

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Béjaïa

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des sciences biologiques de l'environnement
Spécialité : ECOLOGIE



Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

**Etude de quelques paramètres morpho-
physiologiques chez *Vigna unguiculata* L.
cultivée sous contrainte saline**

Présenté par :

MEDDOUR Wassel & OUADFEL Fatah

Soutenu le : 1^{er} juillet 2025

Devant le jury composé de :

M. AHMIM Mourad	MCA	Président
M. RAMDANI Nacer	MCB	Encadreur
M. ADJAOUD Abdenour	MCB	Examineur

Année universitaire : 2024 / 2025

Remerciements

Avant tout propos, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Allah tout-puissant pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

*Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à notre encadrant Monsieur **Nacer Ramdani**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, sa bienveillance tout au long de cette étude. Son expertise et ses orientations nous ont été d'une aide inestimable pour la réalisation de ce mémoire.*

C'est pour nous un grand honneur d'avoir été encadré par vous, surtout en cette période marquant la fin de votre carrière. Votre expérience, votre rigueur et votre bienveillance ont été pour nous une véritable source d'inspiration.

*Nous vous souhaitons une retraite paisible, riche en bonheur et en santé, après une carrière pleinement accomplie. Merci du fond du cœur monsieur **Ramdani**.*

*Nous tenons à remercier aussi les membres du jury Monsieur **Abdenour Adjaoud**, l'examineur, et Monsieur **Mourad Ahmim**, le président, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail.*

Nous remercions également toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin pour la réalisation de ce travail en particulier.

Nous n'oublions pas nos camarades de promotion, pour les moments d'échange, d'entraide et de partage qui ont enrichi cette expérience.

Enfin, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à nos familles, en particulier à nos parents, pour leur amour, leurs encouragements et leur soutien moral inconditionnel, sans lesquels ce parcours n'aurait pas été possible.

A toute et à vous, merci du fond du cœur

MEDDOUR.W

OUADFEL.F

Dédicaces

*Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant, pour m'avoir
Donnée la force et la patience, et la chance d'étudier et de suivre le
Chemin de la science.*

*Je dédie cet humble acte à celui qui m'a donné la vie, symbole de
Tendresse qui s'est sacrifié pour le bien.*

*À la source de l'amour et de la tendresse À qui sa supplication était un
Salut Pour espérer et éclairer mon chemin À celle qui a bon cœur « Ma
Chère mère » Que Dieu la protège et bénisse sa longue vie*

De toute ma vie

Le courage de m'aider et de me protéger, ainsi que

Mon père, que Dieu le bénisse.

A mes sœurs Hamouche Lynda, saidi Lamia

A mes chers frères Walid, Khelaf et youva

A toute la famille Meddour, à tous mes chers amis sans

Exception

Mon copain Fatah qui a parfaitement fait son travail.

Également à tous mes enseignants du primaire

Jusqu'à l'université et surtout mon encadrant :

Mr Ramdani N.

A tous ceux qui m'ont aidé:

Wassel.

Dédicaces

À mes deux parents qui m'ont accueilli d'abord dans cette vie, puis m'ont formé de la meilleure façon possible par leur investissement parental, éducation et apprentissage. Je ne sais pas est ce que un remerciement me suffira de résumer mon amour et ma gratitude envers eux

À mon chère frère Amar qui m'encourage toujours pour avancer dans mes études et L.hadi, djebbar et à mes sœurs, à ma chère femme Lydia

À tous les collègues et amis avec lesquelles j'ai partagé les mêmes activités et projets associatifs. Que nos associations soient multipliées, actives et bénéfiques pour les populations.

À toute ma promotion du Master Ecologie j'espère la réussite pour chacun d'eux.

À ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce modeste travail

À tous ceux que j'aime et à ceux qui m'aiment.

OUADFEL Fatah

Liste des tableaux

	Pages
Tableau I : Extension globale de la salinité secondaire sur une superficie en millions d'hectares à l'échelle mondiale (Ghassemi <i>et al.</i> , 1995)	05
Tableau II : Résultats des analyses physico-chimiques du sol de Timezrit	30
Tableau III : Classe de la qualité des sols selon l'échelle de Durant J.H (1983).....	31
Tableau IV : Résultats des paramètres physico-chimiques de l'eau de source d'Idnanane (Feraoun).....	32
Tableau V : Effet de l'eau d'irrigation sur la biomasse des parties aériennes et racinaires des plantes de <i>Vigna unguiculata</i> L.....	36
Tableau VI : Effet de l'eau d'irrigation sur les pigments chlorophylliens des feuilles de <i>Vigna unguiculata</i>	37

Liste des figures

	Pages
Figure 1 : Une Vue d'ensemble de la réaction en deux étapes de la croissance des plantes face au stress salin (Polash et <i>al.</i> 2019).	7
Figure 2 : photographie des graines de l'haricot dolique (<i>Vigna unguiculata</i>)	19
Figure 4 : Dispositif de culture de <i>Vigna unguiculata</i>	26
Figure 5 : Diagramme de Riverside (USSS, 1954)	33
Figure 6 : Effet de l'eau d'irrigation sur la hauteur des parties aériennes et racinaires des plantes de <i>Vigna unguiculata</i> L.	34
Figure 7 : Effet de l'eau d'irrigation sur la surface foliaire de <i>Vigna unguiculata</i>	35
Figure 8 : Effet de l'eau d'irrigation sur la matière sèche des parties aériennes et racinaires des plantes de <i>Vigna unguiculata</i> L.	36
Figure 9 : Effet de l'eau d'irrigation sur les teneurs en proline foliaires des plantes de <i>Vigna unguiculata</i> L.	38
Figure 10 : Evolution de la CE des sols en fonction des eaux d'irrigation	39

Liste des abréviations

Abréviations	Significations
ABA	Acide Abscissique
AG	Acide Gibbérellique
AIA	Acide Indolacétique
CaCl ₂	Chlorure de calcium
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CaSO ₄	Sulfate de calcium
CAT	Catalase
EOR	Espèces réactives à oxygène
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
H ₂ O ₂	Peroxyde d'hydrogène
MDA	Méthylène Dioxy Amphétamine
MgCl ₂	Chlorure de magnésium
MgCO ₃	Carbonate de magnésium
MgSO ₄	Sulfate de magnésium
Na ₂ CO ₃	Carbonate de sodium
NaCl	Chlorure de sodium
NaHCO ₃	Bicarbonate de sodium
NaSO ₄	Sulfate de sodium
O ₂ ⁻	Superoxyde
POD	Peroxydases

SOMMAIRE

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Page

Introduction Générale..... 1

Chapitre I : Synthèse bibliographique 3

1. Généralités sur la salinité des sols.....3

1.1. Définition et origine de la salinité.....3

1.1.1. Définition de la salinité.....3

1.1.2. Origine de la salinité3

1.2. Types et distribution des sols salins dans le monde et en Algérie4

1.2.1. Types des sols salins4

1.2.2. Distribution des sols salins dans le monde5

1.2.3. Distribution des sols salins en Algérie.....6

2. Effet de la salinité sur la croissance des plantes.....6

3. Mécanismes d'adaptation et de tolérance des plantes à la salinité.....7

3.1. Exclusion.....8

3.2. Inclusion.....8

3.3. Ajustement osmotique8

3.3.1. Accumulation de la proline.....	8
3.3.2. Accumulation des sucres solubles	9
4. Importance des légumineuses en agriculture	9
4.1. Principales caractéristiques botaniques des légumineuses	9
4.2. Rôle des légumineuses dans l'amélioration des sols et la sécurité alimentaire ..	10
4.2.1. Amélioration de la structure des sols	11
4.2.2. Contribution à atténuer les changements climatiques et à s'adapter à leurs effets.....	11
4.3. <i>Vigna unguiculata</i> : répartition à l'échelle mondiale et en Algérie...	12
5. Mécanismes de tolérance des légumineuses à la salinité.....	12
5.1. Séquestration de sodium	12
5.2. Prélèvement de K ⁺	13
5.3. Biosynthèse des osmoprotecteurs et ajustement osmotique	13
5.4. Induction des enzymes antioxydantes	14
5.5. Induction des phytohormones.....	15
6. Les paramètres morpho-physiologiques comme indicateurs de stress salin	15
6.1. Paramètres morphologiques	15
6.2. Paramètres physiologiques	16
6.3. Réponses biochimiques au stress salin.....	17
Chapitre II : Matériel et Méthodes	18

1. Matériel	18
1.1. Le sol	18
1.2. Le matériel végétal	18
1.2.1. Présentation de la plante de l'étude : <i>Vigna unguiculata</i> L.	19
1.3. L'eau d'irrigation	19
2. Méthodes	20
2.1. Analyse granulométrique.....	20
2.2. Le pH.....	20
2.3. L'humidité.....	21
2.4. Conductivité électrique	21
2.5. Dosage du carbone total.....	21
2.6. Dosage du l'azote total	22
2.7. Dosage du phosphore assimilable	22
2.8. Dosage des bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+)	23
3. Effets de l'eau de source sur les paramètres morpho-physiologiques de l'haricot dolique (<i>Vigna unguiculata</i> L.)	23
3.1. Conduite de l'essai	23
3.1.1. Préparation des graines	24
3.1.2. Test de germination des graines	24
3.1.3. Préparation des eaux d'irrigation	24

3.1.4. Préparation des pots	25
3.1.5. Mise en culture des plantes.....	25
3.1.6. Dispositif expérimental	25
3.1.7. Condition de cultures	26
3.2. Paramètres mesurés.....	26
3.2.1. Surface foliaire	27
3.2.2. Hauteur des parties aériennes et racinaires des plantes	27
3.2.3. Biomasse fraîche et sèche des parties aériennes et racinaires des plantes	27
3.2.4. Dosage des pigments chlorophylliens	28
3.2.5. Dosage de la proline foliaire.....	28
3.2.6. Evolution de la salinité du sol après récolte.....	29
3.3. Analyses statistiques	29
Chapitre III : Résultats et discussion	30
1. Caractérisation physico-chimiques du sol	30
2. Caractérisation physico-chimiques de l'eau d'irrigation	32
3. Effets de l'eau d'irrigation sur les paramètres morpho-physiologiques de <i>Vigna unguiculata</i> L.....	34
3.1. Hauteur des parties aériennes et racinaires	34
3.2. Surface foliaire	35

3.3. Production de la biomasse	35
3.3.1. Poids frais et secs des parties aériennes et racinaires	35
3.3.2. Matière sèche des parties aériennes et racinaires.....	36
3.4. Pigments chlorophylliens	37
3.5. Teneurs en proline	38
3.6. Évolution de la conductivité électrique (CE) du sol après la récolte	38
4. Discussion	39
Conclusion Générale	43
Références bibliographiques	45
Annexes	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

Les zones semi-arides, caractérisées par une pluviométrie faible et irrégulière ainsi qu'une évapotranspiration élevée, couvrent une part importante des régions méditerranéennes. Ces écosystèmes sont soumis à des conditions climatiques rigoureuses, notamment des températures élevées, de longues périodes de sécheresse et une rareté croissante des ressources en eau douce (**Chelli et al., 2021**). Le climat méditerranéen, typiquement marqué par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs, exacerbe la vulnérabilité de ces zones aux changements climatiques et à la dégradation des sols (**Brito et al., 2022**).

Dans les régions semi-arides à climat méditerranéen, la salinité des sols et le déficit pluviométrique constituent deux stress abiotique majeurs limitant la production agricole. Ce phénomène est souvent aggravé par l'utilisation de nappes phréatiques salines pour l'irrigation. La salinité introduit un stress osmotique réduisant la capacité des racines à absorber l'eau, affecte l'homéostasie ionique en raison d'un excès de sodium (Na^+) et de chlore (Cl^-), et déclenche un stress oxydatif. Ces perturbations altèrent la photosynthèse et freinent la croissance et la biomasse des plantes (**Yang et Guo 2018**).

L'une des principales conséquences de l'aridité croissante dans les régions semi-arides est le recours accru aux eaux souterraines pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau. Toutefois, ces ressources hydriques sont souvent de qualité médiocre, présentant une forte concentration en sels dissous, ce qui aggrave la salinisation des sols (**Bouras et al., 2020**). Cette salinité accrue représente une contrainte majeure au développement de la végétation naturelle et des cultures agricoles, en affectant non seulement la croissance des plantes, mais aussi la structure microbienne des sols et, par conséquent, la productivité globale des écosystèmes (**Jin et al., 2023**).

Par ailleurs, la diminution des précipitations et l'intensification des événements climatiques extrêmes, tels que les sécheresses prolongées, ont des effets dramatiques sur l'équilibre écologique et la durabilité des ressources naturelles (**Zhou et al., 2021**). Ces conditions favorisent les processus de désertification, la perte de biodiversité, et compromettent directement la sécurité alimentaire dans les régions affectées (**FAO, 2022**). En effet, les surfaces affectées par la salinité sont estimés à environ 954,8 millions d'hectares à l'échelle mondiale, soit 23% des terres cultivées (**FAO, 2008**).

Face à ces défis, une meilleure compréhension des interactions entre le climat, le sol, l'eau et la biologie végétale dans les zones semi-arides s'avère indispensable pour élaborer des stratégies d'adaptation durables.

Au cours des dernières décennies, des progrès considérables ont été réalisés dans la recherche de plantes tolérantes à la salinité, notamment par le biais de la sélection conventionnelle et de diverses techniques de sélection modernes (Ashraf *et al.*, 2004). Parmi ces approches, celles combinant des paramètres physiologiques et agronomiques se sont révélées particulièrement pertinentes, car elles permettent d'établir un lien entre le développement végétatif et les mécanismes physiologiques de tolérance tout au long du cycle de croissance de la plante (Munns, 2002). L'identification de variétés et de génotypes tolérants aux sels, capables de limiter les effets dépressifs de la salinité sur les rendements, constitue une piste prometteuse pour améliorer la production agricole dans les zones affectées.

La présente étude vise à évaluer les réponses physiologiques et biochimiques d'une variété d'haricot dolique (niébé ; *Vigna unguiculata* L.) irriguée avec une eau de source naturelle saline, diluée à des niveaux croissants de salinité. Pour ce faire, plusieurs paramètres morpho-physiologiques liés à la croissance des plantules ont été suivis, afin d'analyser les effets de différentes concentrations d'eau d'irrigation salée.

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUE

1. Généralités sur la salinité des sols

1.1. Définition et origine de la salinité

1.1.1. Définition de la salinité

La salinité peut être définie comme étant la quantité globale des sels présents dans «la solutions du sol» (**Imalet, 1979**). Elle constitue l'un des facteurs abiotiques les plus répandus à l'échelle mondiale, limitant considérablement la productivité agricole, notamment dans les régions arides et semi-arides. Dans ces zones, les précipitations sont insuffisantes pour lessiver les sels accumulés dans le profil racinaire des plantes (**Khales et Baaziz, 2006**). La salinité résulte principalement de l'évaporation de l'eau, qui laisse derrière elle des sels et d'autres substances dissoutes (**Carter, 1975**). Elle peut également provenir d'un accroissement des concentrations en sels, tels que le chlorure de sodium (**Sun, 2007**).

Les sols salés se caractérisent par une forte concentration en sels solubles, notamment en gypse, ou par un complexe d'absorption enrichi en ions issus de ces sels, ce qui altère leurs propriétés physiques, en particulier leur structure, qui devient alors diffuse. Ces caractéristiques ont un impact direct sur la croissance de la flore et sur les cultures possibles : certains sols présentent l'un de ces attributs, tandis que d'autres cumulent les deux. Les sels les plus fréquemment rencontrés dans ces sols sont les chlorures, sulfates, bicarbonates, carbonates, borates, nitrates, et parfois les fluorures de sodium. Dans certains cas, les sels de potassium sont également présents. On y retrouve aussi des sels de magnésium, en particulier sous forme de sulfates. Les chlorures de calcium et de magnésium, ou leurs mélanges, peuvent également être responsables de la salinité des sols. Lorsque c'est le cas, ces sols sont qualifiés d'hygroscopiques (**Aubert, 1976**).

1.1.2. Origine de la salinité

La salinité des sols résulte principalement de l'accumulation de sels solubles dans la zone racinaire. Ces sels proviennent de différentes sources naturelles ou anthropiques et appartiennent généralement à trois grandes catégories :

Les carbonates : les composés les plus courants sont le carbonate de sodium (Na_2CO_3), le bicarbonate de sodium (NaHCO_3), le carbonate de calcium (CaCO_3) et le carbonate de magnésium (MgCO_3).

Les sulfates : dérivés de l'acide sulfurique, ils incluent notamment le sulfate de magnésium (MgSO_4), le sulfate de sodium (Na_2SO_4) et le sulfate de calcium (CaSO_4).

Les chlorures : cette catégorie regroupe principalement le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de calcium (CaCl_2) et le chlorure de magnésium (MgCl_2), connus pour leur toxicité élevée vis-à-vis des plantes (**Aubert, 1982**).

1.2. Types et distribution des sols salins dans le monde et en Algérie

1.2.1. Types des sols salins

Il existe plusieurs systèmes de classification des sols salins, notamment les classifications américaines, française, russe, ainsi que celle proposée par la FAO en 1972. Selon **Duchaufour (1977)** et **Cherbuy (1991)**, les sols salés peuvent être regroupés en trois grandes catégories : les sols salins, les sols salins-alcalins et les sols alcalins.

L'apparition de ces sols est étroitement liée à la présence de l'ion sodium (Na^+), que ce soit sous forme saline (comme le chlorure ou le sulfate de sodium), sous forme échangeable, ou dans certains cas, sous les deux formes à la fois. En fonction de leur composition, on distingue notamment :

Les sols salins (Solontchaks) : ils se caractérisent par une forte concentration en sels neutres, principalement le chlorure de sodium (NaCl) et le sulfate de sodium (Na_2SO_4). Ces sols contiennent également des quantités notables de chlorures et de sulfates de calcium et de magnésium. On les retrouve principalement dans les zones arides et semi-arides.

Les sols alcalins (Solonetz) : ces sols présentent une forte teneur en sodium échangeable, mais une faible concentration en sels solubles. Ils renferment essentiellement des sels alcalins, tels que les carbonates et bicarbonates de sodium, avec une prédominance du carbonate de sodium (Na_2CO_3). Ils se rencontrent généralement dans les régions semi-arides à subhumides.

Ces deux types de sols présentent des propriétés chimiques et physiques spécifiques qui influencent la végétation naturelle, nécessitent des techniques particulières pour leur mise en valeur, et ont une répartition géographique distincte. Ils peuvent également affecter la qualité des aquifères voisins (**Maillard, 2001**).

1.2.2. Distribution des sols salins dans le monde

La salinisation des sols représente un enjeu crucial à l'échelle internationale. Selon la **FAO (1972)** et les estimations actuelles, ce phénomène affecte déjà plus de 400 millions d'hectares à travers le monde, tout en menaçant une superficie équivalente. L'ampleur du problème est d'autant plus préoccupante que la surface cultivable sur la planète ne dépasse pas un milliard et demi d'hectares. En moyenne, le globe terrestre perd 10 hectares de terres agricoles chaque minute, dont 3 hectares — soit plus de 1,5 million d'hectares par an — uniquement à cause de la salinisation.

D'après **Bot (2000)**, la salinisation affecte environ 400 millions d'hectares de terres à l'échelle mondiale. En Afrique, ce phénomène concerne près de 40 millions d'hectares, soit environ 2 % de la superficie totale du continent. Dans la région du Proche-Orient, ce sont environ 92 millions d'hectares qui sont touchés, représentant près de 5 % de la superficie régionale. Le tableau I ci-dessous illustre la répartition globale des sols affectés par la salinisation.

Tableau I: Extension globale de la salinité secondaire sur une superficie en millions d'hectares à l'échelle mondiale (**Ghassemi et al., 1995**).

	Salinité légère	Salinité modérée	Salinité forte	Salinité extrême	Total
Afrique	4,7	7,7	2,4	-	14,8
Asie	26,8	8,5	17	0,4	52,7
Amérique	2,1	1,8	0,5	0	4,4
Europe	1	2,3	0,5	0	3,8
Australie	-	0,5	-	0,4	0,9
Total	34,6	20,8	20,4	0,8	76,6

1.2.3. Distribution des sols salins en Algérie

Selon **Durand (1958)**, une large part des terres agricoles en Algérie est affectée par la salinité ou présente un risque élevé de le devenir. Les sols salins sont répartis dans de nombreuses régions du pays. On les retrouve notamment dans les basses terres de l'Oranie, la vallée de la Mina près de Relizane, le bas Chelif, ainsi que sur les hautes plaines situées au sud de Sétif et de Constantine. Ce type de sols est également présent sur les rives de certains chotts, comme le Chott Melghir. Leur répartition s'étend largement aux zones sahariennes, du sud de Biskra jusqu'à Touggourt, Ouargla, et au-delà.

2. Effet de la salinité sur la croissance des plantes

La salinité constitue un facteur limitant majeur pour l'agriculture à l'échelle mondiale (**Hillel, 2000**). Son impact varie en fonction de son intensité. De manière générale, la salinité affecte négativement la croissance et le développement de la majorité des plantes cultivées (**Munns, 1983**). Selon **Ashraf et Harris (2004)**, cet impact défavorable se manifeste par divers changements morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires, qui compromettent la santé des plantes et réduisent leur productivité.

La salinité impose une restriction significative à la croissance et au développement des plantes (**Bouaouina et al., 2000**). La réponse initiale au stress salin se manifeste généralement par un ralentissement de la croissance de la surface foliaire, pouvant aller jusqu'à l'interruption de son expansion lorsque la concentration en sel augmente. Ce stress provoque également une diminution significative de la biomasse sèche et fraîche des feuilles, des tiges et des racines (**Chartzoulakis & Klapaki, 2000**). De manière similaire, la salinité freine le développement de l'appareil végétatif en réduisant à la fois le nombre de feuilles et la surface foliaire (**Ben Khaled et al., 2007**).

Chez les glycophytes, la salinité freine la croissance en perturbant l'équilibre hydrique et ionique des tissus. Au niveau foliaire, cette perturbation se traduit notamment par une réduction de la turgescence, due à la diminution du gradient de potentiel hydrique entre la plante et son environnement. Parmi les mécanismes d'adaptation au stress salin, on retrouve le partitionnement des ions : ceux-ci sont redistribués entre les organes (racines et parties aériennes), entre les tissus (épiderme et mésophile), ou encore entre les compartiments cellulaires (vacuole et cytoplasme) (**Ouerghi et al., 2000**).

L'augmentation de la salinité entraîne une réduction significative de plusieurs paramètres de croissance, notamment la biomasse racinaire, la taille globale de la plante, le nombre de feuilles par plante, la longueur des racines et la surface racinaire (Mohammad *et al.*, 1998). L'ampleur de cet impact varie en fonction de plusieurs facteurs, tels que le type de sel présent, sa concentration, l'espèce et la variété végétale concernées, l'organe affecté, ainsi que le stade de développement de la plante (Levigneron *et al.*, 1995).

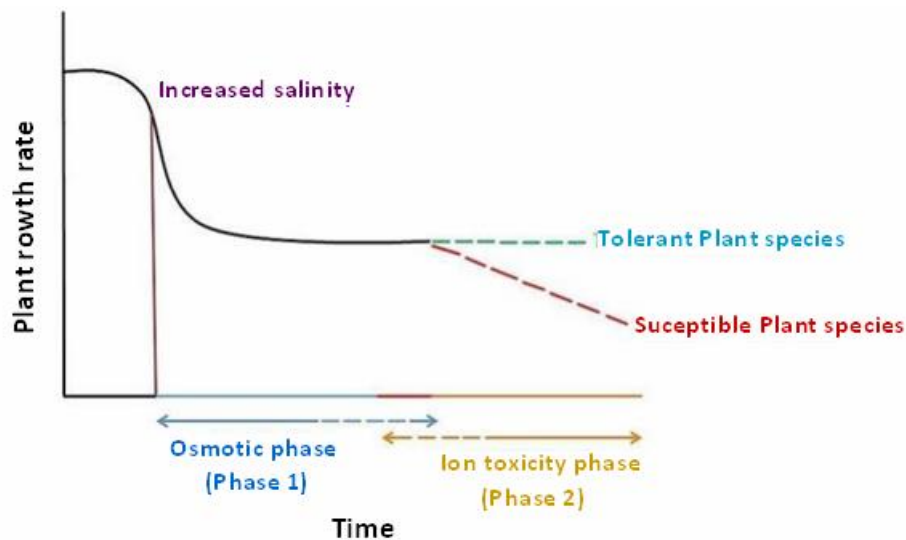


Figure 1: Vue d'ensemble de la réaction en deux étapes de la croissance des plantes face au stress salin (Polash *et al.* 2019).

3. Mécanismes d'adaptation et de tolérance des plantes à la salinité

Les plantes disposent de divers mécanismes pour faire face au stress salin. Certaines continuent de croître sous un stress modéré, tandis que d'autres, plus sensibles, subissent des dommages importants. Dans certains cas, des ajustements métaboliques spécifiques leur permettent de contourner ou de tolérer les effets néfastes du stress (Enita, 2000).

Les variations de salinité dans l'environnement induisent ainsi l'activation de mécanismes de résistance. Parmi eux, l'ajustement osmotique constitue un processus fondamental dans la tolérance des plantes au stress salin (Belfakih *et al.*, 2013) (Figure 1). Ce mécanisme repose sur l'accumulation de composés osmorégulateurs — principalement des acides aminés et des sucres — qui permettent de diminuer le potentiel osmotique et, par conséquent, de préserver la turgescence cellulaire (Levigneron *et al.*, 1995 ; El Midaoui *et al.*, 2007).

3.1. Exclusion

La plante met en place des barrières pour limiter la remontée des sels vers les parties aériennes, notamment les feuilles. Une première ligne de défense est assurée au niveau de l'endoderme (la couche interne des cellules racinaires). Toutefois, cette limite peut être brisée, en particulier au niveau des zones de ramification des racines, où la structure peut être moins hermétique. D'autres mécanismes physiologiques interviennent également pour entraver la diffusion des ions salins des racines vers les feuilles, mais les gènes régulant ces processus restent encore largement méconnus (**El Madidi, 2003**).

3.2. Inclusion

Le sel absorbé par la plante est transporté vers les feuilles en suivant le même flux ascendant que l'eau, via les vaisseaux conducteurs de la sève. Une fois à l'intérieur des cellules, les ions salins sont stockés dans les vacuoles grâce à des mécanismes moléculaires spécifiques, appelés pompes ioniques. Ces vacuoles agissent comme des compartiments isolés, permettant de confiner les sels à l'écart des structures cellulaires sensibles, et ainsi limiter leur toxicité (**El Madidi, 2003**).

3.3. Ajustement osmotique

L'ajustement osmotique est aujourd'hui reconnu comme un mécanisme clé d'adaptation au stress salin, pouvant se manifester à tous les stades de développement de la plante. Son caractère inductible signifie qu'il a peu ou pas d'effet négatif sur le rendement potentiel (**Kara et al., 2011**). Ce processus est essentiel à la capacité de la plante à résister ou à tolérer un stress hydrique ou salin. Pour réguler son potentiel hydrique, la plante synthétise et accumule des solutés organiques compatibles (**Belfakih et al., 2013**), tels que des acides aminés (comme la proline) ou des sucres solubles.

3.3.1. Accumulation de la proline

Selon **Jithesh et al. (2006)**, l'accumulation de proline chez les halophytes entraîne une réduction de la production d'espèces réactives à oxygène (EOR). Cette molécule joue également un rôle dans le contrôle du pH cytoplasmique et peut servir de source de carbone et d'azote en période de stress (**Denden et al., 2005**). L'accumulation de proline a été observée dans différentes espèces végétales soumises à des conditions de stress. Chez

Sesuvium portulacastrum, elle augmente en réponse au déficit hydrique, tandis que chez *Atriplex halimus*, elle s'accroît sous l'effet de la salinité. Cette dernière espèce présente un gradient d'accumulation de proline allant des racines vers les tiges, puis les feuilles, avec des concentrations significativement plus élevées à mesure que la salinité du milieu augmente (Djerroudi-Zidane *et al.*, 2010).

3.3.2. Accumulation des sucres solubles

Chez les plantes soumises à un stress salin, les sucres jouent un rôle important en tant qu'osmolytes (Ruffino *et al.*, 2010). Selon Prado *et al.* (2000), l'adaptation des halophytes aux environnements salins est notamment liée à une augmentation des sucres solubles, en particulier du saccharose. Une accumulation significative de saccharose et de glucose a ainsi été observée chez plusieurs espèces exposées à des concentrations élevées de NaCl. Chez *Chenopodium quinoa*, par exemple, les concentrations en sucres totaux, saccharose et glucose atteignent respectivement 265, 75 et 107 $\mu\text{mol/g}$ de matière sèche (Ruffino *et al.*, 2010).

4. Importance des légumineuses en agriculture

Les légumineuses sont des plantes dicotylédones appartenant à la famille botanique des *Fabaceae* ou *Leguminosae*. Cette famille comprend environ 19 500 espèces réparties dans trois sous-familles :

- sous-famille *Caesalpinioideae* avec 2250 espèces, caractérisées par une fleur irrégulière (pseudo-papilionacée) ;
- sous-famille *Mimosoideae* avec 3270 espèces, caractérisées par une fleur régulière ;
- sous-famille *Faboideae* ou *Papilionoideae* avec environ 14000 espèces, caractérisées par une fleur typique en papillon, qui englobe la plupart des légumineuses cultivées (Polhill et Raven, 1981).

4.1. Principales caractéristiques botaniques des légumineuses

Les légumineuses sont des plantes herbacées, d'arbustes, d'arbres ou encore de lianes. Leurs feuilles peuvent être alternées, composées, pennées ou palmées, et sont généralement dotées de stipules. Leur formation est caractérisée par un calice gamosépale souvent bilabié et une corolle qualifiée de papilionacée en raison de sa ressemblance avec un papillon. Les

fleurs, qui sont hermaphrodites, présentent principalement une zygomorphie et sont généralement pentamères. La corolle, qui du reste ne présente pas cette structure partout dans la famille, se compose d'un grand pétale supérieur, l'étendard, de deux pétales latéraux parallèles, les ailes, et de deux pétales du bas qui sont repliés vers le bas. Ces derniers peuvent être indépendants ou fusionnés par leur bord inférieur pour constituer la carène qui abrite les étamines et le pistil. Il y a 10 étamines. Le fruit, dérivant d'un unique carpelle, est un exemple typique de fruit sec (**Duke, 1981**).

4.2. Rôle des légumineuses dans l'amélioration des sols et la sécurité alimentaire

Les légumineuses constituent la famille botanique la plus riche en espèces utiles à l'être humain, qu'elles soient à usage alimentaire, ornemental, industriel ou médicinal. En termes d'importance économique et agricole, les *Fabaceae* occupent la seconde place après les *Poaceae*. (**Botineau, 2010; Lewis et al., 2013**). Elles représentent environ 27 % de la production agricole mondiale et contribuent à hauteur de 33 % à l'apport en azote des protéines alimentaires humaines (**Graham et Vance, 2003**).

En plus de consolider notre sécurité sanitaire et nutritionnelle, les légumineuses ont également la capacité de fertiliser les sols et d'être bénéfiques pour l'environnement. Elles apportent aux sols des éléments nutritifs indispensables, qui à leur tour nous fournissent des aliments riches en nutriments essentiels pour notre santé, favorisant ainsi une nutrition plus équilibrée. En effet, elles jouent un rôle crucial dans le maintien de la fertilité des sols en raison de leur capacité à former une symbiose fixatrice d'azote avec les bactéries de la famille des *Rhizobiaceae*. Ce processus leur permet de produire abondamment des protéines végétales même sans apport d'engrais azotés. Par conséquent, elles sont également d'une grande importance dans le contexte d'une agriculture durable (réduction des intrants, préservation et enrichissement du sol en azote). Par conséquent, elles ont un rôle essentiel dans la rotation des cultures (**Baudoin, 2001**).

Les cultures de légumineuses, grâce à leurs diverses fonctions (fixation de l'azote atmosphérique, libération des matières organiques de qualité supérieure dans le sol et amélioration du déplacement des nutriments et de la rétention d'eau) ont un potentiel considérable pour l'agriculture durable, où elles peuvent être utilisées soit en tant que culture vivante soit comme résidu cultivé. Par conséquent, outre leurs bénéfices pour les

systèmes de cultures intercalaires, elles sont également pertinentes dans les systèmes de conservation qui ont une grande importance dans les pays en développement, ainsi que dans les systèmes agricoles à faibles intrants (Stagnari *et al.*, 2017).

4.2. 1. Amélioration de la structure des sols

La production des légumineuses, particulièrement les légumineuses sèches, améliore la structure des sols. Elle présente des bénéfices à long terme, l'un d'eux étant l'accroissement de la porosité et de la cohésion du sol, ce qui contribue à sa capacité à retenir l'eau et à s'aérer. Par ailleurs, la profondeur des systèmes racinaires des légumineuses et leur période prolongée de croissance ont un impact positif sur la structure du sol (Praharaj et Maitra 2020).

4.2.2. Contribution à atténuer les changements climatiques et à s'adapter à leurs effets

En raison de leur aptitude à concentrer des nutriments indispensables pour le sol, les légumineuses sont en mesure de diminuer l'utilisation d'engrais synthétiques et de réduire les émissions de gaz à effet de serre, éléments clés du changement climatique. De plus, elles encouragent la croissance des racines, ce qui favorise la capture du carbone et aide à atténuer le réchauffement climatique. De plus, grâce à leur vaste diversité génétique, on peut choisir et obtenir certaines variétés qui sont plus résistantes aux variations climatiques. Dans les régions où l'eau est rare, notamment lorsqu'un stress thermique impacte les cultures, ces types de légumineuses peuvent être bénéfiques pour les agriculteurs.

La culture d'au moins une variété de légumineuse intercalée avec une culture céréalière permet de mieux adapter les champs agricoles aux difficultés climatiques (sécheresse, par exemple). Ce modèle a déjà fait ses preuves en Tanzanie, où l'on cultive sur une même parcelle des céréales (maïs, sorgho), des légumineuses (haricots) et des fruits à coque (arachide). L'association dynamique des légumineuses et des sols joue un rôle crucial dans la production d'aliments nutritifs, l'amélioration de la biodiversité agricole, la lutte contre le changement climatique et le soutien aux moyens de subsistance. (Stagnari *et al.*, 2017 ; Praharaj et Maitra 2020).

4.3. Répartition de *Vigna unguiculata* à l'échelle mondiale et en Algérie

Vigna unguiculata est une légumineuse alimentaire mondiale cultivée dans toute les zones tropicales et du bassin méditerranéen, en Afrique de l'ouest, en Amérique latine et dans quelques régions du sud-est asiatique (Chauvet, 2018).

Avec son taux en protéines de 25 %, le niébé est l'une des sources de protéines les moins chères pour les populations démunies. En Afrique de l'Ouest, où plus de 70 % de la totalité du niébé est produite, il est devenu progressivement une partie intégrante des systèmes de culture, en raison de son adaptation aux climats chauds et secs (Daouda Kouadio *et al.*, 2007).

Sa production annuelle mondiale varie entre 3,1 et 3,3 millions de tonnes de graines sèches dont plus de 64% sont produits en Afrique (Niger, Nigeria, Burkina Faso) (FAO, 2001 ; FAOSTAT, 2004). En Algérie, le niébé est cultivé à petite échelle dans les zones semi-arides du sud et de l'ouest du pays, notamment dans les régions de Biskra, Adrar et El-Oued, en raison de sa bonne tolérance à la sécheresse et à la salinité (Benhammou et Imache, 2015). La superficie annuelle cultivée dans le monde s'élève à plus de 12,5 millions d'ha, dont 9,8 millions sont réalisés en Afrique de l'Ouest, qui est la plus grande zone de production et de consommation du niébé dans le monde (Singh *et al.*, 1997).

5. Mécanismes de tolérance des légumineuses à la salinité

Pour prévenir et assurer la survie des cellules, les légumineuses à l'instar des végétaux, des stratégies englobant divers mécanismes (modifications morphologiques, biochimiques et physiologiques) ont été élaborés par les plantes afin de réparer les dommages provoqués par le stress salin. Parmi ces processus, on cite:

5.1. Séquestration du sodium

De manière générale, les plantes, et plus spécifiquement la symbiose rhizobienne, identifient le stress salin par le biais du signal ionique (Na^+) et osmotique. Les protéines

transmembranaires ou les enzymes récepteurs de Na^+ peuvent détecter une concentration excessive de Na^+ . Un surplus de Na^+ et Cl^- entraîne des modifications dans les structures protéiques et une dépolarisation membranaire, pouvant mener à la reconnaissance de la toxicité ionique. Les antiports Na^+/H^+ de la membrane plasmique extraient le Na^+ des cellules racinaires pour le diriger vers les feuilles. Ce mécanisme de transport constitue la première ligne de défense visant à prévenir l'accumulation de Na^+ dans le cytosol (Zhu, 2003). Dans des conditions de salinité, l'accumulation de Na^+ dans la vacuole est une approche cruciale et avantageuse pour l'équilibre osmotique, qui peut également diminuer la concentration de Na^+ dans le cytosol. (Farissi *et al.*, 2014).

5.2. Prélèvement de K^+

Dans des conditions idéales, les plantes conservent un ratio cytosolique K^+/Na^+ élevé. Le stress salin provoque une baisse de ce rapport en raison de la compétition entre les ions Na^+ et K^+ , ce qui nuit aux processus biochimiques au sein des cellules. Ainsi, une concentration élevée en potassium intensifie le potentiel osmotique, provoquant un afflux d'eau depuis l'extérieur (Claussen M, 1997). L'extraction de K^+ est cruciale pour la turgescence cellulaire et pour les processus biochimiques en situation de stress salin (Pilot *et al.*, 2003).

5.3. Biosynthèse des osmoprotecteurs et ajustement osmotique

Les légumineuses qui tolèrent la salinité effectuent l'équilibre osmotique en accumulant des ions salins dans leurs tissus. Cependant, les quantités accumulées deviennent vite nocives. Par conséquent, l'une des approches d'adaptation consiste à produire des osmoprotecteurs, principalement des sucres et des composés aminés comme la proline et la glycine-Bétaïne (Farissi *et al.*, 2011).

Plusieurs études ont démontré que chez la luzerne, une concentration de 100 mM de NaCl provoque une accumulation significative de proline (Mezni *et al.*, 2010 ; Farissi *et al.*, 2011). Par ailleurs, Verdoy *et al.* (2006), ont observé que la salinité entraînait l'accumulation de proline dans les nodules et favorisait la croissance ainsi que la fixation symbiotique de l'azote chez *Medicago truncatula* (L.) génétiquement modifiée. La proline fonctionne en tant qu'osmoticum dont l'accumulation dans le cytoplasme contribue à neutraliser les impacts ioniques et osmotiques de la concentration de sel dans la vacuole (Slama *et al.*, 2008). Ce même acide aminé participe aussi au maintien des pressions entre

le cytosol et la vacuole, à la régulation du pH (Ottow *et al.*, 2005) ainsi qu'à la stabilité des membranes (Ashraf *et al.*, 2004).

Les glucides pourraient représenter plus de 50% de l'adaptation osmotique des glycophytes exposés à des conditions de salinité (Ashraf *et al.*, 2004). L'accumulation des carbohydrates dans les plantes légumineuses en réponse à la salinité a été documentée dans les espèces de *Phaseolus* (Bayuelo-Jimenez *et al.*, 2012) et *Medicago sativa* (Farissi *et al.*, 2011). Leurs rôles principaux incluent la protection osmotique, l'équilibre osmotique, le stockage du carbone et la capture des radicaux libres (Parida *et al.*, 2004).

5.4. Induction des enzymes antioxydantes

Le stress salin induit la production de dérivés réactifs de l'oxygène, notamment le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), le superoxyde (O_2^-) et les radicaux libres. Ces dérivés provoquent des dommages oxydatifs aux divers éléments cellulaires, tels que les lipides membranaires, les protéines et les acides nucléiques (Halliwell *et al.*, 1985).

Pour faire face aux dérivés réactifs de l'oxygène, les plantes ont élaboré des systèmes enzymatiques et non-enzymatiques de protection antioxydante (Mittler, 2002). L'intensification de l'activité des enzymes antioxydantes constitue une réponse adaptative au stress salin (Wang *et al.*, 2009). Ainsi, l'induction du superoxyde dismutase est perçue comme le premier moyen de défense contre ces dérivés en provoquant une réaction de dismutation de O_2^- en H_2O_2 et O_2 . La transformation du H_2O_2 en H_2O et O_2 est assurée par la catalase (CAT) et les peroxydases (POD) (Gratao *et al.*, 2005) chez *Medicago sativa*. D'après Arab et Ehsanpour (2006), le traitement des graines d'une légumineuse avec de l'acide ascorbique augmente la résistance au sel.

Il existe une corrélation positive entre le maintien d'un niveau élevé d'activité antioxydante, la réduction de la peroxydation des lipides, la préservation de la stabilité des membranes cellulaires des nodules et, finalement, la conservation d'une biomasse nodulaire importante. Selon Mhadhbi *et al.* (2004), les symbioses pois chiche-rhizobia qui présentent la plus grande tolérance au stress salin ont montré les niveaux d'activité peroxydase les plus élevés. Aussi, (Tejera *et al.*, 2004) ont observé que l'activité accrue de SOD mesurée dans les nodules de l'haricot soumis à la salinité était à l'origine du renforcement de la tolérance.

5.5. Induction des phytohormones

Les phytohormones comme l'Acide Abscissique (ABA), l'Acide Indolacétique (AIA), l'Acide Gibbérellique (AG) et les Cytokinines jouent un rôle dans le contrôle de la réaction des plantes à la salinité, aidant ainsi à diminuer l'impact négatif de ce stress. (**Javid et al.,(2011)**) ont observé que l'ABA est primordiale dans la transmission des signaux de réponse adaptative des plantes face aux stress. L'ABA est générée dans les racines en réaction à une réduction du potentiel hydrique du sol et acheminée vers les feuilles où elle se lie à des récepteurs situés sur la membrane plasmique des cellules stomatiques (**Babu et al., 2012**). Selon (**Fatemeh et al. 2012**), la pulvérisation de phytohormones, en particulier AG, sur les feuilles favorise la croissance dans des conditions de salinité. Il a été découvert que l'influence inhibitrice du NaCl sur la photosynthèse, le développement et le déplacement des produits de la photosynthèse était atténuée par l'ABA (**Popova, 1995**). Selon une étude réalisée sur *Phaseolus vulgaris* L., (**Saeidi-Sar et al., 2012**) ont observé que l'interaction entre l'acide ascorbique et AG réduisait les niveaux de MDA et de H₂O₂. L'effet combiné de ces substances a rehaussé la teneur en protéines et l'activité des enzymes antioxydantes dans les plants de haricot soumis à un stress salin.

6. Les paramètres morpho-physiologiques comme indicateur de stress salin

6.1. Paramètres morphologiques

Des études ont montré que la salinité entraîne plusieurs modifications anatomiques de la feuille chez diverses espèces végétales. Une augmentation de la salinité provoque une hausse de l'épaisseur de l'épiderme, de l'épaisseur mésophyllienne, de la longueur des cellules palissadiques et des diamètres des cellules palissadiques et spongieuses dans les feuilles du haricot, du coton et de l'*Atriplex* (**Longstreth et Nobel, 1979**). Cependant, les feuilles de *Brugueira parviflora* traitées par NaCl ont montré une diminution significative de l'épaisseur épidermique et mésophyllienne ainsi que des espaces intercellulaires (**Parida et al., 2004**).

D'autres études ont montré également que la salinité a un impact notable sur l'expansion des racines végétales. Selon **Läuchli et Epstein (1990)** ainsi que **Bayuelo et al. (2002)**, elle tend à augmenter le rapport PR/PA. Effectivement, les plantes montrent un

développement racinaire significatif même en présence d'une forte salinité, et l'augmentation subséquente du rapport PR/PA semble liée à une meilleure résistance au sel. **Kafkai (1991)**, suggère que sous contrainte saline, la plante dépense plus d'énergie photosynthétique pour maintenir un statut hydrique élevé et pour la production de racines en vue de la recherche d'eau et/ou la réduction de la perte d'eau.

Ainsi, il apparaît que des signaux hormonaux déclenchent l'arrêt de la croissance des feuilles (**Munns, 2002**) et qu'une proportion significative de la photosynthèse est alors redistribuée à la croissance des racines. C'est une des réactions anatomiques primordiales aux stress osmotiques chez plusieurs espèces, dont l'aspect adaptatif semble indéniable étant donné qu'une hausse du rapport masse racines/masse foliaire optimise la superficie d'absorption de l'eau en rétrécissant la surface d'évaporation (**Munns, 2002**).

6.2. Paramètres physiologiques

Des études ont montré qu'une surabondance de sel dans le protoplasme provoque des changements dans l'équilibre ionique, conduisant à une diminution de la production d'énergie par les processus de phosphorylation et de photorespiration. L'assimilation de l'azote ainsi que plusieurs voies métaboliques sont altérées. Lorsque la plante dépasse le seuil tolérable de concentration en sel, des dysfonctionnements se manifestent au niveau de la photosynthèse sous l'effet du sel dans le stroma des chloroplastes qui perturbe le transport des électrons. L'absorption de minéraux tels que le potassium, les nitrates ou le calcium est aussi diminuée. La plante manifeste du stress en produisant des anthocyanes ou en détruisant la chlorophylle. Bien que chez certaines halophytes, un apport modeste de sel favorise la croissance, ce phénomène est cependant restreint par un seuil de tolérance. Des stress intenses mènent au nanisme et à la suppression de la croissance. Les feuilles commencent à se durcir avant même d'avoir achevé leur développement et croissance, exposant ainsi l'ensemble de l'organisme à un dépérissement rapide (**Ben-Hayyim et al., 1989; Speer et Kaiser, 1991**).

En ce qui concerne le poids frais et sec des parties aériennes et souterraines, le stress salin induit une réduction significative de ces paramètres chez le blé dur. Cette diminution devient d'autant plus marquée que l'intensité de la contrainte saline augmente (**Belkacemi & Bouchakour, 2015**). Selon **Ferrara et al. (2011)**, la réduction de la matière fraîche sous stress salin est attribuée à une baisse du contenu en eau des feuilles ainsi qu'à une

diminution du potentiel osmotique chez les plantes soumises à ce stress.

Par ailleurs, la réduction de la teneur en eau, résultant de la baisse de l'absorption hydrique causée par la salinité, entraîne la fermeture des stomates foliaires (**Tabaeizadeh, 1998**). Ce phénomène exerce un impact négatif sur d'autres processus physiologiques essentiels, notamment la photosynthèse (**Ykhlef & Djekoun, 2000**).

Une étude portant sur l'influence du NaCl sur la croissance de jeunes plantules de deux espèces spontanées du genre *Pistacia* (*P. lentiscus* et *P. atlantica*) a révélé une diminution du taux de survie, de la biomasse fraîche ainsi que de la longueur de la tige chez les deux espèces exposées. Ces résultats confirment que la salinité constitue l'un des principaux stress abiotiques limitant la croissance et la productivité des plantes. (**Merbah et al., 2021**).

6.3. Réponses biochimiques aux stress salin

En cas de stress salin, selon **Lepengue et al. (2012)**, la concentration en chlorophylle s'accroît à faible dose de NaCl, mais diminue lorsque les concentrations salines augmentent **Afroz et al. (2005)**. Toutefois, l'accumulation de composés osmorégulateurs (tels que la proline) entraîne une diminution du potentiel osmotique, favorisant ainsi la préservation du potentiel de turgescence (**Mekliche et al., 2003**). L'osmorégulation protège principalement les membranes et les systèmes enzymatiques, notamment dans les organes en développement (**Ottow et al., 2005**). Plusieurs auteurs considèrent également les sucres comme de bons régulateurs osmotiques. Ils peuvent avoir une importance significative dans l'adaptation osmotique et la réaction des plantes au stress osmotique, ils sont cruciaux pour la sauvegarde des membranes contre la déshydratation (**Benderradji et al., 2010**; **Chiahi et Louhichi, 2020**).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Chapitre II : MATERIEL ET METHODES

1. Matériel

1.1. Le sol

Le sol utilisé dans cette expérimentation provient de la région de Timezrit, située dans la wilaya de Béjaïa, au nord-est de l'Algérie (36°35'52.32948"N ; 4°47'21.83244"E), à une altitude de 824 mètres. L'échantillonnage a été effectué à une profondeur de 0 à 20 cm dans une parcelle cultivée en oliviers. Le sol a ensuite été conditionné dans des sachets en plastique et transporté au laboratoire pour analyses.

Avant les analyses physico-chimiques, le sol a été soumis à une série de traitements préparatoires : séchage à l'air libre pendant sept jours, fragmentation manuelle des mottes afin de préserver la structure des agrégats, puis tamisage à l'aide d'un tamis à mailles carrées de 2 mm. La fraction fine ainsi obtenue a été conservée dans des flacons plastiques hermétiques.

Des analyses physico-chimiques ont ensuite été réalisées sur cette fraction, en vue de déterminer les principales caractéristiques pédologiques du sol. Ces analyses ont été effectuées selon les méthodes recommandées par **Sakar et Haldar (2005)**, et ont porté sur les paramètres suivants:

- Analyse granulométrique (pour la détermination de la texture)
- Salinité (évaluée par la mesure de la conductivité électrique, CE)
- pH du sol
- Teneur en humidité
- Dosage de l'azote total (N)
- Dosage du carbone total (C)
- Dosage du phosphore assimilable (P)
- Bases échangeables : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+)

1.2. Le matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est constitué de *Vigna unguiculata*, communément appelé niébé, haricot dolique ou haricot à œil noir. Les graines ont été fournies par un commerçant-agriculteur de la région de Tizi-Ouzou (Algérie) et ont été utilisées pour la production des plantules destinées à l'expérimentation (Figure 2).



Figure 2 : photographie des graines de l'haricot dolique (*Vigna unguiculata*).

Vigna unguiculata est une plante à fleurs appartenant à la famille des Fabaceae et au genre *Vigna*. Elle est largement cultivée, notamment dans les régions tropicales et subtropicales, pour ses graines riches en protéines ou pour ses gousses consommées comme légume. Cette légumineuse représente ainsi une source alimentaire et économique importante, en particulier dans les systèmes agricoles à faibles intrants.

D'un point de vue taxonomique, la classification systématique du niébé, selon Padulosi et Ng (1997), est la suivante :

Règne : Plantae

Sous-règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida (Dicotylédones)

Sous-classe : Rosidae

Ordre : Fabales

Famille : Fabaceae

Sous-famille : Faboideae

Tribu : Phaseoleae

Sous-tribu : Phaseolinae

Genre : *Vigna*

Espèce : *Vigna unguiculata* (L.) Walp., 1843

1.3. L'eau d'irrigation

L'eau d'irrigation utilisée dans cette expérimentation provient d'une source naturelle située au village d'Idnanane, dans la commune de Feraoun, daïra d'Amizour, wilaya de Béjaïa (36°33'32.094"N ; 4°50'30.498"E, à 609 m d'altitude). Cette eau a été recueillie dans un

jerrycan en plastique puis soumise à une analyse physico-chimique approfondie. Les paramètres analysés comprennent le pH, la conductivité électrique (CE), le résidu sec à 105°C, la teneur en sels dissous (TDS), la salinité ainsi que les concentrations en cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+). Les trois premiers cations sont nécessaires pour le calcul du rapport d'adsorption du sodium (SAR – *Sodium Adsorption Ratio*), un indicateur essentiel permettant d'évaluer les risques liés à la présence excessive de sodium dans l'eau d'irrigation, notamment son potentiel à entraîner l'alcalinisation et la dégradation de la structure des sols. Le SAR est défini selon l'équation suivante :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}} \quad ; \quad (\text{Na}^+, \text{Mg}^{2+}, \text{Ca}^{2+} \text{ exprimés en méq/l}) \quad (\text{Clavet, 2003}).$$

2. Méthodes

2.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique vise à déterminer la répartition des différentes fractions du sol (sables, limons et argiles), classées selon l'échelle d'Atterberg en fonction de leurs diamètres. Elle permet d'établir la texture du sol, paramètre fondamental en agronomie. La méthode utilisée est celle de la pipette de Robinson, suivant le protocole international modifié.

Cette méthode est basée sur la destruction de la matière organique par l'eau oxygénée (20 volumes); puis dispersion des agrégats du sol à l'aide d'une solution de pyrophosphate de sodium à 40 %.

Le prélèvement par pipette des particules fines ($< 2 \mu\text{m}$, correspondant aux argiles et limons fins), est effectué à des profondeurs et à des temps définis, selon la loi de sédimentation de Stokes. Les fractions grossières ($> 50 \mu\text{m}$), telles que les sables grossiers, sables fins et limons grossiers, sont séparées par tamisage, après élimination des particules fines par une série de siphonages successifs.

Enfin, les pourcentages relatifs de chaque fraction sont projetés sur le triangle textural de l'USDA (United States Department of Agriculture) afin de déterminer la texture du sol (**Annexe 1**).

2.2. Le pH

Le pH du sol a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre à électrode de verre, préalablement étalonné à l'aide de solutions tampons. Deux types de pH ont été déterminés :

Le pH_{eau} , représentant l'acidité actuelle du sol, mesuré dans une suspension sol/eau au rapport 1:2,5 (p/v) ;

Le pH_{KCl} , représentant l'acidité potentielle, obtenu à partir d'une suspension sol/KCl (1M) dans les mêmes proportions 1:2,5 (p/v).

Ces mesures permettent d'évaluer à la fois l'acidité réelle et la capacité du sol à libérer des ions H^+ échangeables, donnant une indication sur sa réserve acide.

2.3. L'humidité

L'humidité du sol a été déterminée selon la méthode gravimétrique, qui consiste à mesurer la perte en eau d'un échantillon de sol après séchage. Une quantité connue de sol frais est pesée, puis placée dans une étuve à 105°C pendant au moins 48 heures, jusqu'à obtention d'un poids constant.

L'humidité gravimétrique est ensuite exprimée en pourcentage (%) selon la formule suivante :

$$H(\%) = \frac{P1 - P2}{P2 - P3} \times 100$$

Avec:

H: humidité exprimée en %

P1: poids du sol frais (g)

P2: poids du sol sec (g)

P3: poids de la tare (g)

2.4. Conductivité électrique

La conductivité électrique du sol (CE) a été mesurée à l'aide d'un conductimètre de paillasse. L'analyse a été réalisée sur une suspension de terre fine dont le rapport sol/eau = 1/5 (p/v). Là CE du sol est exprimé en microsiemens par centimètre ($\mu\text{s/cm}$) et reflète la concentration en ions dissous dans la solution du sol. Cette mesure permet d'évaluer le degré de salinité du sol, facteur pouvant fortement influencer la croissance des plantes.

2.5. Dosage du carbone total

Le carbone organique du sol a été dosé selon la méthode Anne modifiée, telle que décrite par **Dabin (1967)**. Cette méthode repose sur l'oxydation à chaud de la matière organique présente dans le sol en dioxyde de carbone (CO_2), à l'aide d'un mélange de bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) et d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4). L'excès de bichromate non

réduit est ensuite dosé à froid par une solution de sel de Mohr (sulfate double de fer et d'ammonium) à 0,2 N, en présence de diphénylamine servant d'indicateur.

La teneur en carbone organique total (C) est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$C(\%) = \frac{(Ve - Vt) \times 0,615 \times 100}{P}$$

Avec :

$C(\%)$: teneur en carbone organique total ;

Ve : volume de sel de Mohr utilisé pour titrer l'échantillon (en mL) ;

Vt : volume de sel de Mohr utilisé pour le blanc (témoin) (en mL) ;

P : masse de l'échantillon de sol (en grammes) ;

Le taux de matière organique (MO) est ensuite estimé en multipliant le taux de carbone organique par le facteur (1,724), selon la formule : $MO(\%) = C\% \times 1,724$

2.6. Dosage du l'azote total

La teneur en azote total du sol a été déterminée selon la méthode classique de Kjeldahl, qui consiste à minéraliser la matière organique à chaud à l'aide d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4), en présence d'un mélange catalyseur composé de sulfate de cuivre ($CuSO_4$), de sulfate de potassium (K_2SO_4) et de sélénium (Se).

Après minéralisation, l'azote ammoniacal (NH_4^+), sous forme combinée, est libéré par l'ajout de soude concentrée (NaOH à 40%), ensuite distillé à l'aide d'un distillateur automatique UDK 142 (VELP Scientifica), puis recueilli dans une solution d'acide borique à 4%. Le dosage est réalisé par titration à l'acide sulfurique (H_2SO_4 , N/50) en présence du réactif de Tashiro comme indicateur coloré. La teneur en azote total (N) est exprimée en pourcentage (%) selon la formule suivante : $N(\%) = (V_E - V_T) \times 0,14$

Avec :

$N(\%)$: teneur en azote total du sol ;

Ve : volume d' H_2SO_4 (N/50) utilisé pour le titrage de l'échantillon (en mL) ;

Vt : volume d' H_2SO_4 (N/50) utilisé pour le témoin (en mL).

2.7. Dosage du phosphore assimilable

La teneur en phosphore assimilable (P_2O_5) du sol a été déterminée selon la méthode de **Joret et Hébert (1955)**. Cette méthode consiste à extraire le phosphore disponible à l'aide d'une solution d'oxalate d'ammonium [$(NH_4)_2C_2O_2$] à 0,2 N, ajustée à un pH de 7.

Après extraction, le dosage du phosphore est réalisé par colorimétrie. L'ion orthophosphate réagit avec le molybdate d'ammonium en milieu acide pour former un complexe phosphomolybdique. Ce dernier, en présence d'acide ascorbique, développe une coloration bleue mesurée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 650 nm.

Les concentrations en phosphore assimilable sont déterminées à l'aide d'une courbe d'étalonnage construite à partir de solutions étalons de concentrations connues (**Annexe 2**), et sont calculées selon la formule suivante :

$$P_2O_5(ppm) = X \times \frac{U}{v} \times \frac{V}{P}$$

Avec :

X : concentration lue sur la courbe d'étalonnage (en ppm) ;

U : volume final de la solution colorée (10 mL) ;

v : volume de la prise d'essai pour la colorimétrie (1,5 mL) ;

V : volume total de la solution d'extraction (250 mL) ;

P : masse de sol utilisée (10 g).

2.8. Dosage des bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+)

Les bases échangeables du sol ont été déterminées après extraction à l'aide d'une solution d'acétate d'ammonium (CH_3COONH_4) 1N, ajustée à un pH de 7.

Les teneurs en calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) échangeables ont été analysées par titration complexométrique à l'EDTA sur le percolat obtenu après extraction.

Les concentrations en potassium (K^+) et sodium (Na^+) ont été quantifiées par photométrie à flamme (appareil Jenway), à l'aide de solutions standards spécifiques à chaque élément (**Annexes 3** pour les courbes d'étalonnage).

3. Effet de l'eau de source sur les paramètres morpho-physiologiques de l'haricot dolique (*Vigna unguiculata* L.)

3.1. Conduite de l'essai

L'essai expérimental a été mené au laboratoire de Pédologie de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Abderrahmane-Mira de Béjaïa. Les différentes étapes de l'expérimentation ont été rigoureusement planifiées afin de garantir la fiabilité et la

reproductibilité des résultats. Le protocole expérimental a consisté à cultiver les plants de *Vigna unguiculata* dans des pots contenant un sol préalablement analysé, sous des conditions contrôlées, et à appliquer les traitements définis selon les objectifs de l'étude.

3.1.1. Préparation des graines

Afin d'assurer une homogénéité de l'échantillon et de minimiser la variabilité des résultats liée aux réserves embryonnaires, les semences de *Vigna unguiculata* ont été triées manuellement selon leur intégrité visuelle (absence de défauts, blessures ou anomalies). Chaque graine a ensuite été pesée individuellement à l'aide d'une balance de précision, puis classée par intervalles de poids.

L'analyse de la répartition pondérale (**Annexe 4**), présentée sous forme d'histogramme, a permis d'identifier la classe modale la plus représentative de l'ensemble du lot de 500 graines. Ce procédé a conduit à la sélection des graines appartenant à la classe [0,161 – 0,240 mg], qui a été retenue pour toutes les expérimentations ultérieures.

3.1.2. Test de germination des graines

Pour évaluer leur potentiel de germination dans des conditions contrôlées, les graines de *Vigna unguiculata* appartenant à la classe [0.161-0.24 mg] sont désinfectées à l'eau de javel à 3% pendant 3 minutes, puis abondamment rincées à l'eau distillée stérile. Lors du dernier rinçage, les graines sont laissées gonfler pendant une heure dans de l'eau distillée stérile, avant d'être réparties uniformément dans des boîtes de Pétri dont le fond est tapissé de papier filtre imbibé d'eau distillée stérile

L'essai a porté sur 50 graines, réparties en 5 répétitions de 10 graines par boîte. Les boîtes ainsi préparées sont incubées à température ambiante du laboratoire, à l'obscurité.

Le dénombrement des graines germées est effectué quotidiennement, et le pourcentage cumulé de germination est calculé. Le critère de germination retenu est la percée des téguments par la radicule de l'embryon (**Benmahioul et al., 2010**).

3.1.3. Préparation des eaux d'irrigation

Les eaux d'arrosage utilisées dans cette étude ont été préparées à partir d'une eau de source présentant une conductivité électrique élevée, par addition d'eau distillée.

Quatre (04) qualités d'eau d'irrigation, correspondant à quatre traitements, ont été utilisées dans cette expérimentation :

- **Traitement 1** ou **Témoin (T0)** : eau distillée pure, de CE = 13,09 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- **Traitement 2 (T1)** : eau de source diluée au quart avec de l'eau distillée (soit 25 % eau de source et 75 % eau distillée), de CE = 1148 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- **Traitement 3 (T2)** : eau de source diluée de moitié avec de l'eau distillée (50/50), de CE = 2050 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- **Traitement 4 (T3)** : eau de source pure, de CE = 4850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ $\mu\text{S}/\text{cm}$.

3.1.4. Préparation des pots

Le sol, préalablement débarrassé des cailloux et des débris organiques, est réparti dans des pots en PVC d'un diamètre de 6 cm et d'une hauteur de 17 cm, à raison de 425 g de sol par pot. Afin de permettre l'évacuation de l'excès d'eau et d'éviter l'asphyxie des plantules, des trous de drainage sont pratiqués à la base des pots, puis recouverts d'une couche de 25 g de graviers fins.

3.1.5. Mise en culture des plantes

Pour la production des plantules, les graines de *Vigna unguiculata* appartenant à la classe de poids [0,201–0,240 mg] sont mises en germination dans des alvéoles remplies de terreau pendant une période de 10 jours. À l'issue de cette période, les plantules présentant une taille homogène sont sélectionnées. Afin d'éviter le dessèchement des graines, les alvéoles sont arrosées régulièrement avec de l'eau distillée jusqu'au développement complet des plantules.

En date du 12 avril 2025, les plantules présentant deux feuilles cotylédonaire bien développées sont soigneusement transplantées dans des pots, à raison d'une plantule par pot, et à une profondeur de 2 cm. Un léger tassement du sol est effectué afin d'assurer un bon contact entre les racines et le substrat. Après la transplantation, les pots sont immédiatement irrigués avec de l'eau distillée afin de garantir une hydratation uniforme et de créer un environnement favorable à la reprise et à la croissance des jeunes plants. Pour cela, un arrosage régulier est effectué avec de l'eau distillée, à hauteur de 60 % de la capacité au champ, déterminée en début d'expérimentation.

3.1.6. Dispositif expérimental

L'essai a été conduit selon un dispositif expérimental en blocs complets. Il comprend quatre (04) traitements et sept (07) répétitions, soit un total de 28 pots. Les traitements correspondent aux quatre niveaux de salinité des eaux d'irrigation retenus dans cette étude, sont ceux décrits précédemment, à savoir : T0, T1, T2 et T3.

3.1.7. Conditions de culture

Afin d'assurer une croissance optimale des plantules de *Vigna unguiculata*, les pots sont placés à l'extérieur du laboratoire, en bordure de fenêtres, de manière à maximiser l'exposition à la lumière naturelle, essentielle au bon fonctionnement de la photosynthèse et à la fluorescence chlorophyllienne (Figure 3).



Figure 3 : Dispositif de culture de *Vigna unguiculata* L.

L'irrigation proprement dite a débuté 15 jours après la reprise des plantules, soit au stade d'apparition des deux premières feuilles vraies. À partir de ce moment, les pots sont maintenus à un niveau d'humidité avoisinant 60 % de la capacité au champ (Hcc), par des arrosages réguliers, un jour sur deux, à l'aide des quatre solutions d'irrigation présentant des niveaux de conductivité électrique (CE) différents.

3.2. Paramètres mesurés

Afin d'évaluer l'effet des différents traitements sur *Vigna unguiculata*, plusieurs paramètres ont été mesurés après 45 jours de culture. Il s'agit de :

Paramètres biométriques : croissance en longueur (hauteur de la plante et longueur racinaire), biomasse fraîche et sèche des parties aériennes et racinaires, ainsi que la surface foliaire ;

Paramètres physiologiques : dosage des pigments chlorophylliens (chlorophylle a, b, totale et caraténoïdes) et du taux de proline.

3.2.1. Surface foliaire

La surface foliaire est déterminée en sélectionnant au hasard une feuille au stade 4 feuilles sur chaque plantule (une par pot). Les mesures ont été réalisées selon la méthode décrite par **Paul et al. (1979)**, qui repose sur les étapes suivantes :

La feuille est d'abord placée sur du papier calque ;

Les contours sont soigneusement découpés ;

La partie découpée représentant la feuille est pesée (Pf) ;

Le poids (Pp) d'un carré de surface connue (Sq) découpé dans le même papier est également déterminé par pesée ;

La surface foliaire (SF) est ensuite calculée à l'aide de la formule suivante :
$$SF = \frac{Pf \times Sq}{Pp}$$

3.2.2. Hauteur des parties aériennes et racinaires des plantes

À la fin de l'expérimentation, les plantes sont soigneusement extraites des pots, puis séparées en deux parties (aérienne et racinaire) à l'aide d'une lame, au niveau du collet. Les racines sont ensuite lavées délicatement à l'eau de robinet afin d'éliminer les particules de sol résiduelles, puis séchées à l'aide de papier absorbant.

La hauteur des parties aériennes est mesurée depuis la base de la tige jusqu'à l'extrémité supérieure de la plante, tandis que la longueur des racines est mesurée à partir du collet jusqu'à l'extrémité la plus longue du système racinaire. Les mesures sont effectuées à l'aide d'une règle graduée et exprimées en millimètres (mm).

3.2.3. Biomasse fraîche et sèche des parties aériennes et racinaires des plantes

Les parties aériennes et racinaires de chaque plantule ont été pesées séparément à l'aide d'une balance de précision afin de déterminer leur poids frais (PF). Après pesée, les échantillons ont été emballés dans des papiers aluminium numérotés, puis placés dans une étuve à 70°C pendant 72 heures pour obtenir leur poids sec (PS).

Le taux de matière sèche (MS) des parties aériennes et racinaires, exprimé en pourcentage [%], est ensuite calculé selon la formule suivante :
$$MS(\%) = \frac{PS}{PF} \times 100$$

Avec :

MS : Taux de matière sèche (%) ; PF : Poids frais (g) ; PS : Poids sec (g)

3.2.4. Dosage des pigments chlorophylliens

Les pigments chlorophylliens sont dosés selon la méthode décrite par **Rajalakshui et Bame (2015)**. L'extraction est réalisée en incubant 0,1g de feuilles fraîches dans 7 ml de DMSO (diméthylsulfoxyde) à 65°C pendant 30 minutes. La densité optique (DO) des extraits obtenus est ensuite mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre, après étalonnage avec du DMSO pur, aux longueurs d'onde de 470 nm; 645 nm et 663 nm.

Les teneurs en chlorophylle **a**, chlorophylle **b** et chlorophylle totale, exprimées en mg/g de matière végétale fraîche (MVF), sont calculées à partir des équations d'**Arnon (1949)**.

$$\text{Chlorophylle } a \text{ (mg/g MVF)} = \frac{[(12,7 \times A_{663}) - (2,69 \times A_{645})] \times V}{1000 \times P}$$

$$\text{Chlorophylle } b \text{ (mg/g MVF)} = \frac{[(22,9 \times A_{645}) - (4,68 \times A_{663})] \times V}{1000 \times P}$$

$$\text{Chlorophylle } total \text{ (mg/g MVF)} = \frac{[(20,21 \times A_{645}) + (8,02 \times A_{663})] \times V}{1000 \times P}$$

Par ailleurs, la teneur totale en caroténoïdes (xanthophylles + carotènes) a été estimée selon la méthode de **Lichtenthaler et Wellburn (1985)**, en utilisant les extraits chlorophylliens mesurés à 470 nm au spectrophotomètre.

$$\text{Caraténoïdes totaux (mg/g MVF)} = Cx + c = \frac{(1000 \times A_{470} - 1,82 \times Ca - 85,02 \times Cb)}{198}$$

Avec :

A : Densité optique (absorbance) de l'échantillon mesurée à 663 nm, 645 nm et 470 nm ;

V : Volume de l'extrait (DMSO), en mL (ici 7 mL) ; *P* : Poids frais de l'échantillon, en mg (100 mg) ;

Ca : Concentration en chlorophylle a ; *Cb* : Concentration en chlorophylle b ; *Cx+c* : Concentration totale en caroténoïdes (xanthophylles + carotènes).

3.2.5. Dosage de la proline foliaire

Les teneurs en proline foliaire ont été déterminées selon la méthode décrite par **Bates et al. (1973)**, à partir de feuilles de plantes témoins et traitées.

L'extraction de la proline a été réalisée en broyant 0,1 g de feuilles fraîches dans 3 mL d'une solution d'acide sulfosalicylique à 3 %. Le mélange a ensuite été incubé pendant 30 minutes à 100 °C, puis centrifugé à 5000 tr/min pendant 5 minutes.

Le dosage s'effectue en incubant 0,2 mL du surnageant avec 0,4 mL d'eau distillée et 2 mL d'un réactif composé de 30 mL d'acide acétique glacial, 20 mL d'eau distillée et 0,5 g de ninhydrine. Le mélange réactionnel est incubé au bain-marie à 100 °C pendant 1 heure. Après

refroidissement sur glace, l'extraction de la proline colorée est réalisée avec 6 mL de toluène, suivi d'une agitation vigoureuse pendant 15 à 20 secondes.

La phase organique (toluène) contenant le chromophore est ensuite récupérée et la densité optique est mesurée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 520 nm, contre un blanc au toluène.

Les concentrations de proline sont déterminées à partir d'une courbe d'étalonnage établie à partir de solutions standards de proline de concentrations connues (**Annexe 5**), et sont exprimées en microgrammes par gramme de matière végétale fraîche ($\mu\text{g/MVF}$).

3.2.6. Évolution de la salinité du sol après récolte

Afin d'évaluer l'évolution du niveau de salinité du sol à la fin de l'expérimentation, des échantillons de sol ont été prélevés après l'arrachage des plantes pour chacun des traitements. Ces échantillons ont été séchés à l'air libre, puis analysés. La conductivité électrique (CE) de chaque sol a été déterminée conformément à la méthode décrite précédemment, permettant ainsi de mesurer l'accumulation éventuelle de sels dans le substrat en fonction des différents traitements d'irrigation.

3.3. Analyses statistiques

Les données recueillies ont été soumises à une analyse de la variance (ANOVA) à un facteur de classification à l'aide du logiciel statistique XLSTAT (version 2.0, 2016). Afin d'affiner l'interprétation des résultats et d'identifier les groupes homogènes, les moyennes présentant des différences significatives ont été comparées à l'aide du test de Newman-Keuls, au seuil de signification de 5 %.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Chapitre III. RESULTATS ET DISCUSSION

1. Caractérisation physico-chimique du sol

Les résultats des principales caractéristiques physique et chimiques du sol retenu à l'étude sont consignés dans le tableau V.

Tableau V : Résultats des analyses physico-chimiques du sol de Timezrit

Paramètres	Résultats
Analyse granulométrique	
Argiles (%)	32,63
Limons fins (%)	26,09
Limons grossiers (%)	7,97
Sables fins (%)	9,76
Sables grossiers (%)	23,53
Texture	Limono-argileux
Analyse physico-chimique	
Humidité (%)	18,05
pH _{eau}	8,3
pH _{KCl}	6,86
CE (μS/cm à 25°C)	58,8
Couleur	Rouge (2,5YR5/6)
Azote total (%)	0,15 ± 0,01
Carbone organique	1,35 ± 0,13
Matière organique (%)	2,32 ± 0,23
C/N	8,81 ± 0,47
P ₂ O ₅ (ppm)	5,13 ± 0,42
Cations échangeables (en meq/100g de sol sec)	
Na ⁺	0,83 ± 0,04
K ⁺	0,33 ± 0,008
Ca ²⁺	11,56 ± 0,51
Mg ²⁺	3,21 ± 0,17

Il ressort des résultats obtenus que le sol de Timezrit, avec une humidité modérée de 18%, est de couleur rouge (2,5YR5/6, selon le code de Munsell), typique des sols ferrallitiques ou riches en oxydes de fer, souvent bien drainés. L'analyse granulométrique révèle une texture limono-argileuse, qui combine les propriétés des limons et des argiles. Cette composition confère au sol une bonne capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs, notamment en raison de la proportion notable d'argiles (32,63%). Par ailleurs, la teneur relativement élevée en limons (34,06%), peut entraîner un risque de battance. Toutefois, la présence d'une proportion suffisante de sables (33,29%) assure un drainage adéquat, une aération

satisfaisante ainsi qu'une bonne circulation de l'eau, ce qui favorise un enracinement optimal, et, par conséquent, un développement harmonieux des plantes.

Le sol étudié présente une légère alcalinité ($\text{pH}_{\text{eau}} = 8,3$) et ne contient pas de calcaire, comme en témoigne l'absence de réaction à l'acide chlorhydrique.

La conductivité électrique (CE) constitue un indicateur du niveau de salinité du sol. Selon l'échelle de salure établie par **Durand (1983)** (Tableau VI), le sol étudié, présentant une CE relativement faible ($\text{CE} = 58,8 \mu\text{S/cm}$), est classé comme non salin. Ce faible niveau de salinité suggère que le sol ne présente pas de risque de salinité excessive, un facteur généralement favorable au développement des plantes, car il n'engendre pas de toxicité saline.

Tableau VI : Classe de la qualité des sols selon l'échelle de **Durand J.H. (1983)**.

Classe	CE ($\mu\text{S/cm}$ à 25°C)	Qualité des sols	Effet sur le rendement
Classe I	0 à 500	Non salé	Négligeable
Classe II	500 à 1000	Légèrement salé	Diminution du rendement des cultures très sensibles au sel
Classe III	1000 à 2000	Salé	Diminution du rendement des cultures de la plupart des cultures
Classe IV	2000 à 4000	Très salé	Seules les cultures résistantes donnent un rendement satisfaisant
Classe V	Plus de 4000	Extrêmement salé	Seules quelques cultures donnent des rendements satisfaisants

Les teneurs en carbone total ($\%C = 1,35$) et en matière organique ($\%MO = 2,32$) indiquent un sol moyennement riche en matière organique, conformément aux critères définis par **Baize (1988)**. En revanche, la teneur en azote total est faible (0,15 %), ce qui, selon **Dabin (1970)**, classe ce sol parmi les sols pauvres en azote, ceux ayant un taux inférieur à 0,5 %. Par ailleurs, le rapport C/N, inférieur à la plage optimale de 10 à 12, suggère une décomposition rapide de la matière organique. Cette situation peut entraîner un risque de « faim d'azote », dû à une immobilisation de l'azote par les micro-organismes lors de la minéralisation.

Le phosphore assimilable (P_2O_5) est présent en quantité modérée, avec une teneur de 5,13 ppm. Toutefois, son assimilation par les plantes peut être limitée en raison du pH relativement élevé du sol, qui réduit la disponibilité du phosphore.

Les teneurs en cations échangeables révèlent une dominance marquée de l'ion calcium (Ca^{2+}), représentant 72,56% de la somme des bases échangeables, suivi du magnésium (Mg^{2+}) avec 20,15%, du sodium (Na^+) avec 5,21%, et enfin du potassium (K^+) avec 2,07%. Cette

distribution de cations suggère une bonne réserve en éléments basiques, ce qui témoigne d'une fertilité chimique globalement satisfaisante du sol.

2. Caractérisation physico-chimique de l'eau d'irrigation

Les résultats consignés dans le tableau VII indiquent que le pH de l'eau d'irrigation analysée est neutre à légèrement alcalin, avec un pH= 7,55. Cette valeur se situe dans la plage normale de pH (6,5 à 8,5), ce qui traduit une eau chimiquement stable. Un tel niveau de pH est favorable à l'irrigation, car il n'affecte ni la structure du sol ni la disponibilité des nutriments pour les plantes (Ayers *et al.*, 1988).

Tableau VII : Résultats des paramètres physico-chimiques de l'eau de source d'Idnanane (Feraoun)

Paramètres	Résultats	Normes ⁽¹⁾
pH	7,55	6,5 à 8,5
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C)	4850	<2700
TDS (ppm)	1972	<1500
SAL (g/L)	2,1	-
P (ppm)	5,61	-
Na ⁺ (meq/L)	27,02	<9
K ⁺ (meq/L)	0,035	-
Ca ²⁺ (meq/L)	6,26	-
Mg ²⁺ (meq/L)	4,88	-
SAR	11,44	<9
Résidu sec à 105°C (mg/L)	3158	<1300

⁽¹⁾ : D'après la commission des experts de l'université de Californie 1974.

In (Ayers *et al.*, 1988)

La mesure de la conductivité électrique (CE) de l'eau permet d'évaluer sa charge globale en sels dissous. L'eau analysée présente une CE de 4850 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondant à une teneur élevée en solides dissous totaux (TDS) de 1972 ppm et à un résidu sec de 3158 mg/L. Ces valeurs confirment une forte concentration en minéraux dissous, traduisant une salinité extrêmement élevée selon l'échelle de **Durant (1983)** (Annexe 7), voire potentiellement nocive selon.

Selon les normes d'irrigation établies par la commission des experts de l'université de Californie 1974 (Ayers *et al.*, 1988), une CE supérieure à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un TDS supérieur à 1500 ppm et un résidu sec dépassant 1300 mg/L classent l'eau comme saline. Une telle eau peut entraîner, à long terme, une accumulation excessive de sels dans le sol, compromettant la croissance des cultures.

Par ailleurs, d’après le diagramme de Riverside (Figure 4), fondé sur les valeurs de CE et de l’indice d’adsorption du sodium (SAR), cette eau se situe à la limite supérieure de la classe C4S3. Cela indique un pouvoir d’alcalinisation élevé et un risque très important de salinisation, notamment dans les sols à texture fine et à forte capacité d’échange cationique, en particulier dans des conditions de faible lessivage.

Ainsi, cette eau n’est pas recommandée pour l’irrigation de toutes les cultures, notamment celles sensibles au sel. Son utilisation exige impérativement des pratiques de gestion adaptées, telles qu’un drainage efficace, afin de limiter les risques de dégradation des sols.

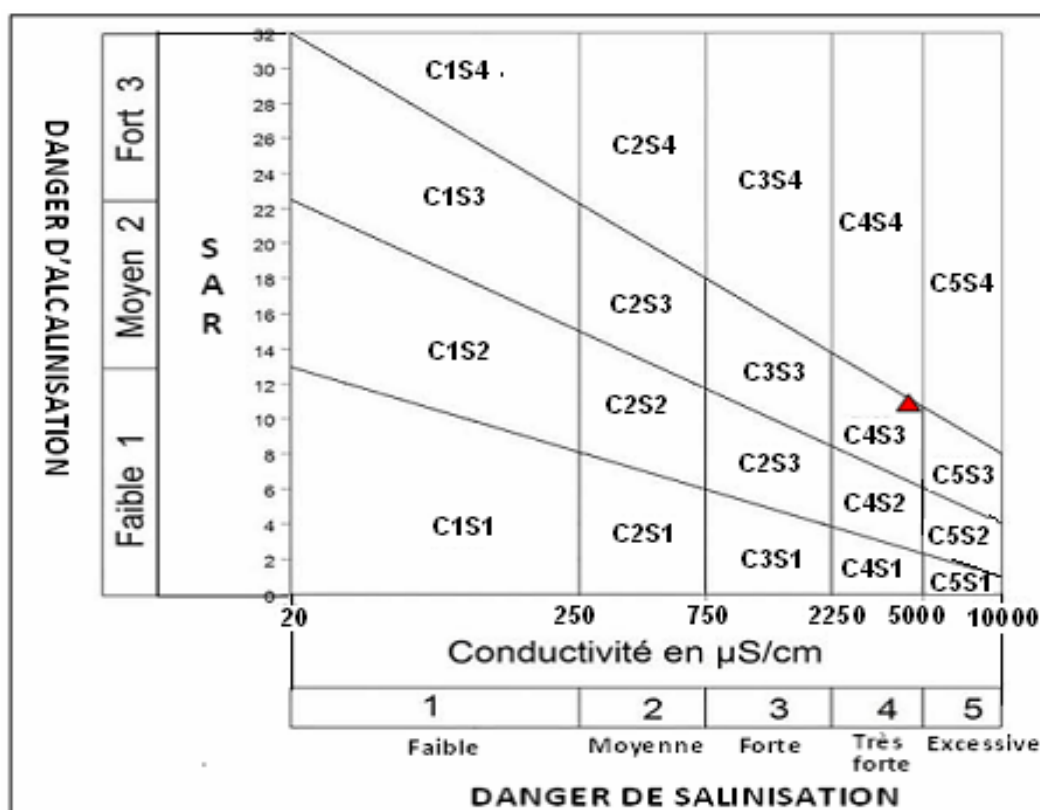


Figure 4 : Diagramme de Riverside (USSSL, 1954)

3. Effets de l'eau d'irrigation sur les paramètres morpho-physiologiques de *Vigna unguiculata*

De manière générale, l'eau d'irrigation utilisée dans le cadre de cette étude a eu un impact significatif sur les plantes de *Vigna unguiculata* cultivées en pots. Cet impact s'est manifesté par une diminution notable de la croissance et du développement de la plupart des plantes, affectant négativement certains paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques.

3.1. Hauteur des parties aériennes et racinaires

Après 45 jours de culture, la croissance en longueur des parties aériennes (Pa) et racinaires (Pr) de *Vigna unguiculata* est significativement influencée par la qualité de l'eau d'irrigation appliquée dans les trois traitements (T1, T2 et T3) en comparaison aux plantes témoins (T0) irriguées à l'eau distillée. Les résultats obtenus (Figure 5) indiquent que les traitements T1, T2 et T3 ont provoqué une inhibition progressive de la croissance en longueur des parties aériennes, avec des réductions respectives de 6,49 %, 13,78 % et de 14,19 %, comparativement au témoin T0. L'analyse statistique a permis de distinguer trois groupes significativement différents ($p < 0,05$).

Concernant la longueur des racines, une tendance similaire à celle observée pour les parties aériennes a été constatée. Les traitements T1, T2 et T3 ont entraîné des diminutions significatives de la longueur des parties racinaires, respectivement de 16,06%, 15,99%, et 14,43% par rapport aux plantes témoins T0. L'analyse statistique a permis de distinguer deux groupes significativement différents ($p < 0,05$). Il convient toutefois de noter que les longueurs racinaires observées pour les trois traitements (T1, T2 et T3) sont très proches les unes des autres et ne présentent pas de différence statistiquement significative.

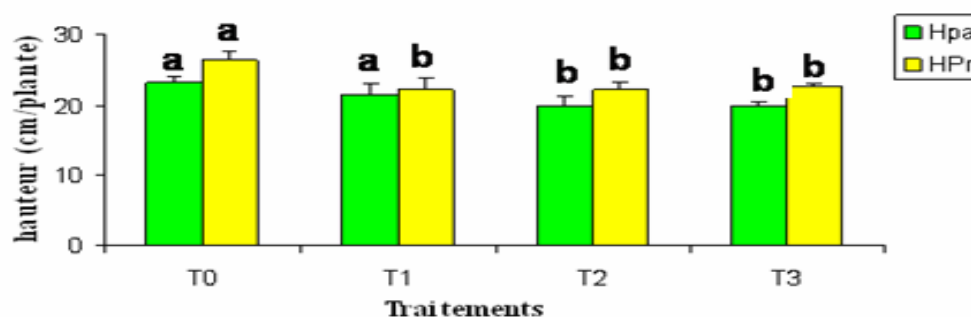


Figure 5 : Effet de l'eau d'irrigation sur la hauteur des parties aériennes et racinaires des plantes de *Vigna unguiculata* L.

3.2. Surface foliaire

L'eau d'irrigation a exercé un effet très marqué sur la surface foliaire de la plante étudiée (Figure 6). Les résultats de l'analyse de la variance ont révélé un effet très hautement significatif de l'eau d'arrosage sur cette variable (Annexe 6). Comme pour la hauteur des parties, la comparaison des moyennes indique la formation de trois groupes statistiquement distincts ($p < 0,05$).

Une réduction de la surface foliaire est observée dès l'application du traitement T1, correspondant à un stress salin induit par une eau de source diluée à 25%, entraînant une diminution d'environ 16,04%. Les réductions les plus marquées ont été enregistrées avec les traitements T2 (25,88%) et T3 (24,52%), comparativement aux plantes témoins (T0). Toutefois, il convient de souligner que les surfaces foliaires des plantes de niébé soumises au traitement T1 ne diffèrent pas significativement de celles observées sous les traitements T2 et T3.

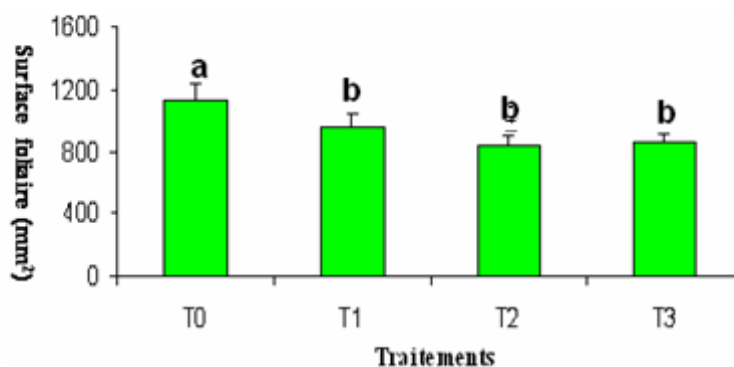


Figure 6 : Effet de l'eau d'irrigation sur la surface foliaire de *Vigna unguiculata*

3.3. Production de la biomasse

3.3.1. Poids frais et sec des parties aériennes et racinaires

La variation des poids des parties aérienne (Pa) et racinaire (Pr) de *Vigna unguiculata* selon les quatre traitements (T0, T1, T2 et T3) est présentée dans le tableau VIII.

Les résultats montrent que les poids frais des parties aériennes varient peu d'un traitement à l'autre. En effet, aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre les traitements ($p < 0,05$), ce qui suggère que la salinité des eaux d'irrigation, quel qu'en soit le niveau, n'a pas eu d'effet notable sur cette variable. En revanche, seules les plantes de niébé

arrosées avec l'eau de source (T3) présentent une diminution significative du poids sec des parties aériennes, estimée à 19,09 % par rapport aux plantes témoins (T0).

Tableau VIII : Effet de l'eau d'irrigation sur la biomasse des parties aériennes et racinaires des plantes de *Vigna unguiculata* L.

Traitements	Poids frais des parties aériennes	Poids secs des parties aériennes (g/plante)	Poids frais des parties racinaires	Poids secs des parties racinaires
T0	3,231 ^a ± 0,170 ^(*)	0,690 ^a ± 0,031	0,904 ^b ± 0,046	0,292 ^b ± 0,029
T1	3,524 ^a ± 0,253	0,718 ^a ± 0,057	1,348 ^a ± 0,105	0,355 ^a ± 0,018
T2	3,343 ^a ± 0,169	0,655 ^{ab} ± 0,041	1,346 ^a ± 0,272	0,383 ^a ± 0,006
T3	3,559 ^a ± 0,296	0,618 ^b ± 0,055	0,699 ^c ± 0,049	0,317 ^b ± 0,026

(*) : Les données sont la moyenne de sept répétitions ± écart-types.

Les moyennes d'une même colonne, partageant au moins une lettre ne sont pas significativement différentes ; test de Newman-Keul à un niveau $p < 0,05$.

Concernant les poids frais et secs des parties racinaires (Pr), l'analyse de variance révèle un effet hautement significatif de l'eau de source sur ces variables (Annexe 6). Le classement des moyennes selon le test de Newman-Keuls, au seuil de probabilité de 5%, met en évidence trois groupes distincts pour les poids frais : ($\{T1 \text{ et } T2\} > \{T0\} > \{T3\}$). En ce qui concerne les poids secs, quatre groupes statistiquement différents ont été identifiés : ($\{T2\} > \{T1\} > \{T3\} > \{T0\}$).

Il convient de souligner que les poids frais et secs des parties racinaires les plus élevés ont été obtenus avec les eaux des traitements T1 et T2, comparativement aux plantes irriguées avec l'eau distillée (T0).

3.3.2. Matière sèche des parties aériennes et racinaires

L'étude de la production de biomasse sèche des parties aériennes et racinaires de *Vigna unguiculata*, soumise à différents traitements, a donné les résultats présentés dans la figure 7.

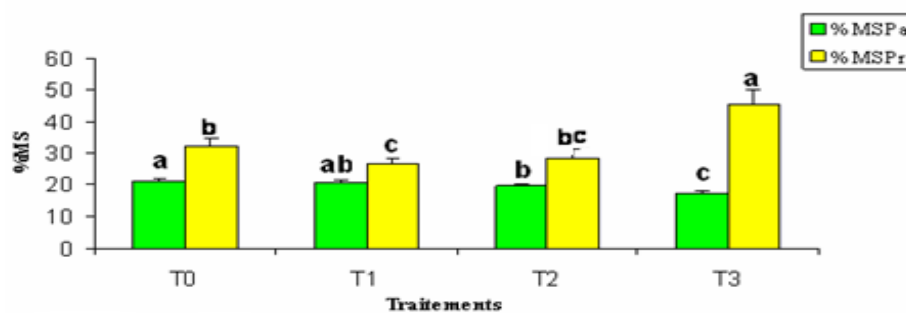


Figure 7 : Effet de l'eau d'irrigation sur la matière sèche des parties aériennes et racinaires des plantes de *Vigna unguiculata* L.

L'analyse montre que le traitement T1 n'a pas d'effet négatif sur la biomasse sèche des parties aériennes. En revanche, les traitements T2 et T3 induisent une réduction statistiquement significative de la production de matière sèche de ces organes, estimée à environ 8,41% pour T2 et 18,72% pour T3, par rapport aux plantes témoins (T0). De même, l'analyse statistique (ANOVA) révèle un effet hautement significatif de l'eau de source, quel que soit son niveau de salinité, sur la biomasse sèche totale des parties racinaires ($p < 0,0001$). Celle-ci a été significativement réduite par les traitements T1 et T2, entraînant une baisse moyenne de l'ordre de 18,22 % et 11,38% respectivement, en comparaison avec le traitement témoin (T0). Toutefois, il est important de noter que le traitement T3 a induit une augmentation très significative de cette variable, estimée à 40,86 % par rapport au témoin (T0).

3.4. Pigments chlorophylliens

Le tableau IX présente les effets des différents traitements d'irrigation sur les pigments photosynthétiques (chlorophylles et caroténoïdes) chez *Vigna unguiculata*. Les résultats montrent une diminution progressive des teneurs en chlorophylle a, chlorophylle b, chlorophylle totale et caroténoïdes (exprimées en $\mu\text{g/MVF}$) sous l'effet des traitements T1, T2 et T3, comparativement au témoin (T0). L'analyse de variance (ANOVA) révèle un effet hautement significatif des traitements sur la diminution des teneurs en pigments chlorophylliens ($p < 0,0001$). Cette réduction devient significative dès le traitement T1, traduisant une sensibilité marquée de ces pigments à la salinité croissante des eaux d'irrigation. Toutefois, aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre les traitements T1, T2 et T3, suggérant que l'effet inhibiteur sur la biosynthèse ou la stabilité des pigments atteint un seuil dès les premiers niveaux de salinité.

Tableau IX: Effet de l'eau d'irrigation sur les pigments chlorophylliens des feuilles de *Vigna unguiculata*

Traitements	Chlorophylle a	Chlorophylle b	Chlorophylle total	Caraténoïdes
	($\mu\text{g/g MVF}$)			
T0	0,492 ^{a(*)} \pm 0,050	0,120 ^a \pm 0,011	0,612 ^a \pm 0,005	3,295 ^a \pm 0,189
T1	0,411 ^b \pm 0,042	0,094 ^b \pm 0,012	0,505 ^b \pm 0,005	2,741 ^b \pm 0,233
T2	0,399 ^b \pm 0,022	0,094 ^b \pm 0,005	0,493 ^b \pm 0,026	2,749 ^b \pm 0,131
T3	0,392 ^b \pm 0,022	0,089 ^b \pm 0,005	0,480 ^b \pm 0,026	2,610 ^b \pm 0,131

(*) : Les données sont la moyenne de sept répétitions \pm écart-types ;

Les moyennes d'une même colonne, partageant au moins une lettre ne sont pas significativement différentes ; test de Newman-Keuls à un niveau $p < 0,05$.

3.5. Teneurs en proline

Il ressort des résultats de la figure 8 que les plantes de *Vigna unguiculata* ont réagi aux traitements (T1, T2 et T3) par une augmentation significative des teneurs en proline foliaire, comparativement aux plantes témoins (T0), irriguées uniquement avec de l'eau distillée, et présentant une teneur en proline de $35,95 \pm 1,82 \mu\text{g/g}$ de matière végétale fraîche (MVF).

Ces augmentations, statistiquement significatives, se sont révélées proportionnelles à l'intensité des traitements appliqués. Les teneurs les plus élevées en proline ($64,35 \pm 6,35 \mu\text{g/g}$ de matière végétale fraîche - MVF), soit une hausse de 78,97 %, ont été enregistrées avec le traitement T3. Celui-ci est suivi du traitement T2 ($48,84 \pm 4,58 \mu\text{g}$ de proline/g MVF), représentant une augmentation de 35,84 %, tandis que le traitement T1 a induit la plus faible élévation ($36,82 \pm 0,88 \mu\text{g/g}$ MVF), correspondant à une hausse de seulement 2,41 % qui n'est pas significative.

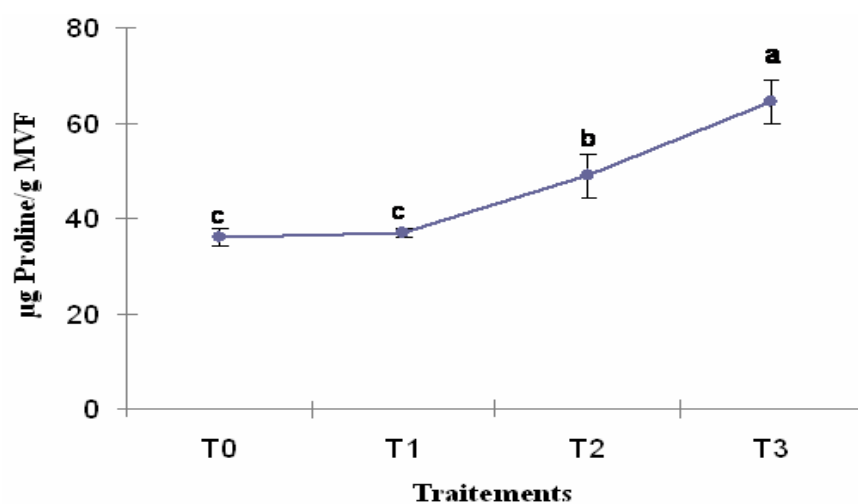


Figure 8 : Effet de l'eau d'irrigation sur les teneurs en proline foliaires des plantes de *Vigna unguiculata* L.

3.6. Évolution de la conductivité électrique (CE) des sols après la récolte

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) montrent que la conductivité électrique (CE) des sols, mesurée après 45 jours de culture, est significativement influencée par les différents types d'eau d'irrigation appliqués (T1, T2 et T3) ($p < 0,0001$).

Ces traitements ont entraîné une augmentation hautement significative de la CE par rapport au témoin (T0) (Figure 10).

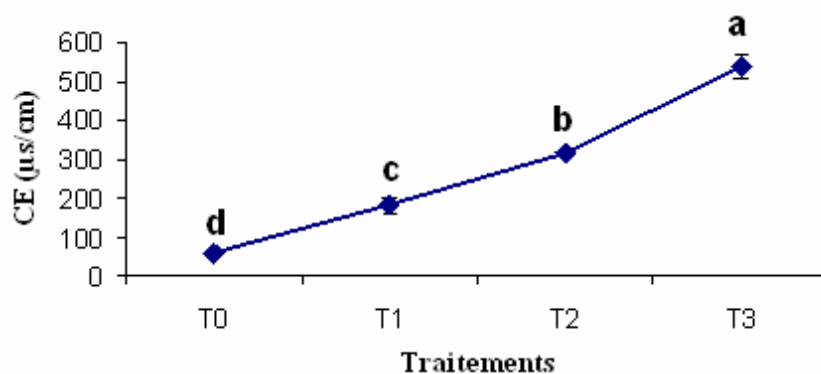


Figure 9 : Evolution de la CE des sols en fonction des eaux d'irrigation

De manière générale, la conductivité électrique la plus faible a été enregistrée avec le traitement T0, tandis que la plus élevée a été observée avec l'eau de source pure (T3). Cela suggère que l'utilisation de l'eau de source a conduit à une élévation de la CE du sol, principalement en raison de sa teneur plus élevée en sels et de l'accumulation progressive de ces derniers dans le sol au fil du temps.

Il semble que malgré une CE du sol relativement élevée mais en présence d'une humidité adéquate dans le sol les plantes ont présenté un bon développement pendant la période de l'essai expérimental..

4. Discussion

Globalement, l'irrigation des plantes de *Vigna unguiculata* avec une eau à conductivité électrique (CE) élevée, riche en sels dissous, a exercé un effet dépressif sur les paramètres morphologiques, biochimiques et physiologiques. Les mesures morphologiques — telles que la longueur, la biomasse fraîche et sèche des parties aériennes et racinaires, ainsi que la surface foliaire — ont affiché une baisse significative proportionnelle à l'intensité du stress salin. De même, les teneurs en pigments photosynthétiques (chlorophylles a, b, totale, ainsi que les caroténoïdes), considérés comme des marqueurs sensibles du stress salin, ont diminué de manière notable. Ces altérations sont principalement imputables à l'excès de sels dissous dans l'eau d'irrigation, dont l'accumulation dans le sol perturbe le métabolisme des plantes et freine leur croissance.

Nos résultats corroborent les conclusions de plusieurs travaux antérieurs ayant démontré que la salinité des eaux d'irrigation saline affecte négativement divers paramètres morphologiques

chez le niébé (*Vigna unguiculata* L.), notamment la hauteur des plantes, le nombre de feuilles et la longueur des racines. Ces effets deviennent d'autant plus prononcés que l'intensité du stress augmente. Selon **Ferrara et al. (2011)**, la réduction de la biomasse fraîche observée en conditions de salinité élevée serait due à une baisse du potentiel osmotique et à une diminution de l'humidité foliaire. **Chiahi et Brinis (2020)** ont également observé une baisse significative de la matière sèche, aussi bien au niveau des parties aériennes que racinaires, chez le blé dur irrigué avec de l'eau salée. Ces perturbations pourraient être liées à des modifications anatomiques, telles qu'un épaissement de l'épiderme et du mésophylle, ainsi qu'à une augmentation de la taille des cellules palissadiques et spongieuses, comme cela a été rapporté chez le haricot, le coton et l'*Atriplex* (**Longstreth et Nobel, 1979**). En revanche, les résultats obtenus ont révélé une biomasse racinaire globalement supérieure à celle des parties aériennes chez *V. unguiculata*, notamment dans les traitements T1 et T2, ce qui suggère qu'un stress salin modéré peut stimuler le développement racinaire. Ce phénomène semble être une réponse adaptative visant à améliorer l'exploration du sol pour optimiser l'absorption de l'eau et limiter les effets toxiques des ions présents dans le milieu. En effet, sous contrainte saline, la plante réoriente une part significative de son énergie photosynthétique pour maintenir son statut hydrique et renforcer la croissance de son système racinaire en vue de la recherche d'eau, augmentant ainsi ses chances de survie (**Kafkai, 1991 ; Munns, 2002**). Cependant, au-delà d'un certain seuil de salinité (comme dans le traitement T3), cette stratégie devient inefficace, et l'on observe une baisse marquée de la biomasse racinaire. Les travaux de **Mohammad et al. (1998)** ont d'ailleurs montré que des niveaux de salinité élevés entraînent une réduction de la croissance globale des plantes, y compris de la biomasse racinaire, de la longueur des racines et du nombre de feuilles, mettant en évidence les limites de l'adaptabilité physiologique des plantes soumises à un stress salin sévère.

De la même manière, les plantes irriguées avec une eau salée ont présenté une réduction significative de la surface foliaire par rapport aux témoins. Cette diminution pourrait s'expliquer par la fermeture des stomates induite par le stress salin, un mécanisme visant à limiter la transpiration et donc la perte en eau (**Munns, 2002**). Cette fermeture réduit également les échanges gazeux, notamment l'absorption du CO₂, ce qui limite la photosynthèse et, par conséquent, la production d'énergie nécessaire à la croissance foliaire (**Flexas et al., 2004 ; Taiz & Zeiger, 2010**). En effet, une eau de CE élevée provoque un stress osmotique et ionique, altérant la croissance, perturbant la physiologie stomatique et

généralisant une toxicité qui freine le développement foliaire. Cette réduction de la surface foliaire apparaît alors comme une stratégie adaptative visant à limiter les pertes en eau tout en préservant les fonctions vitales de la plante (Läuchli & Grattan, 2007).

Ces résultats concordent avec ceux de El housseine *et al.* (1998), qui ont observé une diminution des pigments chlorophylliens sous l'effet du stress salin chez le blé. De même, Shaheena *et al.* (2005) ont signalé une baisse du taux de chlorophylle chez la moutarde exposée à la salinité. Selon Doudech *et al.*, (2008), cette diminution s'explique par la dégradation des membranes thylakoïdes dans les chloroplastes, ce qui affaiblit le mécanisme photosynthétique et inhibe la diffusion du CO₂ à travers les feuilles.

Par ailleurs, les résultats biochimiques ont révélé une accumulation significative de proline chez les plantes exposées à une eau salée, proportionnelle à l'intensité du stress. Cette augmentation de la teneur en proline constitue un mécanisme d'adaptation bien connu face au stress salin. En effet, la proline agit comme osmoprotecteur, en contribuant au maintien de la turgescence cellulaire par la régulation du potentiel osmotique entre l'intérieur et l'extérieur des cellules (Mekliche *et al.*, 2003). D'après Dadach *et al.* (2015), l'accumulation de proline participe également à la régulation du pH cytoplasmique et au maintien des pressions entre le cytosol et la vacuole. En outre, cet acide aminé contribue à la stabilisation des membranes cellulaires, des protéines et des complexes enzymatiques, tout en jouant un rôle d'antioxydants en neutralisant les radicaux libres (Ottow *et al.*, 2005). L'accumulation de la proline est ainsi largement reconnue comme un indicateur biochimique fiable de la tolérance au stress salin chez de nombreuses espèces végétales.

Concernant l'évolution de la conductivité électrique (CE) des sols, les résultats indiquent que ce paramètre, mesuré après 45 jours de culture, est significativement influencée par les différents types d'eau d'irrigation appliqués. Comparativement au témoin (T0), tous les traitements ont entraîné une augmentation notable de la CE, traduisant une accumulation progressive de sels dans le sol. La plus faible valeur de CE a été enregistrée dans le sol du traitement témoin (T0), ce qui est cohérent avec l'absence d'apport externe de sels dissous. À l'inverse, le traitement T3, correspondant à l'irrigation à l'eau de source, a induit la plus forte élévation de la CE, indiquant un processus avancé de salinisation du sol. Cette augmentation est attribuable à la teneur élevée en ions dissous dans l'eau utilisée, qui, au fil des irrigations, s'accumulent dans la rhizosphère. Ainsi, l'élévation de la CE constitue un indicateur direct et

fiable de la salinisation induite par l'utilisation d'eaux d'irrigation de qualité médiocre, et souligne l'impact des pratiques culturales sur la dynamique physico-chimique du sol.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, l'étude des effets de l'irrigation à l'eau saline issue d'une source naturelle sur certains paramètres morpho-physiologiques des plantules de *Vigna unguiculata*, une légumineuse alimentaire, a permis de mieux comprendre la réponse de cette espèce au stress salin.

Les analyses physico-chimiques du sol utilisé comme substrat de culture ont montré qu'il s'agit d'un sol à texture limono-argileuse, avec une teneur relativement élevée en limons. Légèrement alcalin, pauvre en calcaire et classé parmi les sols non salés, ce sol présente une richesse modérée en matière organique et en cations échangeables, mais reste déficient en éléments nutritifs essentiels (N, P, K).

En revanche, l'eau utilisée pour l'irrigation, avec une CE élevée, a été caractérisée comme très fortement saline, exposant le sol à un risque important d'alcalinisation et de salinisation.

L'arrosage des plantes avec des eaux présentant différents niveaux de salinité (T0 : 0 %, T1 : 25 %, T2 : 50 %, T3 : 100 %) a révélé que l'augmentation de la concentration en sel dans l'eau d'irrigation constitue un facteur limitant majeur au développement normal de cette légumineuse, notamment aux stades précoces de croissance. Cette contrainte s'est manifestée par une diminution progressive de la croissance, affectant négativement les fonctions morpho-physiologiques des plantules.

Les plantes soumises aux différents traitements salins ont présenté des signes marqués de stress, tels qu'une réduction de la hauteur, de la biomasse fraîche et sèche des parties aériennes et racinaires, ainsi qu'une diminution de la surface foliaire. Ces altérations morphologiques ont été accompagnées d'un affaiblissement des fonctions physiologiques, illustré notamment par une baisse du taux de chlorophylle. Parallèlement, une augmentation significative de la concentration en proline a été observée, traduisant une réponse biochimique à ce stress salin.

L'ensemble de ces observations permet de conclure que la variété de *Vigna unguiculata* étudiée présente une sensibilité prononcée à la salinité, ne lui permettant pas de se développer de manière satisfaisante sous irrigation à l'eau salée. Ces résultats soulignent l'importance d'une gestion rigoureuse de la qualité de l'eau d'irrigation, notamment dans les régions exposées à la salinisation des sols. Ils mettent également en évidence la nécessité de poursuivre les recherches en vue d'identifier des variétés plus tolérantes au sel, ou d'adopter

des pratiques culturales innovantes susceptibles d'atténuer les effets délétères du stress salin sur les cultures sensibles.

En conclusion, ce travail contribue à enrichir les connaissances sur la résilience des légumineuses face au stress salin. Il ouvre des perspectives intéressantes pour des recherches futures en faveur d'une agriculture durable, notamment dans un contexte de changement climatique, à travers la sélection et l'amélioration de variétés tolérantes à la salinité.

**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aubert, G. (1982).** les sols sodiques en Afrique du Nord. cahier O.R.S.T.O.M. service Pédologie. 194-198.
- Afroz, S., Mohammad, F., Hayat, S., & Siddiqui, M. H. (2005).** *Exogenous application of gibberellic acid counteracts the ill effect of sodium chloride in mustard.* Turkish Journal of Biology, 29(4), 233–236.
- Allison, L. E., & Richards, L. A. (1954).** *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (No. 60). Soil and Water Conservative Research Branch, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture. 1-160.
- Arab, L., & Ehsanpour, A. A. (2006).** The effects of ascorbic acid on salt induced alfalfa (*Medicago sativa* L.) in *in vitro* culture. *Biokemistri*, 18(2) : 63-69.
- Arnon, D. I. (1949).** Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidases in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* 24: 1-15.
- Ashraf, M. P. J. C., & Harris, P. J. (2004).** Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant science*, 166(1) : 3-16.
- Aubert, G. (1976).** Les sols sodiques en Afrique du Nord.
- Ayers R.S., Westcot D.W., 1988** - La qualité de l'eau en agriculture. Bull. F.A.O. Irrig. Drain., 29, Rome, 97 p.
- Babu, M. A., Singh, D., & Gothandam, K. M. (2012).** The effect of salinity on growth, hormones and mineral elements in leaf and fruit of tomato cultivar PKM1. *J Anim Plant Sci*, 22(1), 159-164.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. A., & Teare, I. D. (1973).** Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil*, 39, 205-207.
- Baize D., (1988)** - Les formations calcaires redistribuées du Jovinien et les sols qui en sont issus. *Science du Sol.* 26 (2), 113-136.
- Baudoin, J. P. (2001).** Contribution des ressources phylogénétiques à la sélection variétale de légumineuses alimentaires tropicales. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 5 (4), 221–230.
- Bayuelo-Jiménez, JS, Debouck, DG, & Lynch, JP (2002).** Tolérance à la salinité chez les espèces de Phaseolus au début de la croissance végétative. *Crop Science*, 42 (6), 2184-2192.
- Bayuelo-Jiménez, J. S., Jasso-Plata, N., & Ochoa, I. (2012).** Growth and physiological responses of Phaseolus species to salinity stress. *International Journal of Agronomy*, 13 p.
- Belfakih, M., Ibriz, M., Zouahri, A., & Hilali, S. (2013).** Effet de la salinité sur la croissance des deux variétés de bananier «grande naine» et «petite naine» et leur nutrition minérale au Maroc. *Journal of applied Biosciences*, 63, 4689-4702.
- Belkacemi, T., & Bouchakour, A. (2015).** Impact des contraintes saline et thermique sur la germination et la croissance de 2 variétés de blé dur (*Triticum durum*) et 2 variétés de blé tendre (*Triticum aestivum*) Thèse de Doctorat. Génétique et Amélioration des Plantes, Université Mouloud Mammeri. 71 p

- Ben-Hayyim, G., & Goffer, Y. (1989).** Plantlet regeneration from a NaCl-selected salt-tolerant callus culture of Shamouti orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck). *Plant cell reports*, 7, 680-683.
- Ben khaled L., Ouarraq E., Zid F. 2007.** Impacte du NaCl sur la croissance et la nutrition de la variété de blé du Massa cultivé en milieu hydroponique. *Acta Bio.Gallica*.154 (1) ,101-116.
- Benderradji, L., Bouzerzour, H., Kellou, K., Ykhlef, N., Brini, F., Masmoudi, K., & Djekoun, A. (2010).** Etude des mécanismes de tolérance à la salinité chez deux variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) soumises à un stress salin. *Sciences & Technologie. C, Biotechnologies*, 23-30.
- Benhammou et Imache (2015).** Comparaison de la sensibilité des graines de niébé (*Vigna unguiculata*), haricot blanc et rouge (*Phaseolus vulgaris*) et pois-chiche (*Cicer arietinum*) à l'infestation par la bruche du niébé *Callosobruchus maculatus* F. (Coleoptera : Bruchidae). *Master en biologie Option : Entomologie Appliquée à la Médecine, à l'Agriculture et à la Foresterie. Université Mouloud MAMMARI de TIZI – OUZOU*, 37 p.
- Benmahioul, B., Khelil, B., Kaïd-harche M. et Daguin, F. (2010).** Etude de la germination et de l'effet du substrat sur la croissance de jeunes semis de *Pistacia vera* L. *Acta Botanica Malacitana (35)* : 87- 94
- Bot, A. J., Nachtergaele, F. O., & Young, A. (2000).** Land Resource Potential and Constraints at Regional and Country Levels. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Land and Water Development Division*.111 p.
- Botineau, M. (2010).** Botanique systématique et appliquée des plantes à fleurs. Editions : *Tec & doc. Paris* : Lavoisier, 1315p.
- Bouaouina, S., Zid, E. et Hajji, M. (2000).** Tolérance à la salinité, transports ioniques et fluorescence chlorophyllienne chez le blé dur (*Triticum turgidum* L.). *Options Méditerranéennes. Série A : Séminaires Méditerranéens (CIHEAM)* , (40):239-243.
- Bouras, N., Chkir, N., & Jemai, S. (2020).** Assessment of groundwater salinization and suitability for irrigation in arid and semi-arid regions. *Environmental Earth Sciences*, 79, 431. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09161-9>
- Brito, J. F., Ribeiro, C., & Lopes, N. (2022).** Mediterranean climate dynamics and their influence on land degradation. *Climatic Change*, 170(3-4), 23. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03324-5>
- Calvet, R. (2003).** Le sol: propriétés et fonctions. Phénomènes physiques et chimiques, applications agronomiques et environnementales (Vol. 2). France Agricole Editions.
- Carter, D. L. (1975).** Problems of salinity in agriculture. In *Plants in saline environments* .Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 25-35p.
- Chartzoulakis, K., & Klapaki, G. (2000).** Response of two greenhouse pepper hybrids to NaCl salinity during different growth stages. *Scientia horticultrae*, 86(3), 247-260
- Chauvet.,M,(2018).**Encyclopédie des plantes alimentaires,Belin,p880.
- Chelli, D., Ouessar, M., & Zairi, M. (2021).** Climate variability and its impacts on water resources in semi-arid Tunisia. *Water*, 13(4), 500. <https://doi.org/10.3390/w13040500>
- Cherbuy B. (1991).** Les sols salés et leur réhabilitation étude bibliographique. CEMAGREF, école. Nat. Rennes, 170p.

- Chiahi, N., & Brinis, L. (2020).** The influence of salt stress on the morpho physiological and biochemical parameters of durum wheat varieties (*Triticum durum* Desf.). *Journal of Biological Research-Bollettino della Società Italiana di Biologia Sperimentale*, 93(1).48-55.
- Claussen, M., Lütke, H., Blatt, M., & Böttger, M. (1997).** Auxin-induced growth and its linkage to potassium channels. *Planta*, 201, 227-234.
- Dabin, B. (1970).** Methode d'etude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux. Coton Fibres. *Trop.*, 25(2), 213-234.
- Dabin, B. (1967).** Application des dosages automatiques à l'analyse des sols, 3^{ème} partie. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, série Pédologie, V (3), 257-286.
- Dadache, M., Boukhari, S., Mehdadi, Z., Bendimred, F. Z., Latrech, A., & Bouker, A. (2015).** Réponses biochimique et physiologique de la Luzerne arborescente (*Medicago arborea*) au stress salin. *Les technologies de laboratoire*, 9(37) :8-20.
- Daouda, ;K, Echikh, N., Toussaint, A., Pasquet, R. S., & Baudoin, J. P. (2007).** Organisation du pool génique de *Vigna unguiculata* (L.) Walp.: croisements entre les formes sauvages et cultivées du niébé. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 11 (1), 47–57.
- Denden, M., Bettaieb, T., Salhi, A., & Mathlouthi, M. (2005).** Effet de la salinité sur la fluorescence chlorophyllienne, la teneur en proline et la production florale de trois espèces ornementales. *Tropicultura*, 23(4), 220-225.
- Djerroudi Zidane, O., & Moulay, B. (2010).** Effect of Salt Stress on the Proline Accumulation in Young Plants of *Atriplex Halimus* L. and *Atriplex Canescens* (Pursh) Nutt. *European Journal of Scientific Research*, 41(2), 249-260.
- Doudech, N., Mhamdi, M., Bettaieb, T., & Denden, M. (2008).** Tolérance à la salinité d'une graminée à gazon: *Paspalum notatum* Flüggé. *Tropicultura*, 26(3), 182-185.
- Duke, JA, et Duke, JA (1981).** Espèces de légumineuses. *Manuel des légumineuses d'importance économique mondiale* , 5-310.
- Duchaufour, P. 1977.** Pédologie, Pédogenèse et classification. Paris : Masson, 1977. 477p.
- Durand, J. H. (1958).** Les sols irrigables : Étude pédologique . 190p.
- Durand, J.H. (1983).** Les sols irrigables. Étude pédologique. ACCT-PUF, 339 p.
- El Houssine Tahri, A. B., & Sadki, K. (1997-1998).** Effet d'un stress osmotique sur l'accumulation de proline, de chlorophylle et des ARNm codant pour la glutamine synthétase chez trois variétés de blé dur (*Triticum durum*). *Bulletin de l'Institut scientifique*, Rabat, N (21), 81-87.
- Enita, DB (2000).** Agronomie des bases aux nouvelles orientations. Editions Synthèses Agricoles.340p.
- El Madidi, S., El Baroudi, B., & Aameur, F. B. (2003).** Variation de la tolérance à la salinité chez l'orge pendant la germination et la croissance des plantes. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 23(2), 109-115.
- El Midaoui, A., Faiz, F., El Yazami, O., Souirti, Z., El Youbi, R., Messouak, O., & Belahsen, F. (2007).** O-10 Hémiandrose révélatrice d'une malformation de la charnière cervico-occipitale avec syringomyélie. *Revue Neurologique*, 163(4), 124.
- FAO. (2001).** FAOSTAT Agricultural Data. [Http://apps.fao.org/cgibin/nph-db.pl?subset=agriculture](http://apps.fao.org/cgibin/nph-db.pl?subset=agriculture). Hamdy, M. 1989. Cowpea processing project 685-0281.

- USAID. Dakar, Sénégal. 140 p.
- FAO. (2022).** The state of the world's land and water *resources for food and agriculture – Systems at breaking point.* Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/cb9910en/cb9910en.pdf>
- FAO., 1972.** La salinité ; Séminaire de Bagdad , Food and Agriculture Organisation. 272p.
- FAOSTAT. (2004).** Agricultural production, crop primary database. Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome. <http://faostat.fao.org/faostat/> Fortin D, Lô M, Maynart G. 1989.
- Farissi, M., Bouizgaren, A., Faghire, M., Bargaz, A., & Ghoulam, C. (2011).** Agro-physiological responses of Moroccan alfalfa (*Medicago sativa* L.) populations to salt stress during germination and early seedling stages. *Seed Science and Technology*, N 39(2), 389-401.
- Fatemeh, S. R., Saifullah, R., Abbas, F. M. A., & Azhar, M. E. (2012).** Composés phénoliques totaux, flavonoïdes et activité antioxydante des farines de pulpe et de peau de banane : influence de la variété et du stade de maturité. *Revue Internationale de Recherche Alimentaire*, 19(3), 1041–1046.
- Farissi, M., Aziz, F., Bouizgaren, A., & Ghoulam, C. (2014).** Legume-rhizobia symbiosis under saline conditions: Agro-physiological and biochemical aspects of tolerance. *International Journal of Innovation and Scientific Research* Vol. 11 , 96-104.
- Ferrara, A., Lovelli, S., Di Tommaso, T., & Perniola, M. (2011).** Floraison, croissance et nouaison du poivron de serre soumis à un stress hydrique. *Journal of Agronomy* , 10 (1), 12-19.
- Flexas J, Bota J, Loreto F, Cornic G, Sharkey TD (2004)** Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biol* 6: 269–279.
- Ghassemi, F., Jakeman, A. J., & Nix, H. A. (1995).** *Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management and case studies* .526p.
- Graham, P. H. and Vance, C. P. (2003).** Legumes: importance and constraints to greater use. *Plant physiology*, 131(3), 872-877.
- Gratão, P. L., Polle, A., Lea, P. J., & Azevedo, R. A. (2005).** Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Functional plant biology*, 32(6), 481-494.
- Haliawell, B, John M., C. Gutreridge (1985).** Free radicals in biology and medicine. *Journal of Free Radicals in Biology & Médecine*. Vol. I..331-334.
- Hillel, D. (2000).** Gestion de la salinité pour une irrigation durable. *Banque mondiale*, 1-102.
- Imalet R., 1979.** Influence de différentes concentrations de sels (NaCl, Na₂SO₄, MgSO₄) des eaux d'irrigation de l'agriculture sur le rendement du haricot. Thèse d'Ingénieur , INA, EL Harrach, 43p.
- Jithesh, MN, Prashanth, SR, Sivaprakash, KR et Parida, AK (2006).** Mécanismes de réponse antioxydante chez les halophytes : leur rôle dans la défense contre le stress. *Journal de génétique* , 85 , 237-254.
- Javid, MG, Sorooshzadeh, A., Moradi, F., Modarres Sanavy, SAM, et Allahdadi, I. (2011).** Le rôle des phytohormones dans la réduction du stress salin chez les plantes cultivées. *Revue australienne des sciences des cultures* , 5 (6), 726-734.

- Jin, Y., Feng, L., & Wang, J. (2023).** Salinity stress responses in Mediterranean vegetation: a review of physiological and molecular mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1167213. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1167213>
- Joret, G., & Hébert, J.-A. (1955).** Phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fixateur des sols en relation avec la croissance des plantes. *C.R. Acad. Agri. de France*, 52, 1108-1116.
- Kafkai U., (1991).** Root growth under stress. In: Waisel Y., Eshel A. & Kafkafi U., eds. *Plant roots: the hidden half*. New York, USA: Marcel Dekker, 375-391
- Kara, S., et Li, W. (2011).** Modèles de consommation d'énergie unitaire pour les procédés d'enlèvement de matière. *Annales du CIRP*, 60 (1), 37-40.
- Khales A., Baaziz M., 2006.** Etude des peroxydases d'écotypes d'*Opuntia Ficus indica* L, en relation avec le développement dans les conditions de stress Salin. *Congrès international de Biochimie*, Agadir. pp 133-136.
- Levigneron, A., Lopez, F., Vansuyt, G., Berthomieu, P., Fourcroy, P., & Casse-Delbart, F. (1995).** Les plantes face au stress salin. *Cahiers Agricultures*, 4(4), 263-273.
- Läuchli, A., & Epstein, E. (1990).** Plant responses to saline and sodic conditions. *Agricultural salinity assessment and management*, 71, 113-137.
- Läuchli, A., & Grattan, S. R. (2007).** Plant growth and development under salinity stress. In *Advances in molecular breeding toward drought and salt tolerant crops* Springer . 1–32.
- Lepengue, A. N., Mouaragadja, I., Ibrahim, B., Ake, S., & M'batchi, B. (2012).** Réponse du maïs (*Zea mays* var. LG 60) au stress salin: étude de la synthèse de quelques composés biochimiques. *Journal of Animal & Plant Sciences*, vol.14, Issue 1: 1866-1872.
- Lewis, G. P., Schrire, B. D., Mackinder, B. A., Rico, L. and Clark, R. (2013).** A linear sequence of legume genera set in a phylogenetic context- A tool for collections management and taxon sampling. *South African Journal of Botany*, 89, 76-84.
- Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. (1985)** Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, 591–592.
- Longstreth D.J et Nobel P.S.(1979).** Salinity effects on leaf anatomy: consequences for photosynthesis. *J. Plant Physiol*, 63 (4): 700-703.
- Maillard J. (2001).** Le point sur l'irrigation et la salinité des sols en zone sahélienne. Risques et recommandations. *Handicap International*. Novembre 2001, 34p.
- Mekliche, A., Boukecha, D., & Hanifi-Mekliche, L. (2003).** Etude de la tolérance à la sécheresse de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* desf.). I. Effet de l'irrigation de complément sur les caractères phénologiques, morphologiques et physiologiques. *Algerian Annals of Agronomy*, 24(1), 97-110.
- Merbah, K. Z. A., Belhadj, S., Louzabi, S., & Bendechou, A. (2021).** INFLUENCE DU NaCl SUR QUELQUES PARAMETRES MORPHO-PHYSIOLOGIQUES ET BIOCHIMIQUES DE JEUNES PLANTULES DE DEUX ESPECES SPONTANÉES DE PISTACIA (P. lentiscus L. ET P. atlantica Desf.). *AGROBIOLOGIA*, 10(3), 2129-2140.
- Mezni, M., Albouchi, A., Bizid, E., & Hamza, M. (2010)** Minerals uptake, organic osmotica contents and water balance in alfalfa under salt stress. *Journal of Phytology*, 2(11): 01-12.

- Mhadhbi, H., Jebara, M., Limam, F., & Aouani, M. E. (2004).** Rhizobial strain involvement in plant growth, nodule protein composition and antioxidant enzyme activities of chickpea-rhizobia symbioses: modulation by salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 42(9), 717-722.
- Mittler, R. (2002).** Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in plant science*, 7(9), 405-410.
- Mohammad M., Shibi R., Ajlouni M., NimrL.,(1998).** Tomato root and shoot responses to salt stress under different levels of phosphorus nutrition. *Journal of plant nutrition* pp 1667-1680.
- Munns, R., Greenway, H., & Kirst, G. O. (1983).** Halotolerant eukaryotes. In *Physiological Plant Ecology III: Responses to the Chemical and Biological Environment*. 59-135. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Munns, R. (2002).** Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment*, 25(2), 239–250.
- Ouerghi, Z., Cornic, G., Roudani, M., Ayadi, A., & Brulfert, J. (2000).** Effet du NaCl sur la photosynthèse de deux espèces de blé (*Triticum durum* et *T. aestivum*) présentant une sensibilité différente au stress salin. *Journal of plant physiology*, 156 (3), 335-340.
- Ottow, E. A., Brinker, M., Teichmann, T., Fritz, E., Kaiser, W., Brosché, M., ... & Polle, A. (2005).** *Populus euphratica* displays apoplastic sodium accumulation, osmotic adjustment by decreases in calcium and soluble carbohydrates, and develops leaf succulence under salt stress. *Plant Physiology*, 139(4), 1762-1772.
- Paul, E. A., & van Veen, J. A. (1979).** Conversion of biovolume measurements of soil organisms, grown under various moisture tensions, to biomass and their nutrient content. *Applied and environmental microbiology*, 37(4), 686-692.
- Parida, A. K., Das, A. B., & Mitra, B. (2004).** Effects of salt on growth, ion accumulation, photosynthesis and leaf anatomy of the mangrove, *Bruguiera parviflora*. *Trees*, 18(2), 167-174.
- Padulosi, S., & Ng, N. Q. (1997).** Origin, taxonomy, and morphology of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. *Advances in cowpea research*, 1-12.
- Pilot, G., Gaymard, F., Mouline, K., Chérel, I., & Sentenac, H. (2003).** Regulated expression of Arabidopsis Shaker K⁺ channel genes involved in K⁺ uptake and distribution in the plant. *Plant molecular biology*, 51, 773-787.
- Polhill, RM, et Raven, PH (éd.). (1981).** *Progrès en systématique des légumineuses. Parties 1 et 2*, 1049 p.
- Polash, M. A. S., Sakil, M. A., & Hossain, M. A. (2019).** Plants responses and their physiological and biochemical defense mechanisms against salinity: A review. *Trop. Plant Res*, 6(2), 250-274.
- Popova, L. P., Stoinova, Z. G., & Maslenkova, L. T. (1995).** Involvement of abscisic acid in photosynthetic process in *Hordeum vulgare* L. during salinity stress. *Journal of plant growth regulation*, 14, 211-218.
- Praharaj, S., & Maitra, S. (2020).** Importance of legumes in agricultural production system: An overview. *Agro Economist*, 2, 69-71.
- Rajalakshmi, K.; Banu, N. (2015).** Extraction and estimation of chlorophyll from medicinal plants. *Int. J. Sci. Res.*, 4, 209–212.

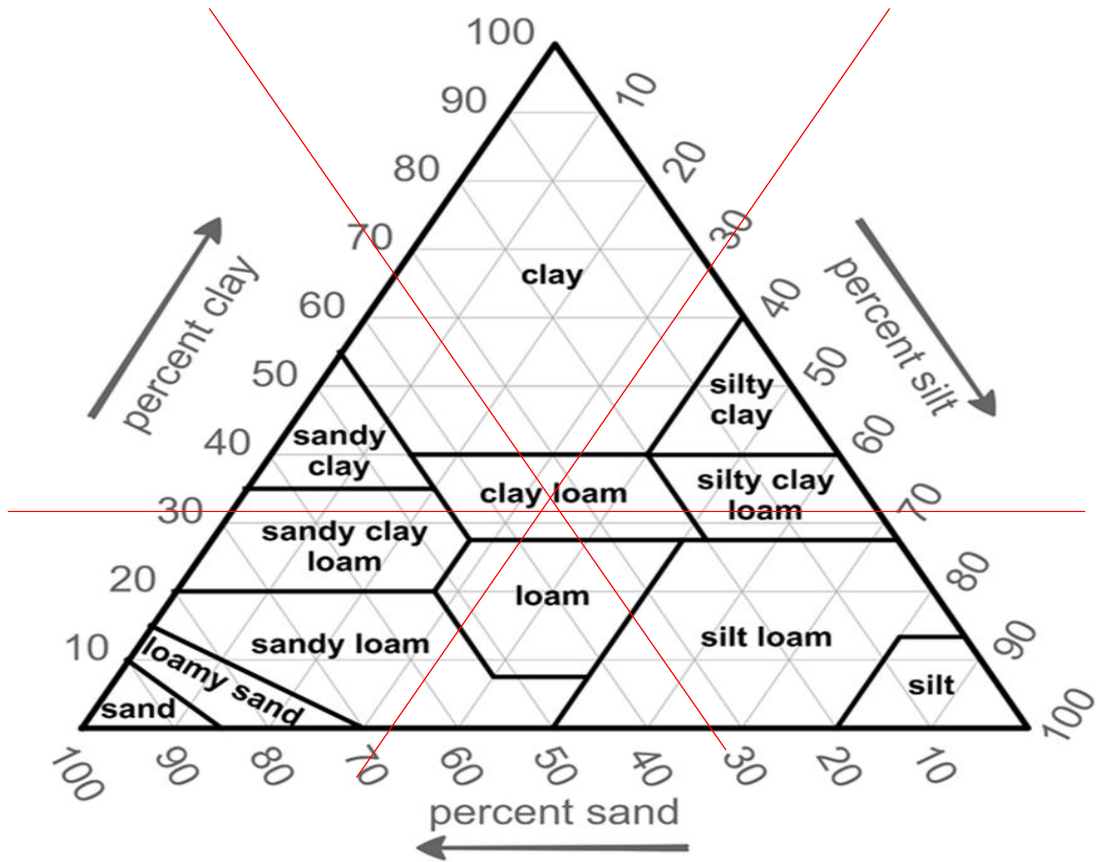
- Ruffino, AMC, Rosa, M., Hilal, M., González, JA, & Prado, FE (2010).** Le rôle du métabolisme des cotylédons dans l'établissement des plantules de quinoa (*Chenopodium quinoa*) poussant en conditions salines. *Plant and soil* , 326 (1), 213-224.
- Saeidi-Sar, S., Abbaspour, H., Afshari, H., et Abdel-Wahhab, MA (2012).** Tolérance des plantules de pistachier (*Pistacia vera* L.) infectées par des mycorhizes au stress hydrique en serre. *Journal of plant physiology* , 169 (7), 704-709.
- Saeidi-Sar, S., Abbaspour, H., Afshari, H., et Abdel-Wahhab, MA (2012).** Tolérance des plantules de pistachier (*Pistacia vera* L.) infectées par des mycorhizes au stress hydrique en serre. *Journal of plant physiology* , 169 (7), 704-709.
- Sarkar, Dipak et Haldar, Abhijit (2005).** Physical and Chemical Methods in Soil Analysis: Fundamental Concepts of Analytical Chemistry and Instrumental Techniques. New Age International (P) Limited, New Delhi, 193 pages.
- Singh BB, Chambliss OL, and Sharma B. (1997).** Recent advances in cowpea breeding in *Advances in cowpea research*, edited by B.B. Singh, D.R. Mohan Raj, K.E. Dashiell, and L.E.N. Jackai. Copublication of International Institute of Tropical Agriculture (IITA) and Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS), IITA, Ibadan. Nigeria.30-49.
- Slama, I., Ghnaya, T., Savouré, A., & Abdely, C. (2008).** Combined effects of long-term salinity and soil drying on growth, water relations, nutrient status and proline accumulation of *Sesuvium portulacastrum*. *Comptes Rendus. Biologies*,331(6), 442-451.
- Stagnari, F., Maggio, A., Galieni, A., & Pisante, M. (2017).** Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*,4, 1-13.
- Sun, F. (2007).** Salt modulates gravity signaling pathway to regulate growth direction of primary roots in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 143, 178–188.
- Speer, M., & Kaiser, W. M. (1991).** Ion relations of symplastic and apoplastic space in leaves from *Spinacia oleracea* L. and *Pisum sativum* L. under salinity. *Plant Physiology*, 97(3), 990-997.
- Tabaeizadeh, Z. (1998).** Réponses induites par la sécheresse dans les cellules végétales. *Revue internationale de cytologie* , 182 , 193-247.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010).** Plant Physiology (5th ed.). Sinauer Associates. Sunderland.782p.
- Tejera, NA, Campos, R., Sanjuan, J., & Lluch, C. (2004).** Activités de la nitrogénase et des enzymes antioxydantes dans les nodules de *Phaseolus vulgaris* formés par des souches isogéniques de *Rhizobium tropici* présentant une tolérance variable au stress salin. *Journal of Plant Physiology* , 161 (3), 329-338.
- Verdoy, D., Coba de la Peña, T., Redondo, F. J., Lucas, M. M., & Pueyo, J. J. (2006).** Transgenic *Medicago truncatula* plants that accumulate proline display nitrogen-fixing activity with enhanced tolerance to osmotic stress. *Plant, Cell & Environment*, 29(10), 1913-1923.
- Wang, X., Zhao, G., & Gu, H. (2009).** Physiological and antioxidant responses of three leguminous species to saline environment during seed germination stage. *African Journal of Biotechnology*, 8(21).

- Ykhlef, N., & Djekoun, A. (2000).** Adaptation photosynthétique et résistance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum): Analyse de la variagénotypique. *Option Méditerranéennes N° 40*, 327-330.
- Yang, Y. et Guo, Y. (2018).** Élucider les mécanismes moléculaires qui interviennent dans les réponses des plantes au stress salin. *Nouveau phytologue* , 217 (2), 523-539.
- Zhou, Y., Zhang, X., & Li, Q. (2021).** Drought impact on vegetation in arid and semi-arid ecosystems under climate change. *Journal of Arid Environments*, 190, 104509. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104509>
- Zhu, J. K. (2003).** Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current opinion in plant biology*, 6(5), 441-445.

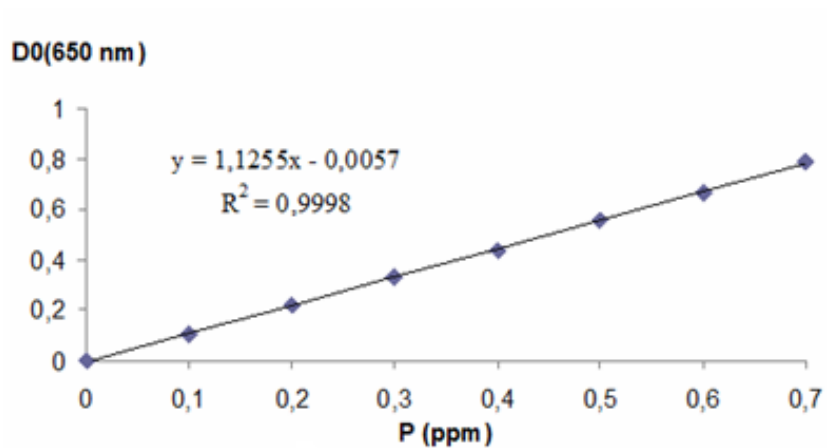
ANNEXES

ANNEXES

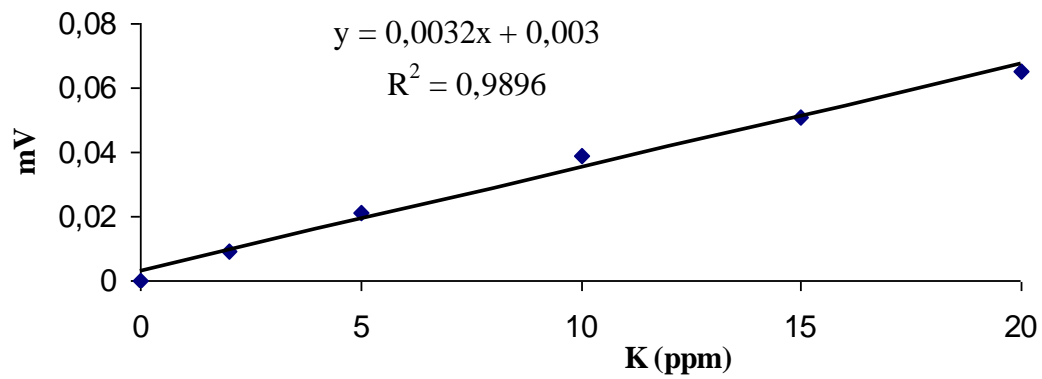
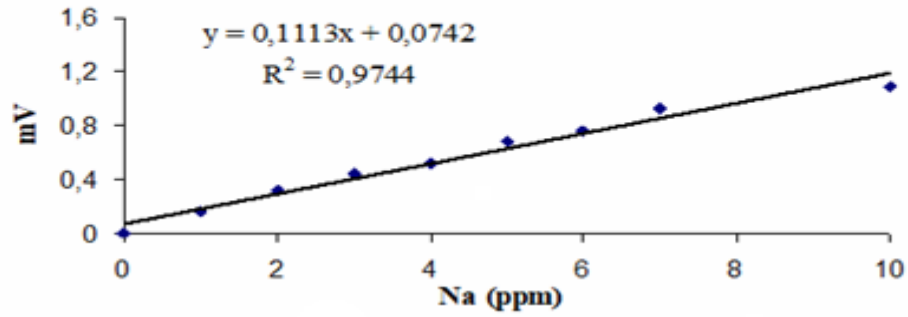
ANNEXE 01 : Triangle de texture (USDA, 1954) .



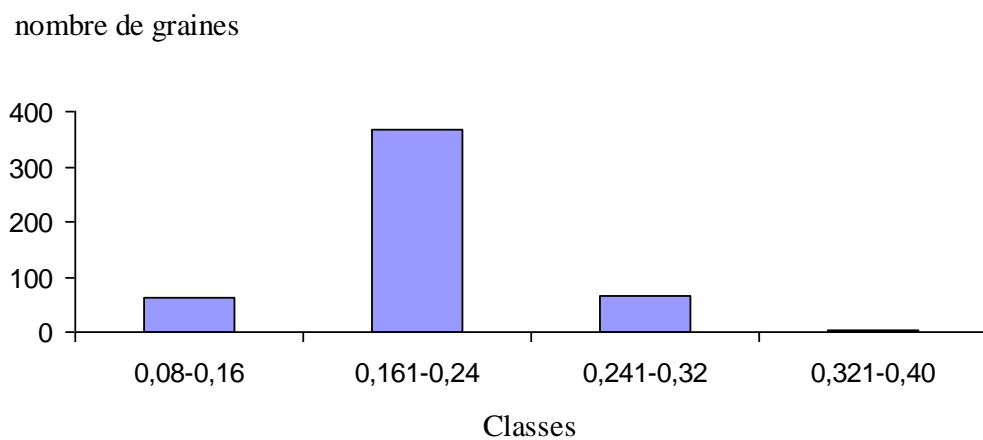
ANNEXE 02: Courbe d'étalonnage phosphore.



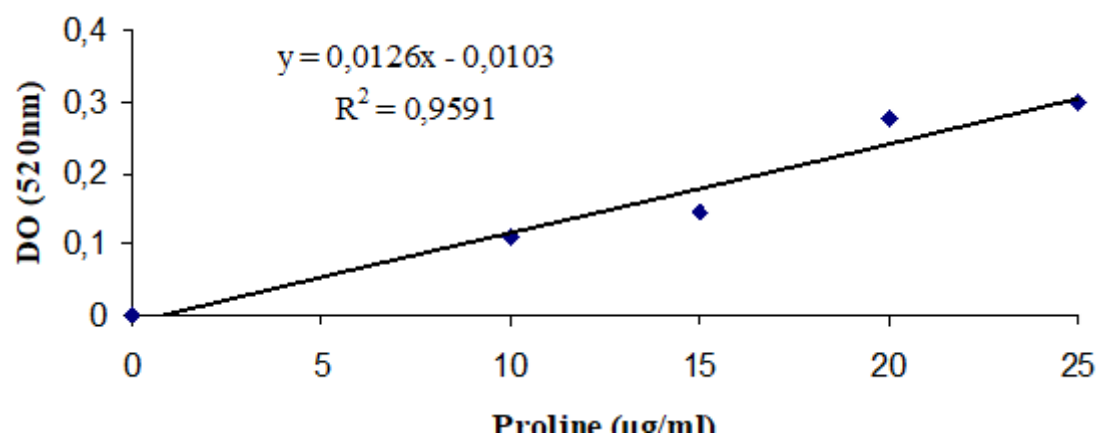
ANNEXE 03 : Courbe d'étalonnage de sodium(Na) et de potassium (K⁺)



ANNEXE 04 : Répartition pondérale des graines de *Vigna unguiculata*



ANNEXE 05: Courbe d'étalonnage de proline



ANNEXE 06 :

Résultats des analyses de variance (ANOVA)

Variable Chlorophylle a :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	5,066	1,267	973,178	< 0,0001
Erreur	24	0,031	0,001		
Total corrigé	28	5,098			

Calculé contre le modèle $Y=0$

Variable Chlorophylle b

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	0,280	0,070	830,133	< 0,0001
Erreur	24	0,002	0,000		
Total corrigé	28	0,282			

Calculé contre le modèle $Y=0$

Variable Chlorophylle Totale

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	7,728	1,932	1000,955	< 0,0001
Erreur	24	0,046	0,002		
Total corrigé	28	7,774			

Calculé contre le modèle $Y=0$

Variable caraténoïdes totaux)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	229,191	57,298	1936,556	< 0,0001
Erreur	24	0,710	0,030		
Total corrigé	28	229,901			

Calculé contre le modèle Y=0

Variable Surface foliaire

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	25450206,668	6362551,667	940,614	< 0,0001
Erreur	24	162342,064	6764,253		
Total corrigé	28	25612548,732			

Calculé contre le modèle Y=0

Variable Proline

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	64231,946	16057,987	981,091	< 0,0001
Erreur	24	392,820	16,367		
Total corrigé	28	64624,766			

Calculé contre le modèle Y=0

Variable Hauteur partie aérienne

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	12543,842	3135,960	2464,768	< 0,0001
Erreur	24	30,536	1,272		
Total corrigé	28	12574,377			

Calculé contre le modèle Y=0

Variable Hauteur partie racinaire

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	15264,107	3816,027	2698,878	< 0,0001
Erreur	24	33,934	1,414		
Total corrigé	28	15298,041			

Calculé contre le modèle Y=0

Variable Poids frais partie aérienne

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	327,052	81,763	1557,521	< 0,0001
Erreur	24	1,260	0,052		
Total corrigé	28	328,312			

Calculé contre le modèle $Y=0$

Variable Poids secs parties aériennes

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	12,620	3,155	1380,836	< 0,0001
Erreur	24	0,055	0,002		
Total corrigé	28	12,675			

Calculé contre le modèle $Y=0$

Variable %Matière sèche parties aériennes

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	10906,380	2726,595	3321,451	< 0,0001
Erreur	24	19,702	0,821		
Total corrigé	28	10926,082			

Calculé contre le modèle $Y=0$

Variable Poids frais partie racinaire

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	34,541	8,635	1265,243	< 0,0001
Erreur	24	0,164	0,007		
Total corrigé	28	34,705			

Calculé contre le modèle $Y=0$

Variable Poids secs parties racinaires

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	3,209	0,802	1787,200	< 0,0001
Erreur	24	0,011	0,000		
Total corrigé	28	3,220			

Calculé contre le modèle $Y=0$

Variable %Matière sèche parties racinaires

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	32414,437	8103,609	929,588	< 0,0001
Erreur	24	209,218	8,717		
Total corrigé	28	32623,655			

Calculé contre le modèle Y=0

Variable CE du sol (final)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	2965294,993	741323,748	1319,072	< 0,0001
Erreur	24	13488,097	562,004		
Total corrigé	28	2978783,090			

Calculé contre le modèle Y=0

ANNEXE 07 : Échelle de la salinité selon Durand (1983)

Classe	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C)	Qualité des sols	Effet sur le rendement
Classe I	0 à 500	Non salé	Négligeable
Classe II	500 à 1000	Légèrement salé	Diminution du rendement des cultures très sensibles au sel
Classe III	1000 à 2000	Salé	Diminution du rendement des cultures de la plupart des cultures
Classe IV	2000 à 4000	Très salé	Seules les cultures résistantes donnent un rendement satisfaisant
Classe V	Plus de 4000	Extrêmement salé	Seules quelques cultures donnent des rendements satisfaisants

ANNEXE 08 : Tableau du classement de la qualité de l'eau en fonction du danger d'alcalinisation du sol

Nom de la classe	Classe	Interprétation
Classe S1	$0 < SAR < 10$ bas taux de sodium	Eaux utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols. Danger d'alcalinisation réduit, bien que certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées.
Classe S2	$10 < SAR < 18$ Taux moyen de sodium	Le danger d'alcalinisation des sols est appréciable dans les sols à textures fine et à forte capacité d'échange, surtout dans la condition de faible lessivage. Eau utilisable sur les sols de texture grossière, ou sur les sols organiques ayant une bonne perméabilité
Classe S3	$18 < SAR < 26$ Haut taux de sodium	Eaux pouvant provoquer l'apparition d'une alcalinité dangereuse dans la plupart des sols, à l'exception des sols pauvres en argile. Emploi exigeant la mise en œuvre d'un aménagement spécial assurant un bon drainage et fort lessivage. L'addition de matière organique, d'amendements chimiques est souvent nécessaire.
Classe S4	$18 < SAR > 26$ Très haut taux de sodium	Eaux souvent inutilisables pour l'irrigation, présentant un fort danger d'alcalinisation. Ces eaux sont utilisées pour l'irrigation, seulement si leur salinité permet l'addition de calcium ou si le sol en contient suffisamment.

Source : Durand (1982)

Tableau 5 : Interprétation des classes du diagramme de RIVERSIDE

CLASSES	Interprétation des classes
C1S1	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles
C1S2 - C2S1	Eau de qualité bonne à moyenne a utilisé avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles
C3S1 - C2S2 – C1S3	Qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse
C4S1 - C3S2 - C2S3 – C1S4	Eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensible, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.
C5S1- C4S2- C3S3- C2S4	Eau de qualité très mauvaise, utilisé que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistante avec nécessité des doses de lessivage et/ou apport de gypse
C5S2- C4S3- C3S4	Qualité très mauvaise a n'utilisé que pour les circonstances exceptionnelles
C5S3- C4S4- C5S4	Eau déconseillée pour l'irrigation

Source : (CLEMENT et GALAND, 1979)

RÉSUMÉ

Résumé

La présente étude a pour objectif d'évaluer les réponses des plantules de niébé (*Vigna unguiculata*), cultivées en pots sur un sol limino-argileux, à une irrigation avec de l'eau provenant d'une source naturelle salée, appliquée à différentes concentrations. Les effets de cette contrainte saline ont été analysés à travers divers paramètres morphologiques et physiologiques, dans le but d'identifier les seuils de salinité susceptibles d'affecter la croissance et le développement de cette légumineuse d'intérêt agronomique. Les résultats ont révélé une réduction progressive et significative des paramètres morphologiques notamment la hauteur des plantes, la surface foliaire ainsi que la biomasse fraîche et sèche des parties aériennes et racinaires à mesure que la concentration en sel de l'eau d'irrigation augmentait. Par ailleurs, l'analyse des paramètres physiologiques a mis en évidence une altération de l'efficacité photosynthétique (réduction des pigments chlorophylliens) ainsi qu'une accumulation de la proline dans les feuilles, indiquant une réponse adaptative au stress salin. Ces résultats confirment la sensibilité du niébé à la salinité et soulignent l'importance de la gestion de la qualité de l'eau d'irrigation pour assurer la réussite de sa culture dans les zones soumises à la salinité des sols ou ressources hydriques salins.

Mots-clés : *Vigna unguiculata*, stress salin, eau d'irrigation salée, croissance.

Abstract

This study aims to evaluate the responses of cowpea (*Vigna unguiculata*) seedlings, grown in pots containing loam-clay soil, to irrigation with naturally saline water applied at different concentrations. The effects of this salinity stress were analyzed through various morphological and physiological parameters, with the goal of identifying salinity thresholds likely to affect the growth and development of this agronomically important legume. The results revealed a progressive and significant reduction in morphological parameters notably plant height, leaf area, and both fresh and dry biomass of aerial and root parts as the salt concentration in the irrigation water increased. Furthermore, the analysis of physiological parameters highlighted an alteration in photosynthetic efficiency (as evidenced by reduced chlorophyll pigment content) as well as an accumulation of proline in the leaves, indicating an adaptive response to salt stress. These findings confirm the sensitivity of cowpea to salinity and emphasize the importance of managing irrigation water quality to ensure successful cultivation in areas affected by saline soils or water resources.

Keywords: *Vigna unguiculata*, salt stress, saline irrigation water, growth.

المخلص:

تهدف هذه الدراسة الى تقييم استجابة شتلات اللوبيا، المزروعة في أصص تحتوي على تربة طينية، للري بمياه مالحة طبيعية بتركيزات مختلفة. حُلَّت آثار هذا الإجهاد الملحي من خلال معايير مورفولوجيا وفسولوجية مُختلفة، بهدف تحديد عتبات الملوحة التي يُحتمل أن تؤثر على نمو وتطور هذه الخضراوات المهمة زراعيًا.

أظهرت النتائج انخفاضًا تدريجيًا وملحوظًا في المعايير المورفولوجيا -لا سيما ارتفاع النبات، ومساحة الورقة، والكتلة الحيوية الطازجة والجافة للأجزاء الهوائية والجذرية -مع زيادة تركيز الملح في مياه الري. علاوة على ذلك، سلَّط تحليل المعايير الفسيولوجية الضوء على تغيّر في كفاءة التمثيل الضوئي (كما يتضح من انخفاض محتوى صبغة الكلوروفيل)، بالإضافة إلى تراكم البرولين في الأوراق، مما يشير إلى استجابة تكيفية للإجهاد الملحي. تؤكد هذه النتائج حساسية اللوبيا للملوحة، وتؤكد على أهمية إدارة جودة مياه الري لضمان نجاح زراعتها في المناطق المتأثرة بالتربة المالحة أو موارد المياه.

الكلمات المفتاحية: *Vigna unguiculata*، اللوبيا، الإجهاد الملحي، مياه الري المالحة، النمو.