épines :** Paires et pointues, avec deux épines incurvées à chaque nœud ;
- **Fleurs :** Blanches jaunâtres et odorantes, en épis cylindriques. FAO(2006)

I-1-2 Distribution et écologie:

Senegalia laeta se trouve dans les régions arides et semi-arides d'Afrique, notamment dans le Sahara, au Moyen-Orient et en Asie occidentale.

- Elle préfère les sols neutres à alcalins, bien drainés, sableux ou argileux.
- Elle tolère la sécheresse et les températures élevées, et peut survivre dans des régions avec des précipitations annuelles comprises entre 250 et 750 mm. El-Beltagi, H. S., & Mohamed, H. I. (2018).

Cette espèce est également étudiée pour sa capacité à germer et à se développer dans des conditions de salinité élevée, ce qui en fait une candidate prometteuse pour la restauration des écosystèmes dégradés par la salinisation. Dunod, 2018

I-1-3 Utilisations:

- **Fourrage:** les feuilles et les gousses sont utilisées comme fourrage pour les animaux, notamment les chameaux et les chèvres.
- **Bois:** le bois est utilisé pour la construction, la fabrication de poteaux et de clôtures.
- **Médecine traditionnelle :** l'écorce est utilisée pour traiter la diarrhée et la dysenterie, et pour assouplir les peaux avant tannage.
- **Gomme :** l'arbre produit une gomme arabique, bien que de qualité inférieure à celle de l'acacia senegal.
- **Stabilisation des sols :** *Senegalia laeta* peut aider à stabiliser les sols et à prévenir l'érosion.

I-1-4 Systématique :

- **Règne :** Plantae
- **Embranchement :** Magnoliophyta
- **Classe:** Magnoliopsida
- **Ordre :** Fabales

- Famille:** Fabaceae
- **Sous-famille :** Mimosoideae
- **Tribu :** Acacieae
- **Genre :** Senegalia
- Espèce :** S. laeta

Conclusion :

Senegalia laeta est une espèce végétale fascinante qui offre de nombreux avantages écologiques et économiques. Grâce à sa capacité à résister à la sécheresse et à la salinité, elle est idéale pour les régions arides et semi-arides. Ses utilisations multiples, notamment comme fourrage, bois et médecine traditionnelle, en font une ressource précieuse pour les communautés locales. En outre, sa capacité à stabiliser les sols et à prévenir l'érosion contribue à la conservation de l'environnement. En résumé, Senegalia laeta est une espèce remarquable qui mérite d'être étudiée et valorisée davantage.

Chapitre II :
Matériel et
méthodes

Chapitre II : Matériel et méthodes

II-1 Matériel

II-1-1 Origine et récolte des graines

Les graines de *Senegalia laeta* nous ont été fournies par l'I.N.R.F. de Tamanrasset. Selon le personnel de ce dernier, la date de la récolte des graines est le début de l'an 2015.

II-1-2 Choix des eaux et des salinités utilisées dans le travail

L'objectif de cette étude est de comprendre la réaction des graines de *S. laeta* à différents degrés de salinité et d'évaluer leur potentiel de germination. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé six types d'eau avec différents degrés de salinité, soient deux échantillons d'eau de forage (nappe de Mio-Pliocène et de Sénonien) et trois échantillons préparés en utilisant du chlorure de sodium (NaCl) à des concentrations de 5, 10 et 20 g/L, en plus de l'eau distillée comme témoins.

II-1-3 Matériel de germination

Pour réaliser les expériences de germination, nous avons utilisé une gamme de matériels et d'équipements de laboratoire précis, comprenant des boîtes de Pétri stériles, du papier filtre Whatman de haute qualité et un incubateur réglé avec précision pour assurer des conditions standards de température (25 °C). Ces outils nous ont permis de suivre et d'analyser avec précision les phases de germination et d'évaluer l'effet de facteur étudié sur la croissance et le développement des graines.

II-1-3-1 Matériel de suivi et de mesure de germination :

Pour suivre et mesurer la germination, nous avons utilisé divers outils et méthodes. Le suivi de la germination a été effectué d'une fréquence quotidienne, avec un enregistrement manuel du nombre de graines germées. Les données ont été ensuite compilées dans une base de données Excel pour calculer les paramètres de germination. La mesure des longueurs de la radicule et de l'hypocotyle, est réalisée à l'aide d'un papier millimétré. Une balance de précision a été utilisée pour déterminer le poids frais et sec des plantules. Le séchage des

plantules est réalisé dans une étuve à 76°C pendant 48 heures, les plantules ont été roulées dans du papier sulfurisé.

II-2.Méthodes :

II-2-1 Préparation des graines :

II-2-1-1 Tri des graines selon le calibre :

Le tri des graines de *Senegalia laeta* selon leur calibre repose principalement sur la taille des graines, qui mesurent environ 9 à 10 mm de diamètre[1]. Une méthode courante pour trier les graines consiste à utiliser la flottaison : les bonnes graines coulent, tandis que les graines de moindre qualité ou vides flottent[5]. Ce tri permet de sélectionner des graines de calibre homogène et de meilleure qualité pour la semence ou la plantation.

II-2-1-2 Scarification chimique et désinfection des graines

Les graines de *Senegalia laeta* présentent une forte inhibition tégumentaire, ce qui nécessite un traitement spécifique pour favoriser leur germination. Pour cela, nous avons opté pour une scarification chimique à l'aide de l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4 97%) pendant une durée de 20 minutes. (Kheloufi, 2019), Après le traitement, les graines ont été rincées abondamment à l'eau du robinet, puis rincées trois fois avec de l'eau distillée pour éliminer toute trace d'acide. Les graines ont été séchées sur du papier absorbant pour éviter toute accumulation d'humidité excessive. Avant la mise en germination, les graines ont subi une désinfection à l'eau de javel diluée dans de l'eau distillée pendant 3 à 5 minutes pour prévenir toute contamination microbienne. Après rinçage à l'eau distillée, les graines ont été mises à germer selon le protocole établi.

II-2-2 Mise en place des expériences de germination

L'expérimentation s'est déroulée au Centre de Recherches des Analyses Physiques et Chimiques (C.R.A.P.C.° de l'Université Kasdi Merbah Ouargla, durant la période allant du 29 février 2025. Le dispositif expérimental était complètement randomisé avec 5 répétitions, une seule espèce et 5 types d'eau, y compris l'eau distillée. Les tests ont été réalisés dans des boîtes de Pétri tapissées de papier filtre, avec 25 graines placées dans chaque boîte.



Figure 2: Dispositif expérimental au laboratoire

II-2-3 Suivi de la germination

Le suivi a été fait d'une façon quotidienne dans une zone stérile (proche de bec benzène), La germination est déterminée par l'extension de la radicule au-delà de 1 mm (MILLER., 1995; MBAYE et al, 2002). Un apport d'eau est réalisé chaque jour avec, si nécessaire, changement de papier filtre pour éviter la contamination des graines et l'accumulation du sel (Sarr , 2005) .

II-2-4 Mesure de la CE et du pH des eaux utilisées

À l'aide d'un pH-mètre et d'un conductimètre, nous avons procédé à la mesure du pH ainsi que de la conductivité électrique (CE) de l'eau. Avant chaque série de mesures et lors du changement d'échantillons, les instruments ont été soigneusement rincés à l'eau distillée afin d'éviter toute contamination. Ces paramètres ont été enregistrés à deux moments clés : avant le début de l'irrigation et à la fin de celle-ci.



Figure 3 : Mesure de la CE et de pH des eaux utilisées.

II-2-5 Paramètres de germination

II-2-5-1 Pourcentage final de germination (PFG %):

Ce paramètre est calculé par la formule (01) avec pour : n_i est le nombre de graines germées jusqu'au dernier jour de l'essai, et N est le nombre total de graines utilisées dans l'essai (Côme, 1970).

$$\text{PFG (\%)} = (\sum n_i / N) * 100 \dots \dots \dots (01)$$

II-2-5-2 Temps moyen de germination (TMG):

Le temps moyen de germination est calculé selon la formule (02) avec t_i est le nombre de jours à partir de début du test, n_i est le nombre de graines germées enregistré au temps t_i , et $\sum n_i$ est le nombre total de graines germées (Orchard 1977).

$$\text{TMG (jours)} = \sum (t_i \cdot n_i) / \sum n_i \dots \dots \dots (02)$$

II-2-5-3 Indice de Taux de germination (%/jour) :

Selon Kader (2005) l'indice de taux de germination (ITG), aussi appelé indice de vitesse de germination (IVG), est une mesure qui combine **la vitesse** et **le pourcentage final** de germination. Il permet de comparer la vigueur des graines et la performance de germination entre différents traitements ou lots de semences.

Il existe plusieurs formules pour calculer l'ITG. La formule (03) est la plus couramment utilisée .

$$\text{ITG} = \Sigma (\text{Ni} / \text{Ti}) \dots \dots \dots (03)$$

Avec :

- **Ni** représente le nombre de graines germées chaque jour (ou à chaque intervalle de temps).
- **Ti** représente le nombre de jours (ou l'intervalle de temps) depuis le début du test de germination jusqu'à ce jour.

Selon la valeur de l'ITG peut être comme suit :

Un **ITG élevé** indique une germination rapide et uniforme, ce qui est généralement associé à une **vigueur élevée des graines**. Les graines à ITG élevé ont tendance à émerger rapidement et uniformément, ce qui favorise l'établissement d'une culture uniforme ; à mieux concurrencer les mauvaises herbes et à être plus résistantes aux stress environnementaux et aux maladies.

Un **ITG faible** indique une germination lente et/ou irrégulière, ce qui peut être le signe d'une faible vigueur des graines.

II-2-6 Les paramètres de l'émergence des semis mesurés

II-2-6-1 Longueur de radicule et de l'hypocotyle

La longueur de la radicule et de l'hypocotyle sont déterminées le 8^{ème} jour de germination par l'utilisation d'un papier millimétré.

II-2-6-2 Poids frais et sec des plantules :

Le poids frais des plantules déterminé le 8^{ème} jour, à l'aide d'une balance de précision
Le poids sec (g) est déterminé après séchage au four à 80°C pendant 2 jours.

II-3 Analyse statistique des données

Les données des paramètres de germination et de l'émergence des semis obtenus ont été analysées statistiquement par le logiciel XLSTAT 2009. Après vérification de la normalité (Shapiro-Wilk) et de l'homogénéité, nous avons appliqué le test (ANOVA) ou bien le test de (Kruskal-wallis) en fonction du résultat des tests de normalité et d'homogénéité. En cas de différences significatives entre les traitements, un test post-hoc (Fisher avec $p < 0.05$) est appliqué pour la différenciation entre les groupes.

Chapitre III : *Résultats et* *discussion*

Chapitre III : Résultats et discussion

III-1 Salinité et pH des eaux utilisées dans l'étude

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques physico-chimiques fondamentales de trois types d'eaux et de trois solutions salines de NaCl utilisées dans l'étude. Les deux paramètres mesurés, la conductivité électrique (CE) et le potentiel Hydrogène (pH), sont essentiels pour caractériser la qualité de ces eaux en vue de leur utilisation pour l'irrigation et pour anticiper leur effet sur la germination et la croissance des plantes.

Tableau 1: La conductivité électrique et le pH des eaux utilisées dans l'étude.

Nom	CE à 25 °C (dS/m)	pH
E. filtrée	0.2	7
E.S.U.O.	2.99	7.27
E.M.U.O.	6.43	7.16
NaCl 5 g/l	12.15	7.24
NaCl 10 g/l	16.29	7.20
NaCl 20g/l	29.92	7 15

La conductivité électrique (CE), exprimée en déci Siemens par mètre (dS/m), est un indicateur direct de la concentration totale en sels dissous (salinité) d'une solution. Les résultats montrent une gamme de salinité extrêmement large, allant d'une eau très peu minéralisée (Eau filtrée, CE = 0,2 dS/m) à des solutions extrêmement salines (NaCl 20 g/l, CE = 29,92 dS/m). Cette variabilité est au cœur de l'expérimentation, permettant d'évaluer la réponse des graines de *Senegalia laeta* à un gradient de stress salin croissant.

Le pH mesure le caractère acide ou basique des solutions. Toutes les solutions testées présentent un pH très proche de la neutralité (de 7,00 à 7,27). Cette faible variation indique que le facteur de stress principal étudié ici n'est pas lié à l'acidité ou à l'alcalinité, mais bien à la salinité (stress osmotique et ionique).

III-1-1 Classification des eaux et des solutions de NaCl selon les normes d'irrigation

Pour évaluer objectivement l'aptitude de ces eaux à un usage agricole et anticiper leur impact, nous les avons classifiées selon les normes de l'USDA (United States Department of

Agriculture) et de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture), qui sont des références internationales en la matière.

III-1-1-1 Classification de l'Eau filtrée (CE = 0,2 dS/m) :

- **Classe USDA : C1** (Risque de salinité faible). Cette eau peut être utilisée pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la majorité des sols avec peu de risques de développer une salinité.
- **Classe FAO** : Aucune restriction d'usage. C'est une eau d'excellente qualité pour l'irrigation.

III-1-1-2 Classification de l'E.S.U.O. (CE = 2,99 dS/m) :

- **Classe USDA : C4** (Risque de salinité très élevé). Cette eau n'est pas recommandée pour l'irrigation dans des conditions ordinaires. Elle ne peut être utilisée que sur des sols très perméables avec un excellent drainage et pour des cultures très tolérantes à la salinité.
- **Classe FAO** : Restriction d'usage sévère. L'usage de cette eau présente des risques importants de salinisation des sols et de stress pour la plupart des cultures.

III-1-1-3 Classification de l'E.M.U.O. (CE = 6,43 dS/m), et des solution de NaCl :

- **Classe USDA : C5** (Risque de salinité excessif). Toutes ces solutions ont une conductivité supérieure à 5 dS/m. Elles sont considérées comme inutilisables pour l'irrigation dans des conditions normales.
- **Classe FAO** : Restriction d'usage sévère. La FAO place le seuil de restriction sévère à 3 dS/m. Toutes ces solutions dépassent largement ce seuil et sont donc impropres à un usage agricole durable.

III-1-2 Impact prévisible sur la germination des graines de *Senegalia laeta*

La salinité du milieu est un facteur abiotique majeur qui affecte la germination principalement par deux mécanismes : le stress osmotique et la toxicité ionique (Munns & Tester, 2008). Le premier, le stress osmotique, résulte de la diminution du potentiel hydrique de la solution, ce qui limite la capacité de la graine à absorber l'eau nécessaire à l'activation de son métabolisme et à l'émergence de la radicule (Khayat et al., 2014). Le second mécanisme est la toxicité ionique, due à l'accumulation d'ions tels que le Na^+ et le Cl^- , qui peuvent

perturber l'équilibre nutritionnel et inhiber l'activité enzymatique au sein de l'embryon (Hasegawa et al., 2000). En se basant sur la classification précédente et ces mécanismes, l'impact potentiel sur la germination peut être hiérarchisé :

III-1-2-1 Impact prévisible de l'eau filtrée (CE = 0,2 dS/m)

Cette solution devrait servir de témoin optimal. Le stress osmotique et ionique étant inexistant, on s'attend au taux et à la vitesse de germination les plus élevés, reflétant le potentiel germinatif maximal de l'espèce dans des conditions idéales.

III-1-2-2 Impact prévisible de l'E.S.U.O. (CE = 2,99 dS/m)

En raison de sa salinité déjà classée comme très élevée (C4), un stress osmotique significatif est attendu. Le potentiel hydrique de cette solution est bas, ce qui rendra l'imbibition des graines plus difficile. Par conséquent, il est probable d'observer une réduction marquée du taux de germination final ainsi qu'un retard dans le déclenchement de la germination par rapport au témoin. Ce type de réponse est largement documenté pour les espèces de zones arides, y compris pour le genre *Acacia/Senegalia* (Ben-Salah & Ghrabi, 2012).

III-1-2-3 Impact prévisible de l'E.M.U.O. et des solutions de NaCl (CE > 6 dS/m)

Pour ces solutions, le stress osmotique sera sévère à extrême. Il est hautement probable que le potentiel hydrique de ces milieux soit inférieur au potentiel requis par les graines de *Senegalia laeta* pour germer.

Pour l'E.M.U.O. (CE = 6,43 dS/m), la germination sera probablement très faible, voire nulle.

Pour les solutions de NaCl, en plus du stress osmotique extrême, la toxicité spécifique des ions Na^+ et Cl^- deviendra un facteur inhibiteur majeur. À ces concentrations, il est très probable que la germination soit complètement inhibée, car les seuils de tolérance physiologique de l'espèce sont dépassés (Munns & Tester, 2008). Ces traitements permettront de déterminer le seuil de tolérance de *Senegalia laeta* à la salinité, qui, même pour une espèce adaptée aux zones arides, sera certainement dépassé.

En conclusion, l'expérience est conçue pour exposer les graines à un gradient de stress salin permettant de quantifier la réponse de l'espèce, depuis des conditions optimales (Eau filtrée) jusqu'à des conditions létales (solutions de haute salinité).

III-1-3 Effet des différents types d'eau sur les paramètres de germination

Le tableau 4 suivant donne les moyennes et les écarts types des différents paramètres mesurés. Chaque valeur constitue la moyenne de cinq répétitions.

Tableau 2: Effet de la salinité sur les paramètres étudiés

Espèce	Traitements	PFG (%)	TMG (J)	ITG (%/Jour)	Lmr (cm)	Lmh (cm)	Pmf (g)	Pms (g)
<i>Senegalia laeta</i>	E. Filtrée	70 ±11.2	1.30±0.2	61±12.1	2.10±0.5	1.97±0.4	1.87±0.2	0.3±0.0
	E.S.U.O.	70±6.1	2.30±0.4	41± 4.	2.08±0.8	1.15±0.2	2.06± 0.2	0.31± 0.0
	E.M.U.O.	78±13.5	2.40±0.1	38±8.38	2.51±0.6	1.03±0.2	2.31± 0.2	0.31± 0.0
	NaCl 5g/l	53± 7.6	3.79±1.0	19±3.5	1.03±0.1	0.90±0.2	1.61±0.3	0.30±0.1

Le tableau précédent montre l'impact d'une salinité croissante (de l'eau filtrée, considérée comme contrôle, jusqu'à une solution de NaCl à 5g/l) sur la germination et la croissance précoce de l'espèce *Senegalia laeta*. L'analyse des résultats obtenus pour les différents paramètres montre que L'augmentation de la salinité a un effet globalement négatif et inhibiteur sur la germination et le développement des plantules de *Senegalia laeta*.

Il y'a lieu de signaler qu'on a pas enregistré de la germination dans les solutions NaCl 10 g/l et 20 g/l. De ce fait, et dans la suite du travail les interprétations et les conclusions seront axées sur les trois salinités dans lesquelles un certain pourcentage de germination est enregistré.

III-1-3-1 Effet des différents types d'eau sur le PFG (%)

La figure 4 suivante présente le pourcentage final de germination (PFG) des graines de *Senegalia laeta* soumises à quatre traitements différents, caractérisés par des conductivités électriques (CE) croissantes comme indiqué dans le tableau 1 : Eau Filtrée (CE = 0,2 dS/m), E.S.U.O. (CE = 2,99 dS/m), E.M.U.O. (CE = 6,43 dS/m) et une solution de NaCl à 5 g/l (CE = 12,15 dS/m).

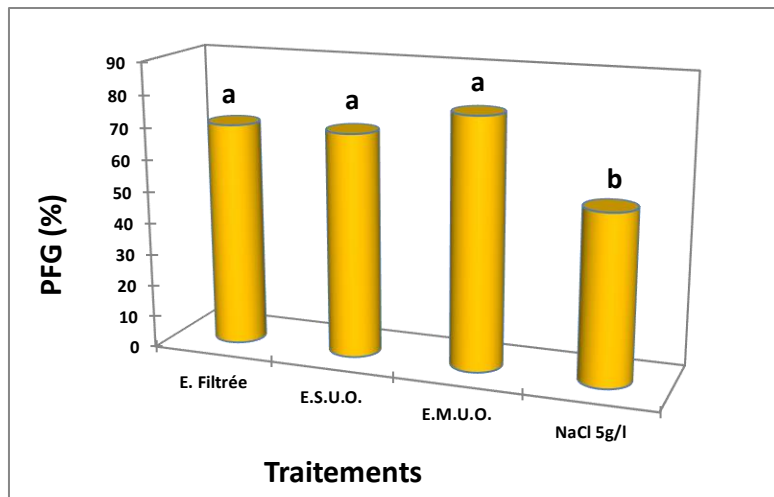


Figure 4: Effet de la salinité sur le pourcentage final de germination des graines de *S. laeta*.

III-1-3-1-1 Analyse des Résultats de Germination de *Senegalia laeta*

L'analyse des données révèle d'une part une haute tolérance à une salinité modérée : Les graines de *S. laeta* montrent un pourcentage final de germination élevé et statistiquement similaire pour les trois premiers traitements. Le PFG est d'environ 75% pour l'eau filtrée (traitement témoin), 72% pour l'E.S.U.O. et 78% pour l'E.M.U.O. L'analyse statistique (test de Fisher LSD, $p < 0,05$) confirme qu'il n'y a pas de différence significative entre ces trois groupes, tous marqués par la lettre "a". Cela indique que *S. laeta* tolère bien des niveaux de salinité allant jusqu'à une conductivité électrique de 6,43 dS/m sans impact négatif significatif sur sa capacité de germination finale. D'autre part une inhibition par une forte salinité : Le traitement avec la solution de NaCl à 5 g/l (CE = 12,15 dS/m) a provoqué une chute drastique et statistiquement significative du PFG, qui tombe à environ 45%. Ce traitement est marqué par la lettre "b", ce qui le distingue significativement des trois autres.

En résumé, les résultats expérimentaux montrent que les graines de *Senegalia laeta* possèdent une bonne tolérance à la salinité jusqu'à un certain seuil. Au-delà de ce seuil (ici, entre 6,43 dS/m et 12,15 dS/m), la salinité devient un facteur limitant majeur, inhibant fortement la germination.

III-1-3-1-2 Discussion des résultats de germination de *Senegalia laeta*

La salinité des sols et des eaux est l'un des stress abiotiques les plus importants qui limitent la productivité végétale et la régénération naturelle des écosystèmes, en particulier dans les régions arides et semi-arides (Kheloufi, 2019). L'effet inhibiteur de la salinité sur la germination des graines est un phénomène bien documenté qui résulte de deux contraintes

principales : le stress osmotique et la toxicité ionique (Munns & Tester, 2008 ; Kheloufi, 2019).

Tolérance à la salinité modérée : La capacité des graines de *Senegalia laeta* à maintenir un taux de germination élevé (plus de 70%) jusqu'à une CE de 6,43 dS/m est un indicateur de sa bonne adaptation aux environnements modérément salins. Cette tolérance suggère que l'espèce a développé des mécanismes efficaces pour gérer le stress salin à ces niveaux. Les plantes adaptées à de tels environnements, comme de nombreuses espèces du genre *Acacia* (ou *Senegalia*), peuvent :

- Ajuster leur potentiel osmotique : En accumulant des solutés organiques (comme la proline ou les sucres) pour maintenir un gradient de potentiel hydrique favorable à l'absorption d'eau, même lorsque le potentiel hydrique externe est bas (Hajiboland et al., 2014).
- Exclure ou compartimenter les ions toxiques : En limitant l'entrée des ions Na^+ et Cl^- dans l'embryon ou en les séquestrant dans les vacuoles des cellules pour éviter qu'ils n'atteignent des concentrations toxiques dans le cytoplasme (Sarr, 2017 ; Wu et al., 2015).

La performance de *S. laeta* est cohérente avec les observations faites sur d'autres acacias robustes. Par exemple, Kheloufi (2019) a montré que *Acacia karroo* est extrêmement tolérante, avec une germination élevée même à des concentrations élevées de NaCl. Bien que *S. laeta* semble moins tolérante que *A. karroo*, sa performance jusqu'à 6,43 dS/m la classe comme une espèce prometteuse pour la réhabilitation de sites modérément dégradés par la salinité.

Dépassement du seuil de tolérance : La forte réduction du PFG (de ~78% à 45%) observée avec la solution de NaCl 5 g/l (CE = 12,15 dS/m) indique que le seuil de tolérance de l'espèce est dépassé. À cette concentration, les effets combinés du stress osmotique et de la toxicité ionique deviennent préjudiciables : Le stress osmotique intense empêche une imbibition suffisante, un processus essentiel pour activer le métabolisme de la graine et initier la germination (Kheloufi, 2019). La toxicité ionique due à l'accumulation de Na^+ et de Cl^- perturbe l'équilibre ionique, inhibe l'activité enzymatique et peut causer des dommages cellulaires directs à l'embryon, menant à l'échec de la germination (Jaleel et al., 2007). Ce type de réponse dose-dépendante est typique des espèces végétales. Chaque espèce possède un seuil de tolérance génétiquement déterminé. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus sur *Senegalia senegal*, où une forte salinité a également montré un effet négatif sur la croissance et la biomasse des plantules (Sarr, 2017).

III-1-3-2 Effet des différents types d'eau sur le TMG (jours)

La figure 5 suivante illustre le temps moyen de germination (TMG) en jours pour les graines de *Senegalia laeta* sous les mêmes quatre conditions de salinité croissante. Le TMG est un indicateur de la **vitesse de germination** ; une valeur plus faible signifie une germination plus rapide

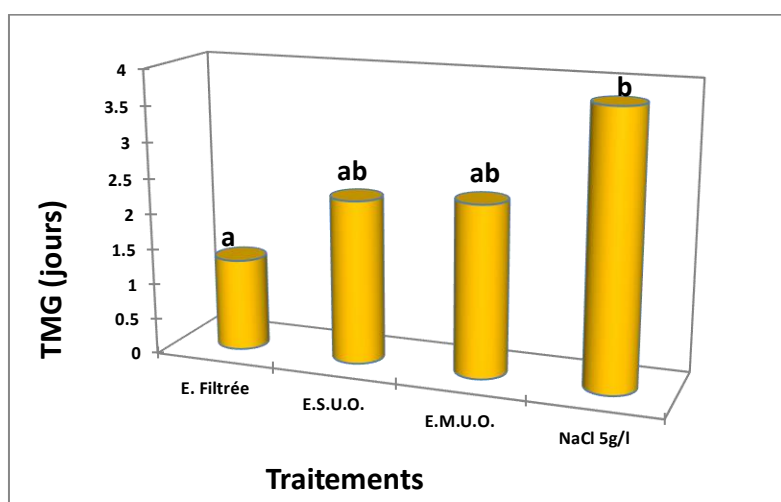


Figure 5: Effet de la salinité sur le Temps moyen de germination des graines de *S. laeta*.

III-1-3-2-1 Analyse des Résultats sur le (TMG) de *Senegalia laeta*

On observe une tendance claire à l'augmentation du TMG avec l'augmentation de la salinité. La germination est la plus rapide dans le traitement témoin (Eau Filtrée) avec un TMG d'environ 1,4 jour. Les traitements E.S.U.O. et E.M.U.O. montrent un TMG intermédiaire d'environ 2,3 jours. L'analyse statistique (lettre "ab") indique que ce retard n'est pas statistiquement différent du témoin (lettre "a"), ni du traitement à forte salinité (lettre "b"). Cela signifie que bien qu'un retard soit observé, il n'est pas suffisamment prononcé pour être considéré comme statistiquement significatif par rapport aux extrêmes dans cette analyse. Le traitement avec NaCl à 5 g/l provoque un retard très important et statistiquement significatif. Le TMG atteint environ 3,6 jours, ce qui est significativement plus long que pour le témoin (groupe "b" vs "a").

En résumé, la salinité a un effet négatif sur la vitesse de germination de *Senegalia laeta*. Cet effet est progressif et devient très marqué à des concentrations de sel élevées.

III-1-3-2-2 Discussion des Résultats sur le (TMG) de *Senegalia laeta*

Ces résultats, combinés à ceux du pourcentage final de germination (PFG), permettent d'affiner notre compréhension des effets de la salinité. Alors que le PFG indique si les graines peuvent germer, le TMG révèle à quelle vitesse elles le font.

Le principal mécanisme expliquant l'augmentation du TMG sous stress salin est le stress osmotique. Une concentration élevée de sel dans le milieu externe abaisse son potentiel hydrique. Pour que l'imbibition (la première étape de la germination) ait lieu, la graine doit générer un potentiel hydrique interne encore plus bas pour attirer l'eau. Plus la salinité externe est élevée, plus ce gradient est difficile à établir, ce qui ralentit l'absorption d'eau et, par conséquent, retarde l'ensemble du processus de germination (Kheloufi, 2019 ; Bayuelo-Jiménez et al., 2002). Ce retard peut également être attribué à un ralentissement des processus métaboliques (comme la mobilisation des réserves) induit par le stress. La comparaison des deux graphiques est très instructive : À salinité faible et modérée (E.S.U.O. et E.M.U.O.) : Le pourcentage final de germination (PFG) n'est pas affecté de manière significative, mais le temps moyen de germination (TMG) est allongé. Cela suggère que les graines de *S. laeta* peuvent tolérer ces niveaux de salinité et finir par germer en grand nombre, mais le processus est ralenti. Les mécanismes d'adaptation qui leur permettent de surmonter le stress osmotique et la potentielle toxicité ionique demandent du temps, ce qui explique ce retard. À forte salinité (NaCl 5 g/l) : La salinité a un double impact négatif. Non seulement elle inhibe la germination d'une partie importante des graines (chute du PFG de ~78% à 45%), mais elle retarde aussi considérablement la germination de celles qui réussissent à germer (augmentation du TMG de ~1,4 à ~3,6 jours).

La vitesse de germination est un facteur écologique crucial, en particulier dans les écosystèmes arides et semi-arides. Un retard dans la germination peut avoir des conséquences négatives sur la survie des plantules. Dans les zones arides, les conditions favorables à la germination (humidité du sol après une pluie) sont souvent de courte durée. Des graines qui germent lentement risquent de voir les couches superficielles du sol s'assécher avant que leurs racines ne puissent atteindre des zones plus humides en profondeur, entraînant la mort de la plantule (Poorter & Markesteijn, 2008). Également, une émergence tardive expose les plantules à une compétition accrue avec d'autres espèces qui ont germé plus rapidement pour l'accès à la lumière, à l'eau et aux nutriments.

Ces résultats confirment que même si *S. laeta* peut être considérée comme tolérante à une salinité modérée en termes de capacité de germination finale, cette tolérance a un coût physiologique, qui se manifeste par un retard dans la vitesse de germination.

III-1-3-3 Effet des différents types d'eau sur l'ITG (%/jour)

Le graphique de la figure 6 suivante présente l'Indice de Taux de Germination (ITG en %/jour) des graines de *Senegalia laeta*. L'ITG est un indice composite qui intègre à la fois le pourcentage final de germination et sa vitesse. Une valeur élevée indique une germination vigoureuse : un grand nombre de graines germent rapidement.

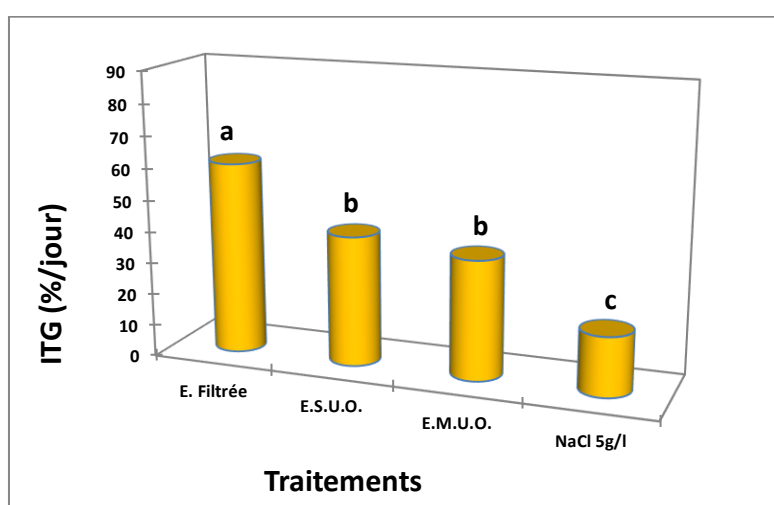


Figure 6: Effet de la salinité sur l'Indice de taux de germination des graines de *S. laeta*.

III-1-3-3-1 Analyse des résultats de l'ITG des graines *Senegalia laeta*

Le graphique montre une diminution très nette et progressive de l'ITG avec l'augmentation de la salinité. La vigueur de germination la plus élevée est observée dans le traitement témoin (Eau Filtrée), avec une valeur d'environ 63 %/jour. L'analyse statistique (test de Fisher LSD, $p < 0,05$) révèle trois groupes clairement distincts :

- **Groupe "a" (Témoin) :** L'eau filtrée présente la vigueur la plus élevée.
- **Groupe "b" (Salinité faible à modérée) :** Les traitements E.S.U.O. (ITG $\approx$ 40 %/jour) et E.M.U.O. (ITG $\approx$ 35 %/jour) forment un groupe homogène. Leur vigueur de germination est significativement plus faible que celle du témoin.

- **Groupe "c" (Forte salinité) :** Le traitement NaCl 5 g/l montre une vigueur de germination très faible (ITG $\approx$ 10 %/jour), significativement inférieure à tous les autres traitements.

En résumé, on peut avancer que la salinité réduit de manière significative la vigueur de la germination de *Senegalia laeta*. Cet effet est dose-dépendant, avec une chute marquée dès les faibles niveaux de salinité, qui devient drastique à forte salinité.

III-1-3-3-2 Analyse des résultats de l'ITG des graines de *S. laeta*

L'analyse de l'ITG, en conjonction avec le PFG et le TMG, offre une vision intégrée et plus fine de la réponse de *Senegalia laeta* au stress salin. L'ITG, ou Indice de Vigueur de Germination, est souvent considéré comme un meilleur prédicteur de l'établissement des plantules en conditions de terrain que le PFG seul, car il tient compte du facteur temps, qui est critique dans les environnements contraignants (Maguire, 1962).

La comparaison des trois graphiques est très révélatrice. Alors que le PFG (Figure 4) ne montrait pas de différence significative entre le témoin, l'E.S.U.O. et l'E.M.U.O., l'ITG (Figure 3) montre une différence très significative. Cela démontre que l'ITG est un indicateur beaucoup plus sensible au stress salin. Il révèle que même si les graines finissent par germer en nombre similaire à des salinités modérées (PFG élevé), la qualité et la vigueur de cette germination sont compromises. Le stress osmotique et la potentielle toxicité ionique, même à faible dose, forcent la graine à dépenser plus de temps et d'énergie pour germer, ce qui se traduit par une vigueur réduite (Kheloufi, 2017).

III-1-3-4 Effet des différents types d'eau sur la Lmr (cm)

Le graphique de la figure 7 suivante montre la longueur moyenne de la racine (Lmr en cm) des plantules de *Senegalia laeta* sous les quatre conditions de salinité. Ce paramètre est un indicateur de la vigueur et de la croissance initiale du semis.

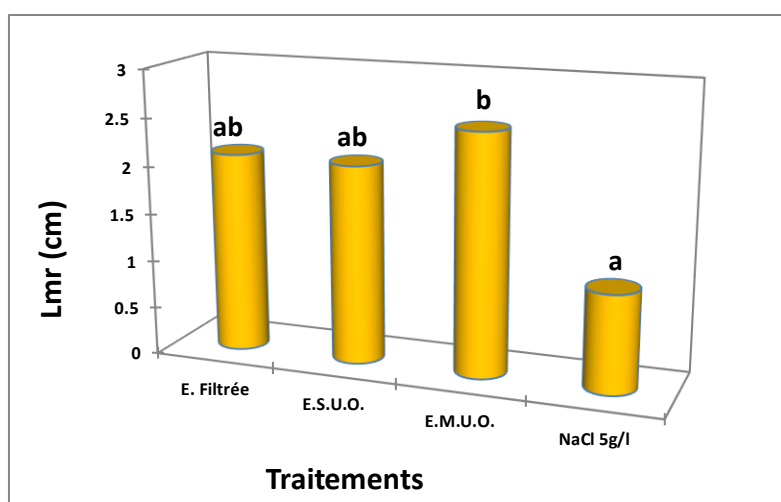


Figure 7: Effet de la salinité sur la longueur moyenne de la racine de *S. laeta*.

III-1-3-4-1 Analyse des Résultats sur la Lmr de *S. laeta*

Contrairement à la vitesse (TMG) et à la vigueur (ITG) de la germination, la réponse de la longueur de la racine n'est pas une simple diminution avec l'augmentation de la salinité. Pour l'E. Filtrée (Témoin) la longueur moyenne est d'environ 2,1 cm (groupe "ab"). L'E.S.U.O. (Salinité faible) la longueur est similaire à celle du témoin, environ 2,0 cm (groupe "ab"). L'E.M.U.O. (Salinité modérée) : On observe la plus grande longueur de racine, atteignant environ 2,4 cm. Ce groupe ("b") est statistiquement distinct du groupe à forte salinité ("a"). pour la solution de NaCl 5 g/l (Forte salinité) : La croissance de la racine est très sévèrement inhibée, avec une longueur moyenne de seulement 0,7 cm. Ce groupe ("a") est statistiquement distinct du groupe à salinité modérée ("b").

Le point le plus marquant est que la croissance de la racine est potentiellement stimulée à une salinité modérée (E.M.U.O.), avant de chuter à une forte salinité.

III-1-3-4-2 Discussion des Résultats sur la Lmr de *S. laeta*

L'élargissement de la racine est la première étape critique de l'établissement de la plantule. Sa sensibilité au stress salin est un facteur déterminant pour la survie (Kheloufi, 2019).

La réduction drastique de la longueur de la racine sous une forte concentration de NaCl (5 g/l) est une réponse classique au stress salin. Elle s'explique par : La toxicité ionique directe sur les cellules en division et en élongation de l'apex racinaire. Le stress osmotique qui limite la turgescence cellulaire, un processus essentiel pour la croissance par élongation. La

plante doit dépenser une énergie considérable pour absorber l'eau, au détriment de la croissance (Munns & Tester, 2008). Les déséquilibres nutritionnels où un excès de Na^+ peut interférer avec l'absorption de nutriments essentiels comme le K^+ et le Ca^{2+} , qui sont vitaux pour la croissance cellulaire (Sarr, 2017).

Le résultat le plus intéressant et complexe est l'augmentation de la longueur de la racine sous la salinité modérée du traitement E.M.U.O. Ce phénomène, où un agent stressant à faible dose a un effet bénéfique, est connu sous le nom d'hormèse. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cet effet : Un niveau de stress modéré peut agir comme un signal, déclenchant des mécanismes d'adaptation. La plante pourrait investir préférentiellement ses ressources dans l'élongation racinaire pour "explorer" le sol à la recherche de zones moins salines et de sources d'eau plus fiables. C'est une stratégie de survie proactive (Farooq et al., 2015). La plante peut avoir synthétisé des osmoprotecteurs (comme la proline) qui, en plus d'aider à maintenir la turgescence, peuvent aussi agir comme des protecteurs cellulaires, favorisant ainsi la croissance dans des conditions de stress modéré.

En combinant les quatre graphiques, nous pouvons dresser un portrait complet de la stratégie d'adaptation de *Senegalia laeta* :

- Face à un stress salin modéré, la graine retarde sa germination (TMG augmente, ITG diminue) pour, potentiellement, accumuler des défenses.
- Une fois la germination initiée, la plantule pourrait compenser ce retard par une croissance racinaire initiale plus rapide et plus vigoureuse (Lmr augmente), une stratégie visant à maximiser ses chances de survie en s'ancrant rapidement et en explorant un plus grand volume de sol.
- Lorsque le stress devient trop sévère (forte salinité), les mécanismes d'adaptation sont dépassés, conduisant à la fois à un échec de la germination (PFG faible) et à une inhibition de la croissance de celles qui germent (TMG élevé, Lmr faible).

III-1-3-5 Effet des différents types d'eau sur la Lmh (cm)

La figure 8 présente la longueur moyenne de l'hypocotyle (Lmh en cm), qui correspond à la partie de la tige située sous les cotylédons. Ce paramètre est un indicateur clé de la croissance initiale de la partie aérienne de la plantule.

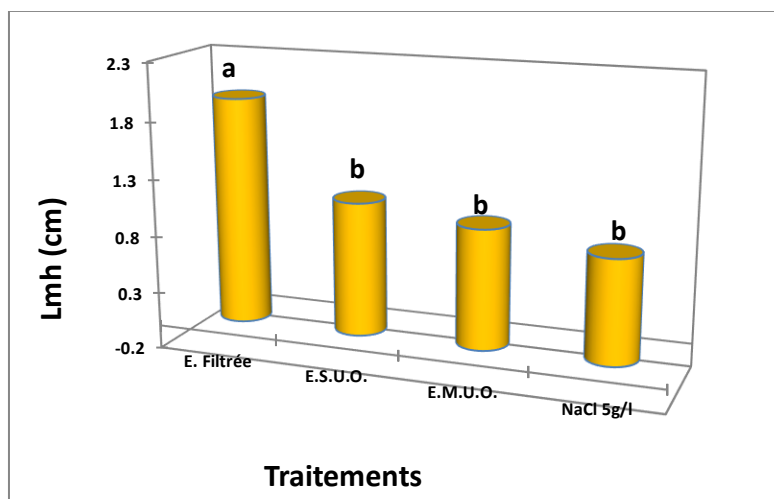


Figure 8 : Effet de la salinité sur la longueur moyenne de l'hypocotyle de *S. laeta*.

III-1-3-5-1 Analyse des Résultats sur la Lmh de *Senegalia laeta*

Le graphique précédent montre que la croissance de l'hypocotyle est extrêmement sensible à la présence de sel. L'élongation la plus importante est observée dans le traitement témoin (Eau Filtrée), avec une longueur d'environ 2,0 cm. Dès l'application du premier niveau de salinité (E.S.U.O.), on observe une chute drastique de la longueur de l'hypocotyle, qui tombe à environ 1,1 cm. Cette diminution se poursuit avec l'augmentation de la salinité (E.M.U.O. $\approx$ 0,8 cm ; NaCl 5 g/l $\approx$ 0,6 cm). L'analyse statistique (test de Fisher LSD, $p < 0,05$) confirme cette forte sensibilité.

- Groupe "a" : Le traitement témoin (Eau Filtrée) est seul dans ce groupe, indiquant que sa croissance est significativement supérieure à tous les traitements salins.
- Groupe "b" : De manière remarquable, les trois traitements salins (E.S.U.O., E.M.U.O. et NaCl 5 g/l) sont regroupés. Cela signifie que si la présence de sel inhibe fortement la croissance de l'hypocotyle par rapport au témoin, l'augmentation de la concentration de sel de 2,99 dS/m à 12,15 dS/m n'entraîne pas de réduction *statistiquement significative supplémentaire* sur ce paramètre.

En résumé, la croissance de la partie aérienne initiale de la plantule (*i.e.*, l'hypocotyle) est le paramètre le plus sensible au stress salin parmi ceux étudiés, montrant une forte inhibition dès les plus faibles concentrations de sel.

III-1-3-6 Effet des différents types d'eau sur la Lmh (cm)

La figure 9 suivante représente le poids moyen frais (Pmf en g) des plantules de *Senegalia laeta* sous les quatre régimes de salinité. Le poids frais est un excellent indicateur de la biomasse totale accumulée et de la croissance globale de la plantule.

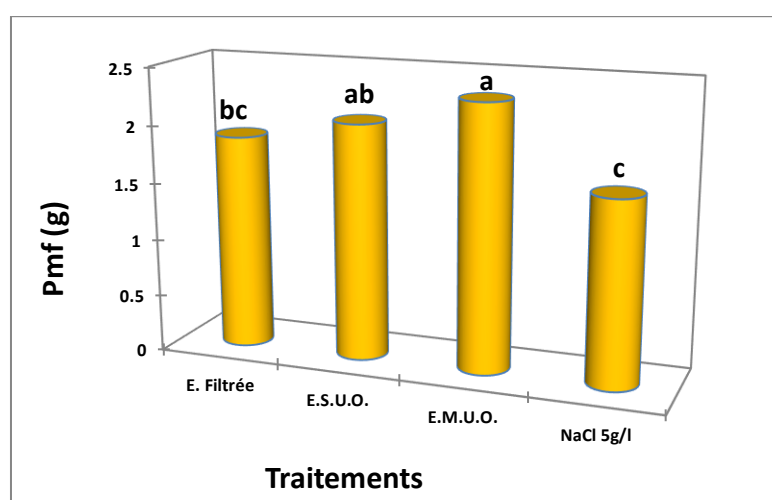


Figure 9 : Effet de la salinité sur le Poids moyen frais (g) de *S. laeta*.

III-1-3-6-1 Analyse des Résultats sur le Poids Moyen Frais (Pmf) de *Senegalia laeta*

L'observation la plus marquante est que la biomasse la plus élevée n'est pas obtenue dans le traitement témoin, mais dans le traitement à salinité modérée (E.M.U.O.), avec un Pmf d'environ 2,2 g. Le traitement **E.M.U.O.** (lettre "a") a produit une biomasse significativement plus élevée que le témoin (lettre "bc") et la forte salinité (lettre "c"). Tandis que le traitement **NaCl 5 g/l** (lettre "c") a produit une biomasse significativement plus faible que tous les autres traitements, à l'exception du témoin ("bc") avec lequel il partage une lettre commune. Les traitements **Eau Filtrée** ("bc") et **E.S.U.O.** ("ab") sont dans des positions intermédiaires, n'étant pas statistiquement différents l'un de l'autre dans cette analyse.

En résumé, non seulement la salinité modérée n'inhibe pas la croissance globale, mais elle semble la stimuler, menant à une accumulation de biomasse supérieure à celle du témoin. La forte salinité, en revanche, inhibe sévèrement la croissance.

III-1-3-7 Effet des différents types d'eau sur le Poids moyen Sec (g)

La figure 10 suivante présente le poids moyen sec (Pms en g) des plantules de *Senegalia laeta*. Le Pms représente la biomasse réelle accumulée par la plante, après élimination de l'eau. C'est l'indicateur le plus fiable de la croissance nette et de l'assimilation de carbone.

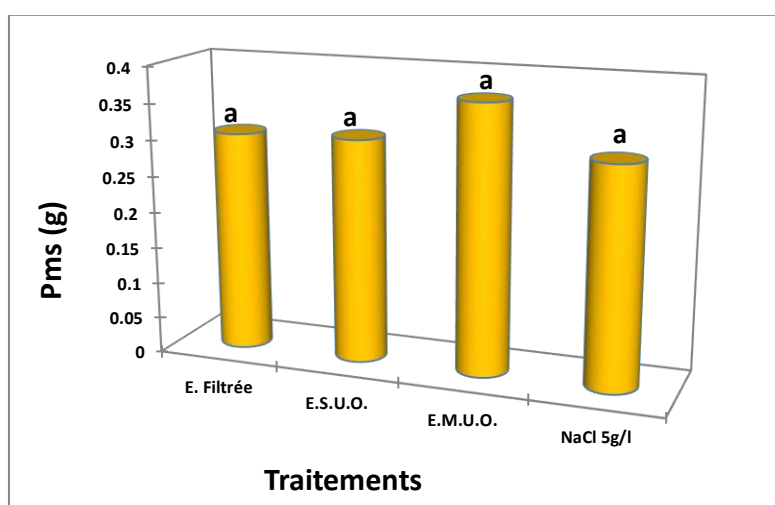


Figure 10 : Effet de la salinité sur le Poids moyen sec (g) de *S. laeta*

III-1-3-7-1 Analyse des Résultats sur le Poids Moyen Sec (Pms) de *Senegalia laeta*

L'observation la plus importante est que, statistiquement, il n'y a aucune différence significative entre les quatre traitements. Toutes les barres sont marquées de la même lettre ("a"), indiquant que, malgré les variations visuelles (E.M.U.O. semble légèrement plus élevé et NaCl 5g/l légèrement plus bas), ces différences ne sont pas statistiquement significatives au seuil de $p < 0,05$.

On observe une légère tendance qui reflète celle du poids frais : la biomasse sèche est la plus élevée sous salinité modérée (E.M.U.O., ~0,35 g) et la plus faible sous forte salinité (NaCl 5 g/l, ~0,27 g). Cependant, la variance au sein des groupes est telle que cette tendance n'est pas statistiquement validée.

On peut dire que les différents niveaux de salinité, allant de l'eau pure à une forte concentration de sel, n'ont pas eu d'impact statistiquement significatif sur la quantité de matière sèche produite par les plantules de *Senegalia laeta* durant la période de l'expérience.

II-1-4 Discussion Générale

L'analyse de l'ensemble des résultats révèle que *Senegalia laeta* emploie une stratégie d'adaptation au stress salin complexe et hautement plastique, plutôt qu'une simple tolérance linéaire. Les résultats démontrent une dissociation claire entre les phases de germination et de croissance précoce de la plantule, une réponse en deux phases souvent observée chez les plantes soumises au stress salin (Munns & Tester, 2008).

Au stade de la germination, la présence de sel, même à faible dose, induit une réponse prudente. La vitesse et la vigueur (Indice de Taux de Germination) sont significativement réduites, ce qui est une conséquence directe du stress osmotique qui retarde l'imbibition de la graine. Cependant, le taux de germination final reste élevé en conditions de salinité modérée, ce qui indique que l'espèce possède les mécanismes intrinsèques pour mener à terme le processus, bien que plus lentement (Kheloufi, 2019).

La phase post-germinative révèle le cœur de cette stratégie adaptative : une allocation différentielle massive des ressources pour prioriser la survie. Face à un stress modéré, la plante inhibe la croissance de sa partie aérienne initiale (l'hypocotyle) pour limiter les pertes en eau par transpiration. Simultanément, elle surinvestit dans son système racinaire, dont la croissance est même stimulée (effet hormétique), lui permettant d'explorer le sol de manière agressive. Cette augmentation du ratio racine/tige est une stratégie adaptative fondamentale pour faire face au stress hydrique et salin (Sarr, 2017 ; Farooq et al., 2015).

L'analyse de la biomasse apporte l'éclairage final. Le poids sec (Pms) reste remarquablement stable à travers les traitements, indiquant une résilience métabolique surprenante. Les variations significatives du poids frais (Pmf) ne sont donc pas dues à une différence de croissance réelle, mais à une gestion active de la teneur en eau. La plante utilise l'ajustement osmotique, en augmentant sa rétention d'eau pour diluer les sels internes, une forme de succulence induite par le stress qui est un mécanisme de tolérance clé chez les espèces adaptées aux milieux salins (Flowers & Colmer, 2015). Cependant, cette stratégie sophistiquée atteint ses limites sous une forte salinité (NaCl 5 g/l), où la toxicité ionique et le stress osmotique dépassent les capacités de régulation de la plante, inhibant alors tous les

processus vitaux. En conclusion, *Senegalia laeta* est un colonisateur opportuniste, dont la plasticité phénotypique le rend particulièrement apte à la réhabilitation de sites modérément salins (Kheloufi, 2019).

Conclusion générale

Ce travail, centré sur la contribution à l'étude de la germination des graines de *Senegalia laeta* en conditions de salinité, a permis de mettre en lumière les stratégies d'adaptation complexes de cette espèce saharienne face à un stress abiotique majeur. Loin de présenter une simple réponse linéaire à l'augmentation de la concentration en sel, *S. laeta* déploie une remarquable plasticité phénotypique qui distingue clairement les phases de germination et de croissance précoce de la plantule.

Les résultats confirment tout d'abord la haute tolérance de l'espèce au stade de la germination. Le pourcentage final de germination (PFG) demeure élevé et statistiquement stable jusqu'à une salinité modérée (CE de 6,43 dS/m), attestant de la capacité intrinsèque des graines à accomplir leur cycle germinatif. Cependant, cette tolérance a un coût physiologique notable : la salinité induit une réponse de "prudence". La vitesse de germination, mesurée par le temps moyen de germination (TMG) et l'indice de taux de germination (ITG), est significativement ralentie. Ce retard stratégique suggère un mécanisme de gestion du risque, permettant à la graine de ne s'engager pleinement que lorsque les conditions, bien que stressantes, ne sont pas létales.

La phase post-germinative révèle la facette la plus fascinante de sa stratégie adaptative : une allocation différentielle massive des ressources. La croissance de la partie aérienne initiale, l'hypocotyle, est le paramètre le plus sensible, étant sévèrement inhibée même à de faibles concentrations salines. Cette inhibition est une mesure cruciale de conservation de l'eau, limitant la surface transpiratoire. Simultanément et de manière contre-intuitive, la croissance de la racine est non seulement maintenue mais significativement stimulée à une salinité modérée. Cet effet d'hormèse constitue une stratégie de survie proactive et agressive, où la plantule investit massivement dans son système racinaire pour explorer le sol à la recherche de zones moins salines et de ressources hydriques plus stables.

Enfin, l'analyse de la biomasse apporte l'éclairage final. La stabilité remarquable du poids sec (Pms) à travers les traitements indique une résilience métabolique surprenante. Les variations du poids frais (Pmf), qui augmente sous stress modéré, ne sont donc pas le reflet d'une meilleure croissance, mais la preuve d'une gestion active de l'eau via l'ajustement osmotique.

Conclusion générale

La plante accumule de l'eau pour diluer les sels internes, un mécanisme de tolérance fondamental.

En conclusion, *Senegalia laeta* ne se contente pas de "subir" le stress salin ; elle y répond par une stratégie sophistiquée en deux temps : d'abord, une germination prudente et ralentie, puis une croissance post-germinative opportuniste qui sacrifie la croissance aérienne précoce au profit d'un investissement massif dans le système racinaire. Cette plasticité en fait un candidat de premier choix pour les programmes de restauration écologique des écosystèmes arides et semi-arides affectés par une salinisation modérée, où sa capacité à établir rapidement un ancrage profond est un atout majeur pour sa survie.

Pour ce qui est des recherches futures et recommandations, il est suggéré de mener des études à plus long terme pour valider la survie de la plante et d'effectuer des analyses biochimiques pour comprendre ses mécanismes de défense. Il est aussi conseillé d'étudier la diversité génétique de l'espèce et sa réponse aux stress combinés, comme la sécheresse, pour une vision plus réaliste. Et sur le plan pratique, il est recommandé de planter *Senegalia laeta* sur des sols dont la salinité ne dépasse pas 8 dS/m. Il est aussi suggéré d'endurcir les plants en pépinière avec une eau légèrement salée pour améliorer leur robustesse. L'espèce doit ainsi être promue dans les projets de restauration des terres et de lutte contre la désertification.

Références bibliographiques

- Ayers, R.S. et Westcot, D.W. (1988). *La qualité de l'eau en irrigation*. Bulletin d'irrigation et de drainage de la FAO, 29 Rev. 1. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Bayuelo-Jiménez, J. S., Craig, R., & Lynch, J. P. (2002). Salinity tolerance of Phaseolus species during germination & early seedling growth. *Crop Science*, 42(5), 1584-1594.
- Bencherif, K., & Bouzid, S. (2012). Effet du stress salin sur la croissance et l'accumulation de la matière sèche chez deux variétés de luzerne (*Medicago sativa* L.). *Courrier du Savoir*, 13, 59–66.
- Ben-Salah, I., & Ghrabi, Z. (2012). Effect of salinity on seed germination and early seedling growth of *Acacia saligna* (Labill.) H.L.Wendl. *Journal of Applied Sciences Research*, 8(7), 3565-3571.
- Boudy, P. (1993). *Guide forestier: Tome 1 – Les essences forestières et d'ornement*. Paris: Éditions Larose.
- Bouksila, F., & Boulahdid, M. (2010). Effet du stress salin sur la croissance et l'accumulation de la matière organique chez le luzern cultivé (*Medicago sativa* L.). *Revue des Bioressources*, 1(2), 15–22.
- Bradaï, A. (2017). *Evolution de la qualité géochimique des eaux souterraines utilisées dans l'irrigation et leur impact sur la dégradation des sols de la plaine du Bas- Chéiff*. Thèse de Doctorat, Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- Dunod. (2018). *Physiologie végétale : De la cellule aux plantes entières (3e éd.)*. Paris : Éditions Dunod.
- El-Beltagi, H. S., & Mohamed, H. I. (2018). Reactive oxygen species, lipid peroxidation and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. In H. El-Missiry (Ed.), *Reactive Oxygen Species (ROS)* (pp. 35–52). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70678>
- FAO. (2006). *Plant genetic resources and food security in West and Central Africa*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Farooq, M., Hussain, M., Wakeel, A., & Siddique, K. H. (2015). Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 461-481.
- Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2015). Plant salt tolerance: adaptations in halophytes. *Annals of Botany*, 115(3), 327-331.
- GBIF & POWO. *Global Biodiversity Information Facility* (<https://www.gbif.org>) & *Plants of the World Online* (<https://powo.science.kew.org>)
- Hajiboland, R., Norouzi, F., & Poschenrieder, C. (2014). Growth, physiological, biochemical & ionic responses of pistachio seedlings to mild & high salinity. *Trees*, 28(4), 1065-1078.

Références bibliographiques

- Harivandi, A. (1999). *Interpreting Turfgrass Irrigation Water Test Results*. Publication 8009, Division of Agriculture and Natural Resources, University of California.
- Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J. K., & Bohnert, H. J. (2000). Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51, 463-499.
(Une référence classique et très citée sur les mécanismes moléculaires de la toxicité ionique).
- Hassani, A., Azapagic, A., & Shokri, N. (2021). Predicting global soil salinity for 2018–2100 using a machine learning approach. *Nature Communications*, 12(1), 6656. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26904-4>
- INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). (2019). *Rapport d'activité scientifique 2019*. Paris : INRA.
- IRD (Institut de Recherche pour le Développement). (2015). *Ressources génétiques et adaptation des plantes aux stress climatiques en zones arides*. Marseille : IRD Éditions.
- Jaleel, C. A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H. J., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2009). Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *International Journal of Agriculture and Biology*, 11(1).
- Khayat, S., Mirhaji, T., & Rostami, M. (2014). The effects of salt stress on germination and seedling growth of *Acacia salicina*. *International Journal of Biosciences*, 4(11), 164-169.
- Kheloufi, A. (2019). *Contribution à l'étude des effets de la sécheresse et du stress salin sur l'écophysiologie des espèces d'Acacia en Algérie*. Thèse de Doctorat en Biologie, Université de Batna 2.
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination—aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2(2), 176-177.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681.
- Poorter, L., & Markesteijn, L. (2008). Seedling traits determine drought tolerance of tropical tree species. *Biotropica*, 40(3), 321-331.
- Richards, L.A. (Ed.). (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. USDA Agricultural Handbook 60. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Sarr, A. (2005). *Amélioration de la tolérance au stress abiotique chez les plantes cultivées : une nécessité pour la sécurité alimentaire en Afrique*. Dakar : CERAAS.
- Sarr, M. S. (2017). *Morphological and Physiological Responses of *Senegalia senegal* (L.) Britton Provenances to Drought, Salinity, and Fertility*. Dissertation for Doctor of Philosophy, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Tchoundjeu, Z., Atangana, A. R., Asaah, E., & Fondoun, J.-M. (2010). Domestication of indigenous fruit trees in Central Africa: Challenges and achievements. *Forests, Trees and Livelihoods*, 19(1), 47–54. <https://doi.org/10.1080/14728028.2010.9752656>

Références bibliographiques

- Wu, H., Shabala, L., Liu, X., Azzarello, E., Zhou, M., Pandolfi, C., ... & Shabala, S. (2015). Linking salinity stress tolerance with tissue-specific Na⁺ sequestration in wheat roots. *Frontiers in plant science*, 6, 71.
- Yang, Y., & Guo, Y. (2018). Elucidating the molecular mechanisms of plant salt stress responses. *New Phytologist*, 217(2), 523–539. <https://doi.org/10.1111/nph.14920>