

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et sciences Agronomiques
Département des sciences Biologiques

MEMOIRE DE FIN D'ÉTUDE
En vue de l'obtention du diplôme de Master en Biologie
Spécialité : Biodiversité et physiologie végétale.

Sujet :

Contribution à l'étude de l'influence du Silicate de sodium sur
la germination et le début de croissance de *Pisum sativum*
subsp arvense en condition d'un stress salin

Présenté par :

M^{elle} OKBI YASMINA

Mr AIT OUFFROUKH TARIQ ABDELHAMID AMIR

Dirigé par :

Mr Dj. Medjebeur.

Le jury :

Présidente : Mme Taleb K. MCA.UMMTO

Examinatrice: Mme. Hannachi .L.MCA.UMMTO.

Promoteur: Mr. Medjebeur Dj. MCB.UMMTO.

Co promotrice: Mme Mekhloufi H .doctorante.

Promotion 2023-2024

Remerciements

Avant tout, on remercie le bon Dieu le tout puissant de
Nous avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience
Pour réaliser ce travail.

On tient à exprimer notre profonde gratitude à notre
Promoteur, Mr Medjebeur pour son aide, sa compréhension,
ses conseils qui nous ont beaucoup enrichis, ses orientations
et sa patience avec nous.

Nos sincères remerciements à Madame **MAKHLOUFI**
pour sa précieuse aide et compréhension.

Nous remercions tous les membres du jury à savoir M^{elle}
HANNACHI, Madame Taleb, pour
L'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre
mémoire.

DEDICASES

C'est avec une joie immense et le cœur ému que je dédie ce mémoire à ma chère famille pour leur affections inépuisables et leur précieux conseils .Ils n'ont cessé de prie pour moi durant mon cursus scolaire et m'ont encouragé régulièrement.

A ma mère

Source inépuisable de tendresse ; de patience et de sacrifices .Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie .Quoique je puisse dire et écrire ; je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. J'espère ne jamais te décevoir ; ni trahir ta confiance et tes sacrifices .Puisse Dieu tout puissant ; te préserver et t'accorder santé ; longue vie et bonheur.

A mon père

De tous les pères ; tu es le meilleur .Aucune dédicace ne saurait exprimer ma reconnaissance et mon profond amour .Puisse Dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur .Vous êtes et vous rester pour moi ma référence ; la lumière qui illumine mon chemin .Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez preuve ; de l'encouragement et le soutien que vous ne cessez de manifester ; j'espère que vous y trouverez les fruits de votre semence et le témoignage de ma grande fierté de vous avoir comme père .

Enfin à toutes mes sœurs adorables : Nina, Hanane, Sabrina, Thiziri et mon petit frère Karim, à tous ceux qui m'ont porté leur soutien, leur

Encouragement et à ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à

Réaliser ce modeste travail.

Yasmina.

DEDICASES

Ce mémoire est dédiée a toutes les personnes qui ont contribué a sa réalisation et qui ont soutenu mon parcours tout au long de cette aventure. A ma famille, pour leur amour inconditionnel et leur soutien constant.

A ma mère

Ce mémoire est dédiée a ma mère, dont le mémoire reste une source inépuisable d'inspiration et de force bien que tu ne sois plus parmi nous, ton amour et ta sagesse continuent de guider chacun de mes pas .A toi qui a toujours cru en moi et m'a encouragé dans chaque étape de mon parcours je dédie ce travail en hommage a ton soutien indéfectible et a ton héritage précieux.

A mon père et mes frères

Ce mémoire est dédiée a mon cher papa et a mes frères, dont le soutien inébranlables et l'affection, m'ont été d'une aide précieuse tout au long de ce parcours. Votre présence et votre encouragement ont été une source constante de motivation et de force.

Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Abdelhamid.

Sommaire :

*

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

Introduction	1
I. Généralités sur le pois fourrager	3
I. 1. Description morphologique	3
I. 1.1 .La partie racinaire.....	3
I. 1.2. La partie aérienne	4
I. 1.2.1. Tige	4
I. 1.2.2. Feuille.....	4
I. 1.2.3. Fleurs	4
I. 1.2.4.Fruit	5
I. 2. Classification taxonomique	6
I. 3. Exigences de <i>Pisum sativum</i>	6
I. 4. Intérêt des légumineuses fourragères	6
I. 4.1. Protéines.....	7
I. 4.2. Fibres	7
I. 4.3. Minéraux.....	7
I. 4.4. Energies	7
I. 4.5. Vitamines.....	7
I. 5. Intérêt écologique	7
I. 5.1. Fixation d'azote	8
I. 5.2. Amélioration de la fertilité du sol	8
I. 5.3. Couverture du sol et protection contre l'érosion	8
I. 5.4. Contribution a la biodiversité	8
II. Généralités sur la germination et la salinité	8
II. 1 .Notion de germination	8
II. 1.1. Etapes de germination.....	8
II. 2. Le stress salin	9
II. 2.1. La salinité du sol.....	9
II. 2.2. Le stress salin.....	9
II. 2.3. Le stress oxydatif.....	10
II. 2.4. Le stress osmotique	10
II. 2.5. Le stress ionique	10
II. 3. Influence du stress salin sur la plante	10
II. 3.1. Effet du stress salin sur la germination de la plante.....	10

II.	3.2. Effet de la salinité sur la croissance de la plante	11
II.	3.2.1 .Effet osmotique	11
II.	3.2.2. Effet ionique et spécifique	11
II.	3.3. Effet de la salinité sur la morphologie de la plante.....	12
II.	3.4. effet de la salinité sur la photosynthèse.....	12
II.	3.5. Tolérance des plantes a la salinité	12
II.	3.5.1. Stratégies de détoxification contre le stress oxydatif	13
II.	3.5.2. Homéostasie hydrique contre le stress osmotique	13
II.	3.5.2.1. Compartimentation vacuolaire	13
II.	3.5.2.2. Exclusion d'équilibre ionique	14
II.	3.5.2.3. Ajustement ionique	15
II.	3.5.2.4. Stratégies osmotiques.....	15
III.	Définition du silicium	16
III.	1. Teneur du Silicium chez les plantes	17
III.	2. Rôle du silicium chez les plantes	17

Chapitre 02 : Matériels et méthodes

I.	Matériels d'études	19
I.	1. Matériels utilisé	19
I.	2. Matériels végétale.....	19
II.	Méthodes d'étude.....	19
II.	1. Protocole expérimentale.....	20
II.	1.2. Préparations des solutés.....	20
II.	1.3. Préparations des graines.....	20
II.	1.4. Le priming.....	21
I.	Mise en culture.....	21
II.	Paramètres mesurés.....	21
II.	1. Taux de germination finale.....	21
II.	2. Temps moyen de germination.....	21
II.	3. Cinétique de germination.....	22
II.	4. Détermination des longueurs de la tige et de la racine principales des plantules.....	23
II.	5. Détermination de la biomasse des plantules.....	24
II.	6. Analyse statistique.....	24

Chapitre 03 : Résultats et discussions

I.	Effet du silicate de sodium sur la germination des graines de (<i>Pisum sativum subsp. arvense.</i>) en condition de stress Salin	25
I.	1 .Effet sur la cinétique.....	25
I.	2. Effet de Silicate de sodium sur le taux de germination des graines de <i>Pisum sativum subsp. Arvense</i> en condition du stress salin	27
I.	3.Effet de silicate de sodium sur le temps moyen de germination (TMG) de <i>Pisum sativum subsp. Arvense</i> en condition du stress salin.....	28
I.	4. Effet de silicate de sodium sur les longueurs de tiges des plantules de <i>Pisum sativum subsp. Arvense</i> en condition du stress salin	29
I.	5. Effet du silicate de sodium sur les longueurs de racine de <i>Pisum sativum subsp. Arvense</i>	30
I.	6. Effet du silicate de sodium sur la biomasse des plantules <i>Pisum sativum subsp. Arvense</i> en condition du stress salin.....	31
II.	Discussion	33
	Conclusion.....	35
	Références bibliographiques.....	
	Perspectives.....	
	Annexes	

Listes des abréviations

NaCl : Chlorure de sodium

Si : Silicium

g/L : Gramme par litre

cm : centimètre

C° : degré Celsius

D0 : témoin

D3 : NaCl à 3g/L

D6 : NaCl à 6g/L

D9 : NaCl à 9g/L

D15 : NaCl à 15g/L

SI2 : Silicium à 2g/L

SI4 : Silicium à 4g/L

K+ : Ion de potassium

Na+ : Ion de sodium

Cl- : Ion de chlorure

Ca²⁺ : Ion de calcium

ROS : Espèces réactives d'oxygènes

SOD: Super oxyde Dismutase

TMG: Temps moyen de germination

TG: Taux de germination

Introduction

Introduction

Introduction :

Le fourrage fait référence à tous les végétaux (herbes de prairie, céréales, maïs, pailles, racines, tubercules) utilisés pour nourrir les animaux, principalement les ruminants. La consommation des fourrages produits peut être soit à l'état frais (pâturage) soit en distribution en vert, soit une fois récolté et conservé sous forme ventilé (en plein air) ou sous forme humide (ensilage). Le rôle des cultures fourragères est lié en grande partie au rôle de l'élevage qui les valorise. (Renaud 2002).

La famille Leguminosae ou Fabaceae occupe la troisième place en termes de nombre de genres de plantes à fleurs, derrière les Orchidaceae et les Asteraceae. Elle compte 730 genres avec 19400 espèces (Rasanen., 2002).

La culture du pois (*Pisum sativum* subsp. arvense L.) est répandue à travers le monde et il est considéré comme la deuxième légumineuse la plus consommée après le pois chiche, et il est indéniablement la culture de jardin la plus appréciée. Cette espèce joue un rôle essentiel dans la nutrition animale en tant que source riche en protéines, et en vitamines et surtout représente une grande surface de production d'herbage pour les ruminants (Sumner et Al. 1980).

La salinité des eaux et des sols constitue une limitation sérieuse de la croissance et du rendement des cultures dans le monde, Les zones arides et semi-arides présentent des risques de salinité plus élevés, avec une faible pluviométrie, une forte évapotranspiration et une eau d'irrigation fortement minéralisée (SHANNON, 1986).

Les végétaux réagissent différemment au stress salin, en fonction de l'espèce, de la variété et surtout du stade de développement. La salinisation secondaire en Algérie après l'irrigation avec des eaux minéralisées a provoqué une augmentation de la salure dans de nombreuses zones irriguées, en particulier dans le milieu arides et semi-arides.

Selon DROUHIN (1961), l'Algérie est parmi les pays les plus confrontés aux contraintes de salinité. De plus, selon DAOUD et HALITIM (1994).

Le silicium est un élément minéral très abondant dans les sols. Classé dans la catégorie des éléments bénéfiques. Sa teneur est très variable chez les espèces végétales. Son rôle n'est pas vérifié chez toutes les plantes. A titre d'exemple chez les céréales, le Si permet le renforcement des tiges en chaume et protège les plantes contre la verse (Marschner, 2012)

Introduction

Récemment, l'utilisation du silicium (Si) a attiré l'attention de plusieurs chercheurs agronomes (Haghighi et al. 2012). De nombreuses études ont montré qu'il peut influencer positivement la germination, la croissance et le rendement des plantes et particulièrement, l'amélioration de leurs résistances aux stress abiotiques et biotiques (Ma et al., 2001).

En outre, notre recherche a pour objectif d'analyser le rôle du silicium dans la réduction des effets du chlorure de sodium sur les graines du pois fourrager *Pisum sativum* subsp Arvense, variété "Sefrou", cultivées en Algérie. Nous avons étudié plusieurs paramètres liés à la germination et au développement des plantules après avoir été exposées à différentes concentrations de NaCl.

Ce mémoire se compose de trois chapitres :

Le chapitre initial est dédié à la synthèse bibliographique sur *Pisum sativum* subsp. Arvense (le pois fourrager) ; cette partie traite également les effets de la salinité sur la physiologie et le développement de la plante et l'apport de Silicium dans l'amélioration de la résistance et la tolérance aux contraintes abiotique d'une manière générale et la salinité en particulier.

Le second chapitre représente la description du matériel et des méthodes utilisées.

Concernant le troisième chapitre, il est consacré aux résultats obtenus et la discussion qui va avec.

En somme, ce mémoire se termine par une conclusion générale.

Chapitre 01

Synthèse

Bibliographique

I. Généralités sur le pois fourrager :

Le pois fourrager (*Pisum sativum subsp. arvense.*) est une légumineuse d'hiver de la famille des Fabaceae, cultivée de manière étendue en Asie du Sud-Ouest, en Europe, en Amérique du Nord, au Japon, en Australie, dans les pays méditerranéens et en Éthiopie pour ses multiples usages comme les légumes secs, les pois frais et fourrage pour le bétail. Sa valeur nutritionnelle est notable, contenant une gamme riche en minéraux (comme le fer, le magnésium, le phosphore et le zinc), en vitamines (telles que la vitamine A, C, K, thiamine, niacine, acide folique, pyridoxine et acide pantothénique), en glucides et en protéines (à hauteur de 19 à 27 %), tout en étant pauvre en composés antinutritionnels. Du fait de sa faible teneur en matières grasses, en sel et en cholestérol, il est considéré comme un agent restaurateur de la fertilité des sols, grâce à sa capacité de fixation symbiotique de l'azote (Khan et al. 2022).

1. Description morphologique :

1.1. La partie racinaire :

Le pois fourrager (*Pisum sativum subsp. arvense.*) possède un système racinaire composé d'une racine principale pivotante, sur lequel se forme les racines latérales primaires, secondaires, tertiaires (figure 01) .Les nodosités, siège des interactions symbiotiques avec les bactéries fixatrices d'azote sont localisés principalement sur les racines latérales. (Pauline .2020)



Figure 01 : partie racinaire de *Pisum sativum subsp Arvense* (Alamy, 2007).

1.2. La partie aérienne :

1.2.1. Tige :

Les tiges de cette plante présentent une longueur qui varient entre 30 cm à 150 cm .Ce sont des tiges herbacées grimpante à vrilles, fines et cylindriques, arrondies qui ont une croissance indéfinie (Khan, 2004).



Figure 02 : tige de *Pisum sativum subsp Arvense* (Alamy, 2018).

1.2.2 Feuilles :

Les feuilles sont composées généralement de plusieurs folioles modifiées en vrilles. Elles présentent une couleur allant du vert jaunâtre au bleu vert (cousin.1997. Il existe plusieurs formes de feuilles, des feuilles normales qui ont plusieurs folioles attachées au pétiole, des feuilles affilées qui ont une forme allongée et pointue, cylindrique (Khan .2004).

1.2.3. Fleurs :

Les fleurs du (*Pisum sativum* subsp. Arvense) sont caractéristiques de la sous famille des papilionacées. Elles sont composées de pétales de différents couleurs allant du blanc au pourpre voir au rose. Ces fleurs sont généralement zygomorphes, principalement autofécondée (Khan 2004).



Figure 03 : fleur de *Pisum sativum* subsp Arvense (Alamy, 2018).

1.2.4. Fruit :

Les gousses de (*Pisum sativum* subsp. Arvense) sont d'une taille petite et variable renfermant peu de graines entre 4 et 12 graines .Ils sont souvent d'une couleur verte avec un texture lisse .Ils sont riche en tanins. (Jandoubi et *al.* 2021).



Figure 04 : Morphologie de la partie aérienne du *Pisum sativum* (Techno-Science ,2015)

2. Classification taxonomique (USDA 2008) :

Embranchement	Phanérogames
Sous –embranchement	Angiospermes
Classe	Magnolipsida ;(Dicotylédones)
Sous-classe	Rosidae
Ordre	Fabales
Famille	Fabaceae (légumineuses).Papilionacée
Sous-famille	Faboideae ; Papilionideae
Tribu	Fabaceae
Genre	Pisum
Espèce	<i>Pisum sativum L.</i>
Sous –espèce	Arvense

3. Exigences du *Pisum sativum* :

Il est cultivé dans tous les pays tempérés et dans la plupart des hautes terres tropicales .Le pois a besoin d'un climat relativement frais, les températures moyennes doivent être comprises entre 7° et 24°C, pour les rendements optimaux entre 13° et 21°C C. *Pisum sativum* est cultivé dans des régions ou la précipitation ne dépassent pas 400 mm ,mais la pluviométrie idéale est de 800mm jusqu'à 1000mm par an. Il est légèrement sensible à la longueur du jour car les jours longs favorisent la floraison. Le *Pisum sativum* pousse dans des sol de toutes natures dotés de niveaux de fertilité modéré, bien drainé et à un pH de 5.5 -7, bien que certain cultivar tolèrent un pH allant jusqu'à 7.5 (Brink et bilay 2006) .

4. Intérêts des légumineuses fourragères

Les légumineuses fourragères sont souvent utilisées comme aliments pour le bétail plutôt que pour la consommation humaine, donc leurs valeurs nutritionnelles sont généralement analysées en fonction de leur utilisation dans l'alimentation animale. Voici quelques exemples de valeurs nutritionnelles typiques pour certaines légumineuses fourragères

Elles sont généralement riches en protéines, avec des taux pouvant varier entre 15% et 25% de leur poids sec. Elles constituent une source de protéines de haute qualité pour les animaux d'élevage, ruminants en particulier. Leur teneur en protéines brutes peut atteindre 20 à 30% de la matière sèche, contre 10 à 15% pour les graminées. Cela permet de réduire les besoins en aliments concentrés riches en protéines, souvent coûteux et polluants.

Elles contiennent également des fibres alimentaires, qui peuvent aider à la digestion chez les animaux. Les niveaux de fibres varient selon la légumineuse spécifique, mais elles sont généralement considérées comme une source de fibres de qualité pour les animaux.

Elles peuvent fournir une gamme de minéraux essentiels tels que le calcium, le phosphore, le magnésium et le potassium.

La teneur en énergie des légumineuses fourragères varie selon leur composition en hydrates de carbone et en graisses. Certaines peuvent fournir une quantité importante d'énergie, tandis que d'autres peuvent être plus faibles en énergie mais riches en protéines, en ce qui concerne les vitamines elles peuvent également contenir des vitamines telles que la vitamine A, C (B .Heuzé et al. ,2015).

5. Intérêts écologique :

Les légumineuses fourragères jouent un rôle essentiel dans les systèmes d'élevage durables .Elles permettent de produire une alimentation animale de qualité tout en préservant l'environnement.

Grâce à leur symbiose avec des bactéries rhizobiennes, les légumineuses fixent l'azote atmosphérique et le rendent disponible pour les plantes. Cela permet de réduire l'utilisation d'engrais azotés de synthèse, polluants pour l'eau et l'air.

En enrichissant le sol en azote, les légumineuses contribuent à améliorer sa fertilité et sa structure.

Les légumineuses avec leur feuillage dense, permettent de bien couvrir le sol, ce qui limite l'érosion et favorise la conservation de l'eau

Les prairies riches en légumineuses offrent un habitat pour une grande variété d'insectes pollinisateurs et d'autres animaux. (Baumont et al . ,2016).

II. Généralités sur la germination et la salinité :

1. Notion de germination :

La germination est le passage de la vie latente à la vie active de la graine selon les conditions favorables. C'est un phénomène par lequel le développement de l'embryon s'effectue en utilisant les réserves de la graine grâce à ces stocks .Le premier organe qui apparait une fois la germination est terminée est la radicule , (Mazliak ,1982).

1.1. Etapes de la germination :

C'est l'ensemble des étapes qui commencent par l'imbibition des graines par l'absorption de l'eau, ensuite la reprise de l'activité respiratoire, cela implique la réactivation des processus métaboliques tels que la glycolyse, le cycle de Krebs et la chaîne respiratoire pour fournir de l'énergie à la graine durant la germination. Les réserves stockées dans la graine sont mobilisées pour fournir des nutriments aux cellules embryonnaires, ensuite on a l'élongation de l'axe embryonnaire qui conduit la graine à l'émergence de la radicule qui est la première racine qui apparaît dans la plante (Mazliak, 1982).

2. Le stress salin

2.1. La salinité du sol :

Un sol salin est basé sur les mesures de conductivité électriques (CE), de l'extrait de saturation de (CE) dans la zone de la plante. Lorsque la conductivité électrique de l'ECe dans la zone de la racine dépasse 4 ds m⁻¹ à 25°C avec un taux de sodium échangeable de 15% (Musa al Murad et al .2020) et générant une pression osmotique d'environ - 0.2MPa (USDA. 2008). Le sol est dit salin.

2.2. Le stress salin :

Le stress lié à la salinité dû à l'accumulation des ions Na⁺ et Cl⁻ dans le sol à des concentrations supérieurs au niveau adéquats, cela engendre une réponse chez les plantes qui mettent en places divers mécanismes pour faire face à ce stress. Les sels impliqués dans ce stress varient en fonction de la salinité correspondant principalement aux cations de sodium (Na⁺), potassium (K⁺), calcium (Ca⁺⁺), magnésium (Mg⁺⁺), ainsi que les anions chlore (Cl⁻), sulfate (So⁴⁻), carbonate (Co³⁻) et nitrate (No³⁻) (Musa al Murad, 2020).

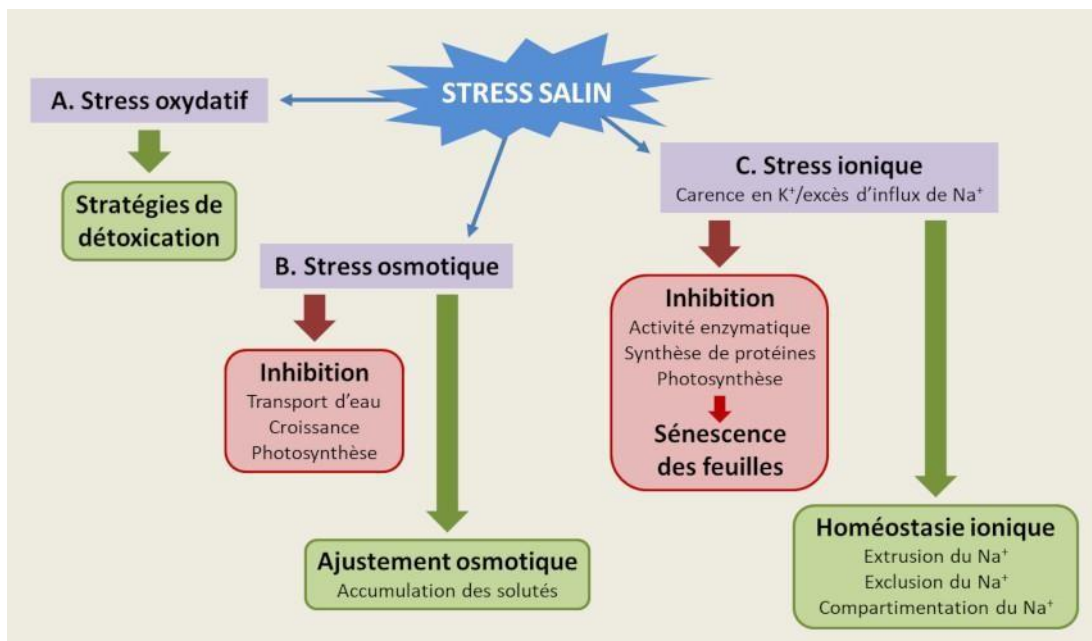


Figure 05 : Effets délétères liés à la toxicité du stress salin et réponse cellulaire mise en place pour assurer la tolérance. Chez les plantes halophiles, l'excès de sel dans le sol provoque un stress ionique, oxydatif et osmotique qu'elles doivent gérer en mettant en place des stratégies pour maintenir (A) les molécules du stress oxydant à un niveau acceptable, (B) l'équilibre osmotique, et (C) l'homéostasie ionique. (Encyclopédie de l'environnement ,2020).

2.3. Le stress oxydatif :

Le stress oxydatif résulte du déséquilibre entre la production d'espèce réactive d'oxygène (pro oxydants) et la capacité des systèmes de défenses de l'organisme à neutraliser (antioxydants), ce déséquilibre entraîne une accumulation excessive de pro oxydants tel que les radicaux libres (ROS), ces radicaux libres peuvent endommager les cellules, les protéines, les lipides et l'ADN (S.Rasool et *al.* 2013).

2.4. Le stress osmotique :

Le stress osmotique est une condition où l'accumulation d'ions à des concentrations plus élevés que les nécessaires dans le sol réduit le potentiel osmotique, ce qui entrave l'absorption de l'eau et des nutriments par la plante (Shao et *al.* 2008).

2.5. Stress ionique :

Le stress ionique est l'accumulation des ions de calcium (Na^+) et de chlorure (Cl^-) en quantité excessive dans les cellules végétales, ce qui affecte le rapport K^+/Na^+ (Yang and Guo 2018).

3. Influence du stress salin sur la plante :

La salinité a un impact défavorable sur le développement des plantes, elle provoque des perturbations multiples sur le métabolisme, sur la croissance et le développement des plantes aux niveaux moléculaires, chimiques et physiologiques (M. Hanana 2011).

3.1. Effet du stress salin sur la germination de la plante :

La salinité a une influence significative sur la germination des graines, une des phases critique dans la vie des plantes, elle inhibe complètement la germination à des niveaux élevés ou induit un état de dormance à faible niveaux (Kochak et *al.* 2013), cela est causé par l'augmentation de la pression osmotique de la solution du sol ce qui ralentit l'imbibition et limite l'absorption de l'eau nécessaire pour déclencher les processus métaboliques impliqués dans la germination (Hajlaoui et *al.* 2007). En conséquence le stress salin entraîne une croissance des plantes (Almansouri et *al.* 2001) cela est due aux perturbations dans les systèmes enzymatiques impliqués dans divers fonctions physiologiques de la graines comme

la réduction de l'activité de polyphénols oxydases, des amylases et des peroxydases (Hajlaoui et *al.* 2007).

3.2. Effet de la salinité sur la croissance de la plante :

L'impact de la salinité sur la croissance des plantes peut être attribué à deux facteurs principaux. D'une part, le stress osmotique résultant de la salinité entraîne une diminution de la turgescence cellulaire. D'autre part la salinité conduit à une réorientation des voies métaboliques du carbone et de l'azote vers les processus de protection, de réparation et d'ajustement osmotique, au détriment de la production de biomasse. De plus l'excès d'ions Na^+ et Cl^- induit par la salinité crée un déséquilibre nutritionnel qui entrave l'absorption des ions essentiels tel que K^+ , Ca^{++} et NO_3^- à la croissance des plantes (Haouala, *et al.* 2007). La salinité induit à une diminution significative de la biomasse, la longueur racinaire, la hauteur des tiges, le nombre de feuilles et la surface foliaire (Mohamed et *al.* 1998). Le potentiel hydrique et le potentiel osmotique diminuent sous le stress salin mais le potentiel de la pression peut rester relativement stable, sous le stress salin le rapport racine /pousse augmente ce qui indique une modification de la réparation de la matière sèche (Meloni et *al.* 2001).

3.2.1. Effet osmotique :

Le stress salin affecte le potentiel osmotique des plantes, provoquant une diminution notable du potentiel osmotique des feuilles. Pour faire face à cette perturbation, les plantes ajustent leur osmose principalement par l'accumulation d'ions tel que le sodium (Na^+) et le chlorure (Cl^-) dans leur racine et feuilles, ce qui aide à maintenir l'équilibre osmotique interne malgré le stress. La proline joue un rôle dans ce processus, l'accumulation de Na^+ et Cl^- se révèle être plus significative pour l'ajustement osmotique sous salinité élevée (Meloni et *al.* 2001).

3.2.2. Effet ionique et spécifique :

Lorsque la salinité augmente il y a une accumulation du sodium (Na^+) et de chlorure ce qui perturbe l'équilibre ionique et modifie la disponibilité d'autres ions, le potassium (K^+) reste stable dans les feuilles et diminue dans les racines sous conditions salines élevées, les concentrations de calcium (Ca^{++}) et de magnésium (Mg^{++}) diminuent dans les feuilles, mais restent inchangés dans les racines. Le rapport de sélectivité K/Na augmente, ce qui indique que les plantes essaient de maintenir l'équilibre ionique optimal (Meloni et *al.* 2001)

3.3. Effet de la salinité sur la morphologie de la plante :

La morphologie d'une plante est le reflet de ses conditions environnementales, fournissant des informations sur sa fonction métabolique. L'augmentation de la teneur en sel, et en particulier en chlorure de sodium dans l'environnement de culture affecte d'une manière significative la morphologie de la plante. Le sodium dans l'environnement affecte significativement l'apparence physique de la plante (Mihaela et al. 2023). Le premier signe visible du stress salin chez les plantes est généralement un ralentissement de la croissance avec des feuilles souvent teintées de vert bleuâtre (Zahra et al. 2020). Plusieurs changements peuvent apparaître à tous les stades de développement lors d'un stress salin affectant la hauteur des plantes le rapport racine tige la surface foliaire le nombre de branches, le nombre de feuilles et de fleurs par plante (Negrao et al. 2017).

3.4. Effet de la salinité sur la photosynthèse :

La salinité affecte la photosynthèse par la réduction de la conductance stomatique, les effets spécifiques des ions et l'inhibition des mécanismes photosynthétiques. L'accumulation de Na^+ et Cl^- est considérée comme l'une des principales causes du déclin de la photosynthèse chez les plantes soumises au stress salin (Lloyd et al. 1989). Le stress salin réduit le taux de photosynthèse des plantes ceci est principalement due à la fermeture des stomates pour limiter les pertes en eau (Munns and Tester, 2008), lorsque les stomates se ferment, le taux de diffusion du CO_2 dans les feuilles se diminuent, ce qui entraîne souvent une réduction de l'activité de plusieurs enzymes impliquées dans le processus de photosynthèse, notamment la Rubisco (Chaves et al. 2009).

La réduction de l'espace foliaire chez les plantes soumises à un traitement au sel entraîne une diminution de la densité de chloroplastes par unité de surface foliaire. Cela affecte la quantité de chlorophylle présente dans les feuilles, cette diminution affecte négativement la capacité de la plante à effectuer la photosynthèse (Munns et Tester, 2008).

3.5. Tolérance des plantes à la salinité :

La tolérance des plantes au stress salin se manifeste par leur capacité à s'adapter à ce stress en mettant en œuvre divers mécanismes physiologiques. Ces mécanismes visent à limiter l'entrée du sel dans la plante et réduire son accumulation dans les tissus photosynthétique et cytoplasmique.

3.5.1. Stratégies de détoxification contre le stress oxydatif :

Les formes actives d'oxygène tel que le peroxyde d'oxygène (H_2O_2), les radicaux libres superoxydes (O_2^-) et hydrophile (OH) sont produites lors des processus cellulaires aérobies et augmente en réponse au stress abiotique comme la salinité (Foyer et Noctor, 2000). En quantité modérées ces composés peuvent servir des signaux pour induire des gènes de défense cellulaire (Parent et al. 2008). Cependant leur accumulation excessive peut causer des dommages oxydatifs nuisant aux structures cellulaires et perturbants le métabolisme de la plante (Mahajan et al. 2008). Pour éliminer ces formes actives d'oxygène, les plantes disposent d'antioxydants comme les composés phénoliques et l'acide ascorbique ainsi que d'enzymes telle que la superoxyde dismutase (SOD) et la catalase (CAT) qui neutralisent ces substances toxiques (Turkan et Demiral, 2009). La sur expression de certains enzymes comme (SOD) chez les plantes transgénique peut améliorer leur tolérance au stress salin ou osmotique (Tanaka et al. 1999 ; Amaya et al. 1999).

3.5.2 .Homéostasie hydrique contre stress osmotique :

3.5.2.1. Compartimentation vacuolaire :

Cette méthode implique le transport actif des ions Na^+ excédentaires du cytoplasme vers la vacuole pour prévenir leur effet toxique et inhibiteur sur les processus enzymatiques (Flower et al. 1977). Ce processus de compartimentation vacuolaire repose sur l'action d'un antiport sodium /proton (Na^+/H^+) dont l'énergie est fournie par les pompes à protons ATPase et PPase vacuolaires (Apse et al. 1999). Grâce à ce processus de compartimentation du sodium dans la vacuole, la cellule parvient à maintenir une faible concentration de sodium dans le cytoplasme minimisant ainsi son effet toxique parallèlement l'augmentation de la concentration de sodium dans la vacuole entraîne une forte pression osmotique qui favorise l'absorption d'eau améliorant ainsi la turgescence des cellules (Glenn et al. 1999, Apse et Blumwald, 2007).

Mouvements d'ions de sodium Na^+ des feuilles vers la racine et l'empêchement de leur circulation vers les parties aérienne :

Chez les plantes (inclure) les flux de sodium sont principalement ascendants et le sel est accumulé dans les parties aériennes au niveau des vacuoles, en revanche chez les plantes (exclure) la majeure partie de sodium absorbé et transporté vers les feuilles est réexportée vers les racines via le phloème ou initialement stockées dans les racines (Lavigneron et al. 1995)

3.5.2.2. Exclusion d'équilibre ionique :

La régulation du transport des ions permet de maintenir une concentration ionique compatible avec un métabolisme cellulaire normale (Cornillon et Palloix 1995), l'exclusion commence par la sélectivité de la membrane racinaire, impliquant une réduction de la perméabilité passive de transporteurs sélectifs et l'expulsion des ions absorbés (Apse et Blumwamd 2007). La régulation du métabolisme cellulaire et du transport ionique entraîne une dépense énergétique, limitée par la fourniture de carbone d'énergie et la vitesse de transport des ions, pouvant interférer avec la concentration du phosphore inorganique nécessaire au transfert d'énergie (Cornillon et Palloix 1995). L'exclusion du sodium est réalisée par l'action combinée des protéines SOS (Salt overly sensitive), ce sont des antiports Na^+/H^+ sur la membrane plasmique (Zhu 2003), les transporteurs HKT1 réduit l'accumulation de sodium dans la partie aérienne en recerclant le sodium des feuilles vers les racines via le phloème (Rus *et al.* 2001).

3.5.2.3. Ajustement ionique :

L'augmentation des concentrations vacuolaires de sodium nécessite l'élévation de la pression osmotique dans d'autres compartiments cellulaires pour maintenir leur volume

(Amtmann et Leigh 2010), les plantes synthétisent et accumulent des composés solubles pour maintenir la croissance cellulaire en conditions de stress ionique, mais elles utilisent également l'ajustement ionique pour équilibrer les concentrations d'ions et ajuster la pression osmotique dans le cytoplasme (Sairam et Tyagi 2004 ; Shabala et Cui 2008). L'augmentation de potassium K^+ contribue à l'ajustement osmotique et contrôle la turgescence cellulaire (Sairam et Tyagi 2004 ; Munns et Tester 2008), les cellules doivent maintenir une teneur en potassium entre 100 et 200 mmol/L pour préserver les réactions métaboliques et maintenir le rapport K/Na (Maathuis et Amtmann 1999).

3.5.2.4. Stratégies osmotiques :

La proline :

Chapitre 01 :

Synthèse Bibliographique

De nombreuses plantes qu'elles soient mono ou dicotylédones, augmentent rapidement leur teneur en proline en réponse au stress salin (Yoshida et al. 1999 ; Rhodes et al. 2002 ; Ortega et al. 2007). La proline est synthétisée via deux voies : l'ornithine et le glutamate prédominent en conditions de stress (Silva Ortega et al. 2007) cette synthèse est stimulée par l'augmentation des messagers codant pour l'enzyme convertissant le glutamate semi aldéhyde en proline (Bartels et Sunkar 2005). Elle agit comme un composé compatible dans l'ajustement osmotique, et atteint de fortes concentrations sans toxicité (Yancey et al. 1982 ; Silva Ortega et al. 2008). En plus de son rôle osmotique, la proline aide à la détoxification des formes actives d'oxygène (Hong et al. 2000 ; Kocsy et al. 2005), stabilise les protéines (Ashraf et Foolad 2007 ; Majumder et al. 2010) et protège l'intégrité de la membrane plasmique (Mansour 1998). La proline constitue une source de carbone et d'azote (Ahmed et Hellebust 1988 ; Peng et al. 1996 ; Sairam et Tyagi 2004), elle maintient le rapport NADP⁺/NADPH compatible avec le métabolisme cellulaire influençant le potentiel redox de la cellule (Hare et Cress 1997). L'apport exogène de proline peut améliorer la tolérance au stress dans certains cas, mais des concentrations élevées peuvent avoir des effets inverses (Ashraf et Foolad 2007 ; Hare et al. 2002 ; Nanjo et al. 2003).

Bétaine :

Les bétaines sont des dérivés de la proline ou d'autres acides aminés jouent un rôle dans l'ajustement osmotique et la protection enzymatique (Rathinasapabathi 2000 ; Gorham 1992) sous un stress salin le métabolisme de la choline (précurseur de la glycine bétaine) peut soutenir les flux transmembranaire par le renouvellement de la phosphatidylcholine composante essentielle des membranes cellulaires (Levigneron et al. 1995). La glycine bétaine, présente dans les chloroplastes, protège les membranes thylakoides, maintenant ainsi l'efficacité photosynthétique (Ashraf et Foolad 2007). Elle stabilise les macromolécules et préserve les membranes sous stress (Yancey 1994 ; Naidu 2003 ; Majumder *et al.* 2010).

Les sucres :

Les polyols (mannitol, sorbitol, tréhalose) augmentent le potentiel osmotique du cytoplasme facilitant la compartimentation du sodium dans la vacuole et agissent comme osmoprotecteurs des membranes et des protéines, en éliminant les radicaux libres d'oxygène (Bohner et Jensen 1996). Ils peuvent servir de source de carbone pendant le stress (Vernon *et al.* 1993).

I. Définition du Silicium (Si) :

Le silicium (Si) est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre. Dans une solution de sol au pH inférieur à 9,0, la forme prédominante est l'acide mono silicique, Si(OH)_4 , une forme non chargée avec une solubilité dans l'eau (25 °C) de 2mM (équivalent à 56 mg Si L⁻¹). L'essentialité de (Si) pour les plantes supérieures n'a été démontrée jusqu'à présent que pour quelques espèces végétales, mais il est bénéfique pour de nombreuses espèces et, dans certaines circonstances, pour la plupart des plantes supérieures (Marschner, 2012).

II. Teneurs du Silicium chez les plantes :

En général, la silice représente entre 0,1 et 10 % de la matière sèche des plantes supérieures. Ces

valeurs sont très similaires à celles observées pour divers éléments essentiels tels que le calcium (0,1 à 0,6 %) et le soufre (0,1 à 1,5 %). (Epstein 1994 ; Epstein 1999). Les concentrations observées sont même bien supérieures à celles des macroéléments chez certaines espèces ayant les plus fortes teneurs en silice. Même à des concentrations très basses, d'environ 0,1 %, la silice présente dans les tissus végétaux la même concentration que celle parfois observée pour des éléments aussi indispensables que le phosphore et le magnésium (Epstein 1994 ; Epstein 1999). La quantité de silice présente dans les tissus végétaux diffère considérablement d'une espèce à l'autre par rapport aux autres éléments. La différence peut aussi être significative entre les variétés au sein d'une même espèce. Cette différence est en partie due à la plante elle-même, car elle est capable d'absorber la silice, mais aussi à l'environnement et à la nature du sol dans lequel elle se développe (Ma et al. 2001).

III. Rôles du Silicium chez les plantes (l'atténuation des stress) :

Pendant leur évolution, les plantes font face à de nombreux ennemis et conditions adverses qui peuvent leur entraîner un stress qui peut compromettre leur croissance et leur développement. D'un point de vue agricole, il est courant de constater des diminutions de rendement causées par un stress, qu'il soit biotique ou abiotique, ce qui entraîne des pertes importantes pour les agriculteurs. Diffusant jusqu'à l'endoderme, le silicium se relâche dans le xylème grâce à la fusion des deux transporteurs, ce qui lui permet d'atteindre les différentes parties de la plante.

Différentes recherches montrent que l'apport de silicium a un effet bénéfique sur la résistance aux effets néfastes des stress abiotiques chez les plantes. Parmi d'autres, la silice contribue à augmenter la résistance à la verse, à la sécheresse et à la toxicité des métaux lourds et des sels (Epstein 1994 ; Epstein 1999).

Le silicium contribue principalement à réduire les stress climatiques en se déplaçant dans les tissus de la plante. La présence de **(Si)**, sur les parois cellulaires et les faisceaux vasculaires, entraîne une accumulation accrue. Les tissus présentent une grande rigidité, ce qui leur confère une meilleure résistance à la chute lors de vents violents (Ma et al. 2001). La diminution de la transpiration est également favorable en présence d'une forte salinité puisqu'elle permet un meilleur stockage de l'eau à l'intérieur des tissus diminuant ainsi, par dilution, l'impact du sel (Romero-Aranda et al. 2006). La silice est aussi utile en présence de concentrations toxiques de certains minéraux comme l'aluminium et le manganèse, même si son mécanisme d'action n'est pas encore clairement défini. (Ma et al. 2001).

Le (Si) et le stress salin :

La principale cause est la salinité causée par les sels de sodium à forte concentration. Les membranes plasmiques et vacuolaires, ainsi que celle du chloroplaste, sont gravement endommagées par la salinité. L'impact du (Si) concerne la correction des dommages membranaires: comprennent une diminution de la perméabilité, une inhibition de la peroxydation des lipides, une diminution de la concentration de sodium dans les tissus et une augmentation de celle de potassium et de calcium, ainsi qu'un stockage du sodium dans les caillots. En conséquence, on observe une diminution du stress osmotique, une augmentation de l'absorption de l'eau par les racines et une amélioration de son utilisation (réduction de l'évapotranspiration). (Ma et al. 2001) Dans l'ensemble, les fonctions trophiques sont stimulées : l'activité de la racine, l'amélioration du rendement photosynthétique (augmentation de l'approvisionnement en CO₂) et une augmentation significative de la biomasse. La correction par le (Si) des effets négatifs de la salinité a été observée pour le riz, le blé, l'orge, le concombre, la tomate). (Habibi et al., 2014).

Chez le riz, on a observé une inhibition de 60 % de la croissance des pousses et des racines du riz en utilisant 100 mM de NaCl pendant une période de trois semaines. Pendant trois semaines, on a utilisé 100 mM de NaCl, mais l'ajout de Si a grandement réduit les dégâts causés par le sel (Match et al. 1986) et au blocage partiel du flux de contournement de la transpirationnel, voie par laquelle une grande partie de l'absorption de grande partie de l'absorption de Na dans le riz (Yeo et al. 1999). Chez l'orge, le Si a augmenté l'activité de la superoxyde dismutase des feuilles et supprimé la peroxydation des lipides causée par le stress salin et a stimulé la H⁺-ATPase de la racine dans les membranes dans les membranes, ce qui suggère que le Si peut affecter la structure, l'intégrité et les fonctions des membranes plasmiques en influençant la peroxydation dépendante du stress en influençant la peroxydation des lipides membranaires dépendante du stress, bien que ces effets puissent être indirects (Liang et al. 2002).

Chapitre 02

Matériel et méthodes

I. Matériels d'étude :

1. Matériel végétale :

Nous avons utilisé une variété de pois fourrager *Pisum sativum subsp. Arvense*. La plus cultivée en Algérie depuis longtemps d'origine Marocaine (ITGC). Les graines proviennent de la récolte de 2021 d'une station située à la Willaya d'Alger et elles nous ont été fournies par l'institut technique des grandes cultures (ITGC) située à el Harrach à Alger. Ces graines n'ont pas subi aucun traitement et elles étaient stockées dans un endroit sec à température ambiante du laboratoire.



Figure 07 : graines du pois fourrager *Pisum sativum subsp. Arvense*

II. Méthodes d'étude :

Le présent travail est réalisé au niveau du laboratoire d'écophysiologie végétale du département des sciences biologiques de l'université de Mouloud Mammeri.

Nous avons procédé à des essais concernant l'effet de différentes concentrations du sel (Na Cl à 3g/l 6g /l 9g /l 15g/l), combinés avec deux concentrations de silicate de sodium (Si à 2g/l 4g/l) sur la germination des graines et le début de croissance de *Pisum sativum subsp. Arvense*

II.1. Protocole expérimentale :**II.1.2. Préparations des solutés :**

Préparations des solutions à différentes concentrations du Na Cl (3, 6, 9,15 g /L).

Préparation des deux solutions de silicate de sodium (Si).

II.1.3 Préparation des graines :**II.1.3.1. Tri des graines :**

Nous avons trié les graines manuellement, en éliminant toutes celles qui présentent des signes d'attaque des insectes (graines trouées ou abimées). Nous avons tenu à sélectionner un lot de graines relativement homogène.

II.1.3.2. Désinfection des graines :

Nous avons désinfecté les graines avec de l'eau javel pendant 5min, ces dernières sont ensuite rincées abondamment à l'eau distillée.

II.1.3.3. Pré-imbibition :

Après la désinfection des graines, ces dernières sont mises dans l'eau distillée pendant 10min.

II.1.4 .Le priming :

Dans cette étude ,des graines de pois fourrager sélectionnées ont été soumises à un traitement de priming utilisant du silicate de sodium à deux concentrations distinctes 2 et 4 g /L ,le priming a été réalisé en trempant les graines dans les solutions de silicate de sodium pendant une période de 48 heures avant leur mise en culture .

I. Mise en culture :

Les graines sont mises dans des boîtes de pétri en plastiques, tapissées de trois couches de papier absorbant à raison de vingt graines de *Pisum sativum* subsp. Arvense, par boîte de pétrie, le nombre de répétition est 4, ce qui fait par conséquent 80 graines par traitement (20 graines × 4 boîtes).

L'arrosage des graines est réalisé par 15ml de chaque dose de solution seule ou combiné au silicate de sodium, à raison de 3 fois par semaine.

Les boîtes de pétrie considéré comme témoins ont été arrosées avec de l'eau désilée .Un autre lot de boîte traité uniquement au silicate de sodium.

Les graines ont été ensuite mises dans l'étuve réglé à une température de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ correspondant à la température propice à la germination de cette espèce. Afin de suivre la germination des graines dans ses différents conditions, de stress salin et en évaluant l'effet du silicate de sodium sur d'éventuelles améliorations de la tolérance au sel.

Nous avons procédé à dénombrer quotidiennement le nombre de graines germés durant une période de 10 jours.

II. Paramètres mesurés :

Nous avons ensuite fait sortir ces boîtes de l'étuve et les mises sur la pailleuse au laboratoire pendant une période de 10 jours.

Nous avons ainsi calculé les différents paramètres tels que le taux de germination final, ainsi que les paramètres de croissance des plantules tels que la longueur des plantules leur partie aérienne et leur partie racinaire et leur poids frais et poids sec .Les longueur des plantules issues des graines germées était mesurée à l'aide d'une règle graduée en centimètre.



Figure 08 : Mise en germination des graines du *Pisum sativum* subsp Arvense (photos originale, 2024).

1. Taux de germination final :

Selon Côme, 1970 le taux de germination est généralement exprimé en pourcentage, en effectuant une évaluation du nombre final des graines germées puis on les divise sur le nombre totale des graines semées puis en multiplie sur 100.

Pour calculer le taux de germination, on utilise la formule suivante :

$$\text{TG \%} = (\text{Nombre de graines germées} / \text{Nombre totale des graines}) \times 100$$

2. Temps moyen de germination (TMG) :

Le TMG correspond au temps mis par les semences pour germer (Côme, 1970). Il est calculé selon la formule suivante :

$$\text{TMG} = \frac{(N_1T_1 + N_2T_2 + \dots + N_nT_n)}{(N_1 + N_2 + \dots + N_n)}$$

N_1 : nombre de graines germées au temps T_1

N_n : nombre de graines germées entre le temps T_{n-1} et le temps T_n

T : nombre total de jours d'observation

3. Cinétique de germination :

La cinétique de germination des graines permet, de calculer chaque jour le taux de germination sous l'effet des différentes concentrations salines seuls ou combinés avec du silicate de sodium, elle est exprimé par le nombre de graines germés pour chaque jour depuis le début de l'expérience.

Selon (Côme, 1970), ce paramètre nous permet d'appréhender le comportement germinatif de la variété étudiée ainsi que les étapes telles que l'absorption de l'eau par la graine jusqu'à l'élongation de l'axe embryonnaire et l'émergence de la racicule.

4. Détermination des longueurs de la tige et de la racine principales des plantules :

Avec une règle graduée, on mesure les longueurs des racines principales et les longueurs des tiges à la fin de la germination.



Figure 09 : les plantules de *Pisum sativum* subsp *Arvense* après germination (photo originale, Avril 2024).

5. Détermination de la biomasse des plantules :

Une fois la germination est finit, les plantules sont pesées avec une balance de précision pour estimer le poids de la biomasse.

6. Analyse statistique :

Pour traiter nos résultats, on a procédé à l'analyse par logiciel R. nous avons appliqué aux résultats obtenus une analyse par le test Kruskal_walis pour le classement des groupes homogènes.

Résultats

I. Effet du silicate de sodium sur la germination des graines de (*Pisum sativum subsp. arvense.*) en condition de stress salin

1 .Effet sur la cinétique

La courbe illustrant la cinétique de germination des graines de *Pisum sativum subsp. Arvense* sous l'effet des concentrations croissantes de NaCl traité au silicate de sodium montrent trois phases différentes.

La première phase :

La phase de latence, nécessaire pour une imbibition adéquate des graines. Les traitements témoins, NaCl 3g/L, NaCl 6g/L, NaCl 9g/L, NaCl 15g/L ont une phase de latence qui prend une durée de deux jours maximum, hors que les traitements restants n'ont pas une phase de latence à partir du premier jour la germination débutent.

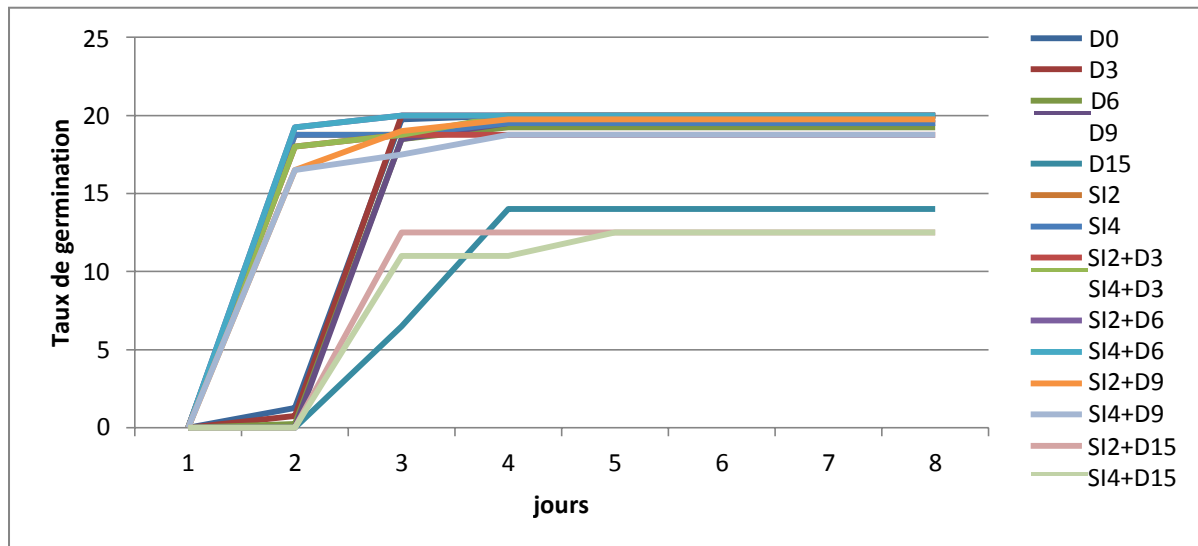
La deuxième phase :

Durant lequel les taux de germination augmentent jusqu'à atteindre la valeur maximale .Le taux de germination le plus élevée est de 100% est obtenue par le lot témoins (D0),le lot des graines traité à la dose de 3g/L de NaCl (D3), le lot des graines traité à la dose 4g/L de silicium et 3g/L de NaCl (Si4*D3), graines traité à la dose 2g/L de silicium et 6g/L (Si2*D6),graines traité à la dose de silicium 4g/L et 6g/L (Si4*D6).

La troisième phase : (Plateau)

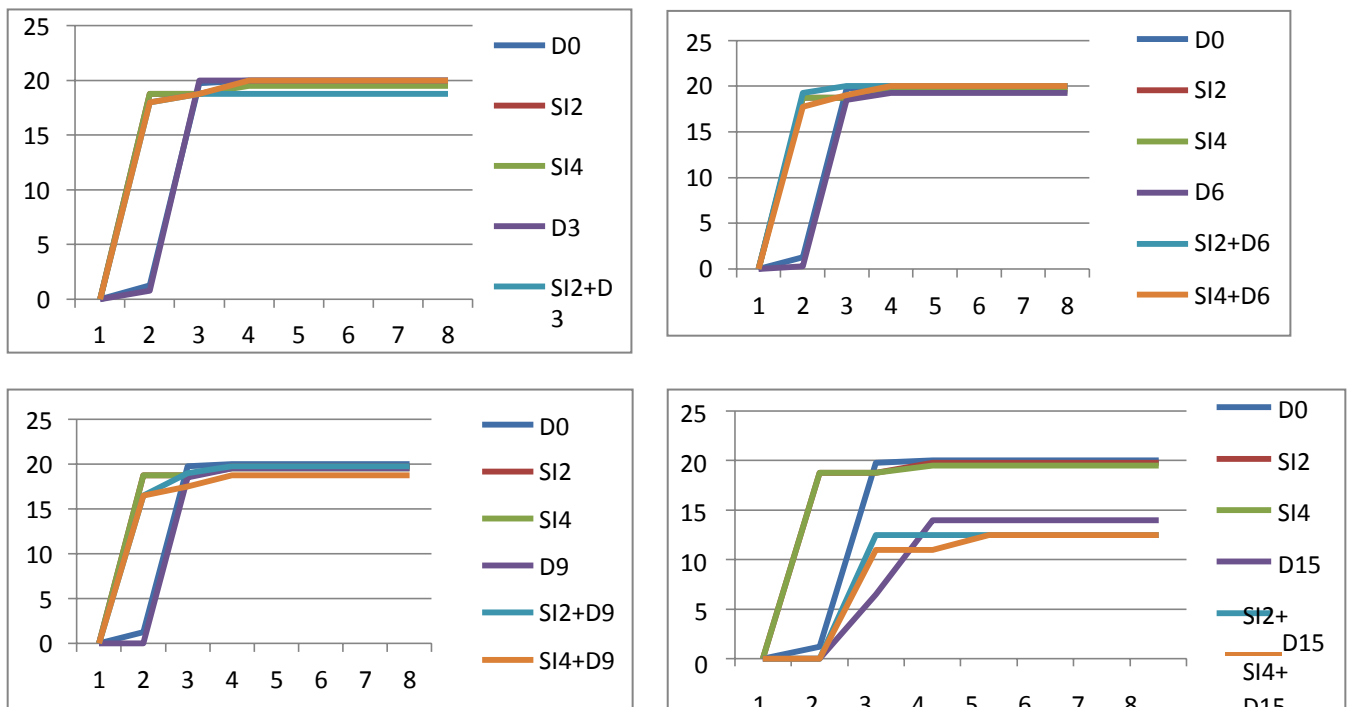
Montre des variations en fonction des traitements, la valeur maximale est observée chez (D0, D3, Si4*D3, Si2*D6, Si4*D6) ainsi les lots traité au silicium ont présenté des valeurs élevés relatives à celle n'ayant pas été traité à cet élément.

Résultats



D0 : témoin ; D3 : NaCl (3g/L) ; D6 : NaCl (6g/L) ; D9 : NaCl (9g/L) ; D15 : NaCl (15g/L) ;
Si2 : Silicium (2g/L) ; Si4 : silicium (4g/L).

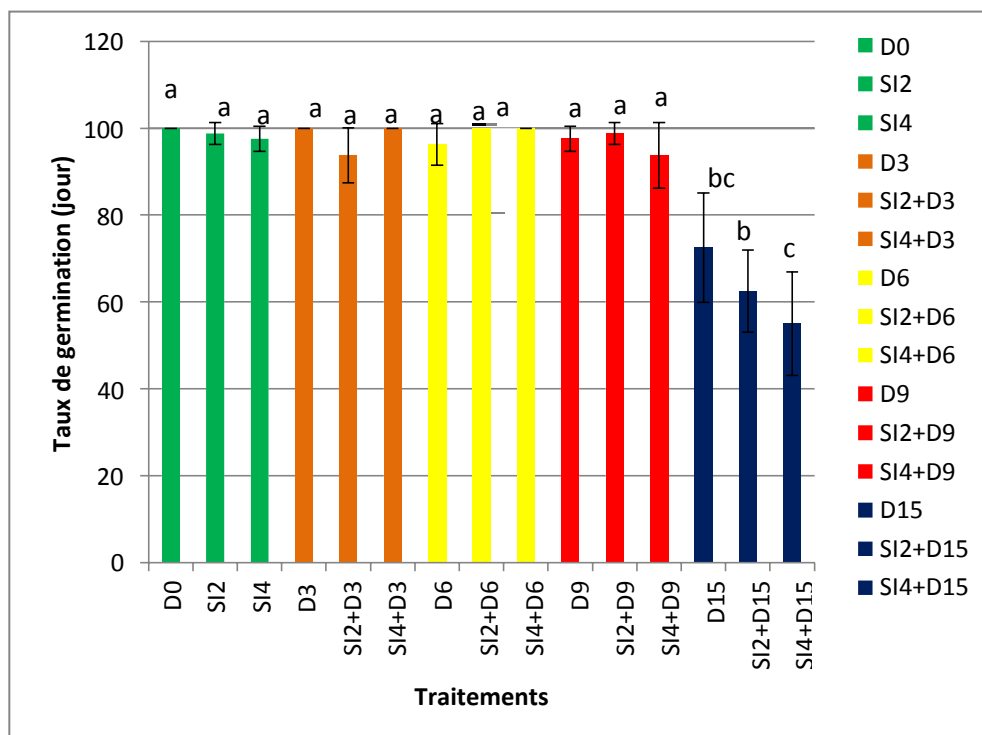
Figure 10 : Effet de silicate de sodium sur la cinétique de germination des graines de *Pisum sativum subsp. Arvense* en condition du stress salin.



Ces figures représentent la cinétique de germination séparée

2. Effet de Silicate de sodium sur le taux de germination des graines de *Pisum sativum* subsp. *Arvense* en condition du stress salin :

Le traitement statistique de nos résultats n'a montré d'effet significatif de la salinité sur le taux de germination qu'à la dose de 15g/l de NaCl. Le traitement des graines au silicium a induit des résultats de taux de germination très proches des lots témoins et ceux traités aux doses de 3, 6, 9g/L. Cependant sous le niveau maximal de stress testé dans notre expérimentation à savoir 15g/L de NaCl, le traitement au silicium s'est avéré non efficient et à même montré un effet négatif. En effet ; le test statistique a répartie les différents traitements en 4 groupes homogènes. Le groupe "a" renferme les lots de graines témoins, traitées seulement au si et ceux ayant subit les doses de sel de 3,6 et 9g/L traité ou non au silicium. Le groupe "bc" représente le taux de germination des graines subissant la dose de sel de 15g/L. Cette valeur a subit une réduction sous le traitement au silicium et illustré par le groupe homogène "b". Le dernier groupe (c), avec une valeur minimale du taux de germination représenté par le lot traité à la plus forte concentration 15g/L combiné à la dose deuxième dose de silicium (figure).

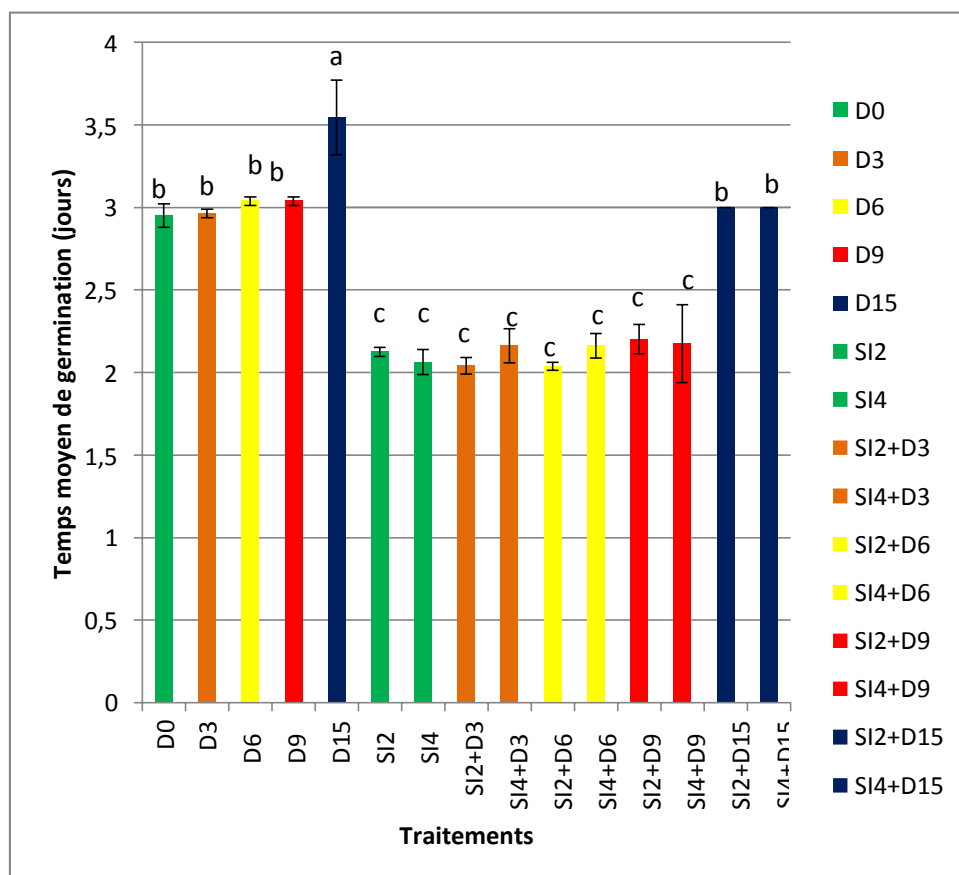


D0 : témoin ; D3 : NaCl (3g /L) ; D6 : NaCl (6g/L) ; D9 : NaCl (9g/L) ; D15 : NaCl (15g/L) ; Si2 : Silicium (2g/L) ; Si4 : silicium (4g/L).

Figure : Effet de silicate de sodium sur le taux de germination des graines de *Pisum sativum* subsp. *Arvense* en condition du stress Salin.

3. Effet de silicate de sodium sur le temps moyen de germination (TMG) de *Pisum sativum subsp. Arvense* en condition du stress salin :

Les valeurs de TMG obtenue après 8 jours de germination représentées par la figure. Nous avons observé dans cette figure un effet significatif du traitement au silicium aux différentes doses de sel testées exprimé par une réduction du temps moyen de germination. L'étude statistique effectuée a repartie les traitements en 3 groupes homogènes, le groupe (a) représente les graines qui ont subit la dose de 15g/L de NaCl (D15) ont atteint une valeur suprême de 3,5 jours, suivie par le groupe (b) qui regroupe les traitements : " témoin(D0) , NaCl 3g/l (D3) ,6g/L (D6) ,9g/L(D9) , silicium à 4g/L avec 15g/L de NaCl (Si4*D15) , silicium à 2g/L avec 15 g/L de NaCl (Si2*D15)".le groupe homogène (c) renferme les plantules traitées par les traitements (, silicium 4g/L , silicium 2g/L avec NaCl 3g/L , silicium 4g/L avec NaCl 6g/L , silicium 2g/L avec NaCl 9g/L, silicium 4g/L avec NaCl 9g/L).

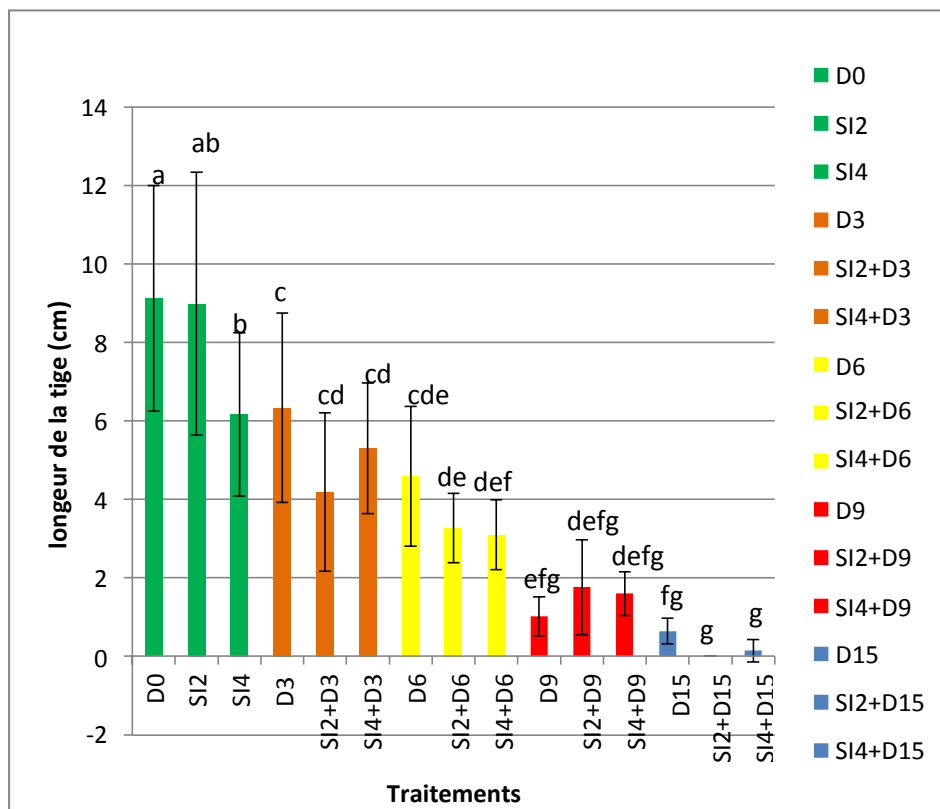


D0 : témoin ; D3 : NaCl (3g /L) ; D6 : NaCl (6g/L) ; D9 : NaCl (9g/L) ; D15 : NaCl (15g/L) ; Si2 : Silicium (2g/L) ; Si4 : silicium (4g/L)..

Figure : Effet de silicate de sodium sur le temps moyen de germination des graines de *Pisum sativum subsp. Arvense* en condition du stress Salin

4. Effet de silicate de sodium sur les longueurs de tiges des plantules de *Pisum sativum subsp. Arvense* en condition du stress salin :

Les longueurs de tige obtenus après 8 jour de mise en germination sont représentées dans la figure .L'analyse statistique de nos résultats à révélé un effet significatif jusqu' a la dose de 6g/L de NaCl , en effet ces résultats sont repartie en plusieurs groupes, le groupe "a" représente le cas des témoins (D0) a enregistré une valeur maximale de hauteur de 9,12 cm, suivie par le groupe homogène "ab" issue du lot des plantules traité seulement au silicium à 2g/L (Si2), le groupe "c" représente le lot des plantules traité avec du NaCl à 3g/L (D3) ,le groupe "cd" renferme les lots traité au silicium avec la dose de NaCl à 3g/L (Si2*D3,Si4*D3) ,le groupe "cde" représente le lot des plantules traité avec NaCl à 6g/L (D6) ,le groupe homogène "de" représente le lot traité au silicium à 2g/L et avec la dose NaCl 6 g/L (Si2*D6),le groupe "def" représenté par le lot des plantules traité au silicium 4g/L avec NaCl 6g/L (Si4*D6) .

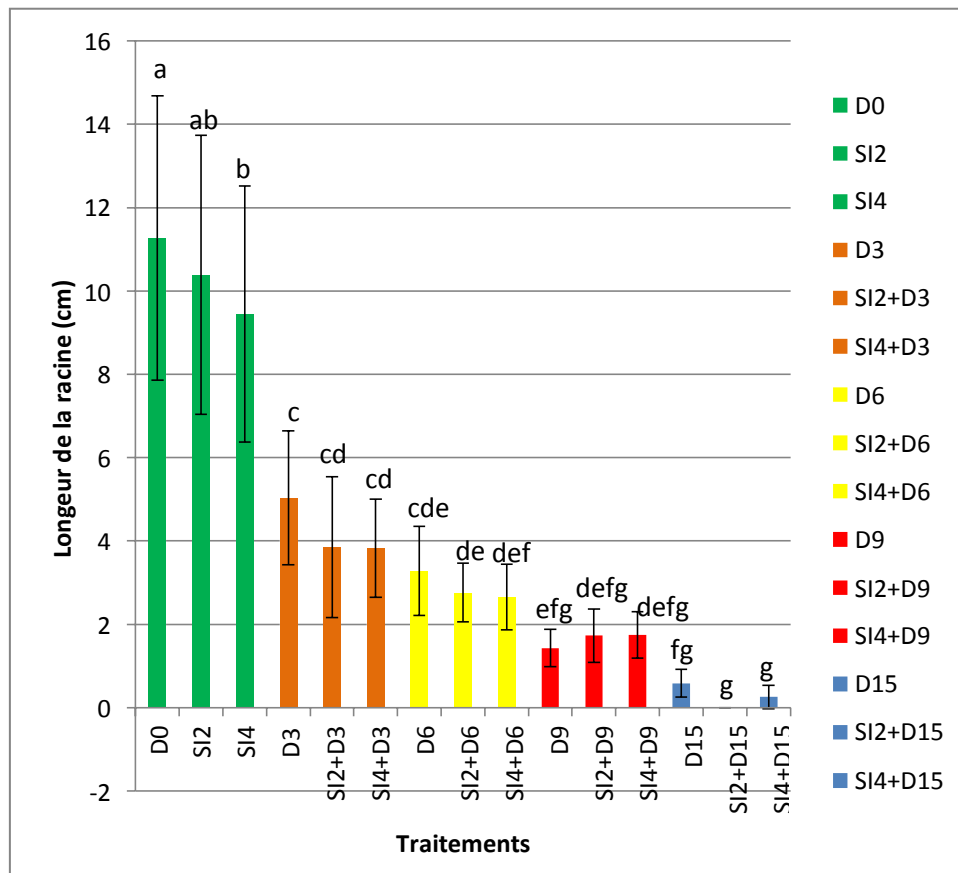


D0 : témoin ; D3 : NaCl (3g/L) ; D6 : NaCl (6g/L) ; D9 : NaCl (9g/L) ; D15 : NaCl (15g/L) ; Si2 : Silicium (2g/L) ; Si4 : silicium (4g/L).

Figure : Effet de silicate de sodium sur les longueurs de tige des plantules de *Pisum sativum subsp. Arvense* en condition du stress Salin.

5. Effet du silicate de sodium sur les longueurs de racine de *Pisum sativum subsp. Arvense* :

Les longueurs de racines obtenues après 8 jours de germination sont représentées dans la figure, L'analyse statistique de nos résultats a montré que les différentes concentrations de NaCl et du silicium et des effets combinés ont marqué une différence significative jusqu' à la dose 6g/L de NaCl. Les résultats sont repartis en plusieurs groupes homogènes , le lot témoin groupe "a" a enregistré une valeur maximale avec une moyenne de 11,27 cm, le groupe "ab" représente le lot de plantules traité avec silicium à 2g/L (Si2), le groupe " b" issue du lot des plantules traité au silicium 4g/L (Si4), le groupe "c" représente le lot des plantules traitées par NaCl à 3g/L (D3), suivi par le groupe "cd" qui représente le lot des plantules traitées par effet combiné de NaCl à 3g/L (D3) et de Silicium 2g/L (Si2) et NaCl à 3g/L et Si à 4g /L suivi par le groupe "cde" qui représente le lot des plantules traitées par 6g/L de NaCl (D6) , ensuite le groupe "de" qui représente l ensemble des plantules traitées par effet combiné de 6g /L de NaCl (D6) et de 4g/L de Si ;suivi par le groupe "def"qui représente l' ensemble des plantules traitées par effet combiné de 6g/L de NaCl et 4g/L de Si



D0 : témoin ; D3 : NaCl (3g /L) ; D6 : NaCl (6g/L) ; D9 : NaCl (9g/L) ; D15 : NaCl (15g/L) ; Si2 : Silicium (2g/L) ; Si4 : silicium (4g/L).

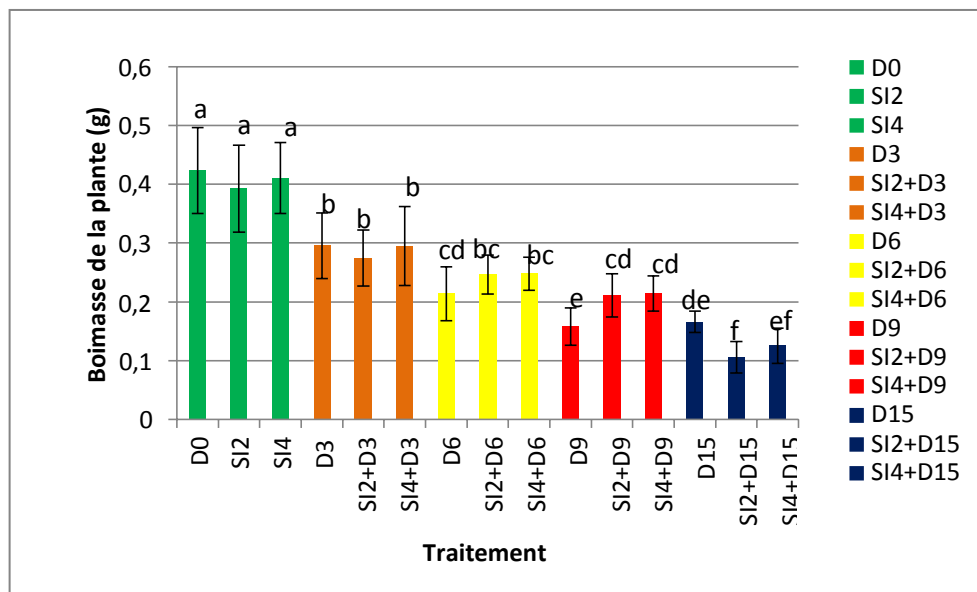
Figure : Effet de silicate de sodium sur les longueurs de racines des plantules de *Pisum sativum subsp. Arvense* en condition du stress Salin.

6. Effet du silicate de sodium sur la biomasse des plantules *Pisum sativum subsp. Arvense* en condition du stress salin :

Les valeurs de biomasse obtenue après 8 jours de germination sont représentées dans la figure. L'analyse statistique de nos résultats à montré que les différents doses de NaCl et du silicium et des effets combinés ont une différence significative sur le changement de la biomasse .On constate que la valeur maximale est atteinte par le témoin avec une moyenne de 0,423 g ,en revanche la valeur minimale est obtenue par les plantes traitées par les doses variables de silicium et de NaCl (Si2*D15) .Les résultats sont repartie en 8 groupes, le groupe (a) représente le lot des plantules témoin (D0) et le lot des plantules traitées au silicium 2g/L (Si2) et l'ensemble des plantules traité au silicium 4g/L (Si4), et le groupe homogène (b) renferme les lots traité par NaCl 3g/L (D3) et les plantules traitées au silicium 2g/L et à NaCl

Résultats

3g/L (Si2*D3) et les plantules traitées au silicium 4g/L avec NaCl 3g/L (Si4*D3) ,le groupe homogène (cd) représente l'ensemble des plantules traité par NaCl à 6g/L (D6) ,plantules traitées par silicium à 2g/L avec NaCl à 9g/L (Si2*D9) et les plantules traité à 4g/L de silicium avec NaCl à 9g/L (Si4*D9) ,suivie par le groupe (bc) qui rassemble les plantules traitées par 2g/L de silicium et l' NaCl à 6g/L(Si2*D6) avec les plantules traitées au silicium 4g/L avec NaCl à 6g/L (Si4*D6) .Le groupe (e) issue de l'ensemble des plantules subissant la dose de NaCl 9g/L (D9) ,ensuite le groupe (de) des plantules traitées par la dose extrême de NaCl 15g/L (D15) suivie par le groupe (f) qui représente le groupe des plantules traitées par le silicium à 2g/L avec NaCl à 15g/L (Si2*D15) ,arrivant jusqu'au dernier groupe (ef) issue du lot traité au silicium 4g/L et de 15g/L de NaCl (Si4*D15).



D0 : témoin ; D3 : NaCl (3g/L) ; D6 : NaCl (6g/L) ; D9 : NaCl (9g/L) ; D15 : NaCl (15g/L) ; Si2 : Silicium (2g/L) ; Si4 : silicium (4g/L).

Figure : Effet de silicate de sodium sur la biomasse des plantules de *Pisum sativum subsp. Arvense* en condition du stress Salin.

Discussion

Discussion

Discussion :

Notre travail a pour objectif d'estimer l'effet du silicate de sodium à deux différentes doses (2g/L ,4g/L) en condition du stress salin provoqué par le chlorure de sodium .Nos résultats ont révélé que les concentrations de sel n'ont pas influencé le taux de germination jusqu'à la dose 15g/L, laquelle un effet statistiquement significatif a été enregistré. Le teste statistique montre que le silicium n'a pas influencé le taux de germination pour les concentrations allant de 3 à 9g/L, à la plus forte dose de sel (15g/L), le Silicate de sodium a plutôt induit une réduction de la capacité germinative des graines de *P. sativum subsp arvense*. Ceci pourrait être expliqué par un éventuel de toxicité causé par ce composé induit à ce niveau de salinité. Cette constatation concorde avec le résultat de divers autres auteurs sur une panoplie d'espèces. En effet ; les travaux de Fernández-Gómez et al. (2024) sur les plantules de *Solanum lycopersicum L.* a bien noté une action de toxicité exprimée par le Na_2SiO_3 qui s'est exprimée par un effet négatif sur certains paramètres de croissance.

Quant à l'effet du silicium sur le temps moyen de germination, le test statistique a révélé une variation significative pour toutes les doses testées. Il a par cela amélioré la vitesse de germination des graines de cette plante.

Le test statistique a révélé que les concentrations de sel ont diminué les longueurs racinaires et les longueurs des tiges dans lequel un effet statistiquement significatif a été enregistré. Le test statistique montre que le Si n'a pas influencé l'élongation racinaire et caulinaire qu'à la dose (9g/L) de NaCl dans laquelle une augmentation significative a été remarquée, hors de cette concentration aucun effet significatif de l'apport du silicium sur les longueurs racinaires et les longueurs de tiges n'a été remarqué. Cette constatation corrobore les travaux d'El Yaalaoui en 2017 sur le blé dur dans lequel il a révélé que le Silicium n'apporte aucun effet sur la partie souterraine du blé dur, selon Benlaribi *et al.* ,1990 le volume du système racinaire reflète une extension ou /et une ramification du système racinaire qui favorise la colonisation d'un plus grand volume du sol, rendant les réserves en eau du sol plus accessibles aux plantules,

Toute fois on a constaté lors de nos résultats statistiques que la biomasse des plantules soumises au stress salin diminue en augmentant les concentrations de NaCl dans la solution d'arrosage, cette augmentation révèle un effet statistiquement significatif sur la biomasse de *P. sativum subsp arvense*. D'après Cherifi *et al.* (2017), l'augmentation de la concentration de NaCl a présenté un effet significatif sur la biomasse sèche de toutes les parties de la plante

Discussion

(feuilles, tiges, racines) des six espèces d'Acacia. L'analyse statistique de nos résultats a révélé que le silicium a montré un effet significatif à la dose de 6g/L et à 9g/L et ce pour les deux concentrations de silicate de sodium. Hors de ses traitements le silicium n'a montré aucune amélioration de la biomasse et même a montré un effet néfaste.

Le rôle du silicium ayant amélioré, du moins pour certaines concentrations de sel constaté dans la présente expérimentation est en parfaite correspondance avec les travaux de Soumaddar et al. (2022) ; Ellouzi et al. (2022) ; Ramirez-Olvera et al. (2021) ; Chaffai et al. (2017) ; Azem et al. (2015) ; sur une panoplie d'espèces végétales, selon Hasanaklou et al, (2023) l'utilisation de silicium améliorent la germination, elle accélère le taux de germination mais aussi de manière significative le taux de croissance des plantules l'amorçage est une méthode qui déclenche les processus métaboliques tel que l'absorption de l'eau, l'activation des enzymes de réserves tel que l'amylase, cellulase, xylenase la pénétration de silicium dans les graines peut jouer un rôle important en tant que catalyseur dans l'hydrolyse de l'amidon catalysée par l'alpha amylase augmentant ainsi la vitesse de la réaction. Dans l'étude de Mahakham et al (2017) sur les riz graines, il a été remarqué qu'une activation de alpha amylase et la métabolisation de l'amidon nécessite une concentration approprié du silicium, l'augmentation de alpha amylase favorise ainsi la dégradation de l'amidon, induisant l'activation du processus de germination. Des auteurs tels que Belanger et al. (1995), ont préconisé la nécessité d'un pré-amorçage préalable des graines des plantules cultivées avant le semé afin d'assurer les propriétés prophylactiques et stimulatrices du Silicium durant les phases phénologiques des plantes.

Néanmoins, dans le cas des hautes concentrations de Silicium, il a été noté dans quelques travaux de recherche effectués chez certaines espèces végétales un effet négatif de ce composé sur la germination et /ou la croissance des plantules. En effet ; d'après l'étude mener par Hasanaklou et al (2017), les concentrations les plus élevées de Silicium ont montré des effets toxiques significativement prononcés sur les longueurs de pousses et des racines de *Stevia rebaudiana* Bertoni. Behboudi et al, (2017) et Fernández-Gómez et al. (2024) ont également montré un effet de toxicité pour le Si exprimé par une réduction des paramètres de germination et de croissance chez les espèces *Solanum lycopersicum* L. Et *Triticum aestivum* L. lors ce que le silicium est apporté en concentration élevée.

Conclusion

Conclusion :

L'utilisation du silicate de sodium en tant que outil d'atténuation des effets délétères de salinité chez les plantes s'avère un moyen intéressant et une approche prometteuse afin de limiter et réduire les dommages subits par la plante causés par le stress salin, en effet le silicium est classés comme le deuxième élément le plus abondant dans la croute terrestres après l'oxygène aussi connus par ses effets bénéfiques pour la croissances des plantes et leur rendements.

Le présent mémoire a été consacré à l'étude de l'effet du silicate de sodium sur le *Pisum sativum subsp arvense*. En condition d'un stress abiotique qui est le stress salin qui est devenue plus fréquent et plus intense ses dernières années, à cause du réchauffement climatique sur la germination et sur la croissance de la variété Sefrou de poids fourrager.

Le stress salin a été induit par le chlorure de sodium. Différentes concentrations de NaCl ont été utilisées (3, 6, 9,15 g/l). Les résultats obtenus ont montré que le pois fourrager tolère la salinité jusqu'à la dose de 15g/L pour les paramètres de germination à savoir le pourcentage final de germination ainsi que le temps moyen de germination. Concernant les paramètres de croissance tel que la longueur, de la tige et de la racine tout comme la biomasse des plantules ont enregistré une diminution significative à partir de la dose de 3g/L où un effet significatif a été observé.

Pour l'étude de l'effet de silicium sur les plantes en condition du stress salin ; nos résultats nous permettent de conclure que les dose de Silicate de sodium testées n'ont pas montré d'effet sur le pourcentage final de germination pour aucune des dose de sels appliquées, il a plutôt montré un effet de toxicité à la plus forte dose testée à savoir 15g/L.

L'effet du Silicium est remarqué sur les paramètres de croissance (longueur, de la tige et de la racine et la biomasse des plantules). Celle-ci s'est par contre exprimée significativement à partir de 3g/L de NaCl.

Référence :

- Ahmad, I., et Hellebust, J.A. 1988. The relationship between inorganic nitrogen metabolism and proline accumulation in osmoregulatory responses of two euryhaline microalgae. *Plant Physiol.* 88(2) : 348–354. doi:10.1104/pp.88.2.348. PMID: 16666306.
- Al Murad, M., Khan, A. L., & Muneer, S. (2020). Silicon in horticultural crops: cross-talk, signaling, and tolerance mechanism under salinity stress. *Plants*, 9(4), 460.
- Almansouri, M., Kinet, J. M., & Lutts, S. (2001). Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Plant and soil*, 231, 243-254.
- Amaya, I., Botella, M.A., De La Calle, M., Medina, M.I., Heredia, A., Bressan, R.A., Hasegawa, P.M., Quesada, M.A., et Valpuesta, V. 1999. Improved germination under osmotic stress of tobacco plants overexpressing a cell wall peroxidase. *FEBS Lett.* 457(1) : 80–84. doi:10.1016/S0014-5793(99)01011-X. PMID:10486568.
- Amtmann, A., et Leigh, R. 2010. Ion homeostasis. Chap. 12. Dans *Abiotic stress adaptation in plants: Physiological, molecular and genomic foundation*. Sous la direction de A. Pareek, S.K. Sopory, H.J. Bohnert et Govindjee. p. 245–262.
- Apse, M.P., Aharon, G.S., Snedden, W.A., et Blumwald, E. 1999. Salt tolerance conferred by overexpression of a vacuolar Na⁺/H⁺ antiport in *Arabidopsis*. *Science*, 285(5431) : 1256–1258. doi:10.1126/science.285.5431.1256. PMID:10455050.
- Apse, M.P., et Blumwald, E. 2007. Na⁺ transport in plants. *FEBS Lett.* 581(12) : 2247–2254. doi:10.1016/j.febslet.2007.04.014. PMID:17459382.
- Ashraf, M., et Foolad, M.R. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environ. Exp. Bot.* 59(2) : 206–216. doi:10.1016/j.envexpbot.2005.12.006.
- Bartels, D., et Sunkar, R. 2005. Drought and salt tolerance in plants. *Crit. Rev. Plant Sci.* 24(1) : 23–58. doi:10.1080/07352680590910410.
- Bohnert, H.J., et Jensen, R.G. 1996. Metabolic engineering for increased salt tolerance — the next step. *Aust. J. Plant Physiol.* 23 (5) : 661–667. doi:10.1071/PP9960661.
- Baumont, R., Bastien, D., Féraud, A., Maxin, G., Niderkon, V., (2016). Les intérêts multiples des légumineuses fourragères pour l'alimentation des ruminants (*Productions Animales* 9 (4) 127-143
- Brink, M., & Belay, G. M. (Eds.). (2006). *Céréales et légumes secs* (Vol. 1). PROTA.
- CÔME DG. (1970). Les obstacles à la germination. Ed. Masson, Paris. pp 162
- Communication à WATMED 3, 3ième conférence internationale sur les Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen, Tripoli (Liban), 1-3 Novembre 2006.
- Cornillon, P., et Palloix, A. 1995. Influence de la salinité et de la température du substrat sur la croissance et la nutrition du piment. *Fruits*, 50 : 469–471.
- DAOUD Y. et HALITIM A., 1994 - Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Sécheresse*, 3 (5) : 151-160
- DROUHIN G., 1961 - Expérience algérienne d'utilisation des eaux saumâtres pour
- Epstein E, 1994 .The anomaly of silicon in plant biology . *Proc .Natl .Acad .Sci* 91- 11- 17.
- Epstein E, 1999 .Silicon .*Annu .Rev .Plant Molecular Biology* ,50 -641- 644.
- Ferrández-Gómez, B., Jordá, J. D., Cerdán, M., & Sánchez-Sánchez, A. (2024). Enhancing Salt Stress

Tolerance in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) through Silicon Application in Roots. *Plants*, 13(10), 1415.

Flowers, T.J., Troke, P.F., et Yeo, A.R. 1977. The mechanisms of salt tolerance in halophytes. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 28(1) : 89–121. doi:10.1146/annurev.pp.28.060177.000513.

Foyer, C.H., et Noctor, G. 2000. Oxygen processing in photosynthesis: a molecular approach. *New Phytol.* 146 : 359–388. doi:10.1046/j.1469-8137.2000.00667.x.

- Glenn, E., Brown, J.J., et Blumwald, E. 1999. Salt-tolerant mechanisms and crop potential of halophytes. *Crit. Rev. Plant Sci.* 18(2) : 227–255. doi:10.1016/S0735-2689(99)00388-3.
- Gorham, J. 1992. Salt tolerance of plants. *Sci. Prog.* 76 : 273–285.
- Guo, Z. Y., Ji, Z. Y., Zhang, Y. G., Yang, F. J., Liu, J., Zhao, Y. Y., & Yuan, J. S. (2018). Effect of ions (K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ and SO₄²⁻) and temperature on energy generation performance of reverse electro dialysis stack. *Electrochimica Acta*, 290, 282-290.
- Heusé, V., Tran, G., Giger –Reverdin, S. (2015). Feedipedia : An Online Encyclopedia of Animal Feeds. INRAE, IRTA, FAO.
- Habibi G, Norouzi F & Hajiboland R (2014) Silicon alleviates salt stress in pistachio plants. *Progress in Biological Sciences*, Vol 4, N°2, 189-202.
- Haghighi M., Afifipour Z., Mozafarian M. (2012). The effect of N-Si on tomato seed germination under salinity levels. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 6 : 87–90.
- Hajlaoui, H., Denden, M., & Bouslama, M. (2007). Etude de la variabilité intraspécifique de tolérance au stress salin du pois chiche (*Cicer arietinum* L.) au stade germination. *Tropicultura*, 25(3), 168-173.
- Hanana, M., Hamrouni, L., Cagnac, O., & Blumwald, E. (2011). Mécanismes et stratégies cellulaires de tolérance à la salinité (NaCl) chez les plantes. *Environmental Reviews*, 19(NA), 121-140.
- Haouala, F., Ferjani, H., & El Hadj, S. B. (2007). Effet de la salinité sur la répartition des cations (Na⁺, K⁺ et Ca²⁺) et du chlore (Cl⁻) dans les parties aériennes et les racines du ray-grass anglais et du chiendent. *BASE*.
- Hare, P.D., et Cress, W.A. 1997. Metabolic implications of stress induced proline accumulation in plants. *Plant Growth Regul.* 21(2) : 79–102. doi:10.1023/A:1005703923347.
- Hong, Z., Lakkineni, K., Zhang, Z., et Verma, D.P.S. 2000. Removal of feedback inhibition of D1-pyrroline-5-carboxylate synthetase results in increased proline accumulation and protection of plants from osmotic stress. *Plant Physiol.* 122(4) : 1129–1136. doi:10.1104/pp.122.4.1129. PMID:10759508.
- Jandoubi, W., Jlassi, I., Boukhibar, H., Touzout, N. S., Ben-Attia, M., & El-Bok, S. (2021). Study of the genetic variation of some accessions of *Pisum sativum* L. originated from the Mediterranean basin.
- Kochak-Zadeh, A., Mousavi, S., & Nejad, M. (2013). The effect of salinity stress on germination and seedling growth of native and bred varieties of wheat. *Journal of Novel Applied Sciences*, 2(12), 703-709.
- Kocsy, G., Laurie, R., Szalai, G., Szilagy, V., Simon-Sarkadi, L., Galiba, G., et de Ronde, J.A. 2005. Genetic manipulation of proline levels affects antioxidants in soybean subjected to simultaneous drought and heat stresses. *Physiol. Plant.* 124(2) : 227–235. doi:10.1111/j.1399-3054.2005.00504.x.
- Ksontini, M., Louguet, P., Laffray, D., & Rejeb, M. N. (1998). Comparaison des effets de la contrainte hydrique sur la croissance, la conductance stomatique et la photosynthèse de jeunes plants de chênes méditerranéens (*Quercus suber*, *Q. faginea*, *Q. coccifera*) en Tunisie. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 55, No. 4, pp. 477-495). EDP Sciences.
- L'irrigation avec référence particulières aux sols salins. U.N.E.S.C.O, Paris, 239-244 Le
- Levigneron, A., Lopez, F., Vansuyt, G., et al. 1995. Les plantes face au stress salin. *Cahiers Agricultures*, 4 : 263–273.

Liang Y, Chen Q, Zhang W, and Ding R 2002: Exogenous silicon increases antioxidant enzyme activities and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). Abstract of Second Silicon in Agriculture Conference, p. 140-151.

Ma JF, Miyake Y et Takahashi (2001) Silicon as a beneficial element for crop plants. In Datnoff LE, Snyder GH et Korndörfer GH Silicon in agriculture. Elsevier, New York

Ma JF., Miyake Y., Takahashi E. (2001). Silicon as a beneficial element for crop plants. In : Datnoff, L.E., Snyder, G.H., Korndörfer, G.H. (Hg.): Silicon in agriculture. Elsevier, New York.

Maathuis, F.J.M., et Amtmann, A. 1999. K⁺ nutrition and Na⁺ toxicity: the basis of cellular K⁺/Na⁺ ratios. *Ann. Bot. (Lond.)*, 84(2) : 123–133. doi:10.1006/anbo.1999.0912.

Mahajan, S., Pandey, G.K., et Tuteja, N. 2008. Calcium- and salt stress signaling in plants: Shedding light on SOS pathway. *Arch. Biochem. Biophys.* 471(2) : 146–158. doi:10.1016/j.abb.2008.01.010. PMID:18241665.

Majumder, A.L., Sengupta, S., et Goswami, L. 2010. Osmolyte regulation in abiotic stress. Chap. 16. Dans *Abiotic stress adaptation in plants: Physiological, molecular and genomic foundation*. Sous la direction de A. Pareek, S.K. Sopory, H.J. Bohnert et Govindjee. p. 349–370.

Mansour, M.M.F. 1998. Protection of plasma membrane of onion epidermal cells by glycinebetaine and proline against NaCl stress. *Plant Physiol. Biochem.* 36(10) : 767–772. doi:10.1016/S0981-9428(98)80028-4.

Marschner, P., 2012. *Mineral Nutrition Higher Plants* Edit. Elsevier. 651p.

Matoh T, Kairusmee P, and Takahashi E 1986 : Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 32, 295-304

Munns, R., et Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59(1) : 651–681. doi:10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911. PMID:18444910.

Naidu, B.P. 2003. Production of betaine from Australian *Melanleuca* spp. for use in agriculture to reduce plant stress. *Aust. J. Exp. Agric.* 43(9) : 1163–1170. doi:10.1071/EA02223.

Nanjo, T., Fujita, M., Seki, M., Kato, T., Tabata, S., et Shinozaki, K. 2003. Toxicity of free proline revealed in an *Arabidopsis* T-DNA tagged mutant deficient in proline dehydrogenase. *Plant Cell Physiol.* 44(5) : 541–548. doi:10.1093/pcp/pcg066. PMID: 12773641.

Parent, C., Capelli, N., et Dat, J. 2008. Formes réactives de l'oxygène, stress et mort cellulaire chez les plantes. *C. R. Biol.* 331(4) : 255–261. doi:10.1016/j.crv.2008.02.001. PMID:18355747.

Peng, Z., Lu, Q., et Verma, D.P. 1996. Reciprocal regulation of D1- pyrroline- 5-carboxylate synthetase and proline dehydrogenase genes controls proline levels during and after osmotic stress in plants. *Mol. Gen. Genet.* 253(3) : 334–341. doi:10.1007/PL00008600. PMID:9003320.

Rasanen., 2002. Biotic and abiotic factors influencing the development of N₂-fixing symbioses between rhizobia and the woody legumes *Acacia*.

Rathinabapathi, B. 2000. Metabolic engineering for stress tolerance: Installing osmoprotectant synthesis pathways. *Ann. Bot. (Lond.)*, 86(4) : 709–716. doi:10.1006/anbo.2000.1254.

Renaud J. (2002). *Récolte des fourrages à travers les âges*. Ed. France Agricole, 15p.

Rhodes, D., Nadloska-Orczyk, A., et Rich, P.J. 2002. Salinity, osmolytes and compatible solutes. Dans *Salinity: environment– plants–molecules*. Sous la direction de A. Lauchli et U. Luttge. Kluwer, Boston. p. 181–204.

Rus, A., Yokoi, S., Sharkhuu, A., Reddy, M., Lee, B.H., Matsumoto, T.K., Koiwa, H., Zhu, J.K., Bressan, R.A., et Hasegawa, P.M. 2001. AtHKT1 is a salt tolerance determinant that controls Na⁺ entry into plant roots. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 98(24) : 14150–14155. doi:10.1073/pnas.241501798. PMID:11698666.

Sairam, R.K., et Tyagi, A. 2004. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Curr. Sci.* 86 : 407–421.

Shabala, S., et Cuin, T.A. 2008. Potassium transport and plant salt tolerance. *Physiol. Plant.* 133(4) : 651–669. doi:10.1111/j.1399-3054.2007.01008.x. PMID:18724408.

SHANNON M. C., 1986 - New insights in plant breeding efforts for improved salt

Silva-Ortega, C.O., Ochoa-Alfaro, A.E., Reyes-Aguero, J.A., Aguado-Santacruz, G.A., et Jimenez-Bremont, J.F. 2007. Salt stress increases the expression of p5cs gene and induces proline accumulation in cactus pear. *Plant Physiol. Biochem.* 46(1) : 82– 92. doi:10.1016

Sumner, A. K., Nielsen M. A. And Youngs C. G. 1980. Production And Evaluation Of Pea Protein Isolate. Presented At The 40th Annual Meeting Of The Institute Of Food Technologists, New Orleans, La, June 8-11

Tanaka, Y., Hibin, T., Hayashi, Y., et al. 1999. Salt tolerance of transgenic rice overexpressing yeast mitochondrial Mn-SOD in chloroplasts. *Plant Sci.* 148(2) : 131–138. doi:10.1016/S0168-9452(99)00133-8.

tolerance. *Hort. Technol.*, 6: 96–99.

Türkan, I., et Demiral, T. 2009. Recent developments in understanding salinity tolerance. *Environ. Exp. Bot.* 67(1) : 2–9. doi:10.1016/j.envexpbot.2009.05.008.

Vernon, D.M., Tarczynski, M.C., Jensen, R.G., et Bohnert, H.J. 1993. Cyclitol production in transgenic tobacco. *Plant J.* 4(1) : 199–205. doi:10.1046/j.1365-313X.1993.04010199.x.

Yancey, P.H. 1994. Compatible and counteracting solutes. Dans *Cellular and molecular physiology of cell volume regulation*. Sous la direction de K. Strange. CRC Press, Boca Raton, Fla. p. 82– 109.

Yancey, P.H., Clark, M.E., Hand, S.C., Bowlus, R.D., et Somero, G. N. 1982. Living with water stress: evolution of osmolyte systems. *Science*, 217(4566) : 1214–1222. doi:10.1126/science.7112124. PMID:7112124.

Yeo AR, Flowers SA, Rao G, Welfare K, Senanayake N, and Flowers TJ 1999 : Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. *Plant Cell Environ.*, 22, 559-565

Yoshida, Y., Nanjo, T., Miura, S., Yamaguchi-Shinozaki, K., et Shinozaki, K. 1999. Stress-responsive and developmental regulation of Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate synthetase 1 (P5CS1) gene expression in *Arabidopsis thaliana*. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 261 : 766–772. doi:10.1006/bbrc.1999.1112. PMID: 10441499.

Zahra, N., Raza, Z. A., and Mahmood, S. (2020). Effect of salinity stress on various growth and physiological attributes of two contrasting maize genotypes. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 63, e20200072. doi: 10.1590/1678-4324-2020200072

Zhu, J.K. 2003. Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Curr. Opin. Plant Biol.* 6(5) : 441–445. doi:10.1016/S1369-5266(03) 00085-2. PMID:12972044

Annexes :

Figure 01 : partie racinaire de *Pisum sativum subsp Arvense* (Alamy, 2007).

Figure 02 : tige de *Pisum sativum subsp Arvense* (Alamy, 2018).

Figure 03 : fleur de *Pisum sativum subsp Arvense* (Alamy, 2018).

Figure 04 : Morphologie de la partie aérienne du *Pisum sativum* (Techno-Science ,2015).

Figure 05 : Effets délétères liés à la toxicité du stress salin et réponse cellulaire mise en place.

Figure 06 : Stratégies impliquées dans l'homéostasie ionique mises en place dans les cellules racinaires par les plantes afin de leur permettre de tolérer un stress salin. (Encyclopédie d'environnement).

Figure 07 : graines du pois fourrager *Pisum sativum subsp. Arvense*.

Figure 08 : Mise en germination des graines du *Pisum sativum subsp Arvense* (photos originale, 2024).

Figure 09 : les plantules de *Pisum sativum subsp Arvense* après germination (photo originale, Avril 2024).

Figure 10 : Effet de silicate de sodium sur la cinétique de germination des graines de *Pisum sativum subsp. Arvense* en condition du stress salin.

Perspectives :

Pour la vérification des résultats obtenus et pour une meilleure caractérisation de cette variété, il serait intéressant de :

- Refaire cette étude avec plus de répétitions afin de réduire l'hétérogénéité constatée.
- Evaluer d'autres paramètres morphologiques et physiologiques (dosages des sucres, de proline, des chlorophylles, des activités enzymes anti oxydantes : SOD, Phosphatase, Catalase) chez les plantules issues des graines ayant reçues un priming préalable au silicate de sodium mis en germination dans des conditions du stress salin.
- Tester une large gamme de concentrations du Silicium afin de relever exactement la dose optimale permettant de stimuler les potentialités de tolérance des graines de cette espèce et également de rechercher la dose à partir de quel se manifeste l'effet toxique de Silicium.

Résumé :

L'amorçage est une technique de traitement pré-germinatif. Notre travail consiste à étudier l'effet de deux traitements pré-germinatifs avec l'eau et /ou avec le silicium (2 et 4 g/L) en condition du stress salin à différents doses (3,6, 9,15 g/L) sur la performance germinative, le début de croissance du pois fourrager *Pisum sativum subsp arvense*. L'objectif était de vérifier si les traitements au silicium confèrent aux plantules une meilleure croissance en milieu salin. Au stade de germination le silicium n'a pas influencé le taux de germination, les traitements au sel à différents doses et au Silicium ont montré un effet très proche à celle du lot témoins puisque le pois fourrager est un Glycophytes très tolérant à la salinité provoqué par NaCl. Le temps moyen de germination a montré que les fortes concentrations de sel provoquent une phase de latence plus longue et les traitements au silicium n'ont pas de phase de latence donc le silicium influence d'une manière positive la TMG. Nos résultats ont également montré que le silicium a un effet positif dans l'atténuation du stress salin à des doses précises, à savoir celle de 6 et de 9g/L. Au-delà de ces doses une toxicité a été observée et un effet significatif négatif a été ainsi enregistré.

Mots clés: *Pisum sativum subsp arvense*, pois fourrager, salinité, stress, NaCl, Silicium, silicate de sodium, germination, amorçage.

Summary:

Priming is a pre-germinative treatment technique. Our work consists in studying the effect of two pre-germinative treatments with water and/or Silicon (2 and 4g/L) under salt stress conditions at different doses (3, 6, 9, 15 g/L) on germination performance, early growth of field pea *Pisum sativum subsp arvense*. The aim was to check whether silicon treatments improve seedling growth in a saline environment. At the germination stage, silicon had no effect on the germination rate, while salt treatments at different doses and silicon treatments showed an effect very close to that of the control batch, since field pea is a Glycophytes highly tolerant to NaCl induced salinity. Mean germination time showed that high salt concentrations caused a longer lag phase, so silicon had a positive effect on TMG. Our results also showed that silicon has a positive effect in attenuating salt stress at specific doses namely 6 and 9g/L. Above these doses, toxicity was observed and a significant effect was recorded.

Key words: *Pisum sativum subsp arvense*, field pea, salinity, stress, NaCl, Silicon, sodium silicate, germination, priming.

