



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
جامعة زيان عاشور بالجلفة
Université Ziane Achour de Djelfa



كلية علوم الطبيعة والحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité : Biotechnologie végétale

*Evaluation de l'effet du stress salin sur quelques paramètres
morphologiques et physiologiques de l'Orge (*Hordeum
vulgare* var. Raihane) et blé (*Triticum durum* Desf var. Simeto)*

Présenté par

HAIDEB Meriem

HELIS Oumaima Rihab

Jury de soutenance

Nom et prénom

Qualité au sein du jury

Mme. Sahouli Safia. MCB

Président(e)

Mr. Taibaoui Ibrahim. MCB

Examineur

Mme. Hadadou Djamila. MCB

Examineur

Mr. Lahouel Mohamed. MCA

Encadreur

Année universitaire: 2025 /2026

Résumé

La salinité constitue l'un des principaux stress abiotiques limitant la productivité des céréales en Algérie, affectant plus de 3,2 millions d'hectares de terres agricoles. Cette étude vise à réaliser une analyse comparative de l'effet du stress salin (NaCl) sur les indicateurs morphologiques et physiologique du blé dur (*Triticum durum* Var. Simeto) et de l'orge (*Hordeum vulgare* Var. Raihane) au stade précoce de croissance. Les résultats ont révélé une variabilité significative dans les stratégies de réponse des deux variétés face au stress salin. L'orge a manifesté une haute capacité adaptative, se traduisant par son aptitude à germer, le maintien de la stabilité de sa teneur en chlorophylle (0,462 mg/g MF), et l'accumulation de quantités élevées de proline comme mécanisme d'Osmoprotection, atteignant son maximum sous le traitement S3 (0,9 mg/g MF). De plus, l'orge a maintenu des taux stables de sucres solubles et de biomasse, même aux concentrations les plus élevées testées. En revanche, le blé dur a montré une sensibilité marquée à la forte salinité, se traduisant par une inhibition totale de sa germination sous le traitement S4, accompagnée d'une altération métabolique sévère marquée par une chute drastique des teneurs en chlorophylle, en proline et en sucres solubles. Néanmoins, une réponse de type **hormésis** (stimulation temporaire) a été enregistrée au niveau des parties aériennes et racinaires sous un stress modéré, agissant comme un mécanisme compensatoire à court terme. En conclusion, cette étude montre que l'orge (Var. Raihane) adopte une stratégie d'adaptation progressive grâce à la stabilité de son système physiologique, tandis que la réponse du blé dur (Var. Simeto) se limite à une stimulation temporaire de la croissance qui finit par être sévèrement réprimée aux seuils de salinité élevés. Sur la base de ces résultats, l'orge (Var. Raihane) s'impose comme le choix le plus approprié pour la culture dans les sols affectés par la salinité en Algérie.

Mots-clés : stress salin — blé dur — orge — ajustement osmotique — proline — chlorophylle — sucres solubles.

ملخص

تُعَدُّ الملوحة أحد أبرز الإجهادات اللاحيوية المحددة لإنتاجية الحبوب في الجزائر، إذ تشمل ما يزيد على 3.2 مليون هكتار من الأراضي الزراعية. تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تحليل مقارنة لتأثير الإجهاد الملحي (NaCl) على المؤشرات المورفولوجية والفسيولوجية لنبتات القمح الصلب (*Triticum durum* Var. Simeto) والشعير (*Hordeum vulgare* Var. Raihane) في مرحلة النمو المبكر. أظهرت النتائج تبايناً ملحوظاً كبيراً في استراتيجيات استجابة الصنفين للإجهاد الملحي؛ حيث أثبت الشعير كفاءة تكيفية عالية تمثلت في قدرته على الإنبات، والمحافظة على استقرار محتوى الكلوروفيل (0.462 ملغ/غ وزناً طازجاً)، وتراكم كميات مرتفعة من البرولين كآلية للحماية الأسموزية بلغت ذروتها عند المعاملة S3 (0.9 ملغ/غ وزناً طازجاً)، مع الحفاظ على معدلات مستقرة من السكريات الذائبة والكتلة الحيوية حتى عند أعلى تركيز المدروس. في المقابل، أبدى القمح الصلب حساسية شديدة للملوحة المرتفعة، إذ تثبط إنباته تماماً عند المعاملة S4 وصاحب ذلك تراجع حاد في النشاط الأيضي تجسّد في الانخفاض الكبير لمحتوى الكلوروفيل، البرولين، والسكريات الذائبة. ورغم ذلك، سجّل القمح ظاهرة التنشيط المؤقت (**Hormésis**) في المجموعتين الخضري والجذري عند مستويات الإجهاد المنخفضة كآلية تعويضية قصيرة الأمد. تلخص الدراسة إلى أن الشعير (Var. Raihane) يتبع استراتيجية التكيف التدريجي بفضل منظومته الفسيولوجية المستقرة، في حين تقتصر استجابة القمح الصلب (Var. Simeto) على تحفيز نمو مؤقت مباشر أن يُثبّط حاداً عند العتبات الملحية العالية. يوصى بناءً على هذه النتائج باختيار الشعير (Var. Raihane) كخيار أنسب للزراعة في الأراضي المتأثرة بالملوحة في الجزائر.

الكلمات المفتاحية: إجهاد ملحي — قمح صلب — شعير — تكيف أسموزي — برولين — كلوروفيل — سكريات ذائبة.

Abstract

Salinity represents one of the most critical abiotic stresses limiting cereal productivity in Algeria, affecting over 3.2 million hectares of agricultural land. This study aims to conduct a comparative analysis of the effects of salt stress (NaCl) on the morphological and physiological indicators of durum wheat (*Triticum durum* Var. Simeto) and barley (*Hordeum vulgare* Var. Raihane) during the early growth stage. The results demonstrated a highly significant variation in the response strategies of both cultivars to salinity. Barley exhibited a high adaptive capacity, characterized by its ability to germinate, maintain stable chlorophyll content (0.462 mg/g FW), and accumulate elevated levels of proline as an osmoprotective mechanism, peaking at the S3 treatment (0.9 mg/g FW). Furthermore, barley maintained stable levels of soluble sugars and biomass even at the highest tested concentration. Conversely, durum wheat showed severe sensitivity to high salinity, resulting in a complete inhibition of germination under the S4 treatment. This was accompanied by a severe metabolic impairment, manifested as a drastic reduction in chlorophyll, proline, and soluble sugar contents. However, a temporary hormesis effect (growth stimulation) was recorded in both shoots and roots under mild stress, serving as a short-term compensatory mechanism. In conclusion, the study indicates that barley (Var. Raihane) follows a progressive adaptation strategy owing to its stable physiological system, whereas the response of durum wheat (Var. Simeto) is limited to a temporary growth stimulation that is ultimately severely suppressed at high salinity thresholds. Based on these findings, barley (Var. Raihane) is recommended as the most suitable option for cultivation in salinity-affected soils in Algeria. **Keywords:** salt stress — durum wheat — barley — osmotic adjustment — proline — chlorophyll — soluble sugars.

Dédicace

بفضل الله تعالى وتوفيقه، تمكنتُ من إنجاز هذا العمل المتواضع، الذي أهديه بكل فخر وامتنان إلى والديّ الحبيبين، اللذين رعاني بحبٍ ودعماني دون انتظار مقابل، وكانا لي دائماً ملجئي وسندي وسر نجاحي. إلى إخواني وأخواتي، رفاق دربي ومصدر سعادتي في الحياة. إلى خالتي العزيزة، شكراً لكِ على قلبك الكبير، ومحبتك الصادقة، ودعائك الذي لم يفارقني أبداً.

والى أساتذتي خاصة الى كل من درسني في الطور التعليمي المتوسط وكان نقطة الاستمرار

في مشواري الدراسي

أدعو الله أن يقيهم دائماً مصدر فخري وقدوة لي. و إلى جميع أفراد عائلتي، صغاراً وكباراً، على

دعمهم المتواصل ومحبتهم الدائمة.

إلى أساتذتي الكرام، الذين غرسوا فينا حبّ التعلّم والمعرفة، أتقدّم بخالص الشكر والتقدير لجهودكم

القيّمة ورسالتكم التربوية النبيلة



Oumaima

Dédicace

أهدي هذا النجاح، وما هو إلا هدية متواضعة أمام تعب سنين طويلة وسهر ليلٍ كثيرة.

اليوم هو عربونٌ بسيط لكل ما قدّمته، ولكل ما بذلته من أجلي. شكرًا يا أمي، والحمد لله كثيرًا الذي وفقني لأجعلك تعيشين هذا اليوم وتشاركوني فرحة نجاحي، ذلك النجاح الذي هو من صنع يديك ودعواتك الصادقة.

كما لا أنسى إخوتي الذين كانوا سندًا لا يميل، وبوصلةً لطريقي لا تضل، وخالاتي وأخوالي الذين أحاطوني بالحب والتشجيع والدعم.

وإلى صديقاتي العزيزات، شكرًا لكنّ على دعمكنّ ومساندكنّ طوال هذا المشوار.

وإلى أساتذتي الأفاضل الذين رافقوني طوال مشواري الدراسي، بكل ما قدموه من علمٍ وتوجيهٍ ونصح، لكم مني خالص الشكر والامتنان.

إلى عائلتي الصغيرة، لا تكفي كلمات الشكر والتقدير والاحترام لثمين جهودكم ووقوفكم إلى جانبي.

حفظكم الله جميعًا ورعاكم، وبارك فيكم، جزاكم عني خير الجزاء.

إليكم جميعًا أهدي ثمة هذا النجاح



Meriem

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur, le **Mr. LAHOUEL Mohamed**, pour sa disponibilité constante, ses précieux conseils, sa patience et ses orientations continues tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont honoré ce travail en acceptant de l'évaluer, en particulier à la Présidente du jury **Mme. SAHOULI Safia**, ainsi qu'aux examinateurs **Mr. TAIBAOUI Ibrahimet**

Mme. HADADOU Djamila pour leurs précieuses remarques et appréciations.

Nous tenons à exprimer notre vive reconnaissance aux membres du corps professoral et de l'administration de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université de Djelfa, qui nous ont soutenus tout au long de notre parcours académique.

Un grand merci s'adresse tout particulièrement au personnel technique et aux ingénieurs des laboratoires de la faculté, pour leur accueil chaleureux, leur aide précieuse et pour nous avoir fourni le matériel et les conditions nécessaires au bon déroulement de nos expérimentations.

Enfin, nous remercions chaleureusement nos familles, nos ami(e)s et tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce projet.

Liste des abréviations

ACP: Analyse en composantes principales

ANOVA: Analyse de la variance

Chl: Chlorophylle

Var: Variété

DO: Densité Optique

F: Valeur de Fisher

MF: Matière Fraîche

NaCl: Chlorure de Sodium

ns: Non significatif

P: Probabilité (*P-value*)

ITGC: Institut Technique des Grandes Cultures

Liste des photos

N°	Titre	page
01	Aperçu global du matériel végétal utilisé (Semences de blé dur var. Simeto R2 et d'orge var. Railhane) avant le tri et la désinfection, 2026.	13
02	Étapes successives de la préparation du substrat de culture (sable fin) : tamisage mécanique, lavage, désinfection chimique à l'eau de Javel, rinçage à l'eau distillée et stérilisation thermique à l'étuve, 2026.	18
03	Différentes étapes de préparation des semences : tri manuel et calibrage par pesée, désinfection chimique sous contrôle chronométrique, séchage sur papier filtre stérile et test préliminaire du pouvoir germinatif sur terreau organique, 2026.	20
04	Opérations techniques de mise en place de l'essai : perforation des unités culturales, codification par encre sélective, et répartition homogène du substrat, 2026.	21
05	Conditions environnementales et suivi de l'essai : agencement des cagettes face à l'éclairage naturel de la salle d'expérimentation, fiche technique de l'eau minérale utilisée, et contrôle de la régulation hydrique, 2026.	23
06	Modifications morpho-physiologiques et symptômes de toxicité induits par le NaCl, 2026.	25
07	Étapes de prélèvement, de mesure morphométrique et de séchage des plantules à l'étuve, 2026.	27
08	Protocole expérimental d'extraction et de quantification des pigments chlorophylliens, 2026.	28
09	Différentes étapes du dosage colorimétrique de la proline au laboratoire, 2026.	30
10	Différentes étapes du dosage colorimétrique des sucres totaux solubles au laboratoire, 2026.	32

Liste des figures

N°	Titre	page
01	Expérience en blocs aléatoires complets	16
02	Effet du stress salin sur la germination chez l'orge Var. Raihane	34
03	Indice de tolérance chez l'orge Var. Raihane	35
04	Valeurs propres	38
05	Analyse en Composantes Principales (ACP) des Paramètres Morphologiques sous Stress Salin de l'orge	39
06	du stress salin sur la germination du blé Var. Simeto	42
07	Indice de tolérance blé dur Var.Simeto	43
08	Valeurs propres	46
09	Analyse en Composantes Principales (ACP) des Paramètres Morphologiques sous Stress Salin du blé	47
10	du stress salin (NaCl) sur la teneur en chlorophylle chez l'orge (<i>Hordeumvulgare</i> L. var. Raihane) et le blé dur (<i>Triticumdurum</i> Desf. var. Simeto R2).	52
11	Effet de différentes concentrations de NaCl sur l'accumulation de la proline foliaire (mg/g MF) chez l'orge (Var. Raihane) et le blé dur (Var. Simeto R2).	54
12	Effet du stress salin (NaCl) sur la teneur en sucres solubles foliaires chez l'orge (Var. Raihane) et le blé dur (Var.Simeto).	56

Liste des tableaux

N°	Titre	page
01	Les différents paramètres morpho-physiologiques étudiés, leurs unités de mesure et leurs codifications	17
02	Valeurs moyennes des paramètres morphologiques de l'orge Var. Raihane sous différentes concentrations de NaCl (0, 4, 8 et 12 g/L)	33
03	Analyse de la chlorophylle a, b et totale de l'orge en nm ($\lambda=645$ nm)	35
04	Résultats de l'analyse de la proline ($\lambda=528$ nm)	35
05	Résultats de l'analyse des sucres totaux($\lambda=487$ nm)	35
06	Matrice de corrélation (Pearson (n))	37
07	Valeurs propres	38
08	Valeurs moyennes des paramètres morphologiques du blé dur Var. Simeto R2 sous différentes concentrations de NaCl (0, 4, 8 et 12 g/L)	41
09	Analyse de la chlorophylle a, b et totale du blé en nm ($\lambda=645$ nm)	43
10	Résultats de l'analyse de la proline ($\lambda=528$ nm)	43
11	Résultats de l'analyse des sucres totaux ($\lambda=487$ nm)	43
12	Matrice de corrélation (Pearson (n))	45
13	Valeurs propres	46
14	Analyse de la variance (ANOVA à deux facteurs) des teneurs en chlorophylle	51
15	Analyse de la variance (ANOVA à deux facteurs) des teneurs en proline	53
16	Analyse de la variance (ANOVA à deux facteurs) des teneurs en en sucres solubles	55

Table des matières

Dédicaces et Remerciements	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des photos	
Liste des tableaux	
Introduction.....	01
Chapitre I : Etude bibliographique	
I.1. Importance stratégique des céréales en Algérie.....	03
I.1.1 Classification botanique de l'orge.....	03
I.1.2 Classification botanique du blé.....	04
I.1.3 Méthodologie de l'étude en milieux inertes (sable).....	04
I.2. Stress abiotiques et environnementaux en Algérie.....	05
I.2.1. Le concept de stress.....	05
I.2.2. Stress hydrique.....	05
I.3. Stress thermique.....	06
I.4. Stress salin.....	06
I.4.1. Sources de salinité.....	06
I.4.2. Expansion de la salinisation dans les régions irriguées et méridionales.....	07
I.4.3. Effets physiologiques du stress salin sur la germination.....	07
I.4.4. Stress oxydatif et inhibition de l'activité enzymatique.....	08
I.5. Mécanismes d'adaptation et stratégies de résistance.....	08
I.5.1. Adaptation physiologique.....	08
I.6. Effets physiologiques du stress salin sur la germination.....	09
I.6.1. Mécanisme du stress osmotique.....	09
I.7. Mécanismes d'adaptation et stratégies de résistance.....	09
I.7.1. Adaptation physiologique.....	09
I.8. Institut Technique des Grandes Cultures(ITGC).....	10
Chapitre II : Matériels et méthodes	
II.1. Méthodologie expérimentale.....	12
II.1.1. Le matériel végétal.....	12
II.1.2. Matériel non végétal.....	14
II.1.3. Principe d'expérimentation.....	15
II.1.3.1. Conditions de l'expérience.....	15
II.1.4. Préparation du substrat.....	17

II.1.5.	Préparation des semences.....	18
II.1.6.	Mise en place de l'expérience et dispositif expérimental.....	20
II.1.7.	Localisation et conditions du site expérimental.....	21
II.1.8.	Observations en cours d'expérimentation.....	23
II.1.9.	Paramètres morphologiques et protocole de mesure.....	26
II.1.9.1.	Les paramètres morphologiques mesurés.....	26
II.1.10.	Dosages des paramètres biochimiques.....	27
II.1.10.1.	Extraction et Dosage de la Chlorophylle (a, b et totale).....	27
II.1.10.2.	Extraction et Dosage de la Proline.....	29
II.1.10.3.	Extraction et Dosage des Sucres Totaux Solubles.....	30
II.1.11.	Analyses statistiques des données.....	32

Chapitre III : Résultats et Discussion

III.1.	Évaluation du comportement de l'orge (<i>Hordeum vulgare</i> L.Var. Raihane).....	33
III.1.1.	Valeurs moyennes des paramètres morphologiquesde l'orge Var. Raihane sous différentes concentrations de NaCl (0, 4, 8 et 12 g/L).....	33
III.1.2.	Paramètres physiologiquesde l'orge var. Raihane.....	34
III.1.3.	Etude statistique Orge Var. Raihane.....	36
III.1.3.1.	Analyse en Composantes Principales (ACP) des Paramètres Morphologiques sous Stress Salin de l'Orge <i>Hordeumvulgare</i> L.Var Raihane	36
III.2.	Évaluation du comportement du blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.) Var.Simeto...	41
III.2.1.	Valeurs moyennes des paramètres morphologiques du blé dur Var. Simeto R2sous différentes concentrations de NaCl (0, 4, 8 et 12 g/L).....	41
III.2.2.	Paramètres physiologiques du blé Var. Simeto.....	42
III.2.3.	Etude statistiques du Blé dur Var.Simeto.....	44
III.2.3.1.	Analyse en Composantes Principales (ACP) des Paramètres Morphologiques sous Stress Salin du blé dur <i>Triticum durum</i> Desf., Var. Simeto.....	44
III.3.	Comparaison entre l'orge Var. Raihane et le blé Var. Simeto.....	48
III.3.1.	Comparaison de point de vue morphologique entre l'orge et le blé.....	48
III.3.2.	Analyse de la variance (ANOVA à deux facteurs) des teneurs en chlorophylle, Proline et sucres totaux.....	51
	Conclusion.....	57

Références bibliographiques

Annexe

Introduction

Introduction

Les céréales, notamment le blé et l'orge, constituent la base de l'alimentation humaine et animale en Algérie. Elles occupent également une place importante sur les plans économique et stratégique, tant au niveau national qu'international. Malgré les efforts déployés pour développer la production locale et réduire la dépendance vis-à-vis des importations, la production nationale demeure insuffisante pour couvrir les besoins du pays (Boukerrouche., 2021 ; Rechachi.2020). Cette situation est liée à plusieurs contraintes environnementales, parmi lesquelles les stress abiotiques qui occupent une place prépondérante. La salinité représente l'un des principaux facteurs limitant la croissance et la productivité des cultures, particulièrement dans les régions arides et semi-arides caractérisées par une faible pluviométrie, une répartition irrégulière des précipitations et une forte évaporation favorisant l'accumulation des sels dans les sols. À l'échelle mondiale, les sols salés affectent environ 7 % des terres émergées. En Algérie, près de 3,2 millions d'hectares sont touchés par ce phénomène (CNES, 1997), ce qui représente une menace directe pour la sécurité alimentaire nationale. (Saied. ;Maamouli., 2022) .

La salinité des sols et des eaux d'irrigation influence négativement les fonctions physiologiques et métaboliques des plantes. Elle se traduit généralement par une réduction de la germination, une inhibition de la croissance et des modifications morphologiques. Face à ces contraintes, les plantes développent différents mécanismes d'adaptation, notamment l'accumulation de composés osmoprotecteurs tels que la proline et les sucres solubles, qui contribuent au maintien de l'équilibre osmotique cellulaire. (Djahra 2015 ; Rechachi.2020).

Malgré les nombreux travaux sur la tolérance au sel chez les céréales, peu d'études comparatives ont été menées en conditions climatiques algériennes sur les variétés locales de blé et d'orge simultanément. Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer l'effet du stress salin induit par différentes concentrations de chlorure de sodium (NaCl) sur le blé dur (*Triticum durum* var. Simeto) et l'orge (*Hordeum vulgare* var. Raihane). Cette étude a pour but :

- ✓ Évaluation de la germination : déterminer la capacité des graines des deux variétés (Simeto et Raihane) à germer sous l'effet de concentrations croissantes de NaCl.
- ✓ Mesure des indicateurs morphologiques directs : déterminer l'effet de la salinité sur les paramètres morphologiques des plantes

- ✓ Mesure des indicateurs de biomasse : suivi des variations morphologiques du poids par la mesure des rendements.
- ✓ Comparaison des stratégies de résistance morphologique : identification de la variété la plus efficace pour préserver sa structure et sa croissance apparente afin de résister à la salinité en Algérie

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux précédés d'une introduction

- ✓ **Le premier chapitre** présente une synthèse bibliographique portant sur l'importance des céréales en Algérie, les différents stress abiotiques et les mécanismes d'adaptation des plantes face au stress salin.
- ✓ **Le deuxième chapitre** est consacré au matériel biologique utilisé, aux conditions expérimentales ainsi qu'aux méthodes d'analyse adaptées.
- ✓ **Le troisième chapitre** expose les résultats obtenus et leur discussion.

Une conclusion clôt le travail dont on expose les perspectives de recherche dans cette optique.

CHAPITRE I:
Etude
Bibliographique

I.1. Importance stratégique des céréales en Algérie

Les céréales représentent un pilier stratégique très important en Algérie, sur les plans économique, nutritionnel et politique (Djermoun., 2009 ; 2018). La consommation quotidienne moyenne de céréales en Algérie a atteint 1678 consommations par habitant en 2013. Le secteur céréalier, notamment le blé et l'orge, constitue un pilier économique important en Algérie, car il a été utilisé comme outil de pression politique (Djermoun., 2018 ; Bouziane., 2015). En plus de représenter un moteur fondamental du développement agricole, cela contribue à créer des opportunités d'emploi, notamment dans les zones rurales comme les hauts plateaux. Malgré l'importance de la production nationale, estimée à plus de 34 millions de quintaux en 2017 selon le ministère de l'Agriculture et du Développement rural, celle-ci est insuffisante pour répondre à la demande croissante. C'est ce qui pousse l'Algérie à recourir aux importations et la classe parmi les plus grands importateurs de céréales au monde. Par conséquent, les céréales sont considérées comme un pivot de la stabilité économique, sociale et politique en Algérie (Djermoun., 2009 ; 2018).

I.1.1 Classification botanique de l'orge

L'orge (*Hordeum vulgare* L.) est une plante de la classe des monocotylédones et qui appartient à la famille des **Poaceae** (ex. graminée) qui comprend 31 espèces, selon Chadeaud et Emberger (1960),

Classification de l'espèce d'orge *Hordeum vulgare* L (Benmansour. ; Lamaa., 2023) :

Règne	Plantae
Division	Magnoliophyta
Classe	Liliopsida
Sous Classe	Commelinidae
Ordre	Poale
Famille	Poaceae
Sous Famille	Hordeoideae
Genre	Hordeum
Espèce	<i>Hordeum vulgare</i> L

I.1.2 Classification botanique du blé

Le blé dur obéit à la classification suivante (Belferragui ; Mahdjoub, 2015)

Embranchement	Angiospermes
Sous embranchement	Spermaphytes
Classe	Monocotylédones
Ordre	Glumiflorales
Super ordre	Comméliniflorales
Famille	Gramineae
Genre	Triticum
Espèce	<i>Triticum durum</i> Desf

I.1.3 Méthodologie de l'étude en milieux inertes (sable)

Le sable est utilisé dans les essais de salinité pour le contrôle de l'irrigation et de la nutrition minérale. Il est fréquemment utilisé comme substrat dans les études physiologiques contrôlées en raison de ses propriétés physiques uniques. *Inertie et Contrôle Nutritionnel* : Le sable est considéré comme un milieu inerte, ce qui signifie qu'il n'interfère pas avec la composition chimique de la solution nutritive apportée. Cela permet aux chercheurs de contrôler précisément l'apport en nutriments minéraux (ex : solutions de Hoagland ou Coïc-Lesaint) sans les interactions complexes d'échange d'ions propres aux sols argileux. *Gestion de la Salinité* : L'utilisation du sable facilite le contrôle de la conductivité électrique (CE) du milieu. Il permet un drainage efficace et le lessivage des impuretés ou des sels accumulés, assurant que la concentration saline imposée reste stable et mesurable. *Suivi de l'Irrigation* : Ses caractéristiques de rétention d'eau permettent un ajustement précis de l'apport hydrique, souvent basé sur un pourcentage de la capacité au champ, ce qui est crucial pour distinguer les effets de la toxicité ionique de ceux du stress hydrique (Soltner, 1999-2005 ; Hassani, 2009 ; Cooper, 1979).

I.2. Stress abiotiques et environnementaux en Algérie

Dans les principales régions céréalières d'Algérie, notamment sur les hauts plateaux, les stress abiotiques et biotiques constituent l'un des principaux obstacles à la culture des céréales. Ces stress incluent les fluctuations des précipitations, de la température, de l'humidité du sol et de la salinité. Ils entraînent des modifications morphologiques, physiologiques et moléculaires chez les plantes, affectant ainsi leur cycle de vie. (Amrouche. ; Mesbah., 2017).

I.2.1. Le concept de stress

Le terme « stress » désigne l'ensemble des perturbations biologiques résultant d'une agression subie par un organisme vivant. En botanique, son usage a une signification précise : il représente les facteurs responsables des perturbations et des changements, soudains ou progressifs, qui affectent la croissance des plantes. (Amrouche. ; Mesbah., 2017).

I.2.2. Stress hydrique

Le stress hydrique, ou sécheresse, a plusieurs définitions, notamment :

En météorologie, la sécheresse est définie comme une période prolongée sans précipitations, ou du moins une diminution significative de leur fréquence par rapport à la moyenne normale.

En agriculture, le stress hydrique peut être défini comme la différence entre la quantité d'eau nécessaire à la croissance d'une plante et la quantité d'eau disponible dans son environnement. Les besoins en eau d'une plante sont déterminés par son taux de transpiration, ou taux d'évaporation ; autrement dit, la quantité d'eau perdue par transpiration est supérieure à la quantité absorbée (Amrouche. ; Mesbah., 2017 ; Mouloudi., 2019).

a. Réponse physiologique de la plante au stress hydrique

En cas de pénurie d'eau, la plante tente de réguler son apport hydrique et de maintenir un volume cellulaire constant pour assurer sa croissance. Le niveau d'eau est contrôlé par la réduction du flux d'eau. Lorsque la teneur en eau du sol diminue, les racines envoient des signaux chimiques à la tige, puis aux feuilles. En réponse, les stomates se ferment pour réduire les pertes d'eau par évaporation. Il s'agit de l'une des premières réponses de la plante à

la sécheresse. La fermeture des stomates entraîne d'autres modifications, comme une diminution de l'absorption de dioxyde de carbone et, par conséquent, une réduction de la photosynthèse. La fixation du carbone diminue également au profit de la photosynthèse, où l'oxygène est fixé à la place du dioxyde de carbone. Ce processus consomme de l'énergie de la plante. Le niveau d'eau peut aussi être régulé par le maintien d'un flux d'eau grâce à l'adaptation osmotique : la concentration des substances dissoutes augmente et le potentiel hydrique diminue. Cela permet à l'eau de se déplacer des racines vers les feuilles, augmentant ainsi la pression de turgescence dans les cellules de garde et favorisant l'ouverture des stomates, permettant ainsi la poursuite de la photosynthèse. (Bénédicte., 2012).

I.3. Stress thermique

La température est le deuxième facteur le plus important influençant la croissance des plantes, car elle accroît l'évaporation de l'eau du sol et nuit à la croissance en augmentant la transpiration (Belkacim.,2023). Les températures optimales de germination varient considérablement selon les espèces et dépendent de l'état physiologique des graines au moment de la germination. On distingue trois types de comportements en fonction de la plage de températures propices à la germination :

Certaines graines ne germent qu'à basse température, souvent autour de 0 °C ; il s'agit principalement de graines d'espèces poussant dans les climats tempérés. D'autres graines ne germent qu'à des températures relativement élevées (jusqu'à 45 °C). Presque toutes les espèces de ce type sont d'origine tropicale ou subtropicale. Enfin, certaines espèces sont capables de germer dans une très large gamme de températures. (Mahboubi., 2008).

I.4. Stress salin

De nombreux chercheurs définissent la salinité comme un processus d'enrichissement anormal du sol en sels dissous, lui conférant ainsi le caractère salin. Il s'agit d'un facteur environnemental crucial qui limite la croissance et la productivité. (Amrouche. ; Mesbah., 2017).

I.4.1. Sources de salinité

La salinité résulte de l'accumulation excessive de sels dissous dans le sol ou l'eau. Elle peut être d'origine naturelle ou anthropique. Parmi les sources de salinité, on trouve des

sources géologiques (telles que les évaporites), hydrogéologiques (associées aux eaux souterraines salines) et hydrologiques (associées à l'eau de mer). Les sols salins sont caractérisés par une forte teneur en sodium échangeable et par l'accumulation de sels dissous à leur surface (Bounegab.; Ayadi., 2020 ; Jabnoute.,2008). L'augmentation de la salinité des terres agricoles est également liée à l'utilisation d'eau d'irrigation de mauvaise qualité et à l'accumulation de sels au fil du temps due à une irrigation continue. (CNES,1997 ; Bouhabila., 2016).

I.4.2. Expansion de la salinisation dans les régions irriguées et méridionales

La salinisation est l'un des principaux facteurs de dégradation des sols dans les régions arides et semi-arides. La salinisation s'étend considérablement, notamment dans les zones irriguées. Des études indiquent qu'elle affecte de vastes superficies de terres agricoles à l'échelle mondiale. L'Algérie figure parmi les pays touchés par ce phénomène, avec des sols salins couvrant environ 3,2 millions d'hectares, en particulier dans les régions méridionales et semi-arides. (Jabnoute., 2008 ; Karoune. ;al ,2017 ; Bouhabila., 2016).

I.4.3. Effets physiologiques du stress salin sur la germination

a. Mécanisme du stress osmotique

De fortes concentrations de NaCl ralentissent la germination et en prolongent la durée, retardant ainsi la levée des plantules. De plus, le faible potentiel osmotique de la solution du sol empêche l'absorption des nutriments par les graines en raison d'une activité enzymatique réduite et d'une absorption de sodium (Na^+) plus importante que celle du potassium (K^+), ce qui entraîne un retard des processus métaboliques. Les stades de germination et de plantule sont les plus sensibles au stress salin. La salinité limite également la croissance racinaire et réduit la capacité de la plante à absorber les minéraux du sol (Jabnoute., 2008 ; Bouhabila., 2016 ; Bounegab.; Ayadi., 2020).

b. Effets physiologiques et biologiques

b.1. Toxicité ionique et déséquilibre minéral

L'accumulation de Na^+ et Cl^- dans la plante entraîne un déséquilibre de l'équilibre ionique et de la nutrition minérale. La salinité provoque une forte accumulation d'ions sodium et chlorure dans les tissus végétaux, affectant l'absorption de minéraux essentiels tels que K^+ ,

Ca^{2+} et Mg^{2+} . De plus, des concentrations élevées de NaCl entraînent une diminution de l'absorption de Ca^{2+} , accompagnée d'une réduction des concentrations de Mg^{2+} , K^+ , N et P dans la plante. Ce déséquilibre nutritionnel est l'une des causes du ralentissement de la croissance en milieu salin. La salinité induit également une compétition entre Na^+ et Ca^{2+} pour les sites de fixation apoplasmique, perturbant ainsi la nutrition minérale de la plante. (Jabnounge., 2008 ; Bouhabila., 2016 ; Karoune., 2017).

I.4.4. Stress oxydatif et inhibition de l'activité enzymatique

La salinité modifie l'activité enzymatique en raison de changements dans la structure cytoplasmique des cellules végétales et perturbe également les processus métaboliques liés à la respiration, à la photosynthèse et à la glycolyse. (Jabnounge., 2008 ; Bouhabila., 2016)

La salinité affecte négativement l'activité physiologique des feuilles, notamment la photosynthèse. La réduction de la photosynthèse est associée à une diminution du potentiel hydrique foliaire. La salinité limite également la fixation du CO_2 et perturbe l'absorption de l'énergie lumineuse par les pigments chlorophylliens. De fortes concentrations de Na^+ et Cl^- perturbent les processus cellulaires et endommagent les chloroplastes, en plus de réduire la teneur en chlorophylle et d'inhiber la synthèse de l'acide 5-aminolévulinique. La salinité affecte également le photosystème II (PSII) et augmente l'activité des enzymes dégradant la chlorophylle. De plus, la salinité entraîne une diminution du taux de photosynthèse due à une réduction de la conductivité stomatique du CO_2 , à la fermeture des stomates, à la déshydratation des membranes cellulaires et à une diminution de la perméabilité au dioxyde de carbone. (Jabnounge., 2008 ; Bouhabila., 2016 ; Karoune.; 2017 ; Bounegab. et Ayadi., 2020).

I.5. Mécanismes d'adaptation et stratégies de résistance

I.5.1. Adaptation physiologique

Les plantes utilisent plusieurs mécanismes pour s'adapter au stress salin et maintenir leur équilibre hydrique intracellulaire. Parmi les plus importants, la fermeture des stomates permet de réduire les pertes d'eau, le degré de photosynthèse étant directement lié au degré de fermeture stomatique. Les plantes ont également recours à la modification osmotique par l'accumulation d'ions dans les vacuoles, notamment Na^+ et Cl^- , afin de réduire leur potentiel hydrique. De plus, la proline s'accumule rapidement chez de nombreuses plantes exposées au

stress salin, en raison d'une conversion accrue de l'acide glutamique en proline (Karoune., 2017). Enfin, une augmentation des sucres solubles dans les tissus végétaux a été observée suite à une altération de la glycolyse ou de la dégradation de l'amidon, contribuant ainsi au maintien de l'équilibre osmotique intracellulaire (Jabnounge., 2008 ; Bouhabila., 2016 ; Moulodi., 2019)

I.6. Effets physiologiques du stress salin sur la germination

I.6.1. Mécanisme du stress osmotique

De fortes concentrations de NaCl ralentissent la germination et en prolongent la durée, retardant ainsi la levée des plantules. De plus, le faible potentiel osmotique de la solution du sol empêche l'absorption des nutriments par les graines en raison d'une activité enzymatique réduite et d'une absorption de sodium (Na^+) plus importante que celle du potassium (K^+), ce qui entraîne un retard des processus métaboliques. Les stades de germination et de plantule sont les plus sensibles au stress salin. La salinité limite également la croissance racinaire et réduit la capacité de la plante à absorber les minéraux du sol (Jabnounge., 2008 ; Bouhabila., 2016 ; Bounegab.; Ayadi., 2020).

I.7. Mécanismes d'adaptation et stratégies de résistance

Les plantes utilisent plusieurs mécanismes pour s'adapter au stress salin et maintenir leur équilibre hydrique intracellulaire. Parmi les plus importants, la fermeture des stomates permet de réduire les pertes d'eau, l'intensité de photosynthèse étant directement liée au degré de fermeture stomatique. Les plantes ont également recours à la modification osmotique par l'accumulation d'ions dans les vacuoles, notamment Na^+ et Cl^- , afin de réduire leur potentiel hydrique. De plus, la proline s'accumule rapidement chez de nombreuses plantes exposées au stress salin, en raison d'une conversion accrue de l'acide glutamique en proline (Karoune., 2017). Enfin, une augmentation des sucres solubles dans les tissus végétaux a été observée suite à une altération de la glycolyse ou de la dégradation de l'amidon, contribuant ainsi au maintien de l'équilibre osmotique intracellulaire (Jabnounge., 2008) ; Bouhabila., 2016).

I.7.1. Adaptation physiologique

La régulation osmotique (accumulation de proline et de sucres solubles). L'ajustement ou régulation osmotique est un mécanisme clé par lequel les plantes, notamment le blé dur,

s'adaptent au stress salin et hydrique. Ce processus consiste en l'accumulation active de solutés compatibles, appelés osmotocums, dans le cytosol pour abaisser le potentiel hydrique cellulaire sans altérer les fonctions enzymatiques (Moulodi.,2019 ; Jabnoune., 2008 ; Karoune., 2017).

a. Rôle de la proline

Cet acide aminé s'accumule de manière spectaculaire en réponse au stress salin. Elle joue un rôle crucial dans la protection des membranes cellulaires et l'ajustement osmotique, permettant de maintenir la turgescence nécessaire aux activités métaboliques. Dans des variétés de blé dur comme "GTA dur", le taux de proline augmente significativement avec la concentration de NaCl et la durée du stress (Moulodi., 2019 ; Jabnoune., 2008 ; Karoune., 2017).

b. Rôle des sucres solubles

Les glucides (sucrose, glucose, fructose) s'accumulent également pour surmonter l'augmentation du potentiel osmotique du milieu extérieur. Cette accumulation participe à la protection des structures cellulaires et sert de source de carbone et d'énergie sous stress. Les variétés tolérantes ont souvent tendance à accumuler des proportions de sucres plus importantes que les variétés sensibles Cette régulation permet aux stomates de rester ouverts, assurant ainsi la continuité de la photosynthèse et retardant le flétrissement des feuilles. (Moulodi., 2019 ; Jabnoune., 2008 ; Karoune., 2017).

I.8. Institut Technique des Grandes Cultures(ITGC)

ITGC, ainsi que les structures techniques similaires, constituent un pilier fondamental pour le développement de la filière céréalière en Algérie. Cette contribution s'articule autour des axes suivants

• Fourniture de Matériel Végétal

Dans le cadre de la recherche agronomique, l'ITGC joue un rôle clé en approvisionnant les chercheurs en matériel végétal nécessaire aux études de tolérance aux stress abiotiques (salinité et sécheresse), à travers une collection diversifiée de géotypes locaux et introduits(ITGC,1995/2004).

- **Amélioration et Sélection**

Ces instituts s'intègrent activement dans les programmes nationaux d'amélioration du blé. En étroite collaboration avec des organismes internationaux de premier plan, tels que le Centre international de recherche agricole dans les zones sèches (**ICARDA**), ils procèdent à des criblages de routine sur de vastes collections germoplasmiques de blé dur et de blé tendre.

- **Diffusion des Pratiques Culturelles**

Au-delà des aspects génétiques, l'action de l'ITGC s'étend à la définition et à l'optimisation des itinéraires techniques (tels que la densité optimale de semis). Ces normes sont adaptées au potentiel génétique de chaque variété et à la fertilité des sols, afin de maximiser le rendement face aux différentes contraintes environnementales (ITGC, 1995/2004 ; Benlaribi, 1990; Hakim, 2018; Davenport, 2003; Anniche; Benbelkacem, 2016; Bouchedja, 2010; ICARDA, 2012).

CHAPITRE II:

Matériel

et méthodes

II.1. Méthodologie expérimentale

II.1.1. Le matériel végétal

Pour répondre aux objectifs de notre étude, le choix s'est porté sur deux espèces de céréales majeures en Algérie, représentées chacune par une variété largement préconisée pour ses aptitudes agronomiques :

Le blé dur (*Triticum durum* var. Simeto R2) : Une variété à haut potentiel de rendement, introduite pour sa performance dans les zones céréalières (Belaegrouz, 2022).

L'orge (*Hordeum vulgare* var. Raihane) : Une variété très prisée pour sa rusticité et sa double fin (grain et fourrage) dans les systèmes agro-pastoraux (Galfout, 2022).

Les semences de ces deux variétés ont été gracieusement fournies par l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC). Afin de garantir la fiabilité et l'homogénéité des tests physiologiques ultérieurs, un tri manuel rigoureux a été effectué avant la mise en culture pour ne retenir que les graines saines, uniformes en taille et exemptes de tout dommage.

Justification scientifique et économique du choix du matériel :

L'intégration conjointe et comparative de Simeto R2 et de Raihane sous un protocole expérimental strictement identique répond à une double problématique (climatique et socio-économique) propre à la région de Djelfa (Algérie) (Kertali, 2024) :

Évaluation de la résilience face aux contraintes locales (Djelfa) : La wilaya de Djelfa, de par son contexte bioclimatique semi-aride à aride, est sujette à des problèmes de salinisation des sols et des eaux d'irrigation. Tester ces deux variétés sous différents niveaux de stress salin (0g/l, 4g/l, 8g/l, 12g/l de NaCl) permet d'évaluer concrètement leurs limites physiologiques d'adaptation in situ.

Valorisation d'une approche comparative interspécifique peu explorée : Bien que la tolérance de l'orge soit globalement reconnue comme supérieure à celle du blé dur, les investigations scientifiques comparant simultanément ces deux espèces sous les mêmes conditions de stress demeurent très limitées. Cette étude comble ainsi un

manque de données comparatives directes en mettant en évidence la divergence de leurs stratégies adaptatives (mécanismes morpho-physiologiques et biochimiques tels que l'accumulation de la proline, des sucres solubles et le maintien de la chlorophylle).

Apport d'une alternative culturale d'aide à la décision pour l'agriculteur : Le blé dur (Simeto R2) représente une culture à forte valeur ajoutée et hautement stratégique pour la sécurité alimentaire nationale. L'objectif ultime est de définir précisément le seuil de salinité critique à partir duquel sa rentabilité s'effondre. Au-delà de ce seuil, l'orge (Raihane) est alors proposée comme une alternative culturale directe et résiliente pour le fellah local, lui permettant de pérenniser sa production, de sécuriser ses revenus et d'éviter l'abandon des terres marginales affectées par le sel (Benmounah, 2022; ESA Mostaganem, 2022).



photo.1 : Aperçu global du matériel végétal utilisé (Semences de blé dur var. Simeto R2 et d'orge var. Raihane) avant le tri et la désinfection, 2026.

II.1.2. Matériel non végétal

Substrat de culture:

Pour la mise en place de notre essai de germination et de croissance, le substrat utilisé est un sable fin, caractérisé par les aspects suivants

Nature : Un sable fin inerte.

Intérêt scientifique : L'utilisation de ce substrat poreux et homogène permet de contrôler parfaitement la concentration de la solution saline ajoutée (NaCl) sans interférence avec les éléments nutritifs ou les complexes colloïdaux du sol.

Matériel chimique:

Pour la désinfection des semences : Éthanol (C_2H_5OH) à 70% et Hypochlorite de sodium (NaCl) dilué au tiers (1/3).

Pour l'induction du stress salin : Chlorure de sodium (NaCl) pur en poudre.

Pour l'extraction et le dosage de la chlorophylle (Baka et al, 2006): Éthanol à 80%.

Pour l'extraction et le dosage de la proline (Méthode de Troll et Lindsley, 1955 ; Dreier et Goring, 1974):

Méthanol à 40%, Acide acétique glacial (CH_3COOH 99-100%), Ninhydrine à 3%, Acide orthophosphorique à 85% (H_3PO_4 , d=1,7), Toluène pur, et Sulfate de sodium anhydre (Na_2SO_4).

Pour l'extraction et le dosage des sucres totaux solubles (Méthode de Dubois et al., 1956) : Méthanol à 40%, Phénol à 5%, et Acide sulfurique (H_2SO_4) concentré.

Autres : Eau distillée et L'eau minérale d'Atlas a été utilisée pour l'irrigation car elle présente la plus faible teneur en salinité.

Matériel de laboratoire et outils de mesure:

Pots en plastique d'expérimentation (unités culturales).

Tubes à essai, tubes à centrifuger, béchers (vases à bec), fioles d'Erlenmeyer, et fioles jaugées de différentes capacités.

CHAPITRE II: Matériel et méthodes

Pipettes graduées et micropipettes de précision (100 μ l, 1000 μ l et 5ml) avec leurs cônes jetables.

Éprouvette graduée : Utilisée pour mesurer avec exactitude le volume d'eau distillée ou de solution saline lors des arrosages.

Balance électronique de précision : Utilisée pour peser régulièrement les pots de culture afin de maintenir une humidité constante par ajustement du poids.

Spectrophotomètre UV-Visible (Type BECKMAN DU 520): Utilisé pour la lecture des absorbances

Agitateur de type Vortex (indispensable pour l'agitation et la séparation des phases lors du dosage de la proline et des sucres).

Centrifugeuse de laboratoire (pour la séparation des phases lors des extractions).

Bain-marie thermorégulé (pour le chauffage à 85C° lors des extractions au méthanol, et à 100C° pour la réaction colorée).

Mortier en porcelaine avec pilon (pour l'homogénéisation et le broyage du matériel végétal frais).

Étuve de séchage (réglée à 70C°-80C° pendant 48 heures pour la détermination du poids sec).

Règle millimétrée (outil de mesure morphologique pour déterminer la longueur de la racine et de la partie aérienne).

II.1.3. Principe d'expérimentation

II.1.3.1. Conditions de l'expérience

Principe : Dans le cas de notre expérience, on entend classiquement par bloc un ensemble de pots voisins et très semblables les uns aux autres, quant aux conditions de croissance et de développement de la végétation. Ces blocs sont dits complets quand tous les objets mis en expérience sont présents dans chacun d'eux (Dagnelie, P., 2012).

CHAPITRE II: Matériel et méthodes

Code des blocs (traitements) et des objets : Soit pour le blé ou pour l'orge, on a effectué 04 traitements d'irrigation selon la concentration en NaCl (S1=Témoin 0 g/l, S2=4 g/l, S3=8 g/l, S4=12 g/l) par addition à l'eau minérale Atlas dont pour chacun des traitements, on a réalisé 05 répétitions (T1, T2, T3, T4, T5) (05 pots dont chacun porte 05 graines).

S1T1	S1T2	S1T3	S1T4	S1T5
S2T1	S2T2	S2T3	S2T4	S2T5
S3T1	S3T2	S3T3	S3T4	S3T5
S4T1	S4T2	S4T3	S4T4	S4T5

Fig01. Expérience en blocs aléatoires complets

Conditions de l'expérience : Tous les blocs ont subi les mêmes conditions ; lumière, température, humidité, utilisation d'une eau minérale (Atlas) dans toute l'expérience, même quantité irriguée d'eau, engrais (la même dose de NPK au jour 1 pour la germination et la même dose d'engrais azoté après la germination pour le développement végétatif).

N°	Paramètre étudié	Unité	Code
1	Longueur de la racine	mm	LR
2	Longueur de tige	mm	LT
3	Surface foliaire	mm ²	SF
4	Poids frais partie aérienne	g	PFpa
5	Poids frais partie souterraine	g	PFps
6	Poids secs partie aérienne après 24h de séchage	g	PSpa24
7	Poids secs partie souterraine après 24h de séchage	g	PSps24
8	Poids secs partie aérienne après 48h de séchage	g	PSpa48
9	Poids secs partie souterraine après 48h de séchage	g	PSps48
10	Pourcentage de germination	%	PG
11	Indice de tolérance au sel	/	ITS
12	Chlorophylle a	μ g/ml	Chla
13	Chlorophylle b	μ g/ml	Chlb
14	Chlorophylle totale	μ g/ml	Chlt
15	Analyse de la proline	μ g/ml	/
16	Dosage de sucre totale	μ g/ml	/

Tableau01. Les différents paramètres morpho-physiologiques étudiés, leurs unités de mesure et leurs codifications

II.1.4. Préparation du substrat

Pour assurer un environnement de culture totalement stérile et homogène, et afin d'éviter toute interférence microbiologique ou chimique avec les traitements salins appliqués, la préparation du sable fin a été réalisée méticuleusement selon le protocole suivant: Tamisage mécanique : Le sable a d'abord été soumis à un tamisage à l'aide d'une tamiseuse électrique (appareil de tamisage) afin d'éliminer les débris grossiers et obtenir une texture fine, propre et régulière.

CHAPITRE II: Matériel et méthodes

Désinfection chimique et lavage : Afin de détruire les micro-organismes et éliminer les impuretés, le sable a été lavé soigneusement avec une solution d'eau additionnée d'hypochlorite de sodium (eau de Javel).

Rinçage à l'eau distillée : Pour éliminer toute trace résiduelle de chlore et de sels solubles qui pourraient fausser les concentrations de NaCl appliquées, le substrat a été rincé abondamment trois fois successives à l'eau distillée.

Séchage et Stérilisation : Le sable humide a ensuite été transféré dans des récipients adaptés, puis placé dans une étuve thermorégulée à une température de 65C° pendant une durée de 48 heures. Cette étape a permis d'assurer à la fois le séchage complet du substrat et sa stérilisation thermique finale avant le remplissage des pots (Ben naceur et al, 2001)(photo.2).



photo.2 : Étapes successives de la préparation du substrat de culture (sable fin) : tamisage mécanique, lavage, désinfection chimique à l'eau de Javel, rinçage à l'eau distillée et stérilisation thermique à l'étuve, 2026.

II.1.5. Préparation des semences

Afin de garantir la fiabilité des tests physiologiques ultérieurs, d'éliminer toute contamination fongique ou bactérienne superficielle, et de s'assurer de la qualité

CHAPITRE II: Matériel et méthodes

intrinsèque des semences de blé dur (Simeto R2) et d'orge (Raihane), le protocole suivant a été appliqué :

Sélection et Homogénéisation : Un tri manuel minutieux a été effectué pour sélectionner des graines saines, exemptes de tout dommage mécanique. Ces semences ont été calibrées par pesée afin de retenir les lots les plus homogènes en taille et en poids.

Immersion alcoolique : Les graines sélectionnées ont été trempées dans de l'éthanol à 70% pendant une minute.

Désinfection chimique : Elles ont ensuite été transférées dans une solution d'hypochlorite de sodium (NaOCl) diluée au tiers (1/3) pendant une durée de 20 minutes.

Rinçage : Pour éliminer toute trace résiduelle de chlore, les semences ont été rincées abondamment six fois successives à l'eau distillée stérile.

Séchage : Les graines ont été séchées délicatement sur du papier filtre stérile.

Test de viabilité pré-expérimental : Parallèlement, un lot échantillon de ces semences a été ensemencé dans un terreau (substrat organique) optimal. Ce test préliminaire a pour but de vérifier le pouvoir germinatif initial des graines et de confirmer l'absence de toute anomalie ou problème physiologique avant le lancement officiel de l'effet du stress salin (Ben naceur et al, 2001)(photo.3).



photo.3 : Différentes étapes de préparation des semences : tri manuel et calibrage par pesée, désinfection chimique sous contrôle chronométrique, séchage sur papier filtre stérile et test préliminaire du pouvoir germinatif sur terreau organique,2026.

II.1.6. Mise en place de l'expérience et dispositif expérimental

La mise en place de notre essai a été réalisée selon les étapes pratiques, quantitatives et organisationnelles suivantes :

Préparation et calibrage des unités culturales : Des pots en plastique ont été utilisés comme unités culturales. Ils hanno été préalablement perforés à leur base afin d'assurer un drainage optimal de l'eau d'irrigation excédentaire et de garantir une bonne aération du système racinaire. Chaque pot a été rempli avec une quantité rigoureusement pesée de 700 g de sable fin préparé (inerte et stérile).

Codification et distinction des cultures : Pour éviter toute erreur d'identification lors du suivi, un code couleur a été appliqué sur les pots :

L'encre noire pour le blé dur (*Triticum durum* var. Simeto R2).

L'encre bleue pour l'orge (*Hordeum vulgare* var. Raihane).

Dispositif expérimental (Composition): L'expérimentation a été conduite selon un dispositif en blocs complètement randomisés. Pour chaque culture, l'essai comprend quatre (04) niveaux de salinité (S1: 0 g/L, S2: 4 g/L, S3: 8 g/L et S4: 12 g/L) avec

CHAPITRE II: Matériel et méthodes

cinq (05) répétitions par traitement (T1, T2, T3, T4 et T5). Dans chaque pot, 05 graines homogènes ont été ensemencées directement dans le sable pour évaluer leur capacité germinative sous stress salin Pendant environ 45 jours.

Fertilisation et Irrigation:

L'eau d'irrigation minérale d'Atlas a été utilisée

au premier jour (Semis): L'irrigation initiale a été enrichie par un apport de 0,3 g/L de complexe NPK (15.15.15) pour stimuler le démarrage.

après la phase de germination (Développement végétatif): Un engrais azoté spécifique (NPK riche en azote) dosé à 0,3 g/L a été appliqué lors des arrosages pour soutenir la croissance des plantules.

logistique: Les pots ont été organisés et placés dans des cagettes plastiques afin de faciliter leur manipulation et leur transfert vers le site d'expérimentation(photo.4).



photo.4 : Opérations techniques de mise en place de l'essai : perforation des unités culturales, codification par encre sélective, et répartition homogène du substrat, 2026.

II.1.7. Localisation et conditions du site expérimental

L'étude a été menée au sein de l'Université Ziane Achour de Djelfa à travers deux sites distincts:

Site 1 Le Laboratoire (Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie): Dédié aux étapes préliminaires (tamisage, lavage et stérilisation du sable; désinfection des semences) ainsi qu'à l'ensemble des analyses biochimiques finales (dosages de la chlorophylle, de la proline et des sucres solubles) sous des conditions méthodologiques rigoureuses.

Site 2 La salle d'expérimentation: C'est le lieu où s'est déroulée la phase de culture et de suivi des plantules. Cette salle est dotée d'une grande fenêtre offrant un éclairage naturel.

Conditions environnementales: La température et la lumière n'ont pas été contrôlées artificiellement, fluctuant selon les conditions climatiques ambiantes.

Régulation hydrique : L'humidité du substrat a été gérée manuellement tous les deux jours par le pesage des pots et l'ajustement du volume d'eau (à l'aide d'une éprouvette graduée) pour maintenir une humidité constante 730g pour chaque boîte.

Remarque méthodologique (Limites de l'étude) :

Le non-contrôle absolu des paramètres thermiques et lumineux constitue une limite intrinsèque à cette étude, ces facteurs étant susceptibles d'influencer la croissance et d'induire une variabilité dans les résultats. Pour des perspectives futures, il est fortement recommandé de conduire ce type d'expérimentation dans une chambre de culture totalement contrôlée (photo.5).



photo.5 : Conditions environnementales et suivi de l'essai : agencement des cagettes face à l'éclairage naturel de la salle d'expérimentation, fiche technique de l'eau minérale utilisée, et contrôle de la régulation hydrique, 2026.

II.1.8. Observations en cours d'expérimentation

Rétention d'eau dans le substrat et réduction des volumes d'irrigation

Observation: Plus la concentration en NaCl augmente, plus le substrat conserve son humidité, ce qui entraîne une diminution notable de la quantité d'eau ajoutée lors des pesées.

Justification: Cela s'explique par deux phénomènes conjugués : d'une part, le potentiel osmotique élevé de la solution saline retient l'eau dans le sable (effet de succion osmotique). D'autre part, le stress salin induit une fermeture des stomates chez la plante et réduit sa surface foliaire, ce qui diminue drastiquement le taux de transpiration globale et maintient le substrat humide plus longtemps(Munns et Tester, 2008).

Réduction de la surface foliaire et coloration plus foncée

Observation: L'augmentation de la salinité provoque une réduction progressive de la surface foliaire, accompagnée d'une coloration verte plus foncée des feuilles.

Justification: La réduction de la surface foliaire est une stratégie adaptative d'évitement permettant à la plante de limiter les pertes d'eau par transpiration. Quant à la coloration verte plus foncée, elle est due à un effet de concentration : la croissance cellulaire étant ralentie par le stress, les chloroplastes et la chlorophylle se densifient dans un volume cellulaire plus restreint.

Altération de l'appareil racinaire (Longueur et épaisseur)

Observation: Avec l'élévation des niveaux de NaCl, la longueur des racines diminue, mais elles deviennent visiblement plus épaisses.

Justification: Le stress osmotique et la toxicité ionique (Na^+ et Cl^-) inhibent l'élongation cellulaire à l'apex racinaire, ce qui limite la croissance en longueur. En contrepartie, la plante réorganise ses tissus en augmentant le diamètre des vaisseaux corticaux (subérisation et augmentation de l'épaisseur) pour mieux stocker l'eau et bloquer ou compartimenter l'entrée des ions toxiques vers la partie aérienne. Apparition de jaunissement (Chlorose apicale)(Arsova et al,2020)

Observation: Un léger jaunissement apparaît à la pointe des feuilles supérieures, s'accroissant avec l'augmentation de la salinité.

Justification: Ce jaunissement est une chlorose typique, provoquée par l'accumulation sélective et toxique des ions Na^+ et Cl^- qui migrent via le flux transpiratoire jusqu'aux extrémités des feuilles âgées. Cette accumulation induit une dégradation prématurée des pigments chlorophylliens et un stress oxydatif localisé(James et al,2006).

Amélioration de la germination chez l'Orge (S2 et S3)

Observation: Chez l'orge (Raihan), la germination est nettement meilleure et stimulée aux niveaux S2 et S3, avant de marquer un fléchissement et une diminution au niveau de stress maximal S4.

Justification: Cela démontre la tolérance remarquable de l'orge (Raihan) face au stress salin modéré. À ces concentrations, l'orge réussit à maintenir son équilibre osmotique sans altération cellulaire majeure, ce qui stimule l'imbibition des graines. Ce n'est qu'au niveau S4 (12g/L) que le seuil de tolérance est dépassé, limitant l'activité enzymatique nécessaire à la germination.

CHAPITRE II: Matériel et méthodes

Réponse biphasique chez le Blé dur: Phénomène d'Hormesis (Hormèse)

Observation: Chez le blé dur (Simeto R2), le taux de germination atteint sa valeur maximale (pic) au niveau S2, suivi d'un effondrement brutal et d'une inhibition de la croissance dès les niveaux supérieurs.

Justification: Ce comportement cinétique décrit parfaitement le concept d'Hormèse (Hormesis). L'hormèse est une réponse adaptative biphasique caractérisée par une stimulation biologique induite par de faibles doses d'un agent stressant (ici le NaCl à S2). Face à cette faible dose, le blé dur active immédiatement son système d'alarme homéostatique (surproduction d'osmolytes protecteurs, stimulation enzymatique), ce qui booste temporairement la germination. Cependant, cette stratégie de défense s'effondre rapidement dès que la concentration augmente, car la toxicité ionique sévère prend le dessus (Erofeeva, 2021) (photo.6).

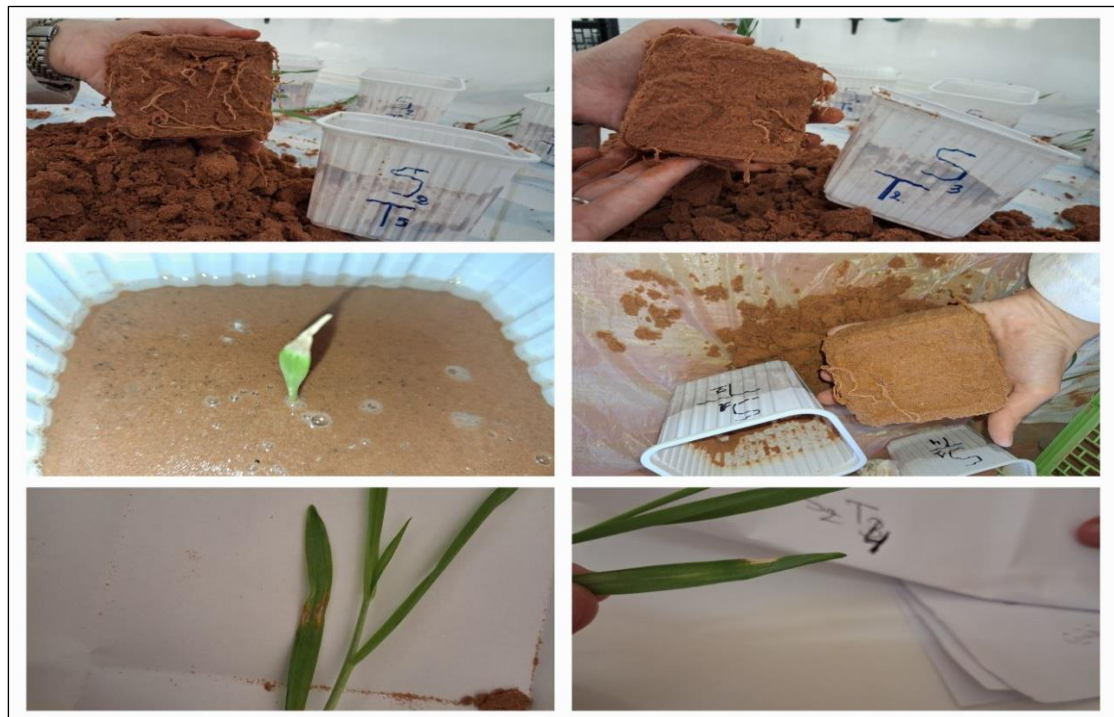


photo.6 : Modifications morpho-physiologiques et symptômes de toxicité induits par le NaCl, 2026.

II.1.9. Paramètres morphologiques et protocole de mesure

A la fin de la période d'expérimentation, les unités culturelles ont été transférées de la salle de culture vers le laboratoire afin de procéder aux prélèvements et aux mesures morphologiques selon le protocole suivant:

Extraction et nettoyage des plantules: Les plantules de chaque pot ont été délicatement extraites du substrat sableux. Le système racinaire a été soigneusement lavé à l'eau courante pour éliminer complètement les débris de sable et les impuretés, tout en veillant à préserver l'intégrité des racines.

Détermination du taux de germination: Le nombre exact de graines germées par pot a été rigoureusement dénombré et enregistré pour calculer la capacité germinative sous l'effet du stress salin.

II.1.9.1. Les paramètres morphologiques mesurés

Les mesures ont porté séparément sur la partie aérienne et la partie souterraine des plantules:

Les paramètres de longueur:

Longueur de la partie aérienne: Mesurée du collet jusqu'à l'extrémité de la feuille la plus longue à l'aide d'une vernier caliper graduée (mm).

Longueur de la partie souterraine: Mesurée du collet jusqu'à l'extrémité de la racine principale (mm).

Les paramètres pondéraux (Biomasse):

Matière Fraîche: Le poids frais de la partie aérienne et de la partie souterraine a été déterminé immédiatement après le lavage en utilisant une balance analytique de précision.

Matière Sèche: Pour l'obtention du poids sec, les échantillons (parties aériennes et souterraines séparées) ont été placés dans une étuve thermorégulée fixée à 85°C.

Contrôle de la dessiccation : Les pesées de la matière sèche aérienne et souterraine ont été effectuées après 24 heures puis après 48 heures. Cette double pesée successive a été rigoureusement appliquée afin de s'assurer de la stabilisation totale du poids et

de l'obtention d'une matière sèche parfaitement nette et anhydre(Munns et al, 2010)(photo.7)



photo.7 : Étapes de prélèvement, de mesure morphométrique et de séchage des plantules à l'étuve, 2026.

II.1.10. Dosages des paramètres biochimiques

II.1.10.1. Extraction et Dosage de la Chlorophylle (a, b et totale)

Cette étape permet de mesurer la dégradation ou le maintien des pigments photosynthétiques sous l'effet de la contrainte saline, en utilisant l'éthanol comme solvant d'extraction.

a. Extraction des pigments par l'Éthanol

Procédure: Peser précisément 100mg de matière fraîche (MF) de la feuille. Broyer finement l'échantillon dans un mortier en présence de 10mL d'éthanol à 80% afin de solubiliser complètement les pigments chlorophylliens.

Centrifugation: Centrifuger le broyat à 4000min pendant 10minutes afin de culotter les débris cellulaires et de récupérer le surnageant limpide de couleur verte.

CHAPITRE II: Matériel et méthodes

b. Lecture au Spectrophotomètre

Procédure: Transférer le surnageant dans des cuves spectroscopiques. Effectuer la lecture de la densité optique (DO) à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible (en utilisant l'éthanol 80% comme tube blanc de référence) aux longueurs d'onde spécifiques suivantes(photo.8):

665nm: Absorbance maximale de la Chlorophylle a.

649nm: Absorbance maximale de la Chlorophylle b.

c. Quantification (Formules de Wintermans et de Mets, 1965)

Les concentrations en pigments (exprimées en mg/g de matière fraîche (MF))

Unité de mesure standard : microgrammes par gramme de matière fraîche ($\mu\text{g/g}$ de MF).

équations adaptées à l'éthanol :

$$\cdot \text{Chl a} = (13.70 \text{ DO } 665) - (5.76 \text{ DO } 649)$$

$$\cdot \text{Chl b} = (25.80 \text{ DO } 649) - (7.60 \text{ DO } 665)$$

$$\cdot \text{Chl Totale} = \text{Chl a} + \text{Chl b}$$

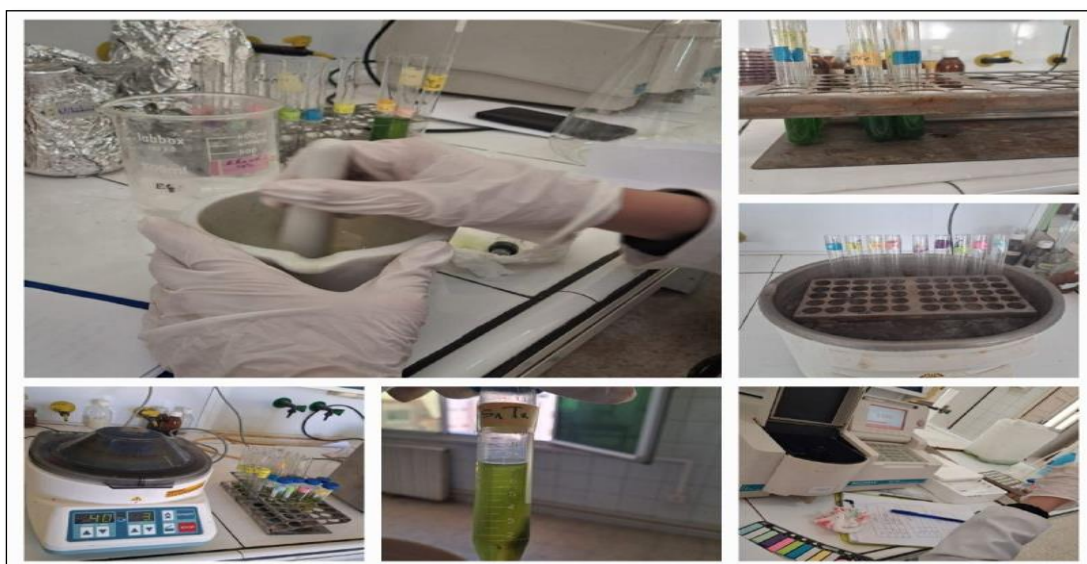


photo.8 : Protocole expérimental d'extraction et de quantification des pigments chlorophylliens, 2026.

II.1.10.2. Extraction et Dosage de la Proline

La teneur en proline a été déterminée selon la méthode décrite par Troll et Lindsley (1955), reprise et simplifiée par Dreier et Göring (1974).

a. Extraction et Réaction colorée

Procédure: Peser précisément 100mg de matière fraîche (MF) de la feuille. Ajouter 4mL de méthanol à 40%, puis chauffer l'ensemble au bain-marie à 85C° pendant une heure.

Réaction: Après refroidissement à température ambiante, prélever 1mL de l'extrait obtenu et y additionner successivement dans un tube à essai :

1mL d'acide acétique glacial (CH_3COOH '99-100%).

2mL de Ninhydrine à 3%.

1mL d'un mélange réactif contenant (120mL d'eau distillée 300mL d'acide acétique 80mL d'acide orthophosphorique à 85% H_3PO_4).

Développement de la couleur : Porter le mélange à ébullition au bain-marie à 100C° durant 30minutes jusqu'à l'apparition d'une coloration rouge.

b. Séparation des phases et lecture

Procédure: Après refroidissement, ajouter 5mL de toluène pour permettre la séparation des phases. Agiter vigoureusement au vortex pendant 30 secondes.

Résultat: Apparition de deux phases distinctes : la phase supérieure (Rouge) contenant la proline solubilisée dans le toluène est récupérée délicatement

Lecture : Mesurer la densité optique ($\{DO\}$) à l'aide du spectrophotomètre UV-Visible de type « BECKMAN DU 520 » à la longueur d'onde de 528nm(Le toluène pur est utilisé comme tube blanc).

c. Quantification et Formule de calcul

La concentration de la proline est extrapolée à partir d'une courbe d'étalonnage réalisée en parallèle avec de la proline pure (g/mL). La formule mathématique finale est(photo.9):

CHAPITRE II: Matériel et méthodes

Teneur en Proline ($\mu\text{g/g}$ de MF) = $C * V_{\text{extrait}} * D / \text{méch}$

C: Concentration de la proline lue sur la gamme étalon ($\mu\text{g/mL}$).

V_{extrait} : Volume total de l'extrait initial (4mL).

D: Facteur de dilution éventuel.

méch: Masse de l'échantillon végétal frais utilisé (0.1 g).

Unité de mesure standard : microgrammes par gramme de matière fraîche ($\mu\text{g/g}$).

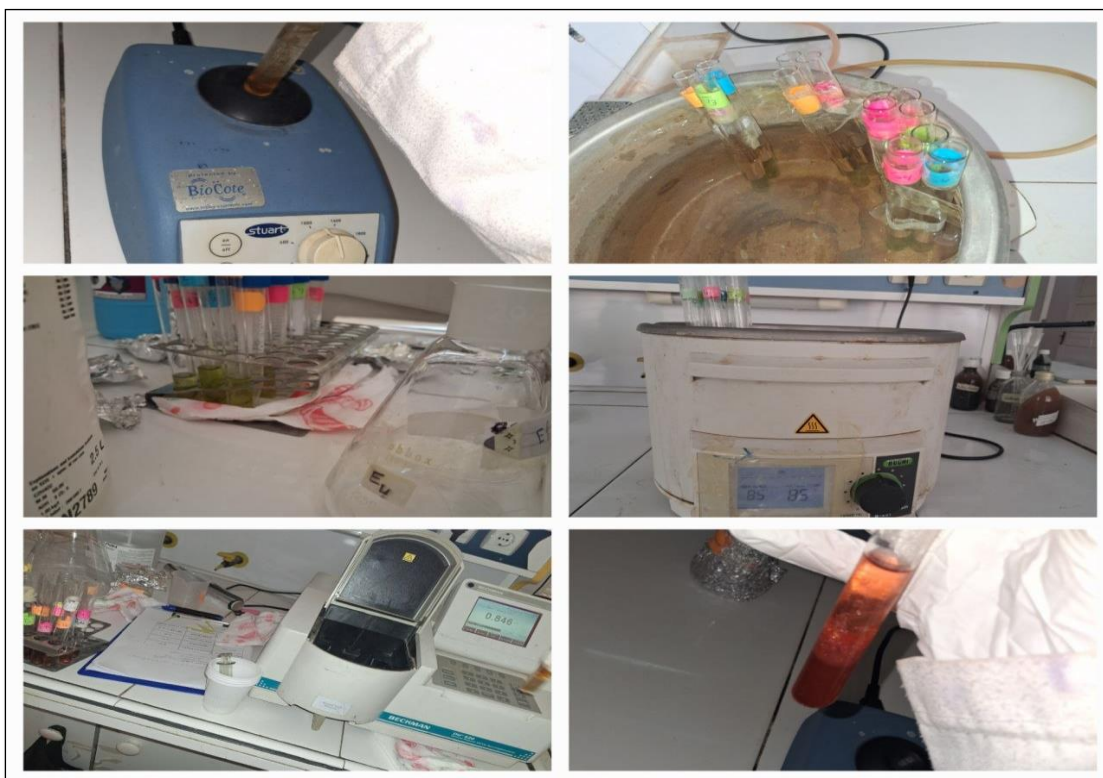


photo.9 : Différentes étapes du dosage colorimétrique de la proline au laboratoire, 2026.

II.1.10.3. Extraction et Dosage des Sucres Totaux Solubles

La teneur en sucres totaux solubles a été déterminée selon la méthode colorimétrique au phénol-acide sulfurique décrite par Dubois et al. (1956).

CHAPITRE II: Matériel et méthodes

a. Extraction et Réaction colorée

Procédure: Peser précisément 100mg de matière fraîche (MF) de la partie aérienne. Macérer l'échantillon dans 4mL de méthanol à 40% pendant 1heure dans un bain-marie réglé à 85C°.

Réaction: Prélever 1mL de l'extrait méthylque, l'introduire dans un tube et y ajouter 1mL de phénol à 5%. Agiter brièvement au vortex, puis additionner énergiquement et rapidement 5mL d'acide sulfurique (H₂SO₄) concentré (l'adjonction rapide d'acide permet de créer un choc thermique nécessaire à la réaction).

Développement de la couleur : Après une deuxième agitation au vortex, placer les tubes dans un bain-marie à température ambiante pendant 15minutes pour stabiliser le développement de la couleur orange-jaâtre.

b. Lecture au Spectrophotomètre

Procédure: Transférer le mélange. Mesurer la densité optique (DO) à la longueur d'onde de 487nm à l'aide du spectrophotomètre UV-Visible de type « BECKMAN DU 520 » (Le tube blanc est composé de 1mL d'eau distillée, phénol et H₂SO₄).

c. Quantification et Formule de calcul

Les valeurs d'absorbance obtenues sont projetées(μg/mL)(photo.10):

Teneur en Sucres Solubles (mg/g de MF) = $C * V_{\text{extrait}} * D / m_{\text{éch}} * 1000$

C: Concentration en équivalent Glucose lue sur la courbe d'étalonnage (μg/mL).

V_{extrait}: Volume total de l'extrait initial (4mL).

D: Facteur de dilution.

m_{éch}: Masse de l'échantillon végétal frais utilisé (0.1g).

Unité de mesure standard : microgrammes par gramme de matière fraîche (μg/g).

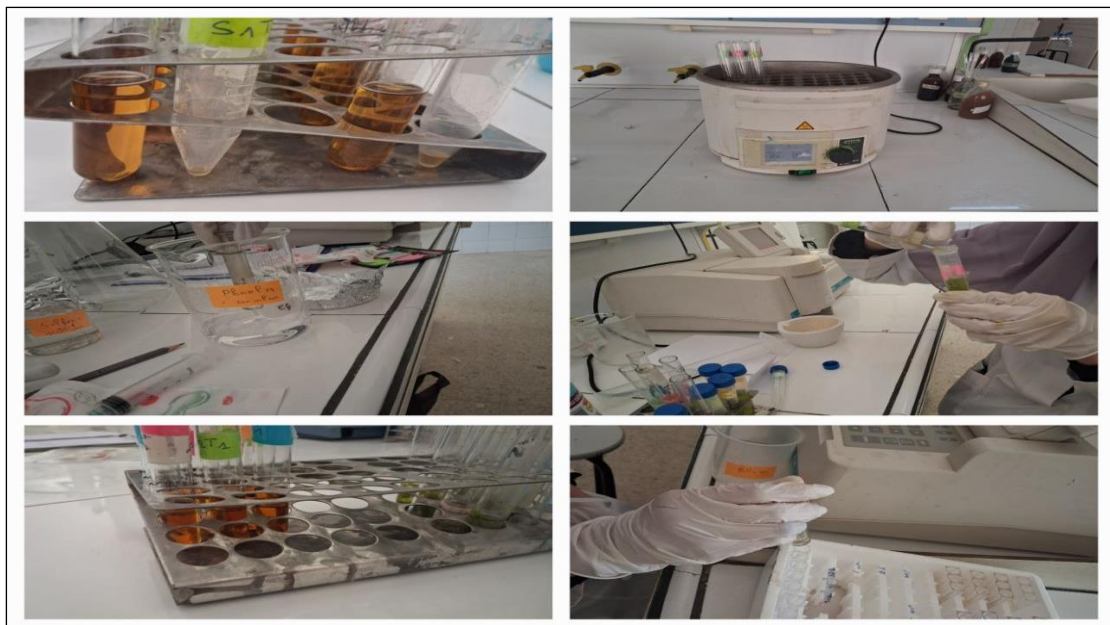


photo.10 : Différentes étapes du dosage colorimétrique des sucres totaux solubles au laboratoire, 2026.

II.1.11. Analyses statistiques des données

Pour l'exploitation et l'interprétation des résultats expérimentaux, les données brutes ont été soumises à deux approches statistiques complémentaires :

Analyse de la Variance (ANOVA) : Une analyse de la variance à un ou plusieurs facteurs a été réalisée afin d'évaluer l'effet significatif du stress salin (NaCl) sur les différents paramètres morphologiques, pondéraux et biochimiques mesurés chez le blé dur (*Triticum durum* var. Simeto R2) et l'orge (*Hordeum vulgare* var. Raihane). Les comparaisons des moyennes ont été effectuées par le test de Tukey (ou Duncan) au seuil de significativité $\alpha = 0.05$ (5%).

Analyse en Composantes Principales (ACP) : Une analyse multivariée par ACP a été implémentée afin d'obtenir une vision globale des corrélations entre les variables mesurées (morphologiques et biochimiques) et d'identifier graphiquement les stratégies de tolérance différentielles développées par les deux espèces céréalières face aux quatre niveaux de salinité.

Les analyses graphiques et statistiques ont été exécutées à l'aide des logiciels (XLSTAT. Version2014) et Microsoft Excel.

CHAPITRE III:

Résultats

et Discussion

III.1.Évaluation du comportement de l'orge (*Hordeumvulgare* L.Var. Raihane)

III.1.1.Valeurs moyennes des paramètres morphologiquesde l'orge Var. Raihanesous différentes concentrations de NaCl (0, 4, 8 et 12 g/L)

	LR (mm)	LT (mm)	SF (mm)	PF pa (g)	PF ps (g)	PS pa24 (g)	PS ps24 (g)	PS pa48 (g)	PS ps48 (g)
S1	240.225	318.346	152.708	0.503	0.166	0.830	0.107	0.087	0.054
S2	135.955	179.346	91.170	0.582	0.294	0.220	0.203	0.200	0.018
S3	87.668	110.632	70.178	0.397	0.397	0.051	0.103	0.194	0.020
S4	43.814	43.815	28.356	0.081	0.081	0.061	0.050	0.027	0.015

Tableaux02. Valeurs moyennes des paramètres morphologiques de l'orge Var. Raihane sous différentes concentrations de NaCl (0, 4, 8 et 12 g/L)

L'analyse des résultats obtenus montre que l'augmentation de la concentration en NaCl a provoqué une diminution progressive des paramètres de croissance de l'orge. Sous le traitement témoin (S1 = 0 g/L), les plantules ont présenté les meilleures performances avec une longueur moyenne de racine d'environ 240 mm, une longueur moyenne de tige de 318 mm et une surface foliaire moyenne de 153 mm². Ces valeurs traduisent des conditions optimales de germination et de développement végétatif .L'application d'une concentration de 4 g/L de NaCl (S2) a entraîné une réduction notable de la croissance. La longueur moyenne des racines est passée à environ 136 mm, tandis que la longueur moyenne des tiges a diminué à 179 mm. La surface foliaire a également régressé pour atteindre environ 91 mm². Cette diminution peut être attribuée à l'apparition d'un stress osmotique limitant l'absorption de l'eau par les racines.

Sous le traitement 8 g/L (S3), la réduction est devenue plus marquée. Les longueurs moyennes des racines et des tiges ont atteint respectivement 88 mm et 111 mm, tandis que la surface foliaire moyenne n'était plus que de 70 mm². Ces résultats indiquent que l'accumulation des ions sodium et chlorure commence à affecter sérieusement les processus physiologiques responsables de la croissance.Le traitement le plus salin, 12 g/L (S4), a provoqué une forte inhibition du développement. Les longueurs moyennes des racines et des tiges ont chuté à environ 44 mm, soit une réduction de plus de 80 % par rapport au témoin. La surface foliaire moyenne est tombée à 28 mm². Malgré cette diminution importante, les plantules d'orge ont

continué à survivre et à produire une biomasse minimale, ce qui témoigne d'une certaine capacité de tolérance à la salinité .

Les mesures des poids frais et des poids secs confirment cette tendance générale. Les biomasses aérienne et racinaire diminuent progressivement lorsque la concentration saline augmente. Cette réduction résulte probablement de la limitation de l'absorption hydrique, de la perturbation du métabolisme cellulaire et de la diminution de la photosynthèse sous stress salin.

III.1.2. Paramètres physiologiques de l'orge Var. Raihane

a. Pourcentage de germination (PG)

Formule de calcul : $(PG) = Ng/Nt * 100 = 2/5 * 100 = 40 \%$

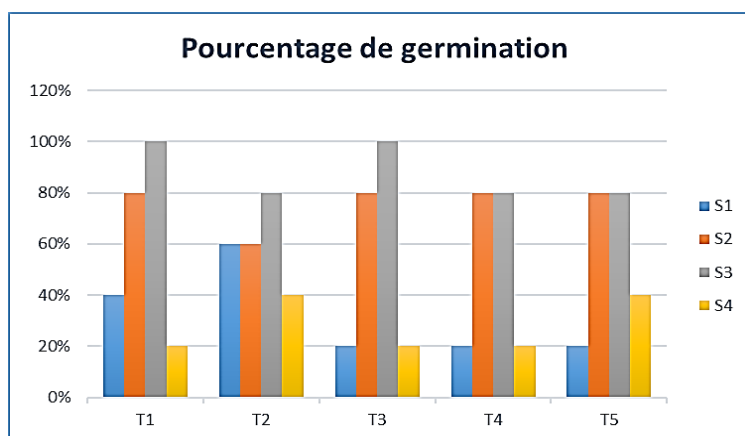


Fig02. Effet du stress salin sur la germination chez l'orge Var. Raihane

b. Indice de tolérance au sel (ITS)

$ITS = (Valeur \text{ sous stress } / Valeur \text{ témoin}) * 100$

$IT(S2) = (125.88/191.89) * 100 = 65.6\%$

$IT(S3) = (87.72/191.89) * 100 = 45,7\%$

$IT(S4) = (43,81/191.89) * 100 = 22.8\%$

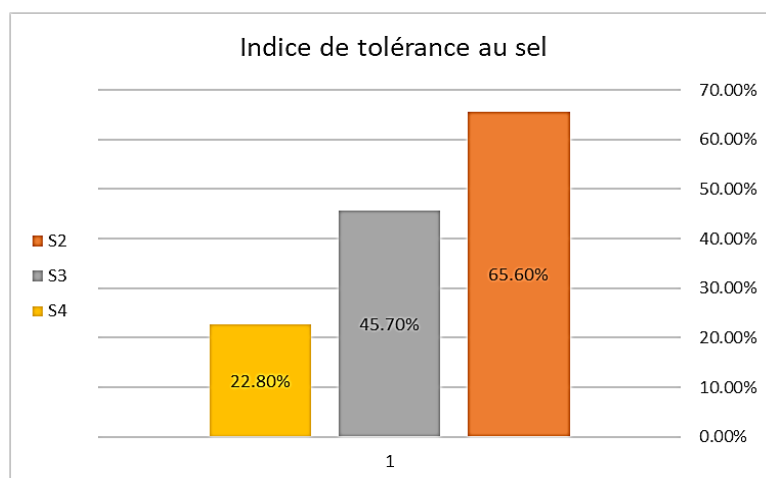


Fig03. Indice de tolérance chez l'orge Var. Raihane

c. Analyse de la chlorophylle (a, b et totale), de la proline et des sucres totaux

	chla	chlb	chl
S1	7.552	2.387	108.795
S2	7.117	4.198	141.883
S3	7.243	4.298	144.906
S4	0.998	9.747	204.888

Tableau03. Analyse de la chlorophylle a, b et totale de l'orge en nm ($\lambda=645$ nm)

Traitement	S1	S2	S3	S4
Valeur de la proline (nm)	0.076	0.674	0.821	0.692

Tableau04. Résultats de l'analyse de la proline ($\lambda=528$ nm)

Traitement	S1	S2	S3	S4
Valeur de dosage de sucre (nm)	0.845	0.901	0.921	0.712

Tableau05. Résultats de l'analyse des sucres totaux($\lambda=487$ nm)

Une salinité élevée entraîne une inhibition progressive de la croissance de l'orge de la variété « Raihane », proportionnelle à la dose, ce qui se traduit par une baisse de l'indice de tolérance des racines de 65,6 % à 22,8 % et de l'indice de tolérance des tiges de 55,7 % à 13,6 % entre les stades S2 et S4. Ce changement morphologique s'accompagne de perturbations biochimiques notables : alors que la teneur totale en chlorophylle semble augmenter avec la salinité.

On suppose en raison d'un effet de concentration lié à la diminution de la surface foliaire, le rapport chlorophylle a/b diminue fortement au stade S4, reflétant une dégradation préférentielle de la chlorophylle a, plus sensible au stress oxydatif, par opposition à une relative stabilité de la chlorophylle b. Simultanément à ces constatations, les mécanismes de défense osmotique s'activent considérablement : la proline et les sucres solubles s'accumulent de plus en plus par rapport à l'échantillon témoin jusqu'à la phase S3, pour atteindre leurs niveaux maximaux à ce stade de salinité moyenne à élever, avant de connaître une légère baisse à la phase S4. Cette dynamique commune aux deux solutés compatibles reflète une mobilisation active de l'adaptation face aux nouvelles conditions.

En résumé, On peut dire que l'orge Var. Raihane utilise une stratégie de tolérance combinant une réorganisation sélective du système photosynthétique et une régulation osmotique active par accumulation de solutés compatibles, ce qui permet de retarder les effets néfastes de la salinité et développe une capacité de tolérance particulière.

III.1.3. Etude statistique Orge Var. Raihane

III.1.3.1. Analyse en Composantes Principales (ACP) des Paramètres Morphologiques sous Stress Salin de l'orge *Hordeum vulgare* L., Var. Raihane.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée sur les variables morphologiques de l'orge soumise à différentes concentrations de NaCl met clairement en évidence que le stress salin constitue la principale source de variation entre les traitements. Les neuf variables étudiées (longueur racinaire, longueur de tige, surface foliaire, poids frais et poids secs des parties aériennes et souterraines) présentent une forte structure de corrélation, ce qui traduit une réponse physiologique coordonnée de la plante face à l'augmentation de la salinité. Les résultats de l'ACP montrent que la majorité de la variance totale est expliquée par les deux premiers axes factoriels,

indiquant que ceux-ci résument efficacement l'information contenue dans l'ensemble des variables étudiées.

L'axe F1 représente essentiellement un gradient de croissance végétative opposant les plantes témoins (S1) aux traitements soumis aux concentrations les plus élevées en NaCl (S3 et S4). Les variables relatives au développement végétatif, notamment la longueur de la racine (LR), la longueur de la tige (LT), la surface foliaire (SF), les poids frais (PFpa et PFps) ainsi que les poids secs mesurés après 24 et 48 heures de séchage (PSpa24, PSps24, PSpa48 et PSps48), sont fortement corrélées positivement entre elles. Cette proximité sur le cercle des corrélations traduit une dépendance fonctionnelle importante entre ces caractères morphologiques. En effet, une plante développant un système racinaire performant présente généralement une meilleure capacité d'absorption hydrique et minérale, favorisant ainsi le développement aérien et l'accumulation de biomasse.

	LR	LT				PS pa24	PS ps24	PS pa48	PS ps48
Variables	(mm)	(mm)	SF (mm)	PF pa (g)	PF ps (g)	(g)	(g)	(g)	(g)
LR (mm)	1	0.9995	0.9925	0.7166	-0.0241	0.9552	0.3591	0.0847	0.9221
LT (mm)	0.9995	1	0.9947	0.7372	0.0023	0.9459	0.3838	0.1141	0.9120
SF (mm)	0.9925	0.9947	1	0.7670	0.0930	0.9209	0.3913	0.1837	0.9060
PF pa (g)	0.7166	0.7372	0.7670	1	0.5694	0.4799	0.8560	0.7345	0.4263
PF ps (g)	-0.0241	0.0023	0.0930	0.5694	1	-0.2915	0.5151	0.9423	-0.2015
PS pa24 (g)	0.9552	0.9459	0.9209	0.4799	-0.2915	1	0.1061	-0.2123	0.9716
PS ps24 (g)	0.3591	0.3838	0.3913	0.8560	0.5151	0.1061	1	0.7701	-0.0277
PS pa48 (g)	0.0847	0.1141	0.1837	0.7345	0.9423	-0.2123	0.7701	1	-0.2000
PS ps48 (g)	0.9221	0.9120	0.9060	0.4263	-0.2015	0.9716	-0.0277	-0.2000	1

Tableau06 .Matrice de corrélation (Pearson (n))

	F1	F2	F3
Valeur propre	5.4655	3.0447	0.4898
Variabilité (%)	60.7277	33.8304	5.4419
% cumuli	60.7277	94.5581	100.0000

Tableau07. Valeurs propres

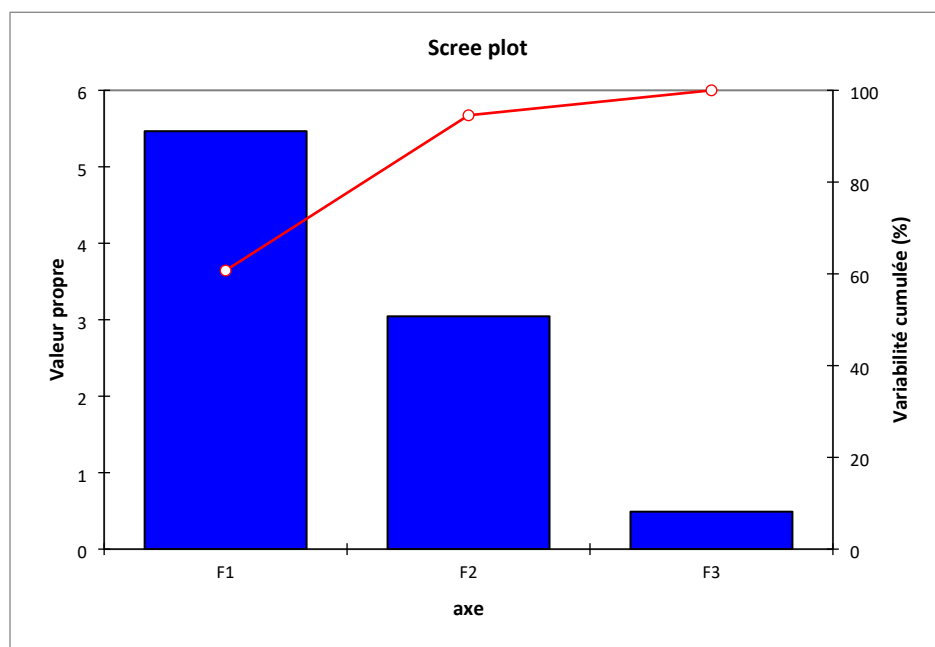


Fig04 .Valeurs propres

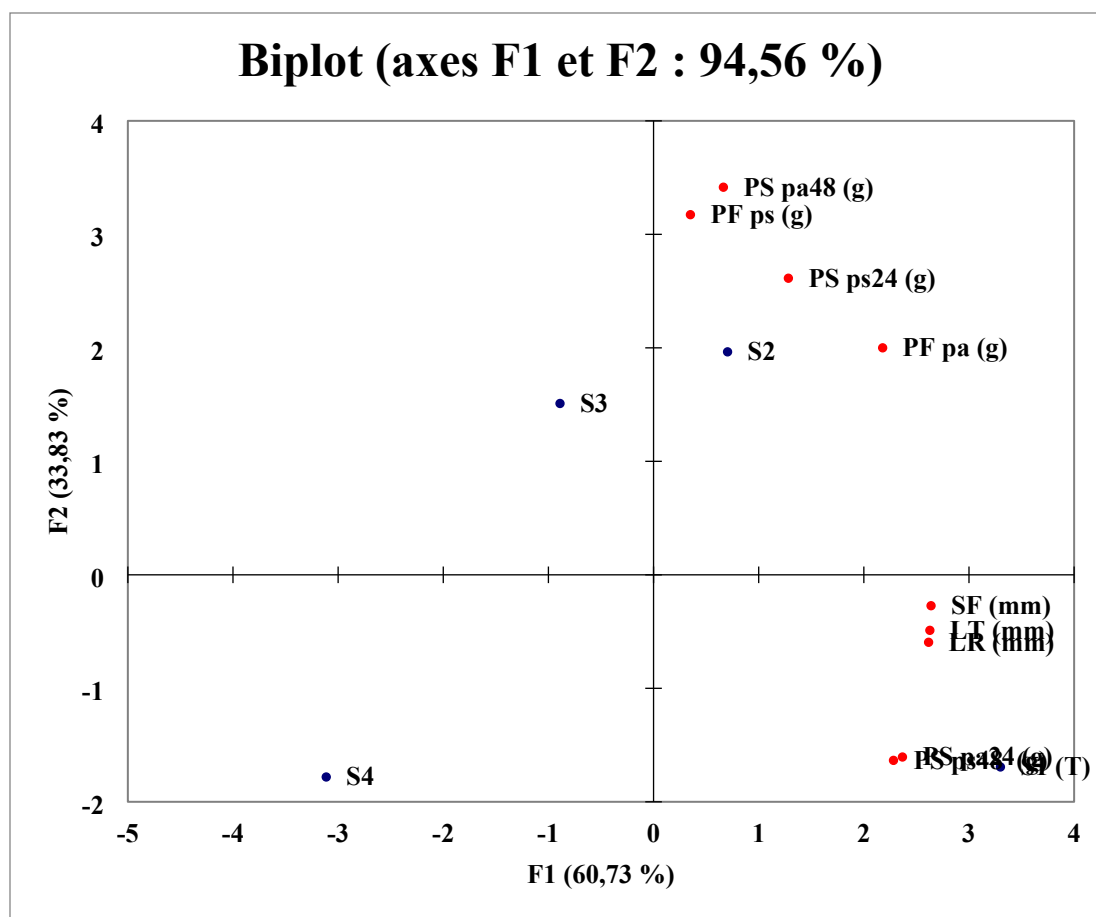


Fig05. Analyse en Composantes Principales (ACP) des Paramètres Morphologiques sous Stress Salin de l'orge

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée sur les variables morphologiques de l'orge soumise à différentes concentrations de NaCl met clairement en évidence que le stress salin constitue la principale source de variation entre les traitements. Les neuf variables étudiées (longueur racinaire, longueur de tige, surface foliaire, poids frais et poids secs des parties aériennes et souterraines) présentent une forte structure de corrélation, ce qui traduit une réponse physiologique coordonnée de la plante face à l'augmentation de la salinité. Les résultats de l'ACP montrent que la majorité de la variance totale est expliquée par les deux premiers axes factoriels, indiquant que ceux-ci résument efficacement l'information contenue dans l'ensemble des variables étudiées.

L'axe F1 représente essentiellement un gradient de croissance végétative opposant les plantes témoins (S1) aux traitements soumis aux concentrations les plus élevées en NaCl (S3 et

S4). Les variables relatives au développement végétatif, notamment la longueur de la racine (LR), la longueur de la tige (LT), la surface foliaire (SF), les poids frais (PFpa et PFps) ainsi que les poids secs mesurés après 24 et 48 heures de séchage (PSpa24, PSps24, PSpa48 et PSps48), sont fortement corrélées positivement entre elles. Cette proximité sur le cercle des corrélations traduit une dépendance fonctionnelle importante entre ces caractères morphologiques. En effet, une plante développant un système racinaire performant présente généralement une meilleure capacité d'absorption hydrique et minérale, favorisant ainsi le développement aérien et l'accumulation de biomasse.

Le cercle des corrélations révèle également que plusieurs variables présentent des coefficients de corrélation supérieurs à 0,90, notamment entre la longueur de la tige et les poids secs, ainsi qu'entre les poids frais et les poids secs des organes végétatifs. Cette organisation indique que la diminution de l'une de ces variables sous l'effet du stress salin entraîne simultanément une réduction des autres paramètres. La croissance de l'orge apparaît donc comme un phénomène fortement intégré, où les différentes composantes morphologiques répondent de manière synchronisée aux contraintes environnementales.

L'interprétation biologique de cette organisation statistique peut être expliquée par les deux phases classiques du stress salin décrites par Munns et Tester (2008). Dans une première phase, l'augmentation de la pression osmotique du milieu réduit rapidement l'absorption d'eau, limitant l'expansion cellulaire et ralentissant l'élongation des racines et des tiges. Dans une seconde phase, l'accumulation progressive des ions Na^+ et Cl^- dans les tissus végétaux provoque une toxicité ionique responsable d'une diminution de la photosynthèse, d'une dégradation des membranes cellulaires et d'une réduction de la synthèse de matière sèche.

La projection des observations sur le plan factoriel montre une nette séparation entre le traitement témoin et les traitements soumis aux concentrations les plus élevées. Les traitements S3 et S4 sont localisés dans la direction opposée aux variables de croissance, traduisant une réduction importante de tous les paramètres morphologiques. À l'inverse, le traitement S2 demeure relativement proche du témoin, suggérant que la variété Raihane conserve une capacité d'adaptation satisfaisante aux concentrations modérées de NaCl.

Cette meilleure stabilité peut être attribuée aux mécanismes physiologiques reconnus chez l'orge. Cette espèce possède une forte capacité d'exclusion du sodium au niveau racinaire, une meilleure sélectivité pour le potassium, une compartimentation vacuolaire plus efficace des ions toxiques ainsi qu'une accumulation importante d'osmolytes compatibles tels que la proline et les sucres solubles. Ces mécanismes contribuent au maintien de la turgescence cellulaire et limitent les effets négatifs du stress osmotique. Les résultats obtenus corroborent ainsi les observations rapportées par Negrão et al. (2017), Deinlein et al. (2014) et Hasanuzzaman et al. (2018), qui considèrent l'orge comme l'une des céréales les plus tolérantes au stress salin.

III.2. Évaluation du comportement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) Var. *Simeto*

III.2.1. Valeurs moyennes des paramètres morphologiques du blé dur Var. *Simeto* R2 sous différentes concentrations de NaCl (0, 4, 8 et 12 g/L)

	LR (mm)	LT (mm)	SF (mm)	PF pa (g)	PF ps (g)	PS pa24 (g)	PS ps24 (g)	PS pa48 (g)	PS ps48 (g)
S1	95.174	103.584	56.627	0.070	0.112	0.050	0.045	0.017	0.013
S2	163.304	218.033	55.749	0.708	0.707	0.175	0.189	0.139	0.153
S3	68.681	58.804	36.494	0.056	0.042	0.068	0.032	0.017	0.005
S4	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau08. Valeurs moyennes des paramètres morphologiques du blé dur Var. *Simeto* R2 sous différentes concentrations de NaCl (0, 4, 8 et 12 g/L)

Les résultats obtenus sur le blé montrent également un effet négatif de la salinité, mais avec une sensibilité plus importante que celle observée chez l'orge. Sous le traitement témoin (S1), les plantules présentent une longueur moyenne de racine de 95 mm, une longueur moyenne de tige de 104 mm et une surface foliaire moyenne de 57 mm². Sous la concentration de 4 g/L (S2), les résultats montrent une certaine variabilité entre les répétitions. Certaines plantules ont conservé une croissance relativement élevée, ce qui explique les moyennes supérieures observées pour la longueur racinaire (163 mm) et la longueur des tiges (218 mm). Cependant, cette réponse ne traduit pas nécessairement une amélioration de la croissance, mais plutôt une hétérogénéité des individus face au stress salin. La surface foliaire reste globalement comparable à celle du témoin.

Lorsque la concentration atteint 8 g/L (S3), une diminution importante de tous les paramètres apparaît. La longueur moyenne des racines chute à environ 69 mm, la longueur des tiges à 59 mm et la surface foliaire à 36 mm². Les poids frais et secs montrent également une forte réduction, indiquant une limitation sévère de l'accumulation de biomasse. Le traitement 12 g/L (S4) a eu un effet particulièrement marqué sur le blé. Toutes les valeurs mesurées deviennent nulles, traduisant une absence totale de germination ou un arrêt complet du développement des plantules. Aucun poids frais ni poids sec n'a été enregistré dans les cinq répétitions.

III.2.2. Paramètres physiologiques du blé Var. Simeto

a. Pourcentage de germination(PG)

Formule : $\text{Ng/Nt} \times 100 = 1/5 \times 100 = 20\%$

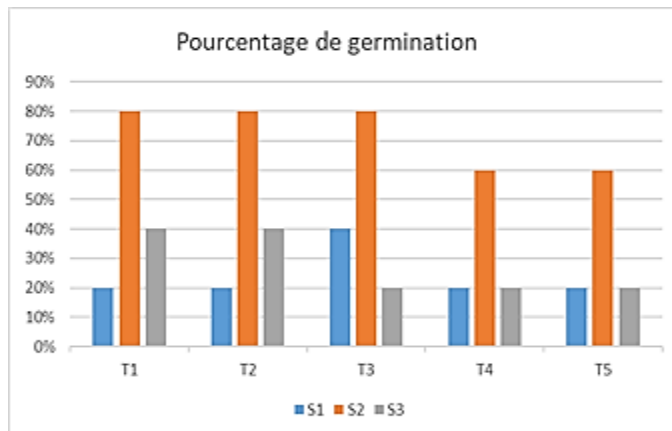


Fig06. Effet du stress salin sur la germination du blé Var. Simeto

b. Indice de tolérance au sel (ITS)

$$\text{ITS} = (\text{Valeur sous stress} / \text{Valeur témoin}) \times 100$$

$$\text{IT(S2)} = (31.43/163.30) \times 100 = 19.25\%$$

$$\text{IT(S3)} = (68.68/163.30) \times 100 = 42.06\%$$

$$\text{IT(S4)} = (0.00/163.30) \times 100 = 0\%$$

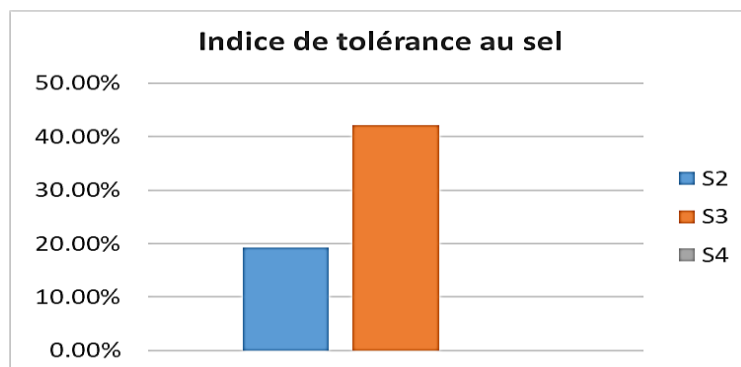


Fig07. Indice de tolérance blé dur Var.Simeto

c. Analyse de la chlorophylle (a, b et totale), de la proline et des sucres totaux

S1	chl a	chl b	chl t
S1	4.519	3.352	103.949
S2	5.271	4.711	137.427
S3	6.135	2.523	100.160

Tableau09. Analyse de la chlorophylle a, b et totale du blé en nm ($\lambda=645$ nm)

Traitement	S1	S2	S3
Valeur de la proline (nm)	-0.043	0.204	0.215

Tableau10. Résultats de l'analyse de la proline ($\lambda=528$ nm)

Traitement	S1	S2	S3
Valeur de dosage de sucre (nm)	0.791	0.759	0.760

Tableau11. Résultats de l'analyse des sucres totaux ($\lambda=487$ nm)

Constat : Les résultats de l'effet du stress salin sur le blé dur (*Triticum durum* Desf., Var. Simeto) révèlent la dépendance à la concentration du sel. L'augmentation de la salinité provoque une altération sévère de la croissance, traduite par la chute drastique de l'indice de tolérance au sel (ITS) qui passe de 19.25% à la dose 4 g/L (S2) pour atteindre 0% sous la concentration maximale de 12 g/L (S4). Cette inhibition morphologique majeure s'accompagne d'une baisse des taux de chlorophylles (a et b), contrastée par une accumulation progressive et adaptative des osmorégulateurs (proline et sucres solubles).

Explication : La régression morphologique (ITS = 0% à S4) s'explique par la sensibilité marquée due à la composante osmotique du stress salin qui réduit drastiquement le potentiel hydrique du substrat, limitant l'absorption d'eau par les racines (sécheresse physiologique). De plus, l'accumulation toxique des ions Na^+ et Cl^- perturbe la nutrition minérale et induit un stress oxydatif sévère, ce qui altère l'intégrité des membranes chloroplastiques et justifie la dégradation des pigments photosynthétiques.

L'ajustement osmotique par Proline et Sucres: Malgré l'arrêt de la croissance à S4, l'élévation des teneurs en proline et en sucres solubles démontre la mobilisation active des mécanismes de défense chez la variété Simeto R2. Ces solutés compatibles agissent comme des osmorégulateurs essentiels pour maintenir une hydratation cellulaire minimale et protéger les macromolécules contre la toxicité ionique, bien que le seuil de tolérance global soit dépassé à la dose limite 12g/L.

III.2.3. Etude statistiques du Blé dur Var. Simeto

III.2.3.1. Analyse en Composantes Principales (ACP) des Paramètres Morphologiques sous Stress Salin du blé dur *Triticum durum* Desf., Var. Simeto

L'Analyse en Composantes Principales réalisée chez le blé dur met également en évidence une forte structuration des variables morphologiques sous l'effet de la salinité. Toutefois, contrairement à l'orge, les corrélations observées entre les différentes variables sont encore plus élevées, plusieurs coefficients dépassant 0,99. Cette homogénéité indique que l'ensemble des caractères morphologiques évolue presque simultanément lorsque la concentration saline augmente.

Chapitre III : Résultats et Discussion

Le premier axe factoriel représente principalement un gradient d'inhibition de la croissance. Toutes les variables de développement présentent des charges positives importantes sur cet axe, traduisant une réponse globale du métabolisme végétatif au stress salin. Les longueurs racinaires, les longueurs des tiges, les surfaces foliaires ainsi que les biomasses fraîches et sèches diminuent simultanément avec l'augmentation de la concentration en NaCl.

Variables	LR (mm)	LT (mm)	SF (mm)	PF pa (g)	PF ps (g)	PS pa24 (g)	PS ps24 (g)	PS pa48 (g)	PS ps48 (g)
LR (mm)	1	0.9835	0.8986	0.8549	0.8733	0.9396	0.9186	0.8700	0.8423
LT (mm)	0.9835	1	0.8192	0.9247	0.9420	0.9531	0.9682	0.9329	0.9181
SF (mm)	0.8986	0.8192	1	0.5433	0.5794	0.7096	0.6549	0.5664	0.5260
PF pa (g)	0.8549	0.9247	0.5433	1	0.9974	0.9480	0.9903	0.9991	0.9992
PF ps (g)	0.8733	0.9420	0.5794	0.9974	1	0.9434	0.9938	0.9959	0.9976
PS pa24 (g)	0.9396	0.9531	0.7096	0.9480	0.9434	1	0.9714	0.9606	0.9350
PS ps24 (g)	0.9186	0.9682	0.6549	0.9903	0.9938	0.9714	1	0.9933	0.9866
PS pa48 (g)	0.8700	0.9329	0.5664	0.9991	0.9959	0.9606	0.9933	1	0.9966
PS ps48 (g)	0.8423	0.9181	0.5260	0.9992	0.9976	0.9350	0.9866	0.9966	1

Tableau12. Matrice de corrélation (Pearson (n))

	F1	F2	F3
Valeur propre	8.1492	0.7965	0.0542
Variabilité (%)	90.5472	8.8505	0.6023
% cumulé	90.5472	99.3977	100.0000

Tableau13. Valeurs propres

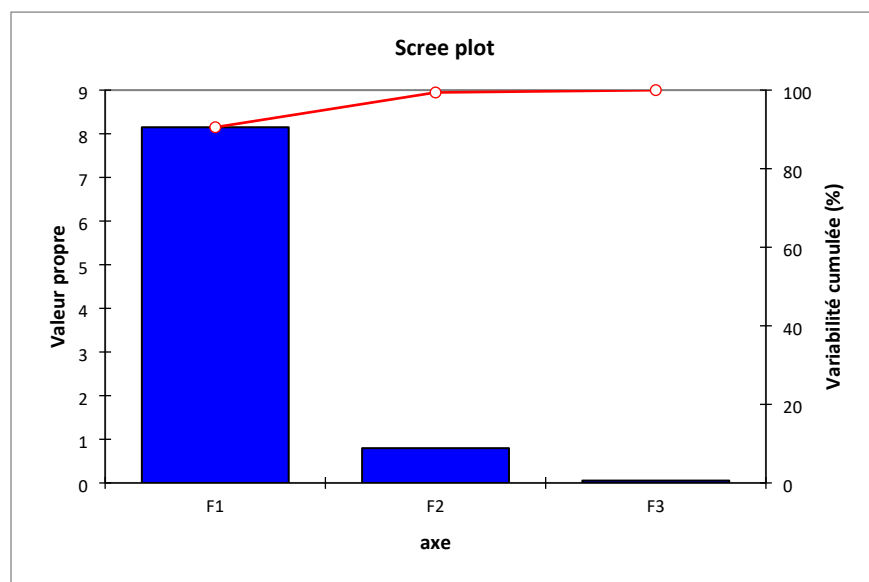


Fig08. Valeurs propres

Le cercle des corrélations montre une très forte proximité entre les variables relatives aux poids frais et aux poids secs, illustrant que la diminution de la biomasse est directement liée à la réduction de l'accumulation de matière sèche. Cette relation traduit une limitation de l'activité photosynthétique et une baisse de la production des assimilats carbonés nécessaires à la croissance.

Sur le plan biologique, cette organisation reflète une sensibilité plus importante du blé dur aux effets combinés du stress osmotique et de la toxicité ionique. L'accumulation de sodium dans les feuilles réduit progressivement l'ouverture stomatique, diminue l'activité de la Rubisco, accélère la dégradation des chlorophylles et augmente la production d'espèces réactives de

l'oxygène. Ces perturbations entraînent une réduction généralisée de la croissance végétative, ce qui explique la forte concentration des variables sur le premier axe.

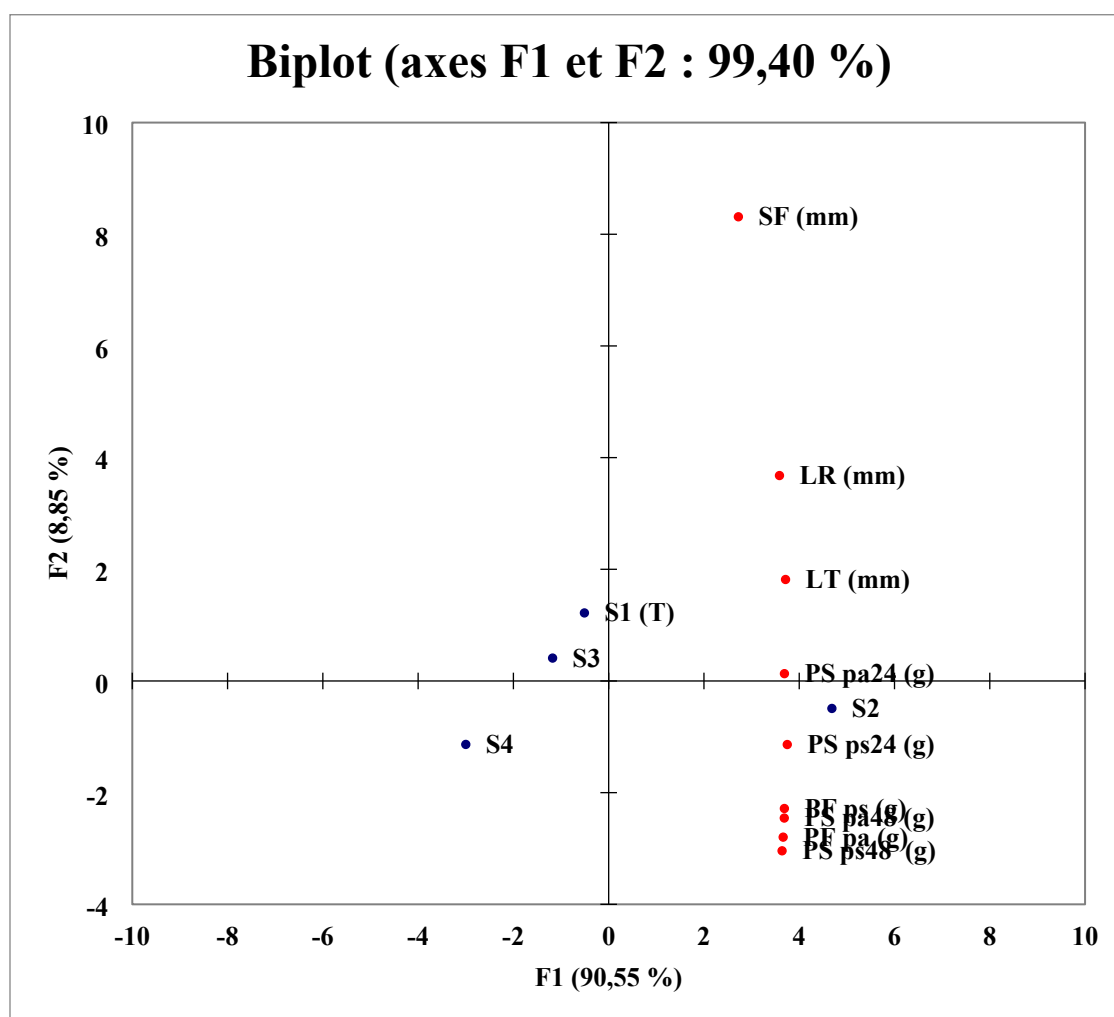


Fig09. Analyse en Composantes Principales (ACP) des Paramètres Morphologiques sous Stress Salin du blé

La projection des traitements montre une séparation très nette entre le témoin et les fortes concentrations de NaCl. Le traitement S4 apparaît fortement isolé, traduisant une inhibition quasi totale de la croissance végétative observée expérimentalement. Cette réponse confirme que la variété Simeto possède une tolérance plus limitée à la salinité comparativement à l'orge Raihane.

Les résultats sont conformes aux travaux de Acosta-Motos et al. (2017), Hussain et al. (2019) et Isayenkov et Maathuis (2019), qui montrent que le blé dur demeure particulièrement sensible aux concentrations élevées de NaCl durant les premiers stades de développement.

III.3. Comparaison entre l'orge Var. Raihane et le blé Var. Simeto

III.3.1. Comparaison de point de vue morphologique entre l'orge et le blé

La comparaison des deux ACP met clairement en évidence des différences importantes dans les stratégies adaptatives développées par les deux espèces. Bien que les deux céréales présentent une diminution progressive des paramètres morphologiques lorsque la salinité augmente, leur organisation statistique révèle des comportements physiologiques distincts.

Dans les deux espèces, les variables morphologiques demeurent fortement corrélées, ce qui traduit une réponse coordonnée de la croissance végétative au stress salin. Les longueurs racinaires, les longueurs des tiges, les surfaces foliaires ainsi que les biomasses fraîches et sèches diminuent simultanément avec l'intensification du stress. Cette similitude est conforme au modèle général décrit chez les glycophytes, selon lequel le stress salin réduit rapidement le potentiel hydrique du sol et limite l'expansion cellulaire.

Cependant, plusieurs différences majeures apparaissent dans l'organisation des ACP. Chez l'orge, les traitements intermédiaires restent relativement proches du témoin, ce qui traduit une meilleure stabilité physiologique. La dispersion plus progressive des traitements suggère que les mécanismes d'adaptation sont progressivement mobilisés lorsque la concentration saline augmente. En revanche, chez le blé, les traitements fortement salins s'éloignent rapidement du groupe témoin, indiquant une perte plus précoce de l'équilibre physiologique.

Ces différences peuvent être expliquées par plusieurs mécanismes physiologiques. L'orge possède une meilleure capacité d'exclusion du sodium grâce aux transporteurs membranaires, permettant de limiter l'accumulation des ions toxiques dans les feuilles. Elle maintient également un rapport K^+/Na^+ plus élevé, indispensable au fonctionnement enzymatique et au maintien de la photosynthèse. À cela s'ajoute une accumulation plus importante de composés osmoprotecteurs tels que la proline, les sucres solubles, la glycine bêtaïne ainsi qu'un système antioxydant plus performant.

Le blé dur, en revanche, présente une compartimentation ionique moins efficace et une accumulation plus rapide du sodium dans les tissus foliaires. Cette accumulation entraîne une dégradation accélérée des chloroplastes, une réduction de la chlorophylle totale, une baisse de la photosynthèse nette et une diminution importante de la biomasse.

L'ensemble de ces observations confirme que la variété Raihane possède une meilleure tolérance variétale au stress salin que la variété Simeto. Cette supériorité physiologique est cohérente avec les nombreux travaux consacrés à la tolérance différentielle des céréales aux contraintes salines.

Discussion générale

Les résultats obtenus dans cette étude sont en accord avec les connaissances actuelles sur les réponses des céréales au stress salin. De nombreuses recherches montrent que la salinité provoque une réduction simultanée de la croissance racinaire, de la croissance aérienne, de la surface foliaire et de l'accumulation de biomasse en raison des effets combinés du stress osmotique et de la toxicité ionique.

Munns et Tester (2008) ont montré que la première réponse des plantes à la salinité est une limitation rapide de l'expansion cellulaire, suivie d'une accumulation progressive du sodium dans les tissus. Nos résultats reproduisent parfaitement ce schéma, puisque toutes les variables morphologiques diminuent progressivement lorsque la concentration en NaCl augmente.

Les travaux de Deinlein et al. (2014) ont démontré que la tolérance dépend principalement de la capacité des plantes à maintenir un faible rapport Na^+/K^+ dans les feuilles. Cette observation explique probablement la meilleure résistance de la variété Raihane, dont les paramètres morphologiques restent relativement stables sous les concentrations modérées de NaCl.

Negrão et al. (2017) soulignent que les variétés tolérantes présentent généralement une meilleure stabilité des réseaux de corrélation entre variables physiologiques, ce qui correspond précisément à la structure observée dans l'ACP de l'orge. À l'inverse, la forte dépendance des variables chez le blé Simeto traduit une sensibilité accrue au stress.

Les travaux de Acosta-Motos et al. (2017) et Isayenkov et Maathuis (2019) montrent que les espèces sensibles présentent une réduction rapide de la surface foliaire et de la biomasse, conséquence directe de la fermeture stomatique et de la diminution de la photosynthèse. Cette tendance est observée dans la présente étude, où les traitements les plus salins sont clairement séparés des témoins sur les plans factoriels.

Hasanuzzaman et al. (2018) rapportent que les espèces tolérantes activent plus efficacement leurs systèmes antioxydants enzymatiques (SOD, CAT, APX), limitant les dommages oxydatifs provoqués par les espèces réactives de l'oxygène. Bien que ces paramètres n'aient pas été mesurés directement dans cette étude, la meilleure conservation de la biomasse chez l'orge suggère l'existence de mécanismes similaires.

Enfin, les observations de Hussain et al. (2019), Shahzad et al. (2021), Yang et al. (2020) et Zörb et al. (2019) confirment que les variétés d'orge possèdent généralement une meilleure plasticité physiologique que les variétés de blé dur, ce qui est pleinement confirmé par les résultats de cette Analyse en Composantes Principales.

Dans l'ensemble, cette étude démontre que l'ACP constitue un outil puissant pour discriminer les réponses variétales au stress salin. Elle met en évidence la supériorité adaptative de l'orge Raihane par rapport au blé Simeto et confirme que les paramètres morphologiques intégrés dans l'analyse représentent des indicateurs fiables de la tolérance variétale à la salinité.

III.3.2. Analyse de la variance (ANOVA à deux facteurs) des teneurs en chlorophylle, Proline et sucres totaux

a. Analyse de la variance (ANOVA à deux facteurs) des teneurs en chlorophylle

Source de Variation	% of total variation	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value	P value	Significant?
Interaction (Sel × Variété)	29.11%	0.05360	3	0.01787	F (3, 32) = 5.844	0.0027	**	Yes
Row Factor (Salinité - NaCl)	17.29%	0.03184	3	0.01061	F (3, 32) = 3.471	0.0274	*	Yes
Column Factor (Variété)	0.475%	0.0008761	1	0.0008761	F (1, 32) = 0.2866	0.5961	ns	No
Residual		0.09783	32	0.003057				
Total		0.1841	39					

Tableau14. Analyse de la variance (ANOVA à deux facteurs) des teneurs en chlorophylle

Effet de l'interaction (sel et variété) : ce facteur constitue la principale source de variance, puisqu'il explique 29,11 % de la variance totale avec un niveau de signification statistique élevé ($P = 0,0027$). D'un point de vue biologique, cela indique que les dynamiques de synthèse ou de dégradation des pigments sous l'effet du stress salin dépendent entièrement du patrimoine génétique des espèces étudiées. Les deux céréales adoptent des stratégies métaboliques totalement différentes face à l'accumulation d'ions Na^+ et Cl^- .

Effet du stress salin (NaCl) : ce facteur est également statistiquement significatif ($P = 0,0274$) et explique 17,29 % de la variance totale. À des concentrations modérées (S_2 et S_3), on observe un « effet de concentration » qui entraîne une légère augmentation des teneurs, reflétant une diminution de la surface foliaire sous pression osmotique.

Comportement différentiel au seuil critique (S4) : L'orge (Var. Raihane) manifeste une tolérance remarquable en enregistrant sa valeur maximale à S4 (de 0,070 à 0,462 mg/g). À l'inverse, le blé dur (Var. Simeto R2) subit un effondrement métabolique total où la teneur devient nulle, traduisant une chlorophyllose irréversible due à une toxicité ionique aiguë.

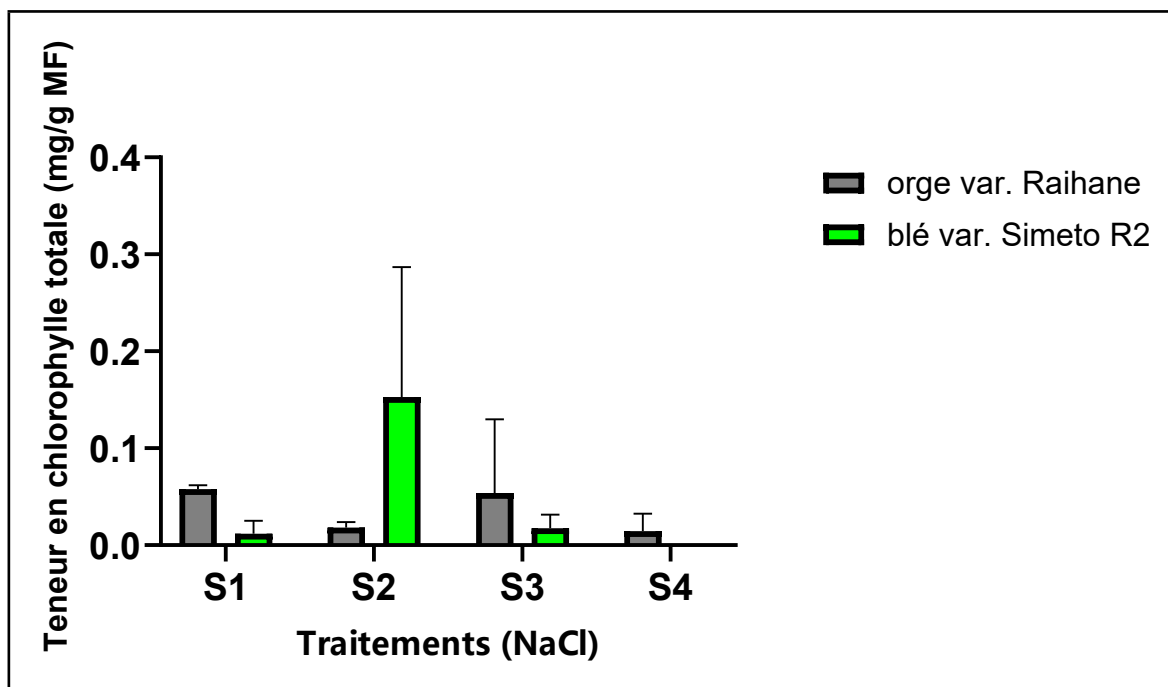


Figure10. Effet du stress salin (NaCl) sur la teneur en chlorophylle chez l'orge (*Hordeumvulgare* L. var. Raihane) et le blé dur (*Triticumdurum*Desf. var. Simeto R2).

b. Analyse de la variance (ANOVA à deux facteurs) des teneurs en proline

source de Variation	% of total variation	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value	Significant?
Interaction	7.727%	0.2131	3	0.07102	F (3, 16) = 14.54	P< 0.0001	Yes (****)
Salinité (NaCl)	37.08%	1.022	3	0.3408	F (3, 16) = 69.76\$	P< 0.0001	Yes (****)
Variété	52.36%	1.444	1	1.444	F (1, 16) = 295.5	P< 0.0001	Yes (****)
Residual (Erreur)		0.07817	16	0.004885			
Total		2.757	23				

Tableau15. Analyse de la variance (ANOVA à deux facteurs) des teneurs en proline

L'analyse de variance (ANOVA) montre que tous les facteurs (salinité, variété et interaction entre les deux) ont un effet hautement significatif sur le plan statistique ($P < 0,0001$)

Sur l'accumulation de proline : L'accumulation de proline en tant que mécanisme de défense : une augmentation considérable de la teneur en proline a été observée chez les deux variétés dès le premier niveau de stress (S2) par rapport au groupe témoin. Cette accumulation biochimique est considérée comme une réponse adaptative classique au stress osmotique (protection osmotique), visant à maintenir le potentiel hydrique de la cellule et à protéger les structures enzymatiques contre l'oxydation.

Supériorité métabolique de l'orge (variété Raihane) : le facteur variétal explique la majeure partie de la variance (52,36 %). L'avoine présente une capacité de synthèse de proline nettement supérieure à celle du blé, atteignant son maximum au niveau de stress S3 (0,9 18 mg/g). Cette concentration élevée en proline explique la capacité de l'avoine à maintenir ses niveaux de chlorophylle et sa biomasse même dans des conditions de salinité élevée (S4).

Décomposition du blé dur (variété Simeto R2) : bien que le blé accumule de la proline aux niveaux de stress S2 et S3, ses concentrations restent nettement inférieures à celles observées chez l'orge. À la concentration maximale S4, on observe une absence totale de proline (0,000 mg/g), ce qui coïncide avec la dégradation de la chlorophylle et la nécrose des tissus observées précédemment. Cela prouve que le blé a dépassé son seuil de tolérance métabolique, ce qui a entraîné l'effondrement de ses mécanismes de défense.

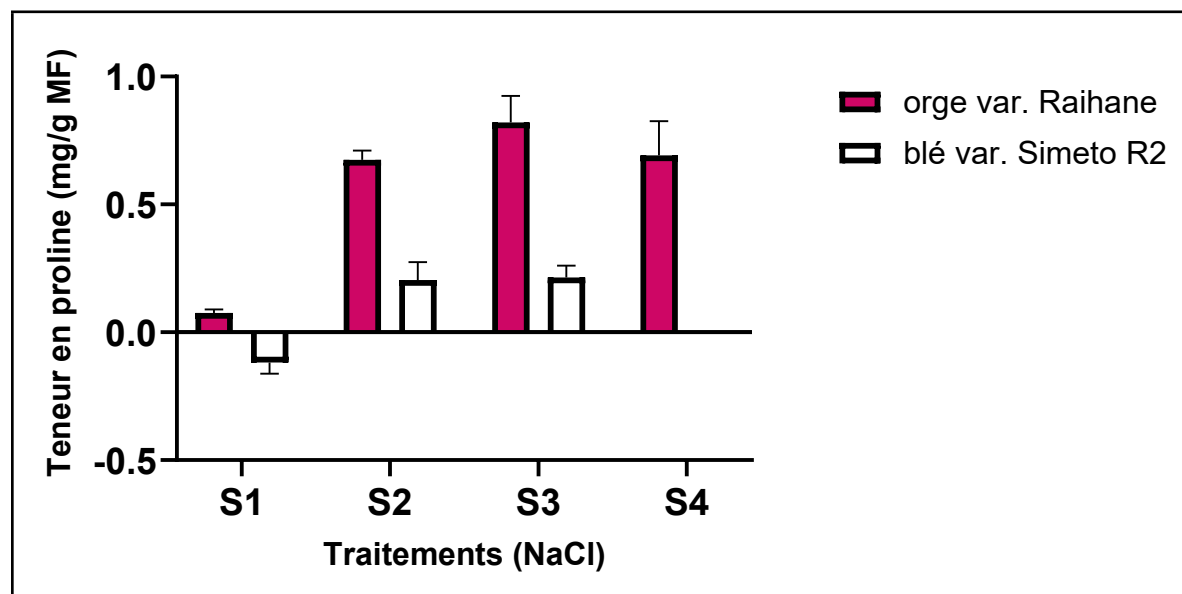


Fig11. Effet de différentes concentrations de NaCl sur l'accumulation de la proline foliaire (mg/g MF) chez l'orge (Var. Raihane) et le blé dur (Var. Simeto R2).

c. Analyse de la variance (ANOVA à deux facteurs) des teneurs en sucres totaux

Source de Variation	% of total variation	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value	Significant
Interaction (Sel × Variété)	21.87%	0.4058	3	0.1353	F (3, 16) = 183.4	P< 0.0001	Yes (****)
Row Factor (Salinité - NaCl)	54.44%	1.010	3	0.3368	F (3, 16) = 456.6	P< 0.0001	Yes (****)
Column Factor (Variété)	23.05%	0.4277	1	0.4277	F (1, 16) = 580.0	P< 0.0001	Yes (****)
Residual (Erreur)		0.01180	16	0.0007375			
Total		1.856	23				

Tableau16. Analyse de la variance (ANOVA à deux facteurs) des teneurs en en sucres solubles

L'analyse de variance à deux facteurs (ANOVA à deux facteurs) appliquée aux teneurs en sucres solubles des feuilles révèle des modifications métaboliques hautement significatives sur le plan statistique pour tous les facteurs étudiés ($P < 0,0001$). Le facteur de salinité (NaCl) est considéré comme le principal facteur régissant la variance totale, puisqu'il explique à lui seul 54,44 % de la variance totale, suivi du facteur « variété » (23,05 %) et de l'interaction entre ces deux facteurs (21,87 %). Les sucres solubles en tant que composés protecteurs contre le stress osmotique : dans l'orge (Var. Raihane), on a observé une accumulation progressive et notable des sucres solubles, dont la teneur est passée de 0,844 mg/g de matière sèche

Dans l'échantillon témoin (S1) pour atteindre un pic de 0,921 mg/g de matière sèche sous l'effet d'un stress modéré (S3). D'un point de vue biologique, cette dynamique reflète une capacité remarquable de cette variété à décomposer l'amidon et à mobiliser des sucres simples (tels que le glucose et le saccharose) afin de réguler son potentiel osmotique interne (régulation osmotique). Ce mécanisme d'adaptation agit en synergie avec l'accumulation de proline pour améliorer la rétention d'eau intracellulaire, stabiliser les membranes et empêcher la déshydratation des tissus sous contrainte saline. Grâce à cette efficacité métabolique, l'orge

conserve une production importante de sucres solubles (0,712 mg/g de matière sèche) même au seuil de salinité maximal (S4).

Réponse limitée et effondrement du blé dur (Var. Simeto): à l'inverse, le blé dur présente un comportement tout à fait différent, caractérisé par une incapacité à accumuler ces substances solubles compatibles. Une baisse continue des teneurs en sucres solubles a été observée dans les traitements S2 et S3 par rapport au groupe témoin, ce qui témoigne de la faible efficacité de cette variété à retenir les sucres à des fins de régulation de l'équilibre osmotique. Au niveau de stress critique (S4), la teneur en sucres solubles s'effondre pour atteindre zéro (0,000 mg/g de matière sèche). Ce résultat confirme la survenue d'un choc osmotique sévère et d'une toxicité ionique aiguë ayant dépassé les capacités de tolérance de la plante, ce qui a entraîné un blocage complet des voies métaboliques et une dégradation totale des structures cellulaires associée à une nécrose avancée des tissus.

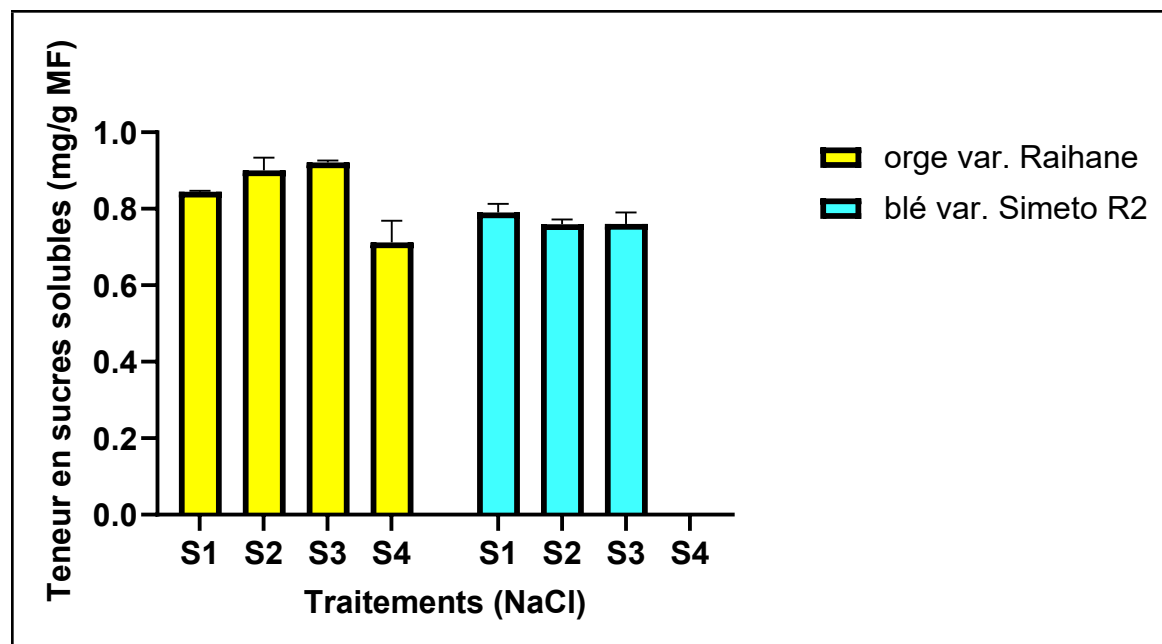


Fig12. Effet du stress salin (NaCl) sur la teneur en sucres solubles foliaires chez l'orge (Var. Raihane) et le blé dur (Var. Simeto).

Conclusion

Conclusion

La présente étude a permis de mettre en évidence des stratégies de réponse distinctes entre le blé dur (*Triticum durum* Desf. Var. Simeto) et l'orge (*Hordeum vulgare* L. Var. Raihane) face à un stress salin croissant, à travers l'analyse d'un ensemble de paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques complétée par une ACP.

Les résultats de l'analyse de la variance montrent que la salinité (NaCl) constitue le facteur le plus influent sur l'ensemble des paramètres étudiés, traduisant l'effet direct de la pression osmotique et de la toxicité ionique résultant de l'accumulation des ions sodium et chlorure sur la croissance des plantes et leurs fonctions vitales. Le facteur variétal révèle quant à lui des différences nettes entre les deux espèces, l'orge Var. Raihane montrant une capacité plus marquée à préserver sa croissance et ses performances physiologiques sous contrainte saline comparativement au blé dur Var. Simeto.

L'analyse de l'interaction *Salinité/Variété* met en évidence une nette divergence dans le mode de réponse des deux céréales. Le blé dur Var. Simeto présente une réponse stimulatrice aux niveaux de salinité modérés, se traduisant par une amélioration de certains indicateurs de croissance et de biomasse par rapport au témoin une réponse connue sous le nom de phénomène d'hormesis. Cette réponse reste cependant temporaire, suivie d'une phase de régression sévère à la concentration saline la plus élevée, atteignant pour certains paramètres des niveaux proches de l'effondrement fonctionnel.

L'orge Var. Raihane, de son côté, montre également une capacité à tirer parti des niveaux de salinité modérés, enregistrant de meilleures performances aux concentrations de 4 et 8 g/L comparativement au témoin pour plusieurs indicateurs étudiés, ce qui témoigne de l'efficacité de ses mécanismes d'adaptation. À la concentration la plus élevée (12 g/L), l'effet de la salinité devient plus visible à travers la baisse de certains paramètres ; toutefois, ce recul demeure moins prononcé que celui observé chez le blé, traduisant une meilleure capacité à tolérer le stress salin.

L'analyse en composantes principales confirme ces résultats : la distribution des traitements révèle une gradation nette de la réponse de l'orge aux différents niveaux de salinité, celle-ci conservant une part appréciable de ses performances physiologiques même aux concentrations élevées. Le blé, en revanche, se caractérise par une transition plus abrupte entre les niveaux de stress, particulièrement à la concentration saline la plus élevée, traduisant une sensibilité plus marquée à la forte salinité.

Les résultats morphologiques concordent avec les données biochimiques : l'orge a montré une meilleure capacité à préserver sa teneur en chlorophylle et à activer ses mécanismes d'ajustement osmotique par l'accumulation de proline et de sucres solubles, des composés contribuant à la protection cellulaire et au maintien de l'équilibre hydrique. Le blé, quant à lui, a présenté une perturbation plus marquée de ces indicateurs aux niveaux de salinité élevés, traduisant une capacité d'adaptation plus limitée face au stress sévère.

Ces résultats confirment que les deux variétés disposent de mécanismes de réponse au stress salin, mais que l'orge Var. Raihane se distingue par une capacité d'adaptation plus importante et une réponse plus stable à travers les différents niveaux de salinité, tandis que le blé dur Var. Simeto R2 présente une réponse stimulatrice transitoire à salinité modérée, suivie d'une sensibilité nette à forte salinité. Sur cette base, l'orge Var. Raihane peut être considérée comme un choix prometteur et plus adapté à la valorisation agricole des zones touchées par la salinité en Algérie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Acosta-Motos, J. R., et al. (2017). *Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms*. *Agronomy*, 7, 18.

Aïkar. S et Goubi. Ch (2019). La céréaliculture dans l'extrême sud de l'Algérie : Historique, situation actuelle et perspectives (cas de la région d'In Salah). Memoire Master, Université Kasdi Merbah – Ouargla, Algérie.

Amrouche. I et Mesbah. E (2017). Effet du stress abiotique sur l'accumulation des protéines totales chez deux variétés de blé dur *Triticum durum* Desf. Mémoire Master, Université des Frères Mentouri Constantine, Algérie.

Arsova, B., et al. (2020). Salt stress and plant roots: Dynamics of developmental and physiological responses. *Plant, Cell & Environment*, 43(11), 2635-2649.

ASJP. Université Kasdi Merbah - Ouargla (2012). Étude comparative de la céréaliculture sous pivots entre les wilayas de Ouargla et Ghardaïa. Mémoire de Fin d'Études, Algérie.

Baka, M., Fercha, A., Gherroucha, H., & Boudour, L. (2006). Contrecarrer l'effet de la salinité par l'utilisation de régulateurs de croissance sur le contenu du blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Revue Sciences & Technologie*, Université Mentouri, Constantine, pp. 6-7.

Beji. S (2021). Aptitude à la double exploitation de sept variétés d'orge (*Hordeum vulgare* L) Dans un milieu semi-aride de Tunisie. *Fourrages* 246, 75-81.

Belferagui. S et Mahdjoub.i. (2015). Réponses des nouvelles variétés de blés dur (*Triticum durum* Desf.) : (variété Cirta et variété Simeto) à la fertilisation azotée dans la région de Guelma. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie.

Belkacimi. Z et Medjerda. A et Benayache .M (2023). Impact de la sécheresse climatique sur les ressources en eau : Le nord-ouest de l'Algérie. *JAMA*, 7, 2-28.

Ben Naceur, M., Rahmoune, C., Sdiri, H., Meddahi, M. L., & Selmi, M. (2001). Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production en grains de quelques variétés maghrébines de blé. *Sécheresse*, 12(3), 167-174.

Benbelkacem, M. (1992). Le triticales une culture en développement. Revue céréaliculture, ITGC, Alger .

Bénédicté. F (2012). Impact du stress hydrique sur l'anatomie et la teneur en polyphénols des feuilles de 2 génotypes d'Eucalyptus au champ, Mémoire Master. Université Montpellier. France.

Benlaribi, M. (1990). Adaptation au déficit hydrique chez le blé dur : Études des caractéristiques morpho-physiologiques. Thèse Doctorat, Université de Constantine.

Benmansour. M et Lamaa. Z (2023). Aperçus sur les maladies cryptogamiques qui affectent l'orge « cas de la maladie de la rouille dans la région de Sebdou ». Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Algérie.

Bensalem, M. (1992). Etude de l'orge et du triticales pour la tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. Les colloques, Ed. I.N.R.A .47

Bouhabila. I (2016). Effet du stress salin sur l'expression de deux facteurs de transcription chez la luzerne annuelle *Medicago truncatula* : cas du NAC969 et du bhlh32. Mémoire de Master. Université des Frères Mentouri Constantine1. Algérie.

Boukerrouche N.(2021). Effet du stress osmotique sur la germination chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : accumulation des osmolytes.Mémoire de Master. Université é des Frères Mentouri Constantine 1. Algérie.

Bounegab. S et Ayadi. I (2020). Etude de la variabilité intraspécifique de tolérance au stress salin chez cinq variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) Au stade juvénile Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah – Ouargla – Algérie.

Chabane, Mohamed (2010). Agriculture, rente et développement, De l'histoire à la prospective, le cas de l'Algérie. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 2, France.

Chaouche. M (2017). Etude de comportement de l'orge (Saida 183) dans deux régions différentes. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie .Conseil National Économique et Social (CNES). (1997). L'environnement en Algérie enjeu du développement. Rapport de la 9^e session plénière, Alger, 28-29 octobre 1997.

Cooper, A. (1979). The ABC of NFT. Nutrient Film Technique. Csiro Plant Industry / University of Adelaide (2006). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. Australia.

Dagnelie, P. (2012). Principes d'expérimentation: Planification des expériences et analyse de leurs résultats. Belgique. ISBN 978-2-87016-117-3.

Deinlein, U., et al. (2014). *Plant salt-tolerance mechanisms. Trends in Plant Science*, 19, 371–379.

Djahra A. B., Benmakhlouf Z., Benkherara S., Benkaddour M., Bordjiba O. 2015. Effet du stress salin sur la teneur en eau et certains osmolytes chez le blé dur *triticum durum* var kebir pulvérisé par une phytohormone synthétisée : benzyl-amino-purine (BAP). *Algerian journal of arid environment* vol. SSN 2170-1318 .5, n° 2, 71-81.

Djermoun. A (2009). La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Revue Nature et Technologie*. N° 01 p 45 à 53.

Djerroud. A (2018). La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Revue Des économies nord Africaines* N ° (18), P 19-26.

Dreier, W., & Göring, H. (1974). Der Einfluss von NaCl-Salzstress auf den Prolingehalt von Keimpflanzen von *Zea mays* L. *Biologia Plantarum*, 16(5), 347-355.

Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350-356.

Erofeeva, E. A. (2021). Plant hormesis as an adaptive response to low-dose environmental stress. *Science of The Total Environment*, 795, 148883.

flavonoïdes et de l'activité antioxydant de l'orge. Mémoire de Fin d'Études, Algérie.

Frontiers in Agronomy (2021). Revue globale sur l'effet de la salinité sur la productivité du blé. pp. (321, 324, 331).

Gheraibia, et al. (2016). Comparative Study of the Biochemical and Physiological Mechanisms of Two Varieties of Durum Wheat Subject to Salt Stress. Université Mentouri Constantine / Université d'Annaba, Algérie. pp. (43, 44, 48).48

Gridi. W et Meguimi. F (2022). Réponses physiologiques et biochimiques de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) Au stress salin. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie.

Hakim, L., et al. (2018). Genetic association based on SRAP markers and agromorphological traits in *Coronilla scorpioides* germplasms. 29ème Congrès International de l'arts.

Hasanuzzaman, M., et al. (2018). *Plant response and tolerance to abiotic oxidative stress*. Springer.

Hassani, A. (2009). L'influence du stress salin et hydrique sur la morphologie, l'anatomie, la physiologie et la biochimie de l'Orge (*Hordeum vulgare*) et du Triticale (*Triticosecale* Witt.). Thèse de Doctorat d'État, Université d'Oran.

Hassani, Abdelkrim (2009). Effet de la salinité sur la physiologie et la biochimie des céréales. Thèse de Doctorat, Université Es-Sénia d'Oran, Algérie. pp. (115, 128, 271).

Hungarian University of Agriculture and Life Sciences (2020). Effect of Abiotic Stresses... on Germination and Seedling Growth of Barley. Hongrie.

Hussain, S., et al. (2019). *Salt stress in plants: adaptive mechanisms*. **Agronomy**, 9, 458.

Isayenkov, S. V., &Maathuis, F. J. M. (2019). *Plant salinity stress: many unanswered questions*. **Journal of Experimental Botany**, 70, 275–284.

ITGC (Institut Technique des Grandes Cultures). (1995/2004). Le triticale : culture et utilisation. Ed. INSID, Alger.

Jabnune. M (2008). Adaptation des plantes au stress salin : caractérisation de transporteurs de sodium et de potassium de la famille HKT chez le riz. these pour obtenir le grade de Docteur en physiologie végétale et biologie moléculaire. montpellier supagro centre international d'études superieures en sciences agronomiques 2 place Viala – 34060 Montpellier Cedex 1 – France.

James, R. A., et al. (2006). Differentiation of salinity tolerance traits in *Triticum monococcum* and *Triticum turgidum* (durum wheat) genotypes. *Functional Plant Biology*, 33(4), 393-400.

Karoune. S, kechebarm.S. A, Halis. Y, Djellouli. A et Rahmoune. C(2017) . Effect of salt stress on morphology, physiology and biochemistry of *Acacia albida*. *Journal Algérien des Régions Arides (JARA)* N : 14.

Mahboubi. S (2008). Variabilité génétique de la tolérance au froid d'écotypes d'une core collection d'*Arabidopsis thaliana*. Mémoire de master. Université D'oran, Algérie.

Miryam, O., El Kadi, F. Z., Chahbar, S., Fatah, K., & Ghoul, S. (2022). Analysis of the germination of two varieties of durum wheat (*Triticum turgidum* L. Var. Durum) as a function of salinity: In-vitro approach. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 28(4), 355-359.

Moulodi. D (2019). Effet du stress hydrique sur quelques paramètres Morphologiques, physiologiques et biochimiques sur deux Populations de *Chenopodium quinoa* Willd. Mémoire de Mastre. Université Kasdi Merbah – Ouargla. Algérie .

Mouloudi. D (2019). Effet du stress hydrique sur quelques paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques sur deux populations de *Chenopodium quinoa* Willd, Mémoire Master. Université Kasdi Merbah – Ouargla. Algérie.

Munns, R., & Tester, M. (2008). *Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681.
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>

Munns, R., et al. (2010). Measuring soluble ion concentrations in mangroove and terrestrial plants. *Methods in Molecular Biology*, 639, 112-120.

Munns, R., et Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59, 651-681.

Negrão, S., Schmöckel, S. M., & Tester, M. (2017). *Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. Annals of Botany*, 119, 1–11.

Pržulj, et al. (2020). Régulation osmotique et rôle des solutés organiques. pp. (2, 3, 6).49

Rahal-Bouziane, H. (2015). L'orge en Algérie : passé, présent et importance pour la sécurité alimentaire, face aux nouveaux défis. Recherche Agronomique, N ° 27, 8-24.

Rechachi. M.Z., Abdelhafid. Y, Menasria. H, Mellah. A, Lakhdari.F. Hiouani.F (2020).Mécanisme (s) de tolérance au sel chez l'orge (*Hordeum vulgare*) Salt tolerance mechanism (s) in barley (*Hordeum vulgare* L). Journal Algérien des Régions Arides (JARA) Algerian Journal of Arid Regions. 14 : (1)p 66-79.

Saied. A et Maamouli. S .(2022). L'effet de stress salin sur la germination et la croissancedeblédur (*Triticum. Durum* Desf.) Et blé tendre (*Triticum. Aestivum*desf.). Mémoire de Master. Université Mohamed Khider de Biskra. Algérie.

Shahzad, B., et al. (2021). *Advances in understanding plant responses to salinity. Plants*, 10, 809.

Shaikhaldein, et al. (2024). Changements morpho-physiologiques et antioxydants sous stress salin (NaCl). pp. (450, 457, 464).

Soltner, D. (1999/2005). Les grandes productions végétales. 19ème édition, Sciences et Techniques agricoles, Angers.

Tegegn, F.A., Franzaring, J., Terfa, M.T., Gobena, A., & Schweiger, A. (2026).Evaluation of durum wheat genotypes for drought tolerance. Australian Journal of Crop Science, 20(02), 99-111. <https://doi.org/10.21475/ajcs.26.20.02.p37>.

Tester, M., et Davenport, R. (2003). Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Annals of Botany*, 91.Université de Toulouse (INP-ENSAT) / Université de Montpellier (2021). Marine and fungal biostimulants improve grain yield, nitrogen absorption and allocation in durum wheat plants. France.

Troll, W., & Lindsley, J. (1955). A photometric method for the determination of proline. *Journal of Biological Chemistry*, 215(2), 655-660.

Université des Frères Mentouri Constantine (2015). Contribution à l'étude des

Université Mohamed Khider - Biskra (2011). Effet de la salinité sur certains paramètres morphologiques et agronomiques chez cinq variétés d'orge. Mémoire de Fin d'Études, Algérie. Auto Exploration and Tracking – AET (2026-05-22). Triticum durum overview. Retrieved from recent search results.

Wintermans, J. F. G. M., & de Mots, A. (1965). Spectrophotometric characteristics of chlorophyll a and b and their pheophytins in ethanol. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biophysics including Quantum Biophysics, 109(2), 448-453.

Yang, Y., Guo, Y. (2018/2020). *Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses.* **New Phytologist.**

Zörb, C., Geilfus, C. M., & Dietz, K. J. (2019). *Salinity and crop yield.* **Plant Biology**, 21(S1), 31–38.

Annexe

Annexe01. Matériel biologique (semences de blé dur et d'orge) et substrat de culture utilisés dans l'expérimentation.



Annexe02. Différentes étapes de préparation, de tamisage et de séchage du sol expérimental.



Annexe03. Différentes étapes de tri, de pesage et de désinfection superficielle des semences (blé dur et orge).



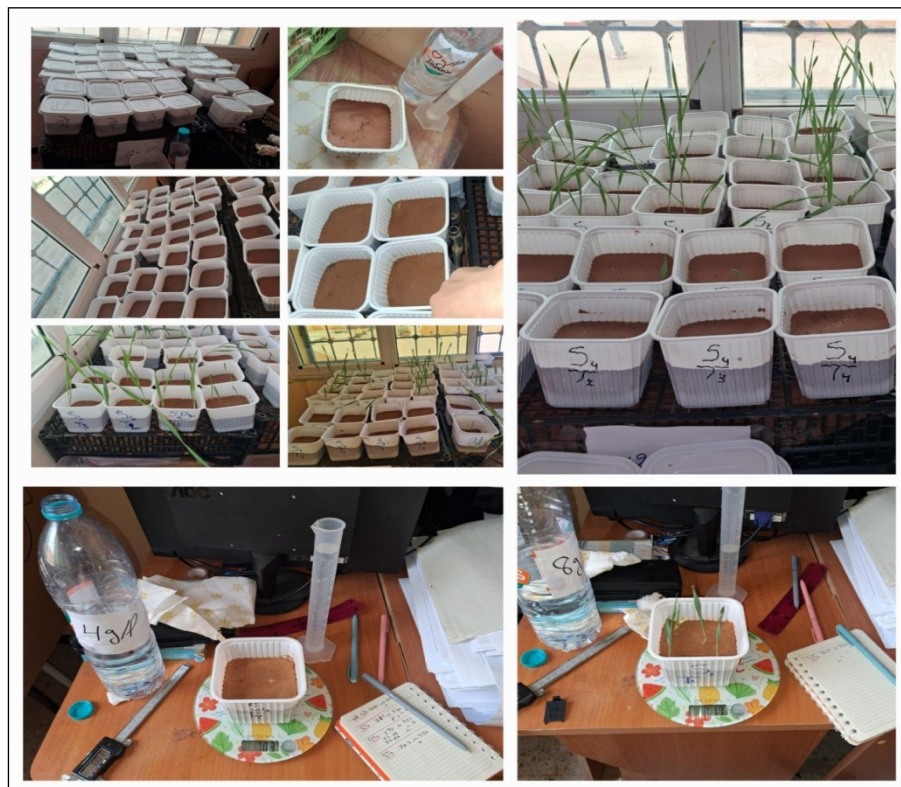
Annexe04. Préparation des pots de culture, pesage du substrat et caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation utilisée.



Annexe05. Essais préliminaires de germination (validation des semences et des substrats) et préparation des solutions de NaCl et de NPK (0.3g/L).



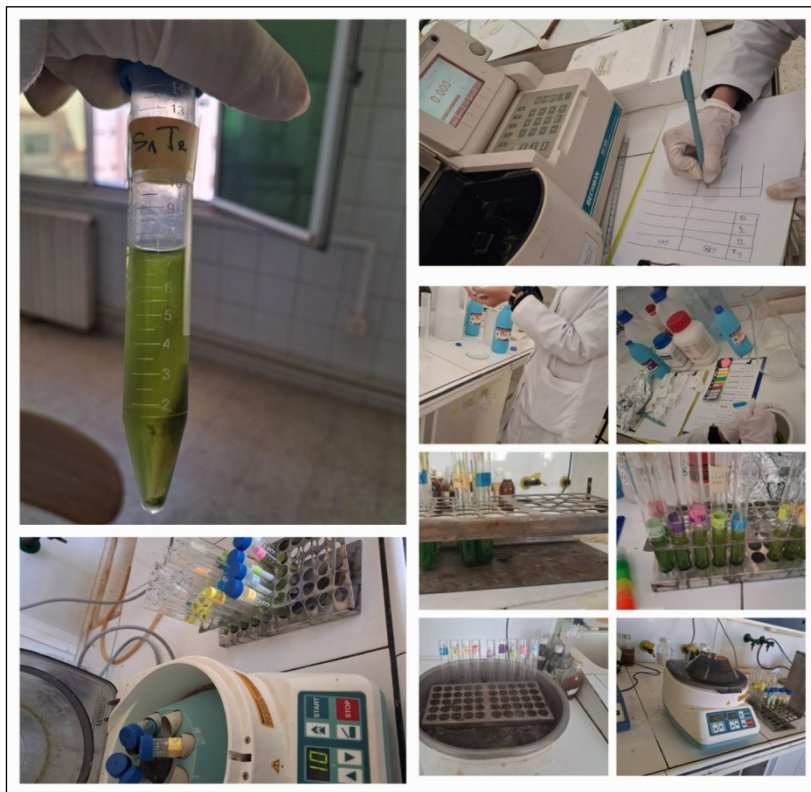
Annexe06. Suivi des étapes de semis, de la levée des plantules (blé dur et orge) et de l'application des différents niveaux de stress salin.



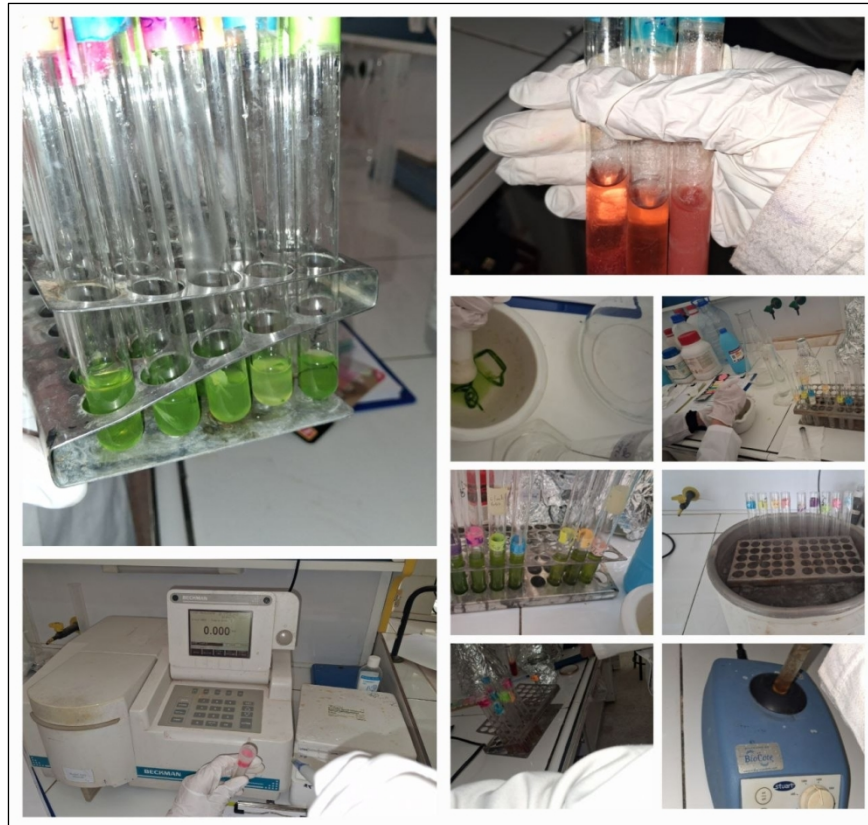
Annexe07. Étapes de récolte des plantes, lavage des racines, mesures morphométriques et séchage à l'étuve pour la détermination de la biomasse (fraîche et sèche).



Annexe08. Protocole d'extraction et de dosage spectrophotométrique des pigments chlorophylliens.



Annexe09. Protocole d'extraction et de dosage de la proline libre selon la méthode de Bates.



Annexe10. Protocole d'extraction et de dosage spectrophotométrique des sucres solubles totaux.

