



République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعرييرج



Université Mohammed El Bachir El Ibrahimy B.B.A  
كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers  
قسم العلوم الفلاحية  
Département des Sciences Agronomiques

# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Amélioration des plantes

## Intitulé :

**Étude de l'effet combiné du stress hydrique et salin sur  
la germination et la croissance de quelques céréales**

Présenté par :

BOUAOUINA Farah & BOUBAITI Ahlam

Soutenu le 29 / 06/ 2025, Devant le Jury :

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
<b>Président :</b>	M. FELLAHI Zine El Abidine	MCA	Faculté SNV-STU, Université de B.B.A.
<b>Encadrant :</b>	M. MAAMRI Khelifa	MCA	Faculté SNV-STU, Université de B.B.A.
<b>Examineur :</b>	Mme. TABTI Dahbia	MCB	Faculté SNV-STU, Université de B.B.A.

Année Universitaire 2024/2025

# Remerciement

*Avant tout, louange à Allah Al-Wahid, Celui qui nous a créés, protégés, guidés et ne nous a jamais laissés seuls. Qu'Il soit glorifié et remercié pour Ses innombrables bienfaits.*

*Au terme de ce travail, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.*

*Nos remerciements les plus chaleureux vont à **Dr.MAAMRI Khelifa**, notre encadrant, pour sa patience, sa disponibilité constante, et la richesse de ses conseils, qui ont grandement nourri notre réflexion tout au long de cette étude.*

*Nous remercions également les membres du jury :*

***Dr.FELLAHI Zine El Abidine**, enseignant à l'Université de Bordj Bou Arréridj, pour avoir accepté de présider le jury.*

***Dr.TABTI Dahbia**, enseignante à la même université, pour l'évaluation et l'enrichissement de ce travail.*

*Nous adressons nos remerciements les plus sincères **Dr. SEBBANE Mahieddine** pour sa collaboration, son soutien et sa présence à nos côtés.*

*Nos pensées reconnaissantes vont aussi à nos collègues de promotion, ainsi qu'à nos amies fidèles, pour leur soutien, leur solidarité et leurs encouragements tout au long de ce parcours.*

*Enfin, nous adressons nos plus profonds remerciements à nos parents, pour leurs sacrifices, leurs prières et leur soutien inconditionnel. Sans eux, rien de tout cela n'aurait été possible.*

*Un grand merci à toute notre famille, pour leur présence rassurante et leurs encouragements constants.*

# *Dédicace*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
(وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ)

*Avant tout, je remercie Allah qui m'a toujours aidée et m'a accordé le courage et la patience tout au long de mon parcours scolaire. Par la volonté du Très-Haut, Le Tout-Puissant et Le Bienveillant, qui m'a permis de mener à bien ce modeste travail, je le dédie à :*

*À moi-même, en reconnaissance des efforts, de la persévérance et des sacrifices consentis tout au long de ce parcours.*

*À mes chers parents, **ma mère** et **mon père**, pour leur amour, leurs prières et leur soutien inconditionnel qui m'ont toujours portée vers l'avant.*

*À mes sœurs **Nesrine** et **Sarah**, et à mes frères **Mohamed** et **Walid**, pour leur présence rassurante et leurs encouragements constants.*

*À mes cousines **Amina** et **Nour**, pour leur affection et leur bienveillance.*

*À mes amies précieuses : **Kaouther**, **Taoues**, **Djenat**, **Israa**, **Houda**, **Zaineb**, **Yassmine**, qui ont embelli mon quotidien par leur amitié sincère.*

***Dida**, **Riham**, **Amira**, **Dounia**, **Amani**, pour leur soutien, leurs sourires et leur complicité durant toutes ces années.*

*À ma binôme de mémoire **Ahlam**, avec qui j'ai partagé les défis et les réussites de ce travail dans un esprit de collaboration et d'entraide.*

*À mon encadrant **Dr. Maamri Khelifa**, pour ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de ce travail.*

*À tous ceux qui m'aiment sincèrement, à ceux qui m'ont conseillée, encouragée et soutenue, même par un simple mot ou un geste. Merci du fond du cœur.*

***Farah***

# Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
(يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ)

*Avant tout, je rends grâce à Allah, Le Très-Haut, Le Sage et Le Miséricordieux, qui m'a accompagnée à chaque étape, m'accordant la force, la patience et la lumière nécessaires pour franchir les défis de ce parcours.*

*Par Sa volonté infinie, ce travail a pu voir le jour, et je le dédie avec gratitude à :*

*À moi-même, pour chaque pas franchi avec courage, chaque épreuve surmontée avec patience, et chaque rêve poursuivi avec détermination.*

*À mes chers parents, **Abbas Boubaiti** et **Aïcha Ben Slimane**, les piliers de ma vie. Merci pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices silencieux et votre soutien indéfectible*

*À mes frères, **Akram** et **Oussama**, et à mes sœurs, **Nessrine** et **Aya**, pour leur présence rassurante, leur affection et leur soutien constant.*

*À la personne qui occupe une place toute particulière dans mon cœur, **A.F.** merci pour ton inspiration, ta douceur et ta lumière dans mon parcours.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, **Dr. Maamri Khelifa**, pour ses conseils avisés et son accompagnement constant tout au long de ce travail.*

*À mes camarades de promotion, À mes précieuses amies: **Salima, Sabrina, Amira, Ilhem, Khaoula, Donia** et **Jihad**, merci pour vos mots, votre écoute et votre présence sincère dans les moments joyeux comme difficiles.*

*À mon amie, ma confidente, ma "benom", **Farah**, merci pour ton soutien unique, ta tendresse et ton amitié inestimable.*

*À tous les enfants de Gaza, symboles d'innocence, de douleur et de résistance. Ce travail est aussi un hommage à leur courage et à leur espoir, qui méritent d'être honorés.*

*Et enfin, à chaque personne qui m'a souhaité du bien avec sincérité, ce travail vous est dédié. Vous êtes la preuve que la bonté et la persévérance peuvent encore illuminer ce monde.*

*Ahlam*

# Table des matières

## Liste des abréviations

Introduction :	1
----------------	---

## Chapitre I Matériels et méthodes

1. Matériel végétal:	6
2. Mise en place des essais	7
3. Le plan expérimental	7
4. Paramètres étudiés :	9
4.1. Essai 01 : Effet des stress salin et hydrique sur la germination :	9
4.1.1 Taux de germination final (G, %) :	9
4.1.3 Cinétique de germination (CG, %) :	10
4.1.4 Germination moyenne journalière (GMJ, %) :	10
5. Essai 02 : Effet des stress salin et hydrique sur la croissance :	11
5.1. Paramètres morphologique étudié :	11
5.1.1 Longueur de coléoptile :	11
5.1.2 Longueur racinaire (LR, cm) :	11
5.1.3 La surface foliaire (cm <sup>2</sup> ) :	12
5.2. Paramètre physiologique étudié :	12
5.2.1 Teneur relative en eau (TRE, %) :	12
5.3. Paramètre biochimique étudié :	13
5.3.1 Taux de chlorophylle totale :	13

## Chapitre II Résultats et discussion

1. Impact du stress salin sur le processus de germination	16
1.1. Effet de génotype :	16
1.2. Effet du stress :	18
1.3. Interaction génotype × stress salin :	19
1.4. Effet du stress salin sur les indicateurs germinatifs mesurés	19
1.4.1. Variation des taux de germination (TG %):	19
1.4.2. Variation de la Vitesse de germination (VG %):	21

1.4.3. <i>Variation de la cinétique de germination (CG %):</i> .....	23
1.4.4. <i>Variation de Germination Moyenne Journalière (GMJ, %):</i> .....	25
<b>2.Étude de la variabilité des traits de croissance selon les facteurs expérimentaux :</b> .....	26
2.1. <i>Analyse de la variance des réponses des plantules aux traitements :</i> .....	26
2.2. <b>Effet du stress salin et hydrique sur les indicateurs de croissances mesuré</b> .....	32
2.2.1. <b>Évolution des longueurs de coléoptile (LC, cm) :</b> .....	32
2.2.2. <b>Évolution des Longueurs racinaire (LR, cm) :</b> .....	34
2.2.3. <b>La surface foliaire :</b> .....	36
2.2.4. <b>Teneur relative en eau (TRE, %) :</b> .....	38
2.2.5. <b>Evolution de la teneur en chlorophylle :</b> .....	39
<b>Conclusion:</b> .....	47
<b>Références bibliographies:</b> .....	49
<b>Annexe</b> .....	55
<b>Résumé :</b> .....	58

## Liste de la figure

- Figure 1: Les semences des géotypes étudiées** ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2 : Dispositif utilisé pour la germination  
..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 3:** Dispositif utilisé pour l'essai en pots..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 4:** La longueur de coléoptile. .... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 5 :** La longueur des racines..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 6 :** Matériel utilise pour la teneur en eau.....  
**Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 7:** Dosage de la chlorophylle. .... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 8 :** Evolution de la capacité de germination sous condition contrôlé (0g/l) et sous différentes .....20
- Figure 9:** Effet des différentes concentrations de NaCl sur la vitesse de germination chez les sept géotypes étudiés..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 11 :** Effet de différentes concentrations de NaCl (0,50,100,150mM) sur la moyenne journalière de germination (GMJ%) du géotype étudié..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 10:** Effet de différentes concentrations de NaCl (0,50,100,150mM) sur la cinétique de germination du géotypes étudiées. .... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 12 :** Évolution de la longueur de coléoptile sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50,100 et 150 mM) et sous condition de stress hydrique (2,4,6 jours) chez les géotypes étudiés. .... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 13 :** Évolution de la longueur des racines sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50,100 et 150 mM) et sous condition de stress hydrique (2,4,6 jours) chez les géotypes étudiés. .... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 14 :** Évolution de surface foliaire sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50, 100 et 150 mM) et sous condition de stress hydrique (2,4,6 jours) chez les géotypes étudiés..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 15 :** Évolution de la teneur en eau sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50, 100 et 150 mM) ..... **Erreur ! Signet non défini.**

**Figure 16 :** Variation de la teneur en chlorophylle A sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50 mM) et stress hydrique (2,4,6 jours) chez les génotypes étudiés. ... **Erreur ! Signet non défini.**

**Figure 17 :** Variation de la teneur en chlorophylle B sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50 mM) et stress hydrique (2,4,6 jours) chez les génotypes étudiés. ... **Erreur ! Signet non défini.**

**Figure 18 :** Variation de la teneur en chlorophylle AB sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50 mM) et stress hydrique (2,4,6 jours) chez les génotypes étudiés.....**Erreur ! Signet non défini.**

**Figure 19 :** Matrice des corrélations des paramètres de croissance étudiés..**Erreur ! Signet non défini.**

**Figure 20 :** Analyse en Composantes Principales (ACP) des variables étudiées. **Erreur ! Signet non défini.**

**Figure 21 :** Analyse en Composantes Principales (ACP) des observations étudiées. ....**Erreur ! Signet non défini.**

## Liste des tableaux

**Tableau 01** : Caractérisation des variétés céréalières utilisées dans l'étude. **Erreur ! Signet non défini.**

**Tableau 02** : Concentrations de NaCl utilisées pour induire le stress salin.

..... **Erreur ! Signet non défini.**

**Tableau 3** : Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de germination mesurés.

..... **Erreur ! Signet non défini.**

**Tableau 4** : Valeur moyenne de l'effet moyen génotype des indicateurs de germination mesurés

..... **Erreur ! Signet non défini.**

**Tableau 5** : Valeur moyenne de l'effet moyen du stress salin des indicateurs de germination

mesurés..... **Erreur ! Signet non défini.**

**Tableau 6:** Carrés moyens de l'analyse de la variance des paramètres de croissance mesurés.

..... **Erreur ! Signet non défini.**

**Tableau 7:** Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de croissance mesurés.

..... **Erreur ! Signet non défini.**

**Tableau 8** : Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress salin' des caractères de croissance

mesurés..... **Erreur ! Signet non défini.**

**Tableau 9** : Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress hydrique' des caractères de croissance

mesurés..... **Erreur ! Signet non défini.**

## **Liste des abréviations**

**ANOVA** : Analyse de la variance

**Chl A** : Chlorophylle a

**Chl B** : Chlorophylle b

**Chl AB** : Chlorophylle totale (a + b)

**CG** : Cinétique de germination

**D0 / D50 / D100 / D150** : Concentrations de NaCl (0, 50, 100, 150 mM)

**G** : Génotype

**G% / TG** : Taux de germination (%)

**GMJ** : Germination moyenne journalière

**LC1 / LC2 / LC3** : Longueurs des coléoptiles 1, 2, et 3

**LR** : Longueur racinaire

**mM** : Millimolaire (unité de concentration)

**NaCl** : Chlorure de sodium

**PPDS (%)** : Plus Petite différence Significative

**PS / PF / PT** : Poids sec / frais / à turgescence

**SF** : Surface foliaire

**T1 / T2 / T3** : Fréquences d'irrigation (2, 4, 6 jours)

**TER / TRE** : Teneur relative en eau (%)

**VG** : Vitesse de germination

**ddl** : degré de liberté.

# Introduction

### Introduction :

La domestication des céréales, révolution agricole fondatrice, a profondément marqué l'évolution des sociétés humaines. Ces cultures restent aujourd'hui indispensables à l'alimentation mondiale grâce à leur adaptabilité climatique, leur cycle de production simplifié (semis, récolte, stockage) et leur forte densité nutritionnelle. Elles fournissent 57% des apports protéiques globaux, surpassant les tubercules et légumineuses (23%) et les produits animaux (20%), confirmant leur rôle vital pour la sécurité alimentaire (**Godon, 1982**).

Le blé domine la production céréalière mondiale et constitue la seconde source alimentaire après le riz, couvrant 15% des besoins énergétiques humains (**Bajji, 1999 cité par Mouellef, 2010**). Deux espèces prédominent : *Triticum durum* (blé dur) et *Triticum aestivum* (blé tendre) (**Hamadache, 2013**). L'orge (*Hordeum vulgare* L.), quatrième céréale mondiale (7% de la production), occupe en Algérie la deuxième place après le blé dur, représentant 35-40% des surfaces cultivées (**Rahal, 2015 ; Pal et al., 2012**).

Selon la **FAO**, en 2024, la production céréalière mondiale atteint 2,849 milliards de tonnes (-0,3% malgré des révisions positives pour le blé en Australie/Kazakhstan et l'orge en Australie). La production de blé s'établit à 787 millions de tonnes (-0,1%), affectée par des aléas climatiques en Europe, Ukraine, Turquie, Royaume-Uni et Maroc. La FAO anticipe cependant une reprise à 796 millions de tonnes en 2025 (+1%).

En Algérie, la céréaliculture est cruciale pour la sécurité alimentaire. Le blé, base de l'alimentation (60% des apports caloriques), génère une consommation annuelle de 11 millions de tonnes (2<sup>e</sup> rang nord-africain). Cette demande entraîne des importations record : 14 millions de tonnes de céréales prévues pour 2024/2025 (+4%), dont 9 millions de blé (+10%). Les principaux fournisseurs (France, Allemagne, Espagne, Amériques) limitent l'impact du conflit russo-ukrainien (4% des importations combinées) (**FAO, 2025**). Le triticale complète ce système comme ressource fourragère (**Fourar-Belaifa, 2015**).

Selon l'**USDA (mai 2025)**, la production algérienne de blé devrait croître de 11% pour atteindre 3 millions de tonnes en 2024/2025, tandis que celle d'orge est estimée à 1,2 million de tonnes. Cette dynamique pourrait hisser l'Algérie au 2<sup>e</sup> rang des producteurs nord-africains derrière l'Égypte, rééditant ainsi ses performances des campagnes 2020/2021 et 2022/2023.

## Introduction

---

La sécheresse et la salinité constituent les principales contraintes abiotiques affectant négativement la productivité agricole. Chaque année, elles provoquent la détérioration de superficies agricoles importantes. On estime qu'à l'échelle mondiale, un milliard d'hectares sont exposés à ces stress, dont près de 3,2 millions en Algérie (**Toumi et al., 2014**).

Les stades de **germination** et de croissance juvénile sont particulièrement vulnérables. Déficit hydrique et salinité abaissent fortement l'absorption d'eau par la graine (potentiel osmotique très bas), retardant l'imbibition et inhibant l'ouverture du radicule (**Khān et Weber, 2008**).

Sous des conditions de stress hydrique simulé (PEG -1,2 MPa), le **pourcentage de germination du blé peut chuter de plus de 50 %**. L'orge subit une baisse similaire ; par exemple, la **longueur racinaire peut être réduite d'environ 85 %** en situation de stress. Les semis stressés de ces deux cultures développent des racines et des pousses plus courtes, ce qui témoigne d'une **vigueur limitée**. À titre d'exemple, les génotypes d'orge tolérants parviennent à maintenir des racines de 15 à 20 mm, tandis que d'autres voient la croissance de leurs pousses presque complètement bloquée (**Shahzadi et al., 2022**). De manière générale, plus la salinité augmente, plus le temps de germination s'allonge et **plus l'indice de vigueur des plantules diminue** (**Khān et Weber, 2008**).

Ces effets précoces réduisent l'établissement des plantules et limitent le nombre de pieds, avec un impact dramatique sur le rendement final. Les céréales soumises à de fortes contraintes hydriques ou salines voient aussi apparaître des anomalies plus tard (floraison perturbée, stérilité des grains) (**Farooq et al., 2009**). Ainsi, des stress en amont se répercutent sur tout le cycle (perte de biomasse, baisse de la photosynthèse et de la fertilité (**Kadam et al., 2014**)).

Au-delà de l'émergence, la sécheresse provoque la fermeture stomatique via l'accumulation d'ABA, limitant l'évapotranspiration mais aussi la photosynthèse. La croissance des feuilles est stoppée (division cellulaire ralentie), les plantules se flétrissent et jaunissent (**Ullah et al., 2018**).

Confrontées à des conditions environnementales défavorables, les plantes ont développé des stratégies adaptatives reposant sur la mise en place de mécanismes de réponse spécifiques leur permettant de réajuster leur fonctionnement métabolique. La tolérance à ces contraintes constitue un phénomène multifactoriel complexe, impliquant l'interaction et la synergie de

## Introduction

---

divers composants biologiques, en vue d'assurer une réponse globale, coordonnée et efficiente. (Oukarroum, 2007).

Pour la sécheresse, le blé tendre limite l'évaporation par fermeture stomatique rapide (Bajji, 1999 cités par Mouellef, 2010), tandis que l'orge saharienne développe des racines jusqu'à 2,5 m pour accéder aux nappes (ICARDA, 2021). Contre la salinité, le riz halophyte expulse le sodium via des pompes  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  (Pal et al., 2012), et le blé dur algérien compartimente le sel dans ses vacuoles (Hamadache, 2013). Globalement, ces cas concrets en zones semi-arides confirment l'importance des mécanismes multifactoriels : osmolytes élevés, antioxydants actifs et architecture racinaire développée sont au cœur de la tolérance observée (Hadjji et al., 2024).

Afin de reproduire au plus près les conditions abiotiques sévères rencontrées en milieu réel, notre étude adopte une approche combinée rigoureuse. Le stress salin a été induit par l'application de solutions à concentrations croissantes de NaCl, tandis que le stress hydrique a été simulé en modulant les fréquences d'irrigation. Ainsi, les plantes ont été arrosées avec les mêmes solutions salines, mais à des intervalles variables, permettant d'imposer simultanément une contrainte osmotique et hydrique.

Cette stratégie expérimentale vise à évaluer de manière intégrée les réponses adaptatives des cultures face à un double stress, tel qu'il se manifeste dans les agroécosystèmes arides et semi-arides.

Dans le cadre de notre étude, nous avons tenté de répondre aux objectifs suivants :

- Évaluer le comportement germinatif et le développement post-germinatifs de quatre espèces céréalières d'intérêt agronomique : le blé dur (*Triticum durum*), le blé tendre (*Triticum aestivum*), l'orge (*Hordeum vulgare*) et le triticale (X *Triticosecale Wittmack*).
- Étudier l'impact du stress abiotique combiné (hydrique + salin), imposé uniquement à travers différentes concentrations de NaCl, sur la germination et la croissance initiale de ces espèces.
- Analyser et comparer les réponses morphologiques, physiologiques et biochimiques exprimées par les variétés testées face à ce stress combiné.

## Introduction

---

- Identifier les variétés ou géotypes les plus tolérants à ce type de stress, en vue de leur valorisation dans des programmes d'amélioration génétique et de culture en zones à contraintes abiotiques.

### ❖ *Hypothèses de travail :*

- Le stress combiné (salinité et déficit hydrique), induit par l'application de NaCl et la réduction de la fréquence d'irrigation, aura un impact significatif et négatif sur la germination et la croissance initiale des céréales.
- Les espèces céréalières étudiées présenteront des degrés de tolérance différenciés face au stress combiné, en fonction de leur nature génétique et de leurs mécanismes d'adaptation.
- Certaines variétés au sein d'une même espèce pourraient manifester des réponses morphologiques, physiologiques et biochimiques plus marquées, témoignant d'une meilleure capacité d'adaptation aux conditions de stress abiotique.

# **Matériels et méthodes**

### 1. Matériel végétal:

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé 7 variétés appartenant à 4 espèces céréalières d'intérêt agronomique : le blé dur (*Triticum durum Desf.*), le blé tendre (*Triticum aestivum L.*), l'orge (*Hordeum vulgare L.*) et le triticale (**X** *Triticosecale Wittmack*). Ces espèces ont été choisies en raison de leur importance dans la céréaliculture algérienne ainsi que de leur variabilité génétique potentielle face aux contraintes abiotiques (**Figure 1. Tableau 01**).



**Figure 2: Les semences des géotypes étudiées**

Le choix de ces géotypes s'est basé sur leur représentativité dans les systèmes de culture locaux et leur intérêt potentiel dans les programmes de sélection pour la tolérance au stress. L'étude de ces variétés a pour objectif principal évaluer l'impact combiné d'un stress salin (apport constant en NaCl) et d'un déficit hydrique induit par la réduction de la fréquence d'irrigation sur la germination, la croissance et les réponses morpho-physiologiques et biochimiques de ces céréales. Ces observations visent à tester notre hypothèse.

**Tableau 01** : Caractérisation des variétés céréalières utilisées dans l'étude

Nom de la variété	Type	Origine	Code
Hedba 03	Blé dur ( <i>Triticum durum</i> )	Algérie (Maghreb)	G1
Ofanto	Blé dur ( <i>Triticum durum</i> )	Italie	G2
Oued zinati	Blé dur ( <i>Triticum durum</i> )	Algérie – région d'Oued Zenati (Guelma, Est algérien)	G4
Anco marzio	Blé dur ( <i>Triticum durum</i> )	Italie	G7
El zina	Blé tendre ( <i>Triticum aestivum</i> )	Algérie	G3
Orge fouara ( <i>Hordeum vulgare</i> )	Céréale à paille (graminée annuelle)	Croissant fertile (Moyen-Orient : Turquie, Syrie, Irak, Iran)	G5
Triticale (oued dhabe)	Hybride interspécifique (blé × seigle)	Créé en <b>Europe</b> (premiers essais en <b>Écosse</b> et en <b>Allemagne</b> au 19 <sup>e</sup> siècle)	G6

## 2. Mise en place des essais

Les expérimentations ont été conduites au laboratoire (0,07) de la faculté SNV-STU de l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, à Bordj Bou Arreridj.

## 3. Le plan expérimental

La présente étude se propose d'évaluer l'effet de stress salin sur la germination et l'impact combiné des contraintes hydriques et salines sur la croissance précoce de sept génotypes céréalières. Un dispositif expérimental factoriel complet a été adopté, intégrant comme variables principales le génotype, le stress salin et le stress hydrique. La contrainte saline a été administrée par l'application de chlorure de sodium (NaCl) à différentes concentrations (**Tableau 02**).

- **Témoin** : 0 mM NaCl
- **Concentration 1** : 50 mM NaCl
- **Concentration 2** : 100 mM NaCl
- **Concentration 3** : 150 mM NaCl

**Tableau 02** : Concentrations de NaCl utilisées pour induire le stress salin.

	Na cl			Témoin
mM	50mM	100mM	150mM	l'eau distillé
g/l	2.9g/l	5.8g/l	8.7g/l	

Afin de caractériser le comportement de nos génotypes sous contrainte, nous avons modulé le **déficit hydrique** tout au long de l'essai, de la germination à la croissance, en appliquant différentes **fréquences d'irrigation**.

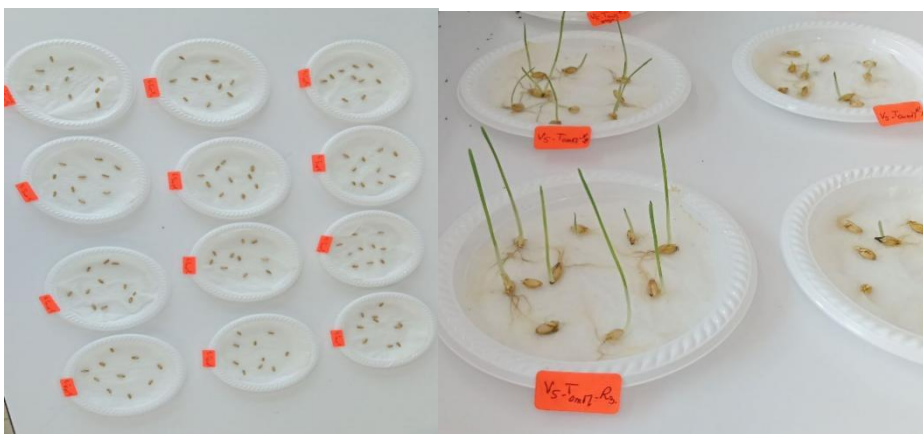
**Traitements (fréquence d'irrigation) :**

- **Témoin (T1) :** Irrigation tous les 2 jours.
- **Traitement 1 (T2) :** Irrigation tous les 4 jours.
- **Traitement 2 (T3) :** Irrigation tous les 6 jours.

Chaque traitement a été mené avec un minimum de trois réplicats. Chaque pot, au sein de chaque répétition, a été clairement identifié par une étiquette, et l'agencement des pots a été effectué de manière méthodique et organisée.

Les graines des sept génotypes ont été stérilisées et désinfectées à l'aide d'une solution d'eau de javel (hypochlorite de sodium à 5%) pendant 15 minutes puis rincées trois fois à l'eau distillée pour éliminer toute trace de chlore.

Pour la germination, un total de 120 graines par variété a été utilisées, soit 10 graines par répétition réparties dans des assiettes en plastique tapissées de trois couches de papier absorbant imbibées uniquement d'eau distillée. Trois répétitions ont été effectuées pour chaque génotype et pour chaque concentration de NaCl (0, 50, 100 et 150 mM). Un volume de 10 ml de la solution correspondante a été ajouté à chaque assiette toutes les 24 heures, pendant une durée de sept jours.



**Figure 3:** Dispositif utilisé pour la germination

Une fois la germination achevée, les plantules ont été transplantées dans des pots individuels. Chaque pot contenait un substrat homogène composé d'un mélange standard de sol et de terreau. L'ensemble des pots a été placé dans des conditions environnementales uniformes (température, lumière et humidité).

Pour chaque groupe de traitement, un volume identique (10 ml par pot) de solution saline correspondant au traitement spécifique a été appliqué. Cependant, les intervalles d'arrosage variaient selon les traitements (**T1** : tous les 2 jours, **T2** : tous les 4 jours et **T3** : tous les 6 jours)

Chaque traitement comprenait trois répétitions, et chaque répétition était subdivisée en trois sous-répétitions, contenant respectivement 3, 3 et 4 plantules. Ainsi, dans la première sous-répétition, les plantules étaient arrosées tous les 2 jours ; dans la deuxième, tous les 4 jours ; et dans la troisième, tous les 6 jours.

Ces irrigations ont été réalisées sur une période de 30 jours afin de suivre à la fois la phase de croissance initiale et l'évolution des réponses au stress.



**Figure 4:** Dispositif utilisé pour l'essai en pots.

#### **4. Paramètres étudiés :**

##### **4.1. Essai 01 : Effet des stress salin et hydrique sur la germination :**

###### **.4.1.1 Taux de germination final (G, %) :**

Ce paramètre permet d'évaluer la capacité germinative et se définit comme le rapport entre le nombre de graines ayant germé et le nombre total de graines mises en incubation (Côme, 1970 ; Amouri et Fyad Lamech, 2012).

$$G (\%) = 100(NGG/NTG)$$

Où :

- **G (%)** : représente le pourcentage de germination.
- **NGG** : représente le nombre de graines germées.
- **NTG** : représente le nombre total de graines incubées.

#### ***.4.1.2 Vitesse de germination (VG%)***

Elle permet d'exprimer l'énergie de germination responsable de l'épuisement des réserves de la graine. Selon Benidire et al., (2015), la vitesse de la germination est le temps moyen à la germination de 50% des graines. Elle est exprimée en pourcentage (%) par la relation suivante selon Kotowski, (1926) in Bentouati et al., (2019)

$$VG (\%) = \frac{N_1+N_2+N_3+\dots+N}{N_1T_1+N_2T_2+N_3T_3+\dots NT} \times 100$$

N1 = nombre des grains germes au temps T1

N2 = nombre des grains germes entre T1 et T2

#### ***.4.1.3. Cinétique de germination (CG, %) :***

Pour mieux appréhender la signification physiologique du comportement germinatif des variétés étudiées, le nombre de graines germées fut compté quotidiennement jusqu'au 7ème jour de l'expérience (Hajlaoui et al., 2007).

Il s'agit de calculer la vitesse de germination sous les différentes concentrations d'osmotiques utilisés pour imposer le stress. Elle est exprimée par le nombre de graines germées à 24, 48, 72, 96, 120, 144 et 168 h après le début de l'expérience.

#### ***.4.1.4. Germination moyenne journalière (GMJ, %) :***

La moyenne journalière de germination a été calculée selon (Osborne et al., 1993) en utilisant la formule suivante.

$$MDG (\%) = \text{Pourcentage de germination final} / \text{nombre de jours à la germination Finale.}$$

## 5. Essai 02 : Effet des stress salin et hydrique sur la croissance :

### 5.1. Paramètres morphologique étudié :

#### 5.1.1. Longueur de coléoptile :

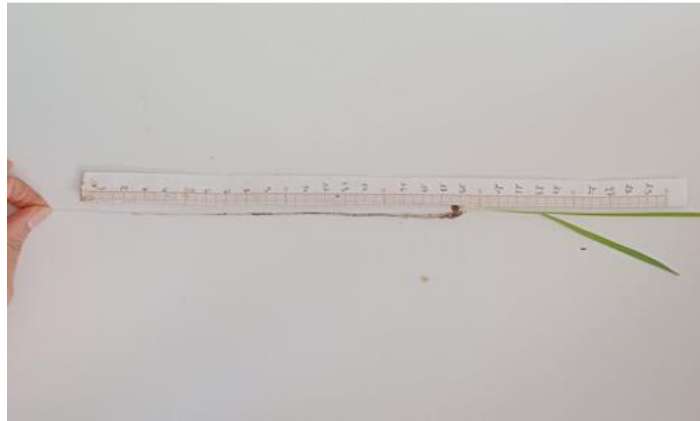
La longueur de la coléoptile est déterminée en mesurant la distance entre la base de la graine et le point d'émergence de la première feuille vraie. Cette mesure est réalisée à l'aide d'une règle graduée, Dans notre étude, une plantule représentative (la plus vigoureuse) a été sélectionnée dans chaque pot, et trois mesures ont été effectuées sur cette même plantule à raison d'une mesure par semaine pendant trois semaines consécutives(Lc1,Lc2,Lc3). La valeur finale retenue correspond à la moyenne des trois mesures réalisées. Cette méthode s'inspire partiellement de celle décrite par Bouatrous (2013).



**Figure 5:** La longueur de coléoptile.

#### 5.1.2. Longueur racinaire (LR, cm) :

La longueur racinaire correspond à celle de la racine la plus développée, mesurée à l'aide d'une réglette graduée, afin d'analyser la réponse de la plante face aux conditions de stress (Brahimi, 2017). Dans notre étude, une seule mesure a été effectuée par pot, en choisissant une plante représentative (la même que celle utilisée pour la mesure de la longueur du coléoptile ).



**Figure 6:** La longueur des racines.

### **5.1.3. La surface foliaire (cm<sup>2</sup>) :**

La surface foliaire moyenne a été estimée selon **Spagnoletti-Zeuli et Qualset (1990)** à l'aide de la formule :

$$SF \text{ (cm}^2\text{)} = 0.749 (L \times l)$$

**Où :**

**L** = longueur moyenne (cm),

**l** = largeur moyenne (cm),

**0.749** = coefficient de régression de la surface estimée à partir du papier grammage sur celle déduite par le produit (L x l).

Les mesures ont été effectuées sur les mêmes plantules que celles utilisées pour l'évaluation de la longueur du coléoptile (LC) et de la longueur racinaire (LR), assurant ainsi l'homogénéité des données morphologiques collectées.

## **5.2. Paramètre physiologique étudié :**

### **5.2.1. Teneur relative en eau (TRE, %) :**

La teneur relative en eau permet d'évaluer le niveau de saturation en eau ou de turgescence des plantes. Cette mesure a été réalisée selon la méthode proposée par **Barrs (1968)**.

Les feuilles sont coupées à la base du limbe, pesées immédiatement pour obtenir le poids frais (PF), puis placées dans des tubes à essai contenant de l'eau distillée et fermés hermétiquement, afin de maintenir une humidité relative saturante. Elles sont ensuite mises à

l'obscurité dans un endroit frais. Après 24 heures, les feuilles sont retirées, tamponnées avec un papier buvard pour éliminer l'excédent d'eau à la surface, puis pesées à nouveau pour obtenir le poids à pleine turgescence (PT). Les échantillons sont ensuite séchés à 80 °C pendant 48 heures dans une étuve, puis pesés pour obtenir le poids sec (PS).

Pour chaque génotype, des feuilles ont été prélevées à partir de chaque pot de chaque répétition afin d'assurer une représentativité adéquate de l'échantillonnage.

La teneur relative en eau est ensuite calculée en utilisant la formule de Clarke et McCraig (1982). 
$$\text{TRE (\%)} = [(\text{PF} - \text{PS}) / (\text{PT} - \text{PS})] \times 100$$

Où :

- **PF** : poids frais
- **PT** : poids de turgescence
- **PS** : poids sec



**Figure 7:** Matériel utilisé pour la teneur en eau.

### 5.3. Paramètre biochimique étudié :

#### 5.3.1. Taux de chlorophylle totale :

##### ❖ Principe

L'extraction des pigments chlorophylliens des tissus foliaires a été réalisée suivant la méthode de Mc Kinney et al. (1941) cités par Arnon (1949).

##### ❖ Mode opératoire

Broyer environ 0,1 à 0,5g de feuilles fraîches dans une solution d'acétone (80%), en présence de quelques milligrammes de sable pour optimiser la libération des pigments chlorophylliens. Après filtration, on procède à la lecture de la densité optique des filtrats à l'aide d'un spectrophotomètre aux longueurs d'ondes suivantes : 663 nm (pour chlorophylle a) et 646 nm (pour chlorophylle b) après étalonnage de l'appareil avec la solution témoin de l'acétone à 80%.



**Figure 8:** Dosage de la chlorophylle.

### ❖ Résultats

Les résultats sont exprimés en mg/g de MF et les concentrations en chlorophylle (a) et (b) sont déterminées à l'aide des équations suivantes :

- **Chl. (a) mg/g MF = [12,7\*DO (663) - 2,69\*DO (645)] \*0,1**
- **Chl. (b) mg/g MF = [22,9\*DO (645) - 4,69\*DO (663)] \*0,1**
- **Chl. Total mg/g MF = Chl (a) + Chl (b)**

### **Calcul de la teneur en chlorophylle de poids frais (mg /g PF) :**

Pour obtenir la teneur en chlorophylle par gramme de tissu végétal (mg/g), appliquez la formule :

$$\text{Teneur (mg/g)} = (\text{Concentration} \times \text{Volume d'extraction}) / \text{Masse de l'échantillon}$$

### ***6.Analyse statistique et visualisation des données:***

Pour l'analyse statistique, nous avons employé l'analyse de la variance (ANOVA) via le logiciel **XLSTAT**. Les résultats obtenus ont ensuite été interprétés. La visualisation des données,



# **Résultats et discussion**

## 1. Impact du stress salin sur le processus de germination

### 1.1. Effet de génotype :

L'analyse statistique révèle un effet très significatif du génotype ( $p < 0,001$ ) sur tous les caractères de germination évalués (TG %, VG %, CG-J2 à CG-J7 %, GMJ %). Les valeurs de F élevées indiquent une forte variabilité génétique, reflétant des différences notables de performance entre les génotypes (tableau 3). L'effet du génotype explique à lui seul 31,26 % de la variation totale observée pour le TG %, ce qui souligne son rôle déterminant dans le contrôle de la germination.

**Tableau 3** : Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de germination mesurés.

SV	ddl	TG %	VG %	CG-J2 %	CG-J3 %	CG-J4 %	CG-J5 %	CG-J6 %	CG-J7 %	GMJ %
$R^2$		0,90	0,81	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,69
F		19,63 ***	8,58* **	19,63 ***	19,63* **	19,63 ***	19,63* **	19,63 ***	19,63** *	4,63** *
Génotype	6	30,52 ***	15,04 ***	30,52 ***	30,52* **	30,52 ***	30,52* **	30,52 ***	30,52** *	11,14* **
Stress salin	3	102,1 ***	31,72 ***	102,1 0***	102,12 ***	102,1 1***	102,11 ***	102,1 2***	102,11* **	15,72* **
Génotype × Stress salin	18	2,25*	2,57* *	2,25*	2,25*	2,25*	2,25*	2,25*	2,25*	0,61 ns

SV = sources de variation. Ddl =degrés de liberté F =Valeur F (statistique F de Fisher).  $R^2$  =Coefficient de détermination. %TG =taux de germination (%), VG % = la vitesse de germination %, CG % =la cinétique de germination%,GMJ = Germination moyenne journalière (%), ns, \*\* et \*\*\* = Effets non significatifs et significatifs aux seuils de probabilité de 1 % et 0.1 %, respectivement.

Le génotype G5 (orge) enregistre les valeurs les plus élevées, avec un taux de germination (TG) de 80,83 %, une vitesse de germination (VG) de 45,45 %, ainsi qu'une cinétique journalière élevée de CG-J2 à CG-J7, atteignant 80,83 % dès le 7<sup>e</sup> jour. Sa germination moyenne journalière (GMJ) s'élève à 27,65 %, la plus élevée parmi tous les génotypes (tableau 4).

Le triticales (G6) suit avec des valeurs intermédiaires mais relativement élevées (TG = 53,33 %, VG = 41,24 %, GMJ = 19,42 %) (tableau 3), traduisant une dynamique germinative soutenue. Les génotypes G3 et G7 présentent des performances modérées et proches, avec des taux de germination respectifs de 51,67 % et 49,17 %, et des GMJ de 9,48 % et 8,17 % (tableau 4).

**Tableau 4** : Valeur moyenne de l'effet moyen génotype des indicateurs de germination mesurés

<i>Génotypes</i>	<b>TG %</b>	<b>VG %</b>	<b>CG-J2 %</b>	<b>CG-J3 %</b>	<b>CG-J4 %</b>	<b>CG-J5 %</b>	<b>CG-J6 %</b>	<b>CG-J7 %</b>	<b>GMJ %</b>
<b>G5</b>	80,83 a	45,45 a	13,47 a	26,94 a	40,42 a	53,89 a	67,36 a	80,83 a	27,65 a
<b>G6</b>	53,33 b	41,24 a	8,89 b	17,78 b	26,67 b	35,56 b	44,44 b	53,33 b	19,42 b
<b>G3</b>	51,67 b	25,35 b	8,61 b	17,22 b	25,83 b	34,44 b	43,06 b	51,67 b	9,48 c
<b>G7</b>	49,17 b	23,2 bc	8,19 b	16,39 b	24,58 b	32,78 b	40,97 b	49,17 b	8,17 c
<b>G2</b>	30,0 c	17,15 c	5,0 c	10,0 c	15,0 c	20,0 c	25,0 c	30,0 c	6,39 c
<b>G4</b>	23,33 c	18,33 bc	3,89 c	7,78 c	11,67 c	15,56 c	19,45 c	23,33 c	7,99 c
<b>G1</b>	20,83 c	22,7 bc	3,47 c	6,94 c	10,42 c	13,89 c	17,36 c	20,83 c	4,35 c
<b>Moyenne</b>	<b>44,17</b>	<b>27,63</b>	<b>7,36</b>	<b>14,72</b>	<b>22,08</b>	<b>29,45</b>	<b>36,81</b>	<b>44,17</b>	<b>11,92</b>
<b>Ppds</b>	<b>10,86</b>	<b>8,16</b>	<b>1,81</b>	<b>3,62</b>	<b>5,43</b>	<b>7,24</b>	<b>9,05</b>	<b>10,86</b>	<b>7,16</b>

%TG = Taux de germination (%), VG % = la vitesse de germination %, CG % = cinétique de germination %, GMJ = Germination moyenne journalière (%). Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5 %.

En revanche, les génotypes du blé dur G1, G2 et G4 affichent les valeurs les plus faibles pour tous les paramètres, notamment des TG inférieurs à 31 %, des vitesses de germination lentes et des GMJ ne dépassant pas 7,99 %. La progression quotidienne reste très faible chez ces génotypes, avec des valeurs de CG-J2 à CG-J7 nettement inférieures (tableau 4). La Ppds, estimée à 10,86 % pour TG, 8,16 % pour VG et 7,16 % pour GMJ, confirme la validité statistique des différences observées entre les génotypes.

Par ailleurs, l'analyse statistique effectuée à l'aide du test de Tukey a permis de regrouper les génotypes en groupes homogènes. Les lettres a, b, c apposées aux moyennes dans le tableau 4 illustrent ces regroupements. Le génotype G5 (orge), classé dans le groupe (a), se distingue significativement de tous les autres par ses performances supérieures. Les génotypes G6, G3 et G7, appartenant au groupe (b), présentent des valeurs intermédiaires sans différence significative entre eux. Enfin, G1, G2 et G4 se retrouvent dans le groupe (c), caractérisé par les résultats les plus faibles, traduisant une sensibilité accrue au stress salin.

Cette classification statistique permet une interprétation rigoureuse des différences observées, en mettant en évidence les génotypes les plus tolérants et en éliminant les écarts non significatifs.

### 1. 2. Effet du stress salin:

Les résultats obtenus mettent clairement en évidence l'effet inhibiteur de la salinité sur les paramètres germinatifs étudiés. L'élévation progressive de la concentration en NaCl entraîne une baisse significative du taux de germination (TG), de la vitesse de germination (VG) et de la germination moyenne journalière (GMJ). Le témoin a présenté les meilleures performances (TG = 80 %, GMJ = 20,87 %) (tableau 4), traduisant une germination rapide et régulière.

**Tableau 5** : Valeur moyenne de l'effet moyen du stress salin des indicateurs de germination mesurés

Traitement	TG %	VG %	CG- J2 %	CG- J3 %	CG-J4 %	CG- J5 %	CG-J6 %	CG-J7 %	GMJ %
<i>Témoin</i>	80,00 a	39,66 a	13,33 a	26,67 a	40,00 a	53,33 a	66,67 a	80,00 a	20,87 a
<i>50 mM</i>	52,86 b	35,72 a	8,81 b	17,62 b	26,43 b	35,24 b	44,05 b	52,86 b	14,85 b
<i>100 mM</i>	32,38 c	21,96 b	5,40 c	10,79 c	16,19 c	21,59 c	26,98 c	32,38 c	8,54 c
<i>150 mM</i>	11,43 d	13,18 c	1,90 d	3,81 d	5,71 d	7,62 d	9,52 d	11,43 d	3,43 c
<b>Moyenne</b>	<b>44,17</b>	<b>27,63</b>	<b>7,36</b>	<b>14,72</b>	<b>22,08</b>	<b>29,52</b>	<b>36,8</b>	<b>44,17</b>	<b>11,92</b>
<b>Ppds</b>	<b>8,20</b>	<b>6,17</b>	<b>1,37</b>	<b>2,74</b>	<b>4,1</b>	<b>5,47</b>	<b>6,84</b>	<b>8,21</b>	<b>5,41</b>
<i>Pr &gt; F (Modèle)</i>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
<i>Pr &gt; F (Concentration du stress)</i>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

%TG =Taux de germination (%), VG %= la vitesse de germination %, CG %=cinétique de germination%,GMJ = Germination moyenne journalière (%), **Pr > F** = p-valeur : si < 0,05 → résultat significatif.Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

Selon le tableau 5, à 50 mM, on observe une diminution notable (TG = 52,86 %, GMJ = 14,85 %), témoignant d'une sensibilité modérée au stress. Cette inhibition s'accroît à 100 mM, où la germination devient lente et irrégulière (TG = 32,38 %, GMJ = 8,54 %). À 150 mM, les valeurs chutent drastiquement (TG = 11,43 %, GMJ = 3,43 %), traduisant un blocage quasi total du processus germinatif.

L'analyse de la variance révèle des différences hautement significatives entre les traitements ( $p < 0,001$ ) (tableau 5), confirmant une relation inverse entre la concentration en NaCl et les performances germinatives. Ces résultats soulignent l'impact physiologique du sel et l'intérêt de sélectionner des géotypes capables de maintenir une activité germinative en conditions salines.

La variabilité est faible, ce qui confirme que les différences observées entre les traitements sont réelles et statistiquement valables.

En complément de ces observations, la classification des traitements selon le test de Tukey (tableau 5) a permis de dégager quatre groupes homogènes distincts. Le témoin (0 mM), classé dans le groupe (a), présente les performances les plus élevées. Le traitement à 50 mM, intégré dans le groupe (b), révèle une inhibition modérée. La concentration 100 mM, associée au groupe (c), entraîne une réduction importante de la germination, tandis que 150 mM, classée dans le groupe (d), représente le niveau de stress le plus sévère, avec des valeurs minimales.

Cette structuration en groupes homogènes offre une lecture statistique rigoureuse des effets du sel, et permet d'identifier avec précision les seuils critiques de tolérance à la salinité.

### ***1. 3. Interaction géotype × stress salin :***

L'interaction entre le géotype et le stress salin s'est révélée significative pour l'ensemble des paramètres de germination, à l'exception du germination moyen journalier (GMJ %), comme l'indiquent les valeurs de  $p < 0,01$  pour tous les caractères sauf GMJ ( $p = 0,87$ ) (tableau 2). Bien que les effets d'interaction présentent des carrés moyens inférieurs à ceux des effets principaux (géotype et stress salin seuls), leur signification statistique témoigne d'une variation différenciée de la réponse des géotypes selon le niveau de stress appliqué.

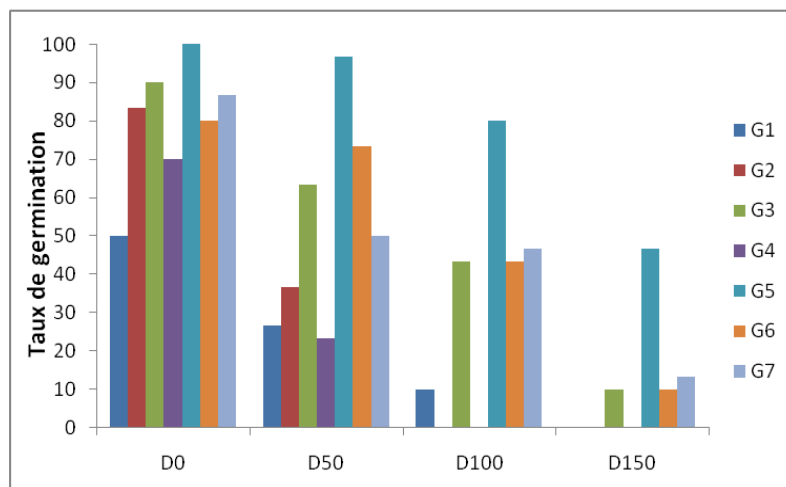
## **1.4. Effet du stress salin sur les indicateurs germinatifs mesurés**

### ***1.4.1. Variation des taux de germination (TG %) :***

L'évaluation de l'effet du stress salin sur la germination est un outil fiable pour estimer la tolérance des plantes à la salinité. Bien qu'elle ne reflète pas toutes les réponses physiologiques, elle donne une indication préliminaire utile de leur capacité à résister à ce stress.

Dans le but de mieux comprendre l'effet de la salinité sur la germination des sept variétés étudiées, les résultats des taux cumulés de germination sous stress salin sont présentés dans la figure 8.

Les données obtenues après une durée de traitement de sept jours, indiquent que les taux de germination des graines diminuent considérablement avec l'augmentation de la salinité. Ainsi, toutes les graines n'ont pas une capacité identique de tolérer la salinité (*Gimeno Gilles, 2009*).



**Figure 9:** Evolution de la capacité de germination sous condition contrôlé (0g/l) et sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 50,100,150 g/l) chez les sept génotypes étudiés.

Les résultats obtenus (Figure 8) mettent en évidence une réduction progressive du taux de germination avec l'augmentation de la concentration en NaCl (de D0 à D150). Cette tendance reflète l'effet inhibiteur bien connu du sel sur la germination, tel que rapporté dans plusieurs études antérieures (Adjel et Bouzerzour, 2004 ; Gholamin et Khayatnezhad, 2011 ; Mahmoodzadeh et al., 2013 ; Charushahi et al., 2015 ; Borlu et al., 2018).

À la concentration témoin (D0), l'ensemble des génotypes a affiché des taux de germination élevés, témoignant de la qualité physiologique des semences et de l'absence de dormance. Cependant, dès D50, une baisse significative est observée, particulièrement marquée chez Hebda, Ofanto et Oued Zenati, ce qui indique une sensibilité précoce au stress salin, comme déjà rapporté chez le blé dur (Benderradji, 2013 ; Lemekeddem et al., 2014).

L'orge (G5) se distingue par une résistance remarquable, conservant un taux de germination élevé jusqu'à D100 (~80 %) et un niveau encore appréciable à D150 (~50 %) (Figure 8). Ce comportement suggère la présence de mécanismes adaptatifs efficaces, tels qu'une meilleure rétention hydrique ou une régulation ionique optimale (Zeng et Shannon, 2000).

À D150, une inhibition quasi totale de la germination est enregistrée chez la majorité des génotypes, à l'exception notable de G3, G5 et G7. Cette baisse drastique peut être expliquée par la toxicité des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ , des déséquilibres nutritionnels, notamment du ratio  $\text{Na}^+ / \text{K}^+$ , et une diminution de l'activité enzymatique essentielle à la mobilisation des réserves (Gasmi et Dehiri, 2018 ; Prado et al., 2000).

Ces résultats corroborent les observations de Kaya et al. (2008), Okçu et al. (2005) et Dassa (2019), qui ont démontré une diminution marquée de la germination sous l'effet croissant de la salinité, mettant en lumière l'importance de la tolérance variétale dans des contextes de stress abiotique.

L'analyse statistique par ANOVA (Annexe 1) appuie ces observations. Elle montre des effets hautement significatifs ( $p < 0,001$ ) des facteurs génotype et concentration en sel, ainsi que de leur interaction. Le génotype a un effet marqué ( $F = 30,52$  ;  $p < 0,001$ ), indiquant une variabilité importante entre les génotypes.

De même, l'effet du stress salin est très significatif ( $F = 102,11$  ;  $p < 0,001$ ), confirmant que l'augmentation de la salinité inhibe la germination. L'interaction génotype  $\times$  concentration est également significative ( $F = 2,25$  ;  $p = 0,01$ ), suggérant que la réponse au stress salin varie d'un génotype à l'autre. Ces résultats soulignent l'importance de la tolérance variétale et renforcent la sélection de génotypes plus résistants à la salinité.

#### ***1.4.2. Variation de la Vitesse de germination (VG %) :***

Dans le but d'approfondir la compréhension physiologique du comportement germinatif des différentes variétés étudiées, un décompte quotidien des graines germées a été effectué jusqu'au septième jour de l'expérience.

L'analyse du graphique (**figure 9**) met en évidence une diminution progressive de la vitesse de germination en réponse à l'augmentation de l'intensité du stress sel en condition

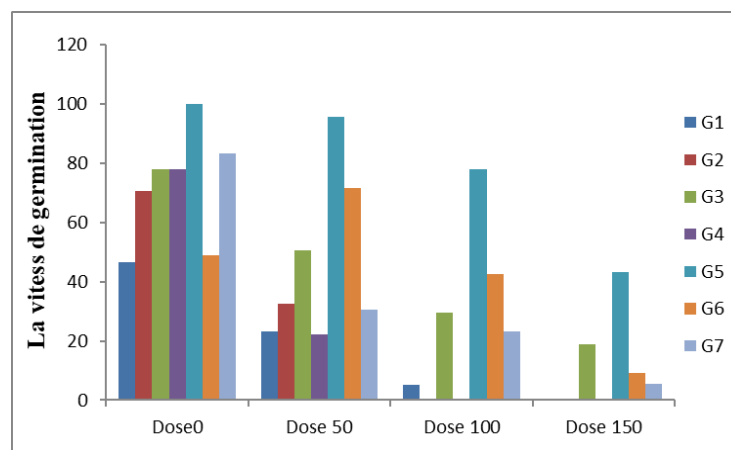
témoin (D0), tous les génotypes présentent des vitesses de germination élevées, avec un maximum observé chez le génotype G5, suivi par G4, G3 et G7.

Lorsque le stress atteint une intensité modérée (D50), une baisse notable est enregistrée chez l'ensemble des génotypes, à l'exception de l'orge et du triticale qui parviennent à maintenir une vitesse relativement élevée. Ce comportement suggère une certaine tolérance

Chez ces deux génotypes. En revanche, les génotypes de blé dur (G1, G2 et G4) montrent une sensibilité marquée dès ce niveau de contrainte (figure 9).

À un niveau de stress plus élevé (D100), la tendance baissière se confirme. G5 demeure le plus performant, suivi par G3, tandis que G1 et G2 affichent des vitesses proches de zéro, confirmant leur grande sensibilité au stress salin.

Enfin, à la dose maximale (D150), la vitesse de germination devient extrêmement faible pour la majorité des génotypes. Seule l'orge continue à exprimer une activité germinative significative, illustrant ainsi une tolérance remarquable aux conditions extrêmes (figure 9).



**Figure 10:** Effet des différentes concentrations de NaCl sur la vitesse de germination chez les sept génotypes étudiés.

Ces observations soulignent une corrélation négative entre l'intensité du stress et la vitesse de germination. Elles mettent en évidence la variabilité des réponses des génotypes étudiés, avec notamment l'orge (G5) qui se distingue par sa capacité d'adaptation supérieure.

Ces résultats concordent avec ceux rapportés par Dassa (2019), qui a montré que l'augmentation de la concentration en NaCl entraîne une réduction progressive de la vitesse de germination, phénomène également décrit par Hajlaoui et al. (2007).

L'analyse statistique (Annexe 2) révèle des effets hautement significatifs des génotypes ( $F = 15,04$  ;  $p < 0,001$ ) et des concentrations en sel ( $F = 31,72$  ;  $p < 0,001$ ) sur la vitesse de germination. Cela montre que la rapidité de germination varie selon le matériel génétique et l'intensité du stress salin. Certains génotypes maintiennent une vitesse élevée même sous contrainte, tandis que d'autres sont plus sensibles.

De plus, l'interaction entre génotype et Concentration est significative ( $F = 2,57$  ;  $p = 0,00$ ), indiquant que la réponse des génotypes dépend du niveau de salinité. Certains tolèrent mieux les faibles doses de NaCl mais échouent à

des concentrations plus élevées, alors que d'autres restent stables. Cette interaction souligne l'importance de considérer la réponse spécifique de chaque génotype dans la sélection variétale.

#### ***1.4.3. Variation de la cinétique de germination (CG %) :***

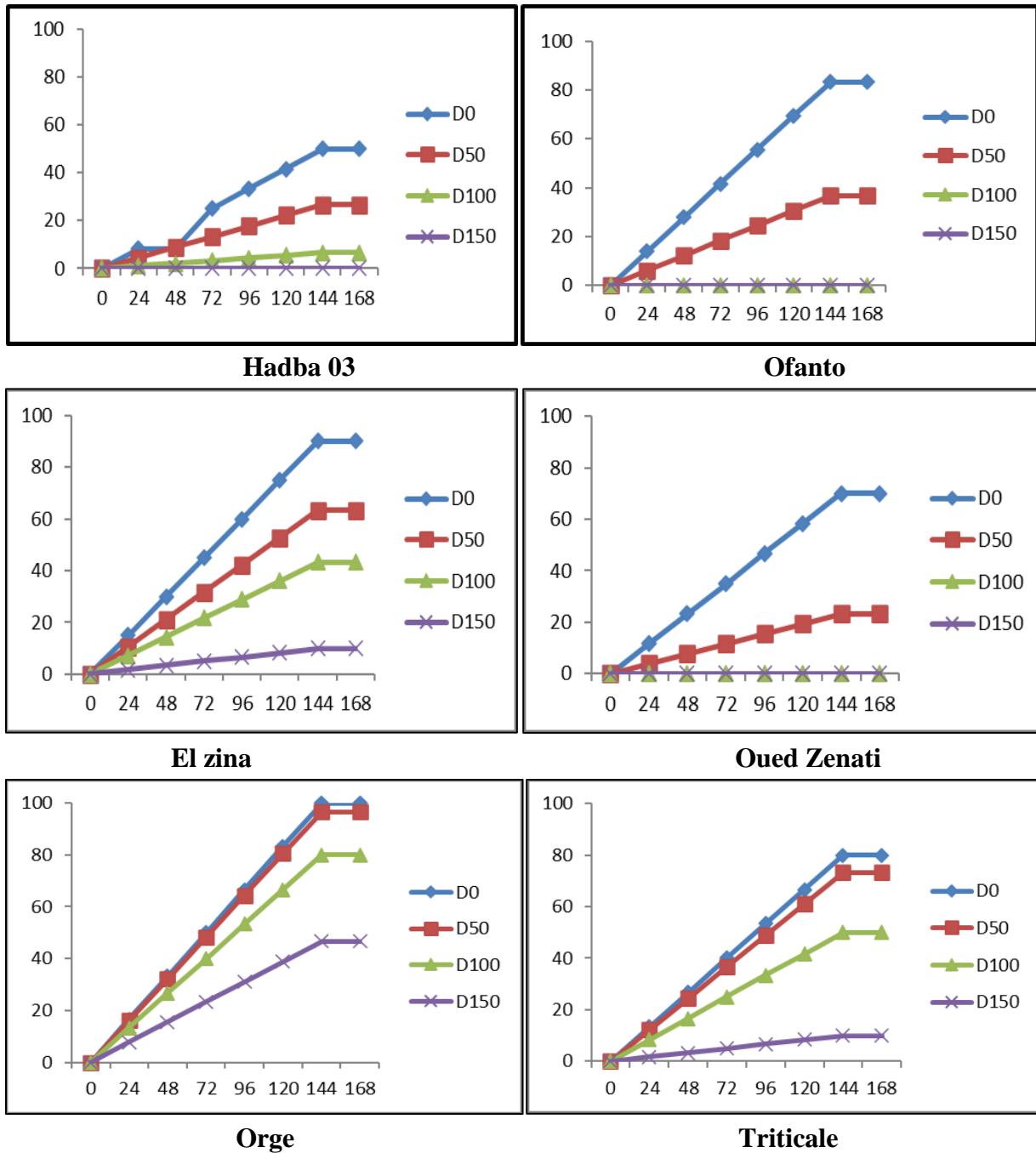
Selon la (**figure 10**), l'observation des courbes de germination obtenues pour les différents génotypes en fonction des concentrations croissantes en NaCl (D0, D50, D100 et D150) met en évidence des comportements différenciés face au stress salin, reflétant le potentiel adaptatif propre à chaque génotype.

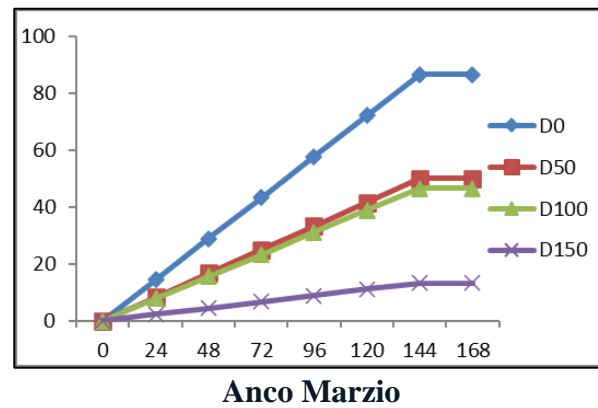
D'après les courbes de germination (**figure 10**), on observe une grande variabilité de réponse des génotypes face au stress salin. Hadba 03 (blé dur) montre une germination assez faible même en condition témoin (65 %), avec une nette chute dès D50 et une inhibition presque totale à partir de D100, ce qui reflète une forte sensibilité. Pour Ofanto (blé dur), bien que la germination soit rapide et élevée à D0, elle s'effondre brusquement dès D50, avec une absence totale de germination aux concentrations plus élevées, ce qui traduit une tolérance très limitée.

À l'inverse, El Zina (blé tendre) présente une cinétique régulière et stable jusqu'à D100, avec une activité encore présente à D150, ce qui suggère une tolérance intermédiaire au stress. Oued Zenati (blé dur), quant à lui, se montre très sensible : la germination ralentit fortement dès D50, et devient presque nulle à D100 et D150 (figure 10).

En revanche, l'orge conserve une germination rapide et élevée, même à D100 (>80 %) et reste active à D150, ce qui indique une très bonne tolérance. Le triticale affiche lui aussi une bonne stabilité jusqu'à D100 (50 %), avec une germination encore visible à D150, montrant ainsi une tolérance intermédiaire. Enfin, Anco Marzio (blé dur) répond mal au stress salin : à

partir de D50, on note une baisse progressive de la vitesse et du taux de germination, et à D150, la germination est quasiment absente (figure 10).





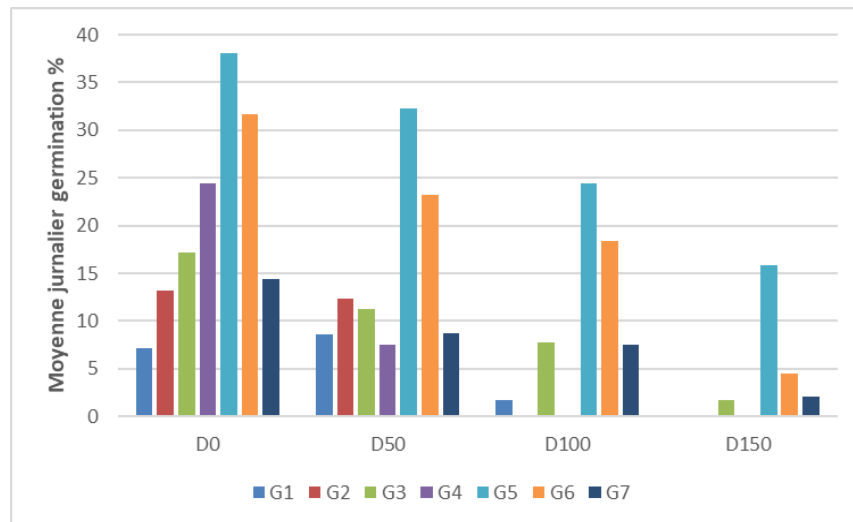
**Figure 11:** Effet de différentes concentrations de NaCl (0,50,100,150mM) sur la cinétique de germination du géotypes étudiées.

Ces observations rejoignent les conclusions de **Mrani et al. (2013)**, qui ont souligné la sensibilité du blé à l'action du NaCl dès le stade de germination. De même, **Okçu et al. (2005)** ont mis en évidence que l'augmentation des concentrations en sel provoque une réduction significative du taux de germination final, ce qui se manifeste clairement dans la cinétique de germination.

#### ***1.4.4. Variation de Germination Moyenne Journalière (GMJ, %):***

Les résultats obtenus (figure 11) montrent une diminution progressive de la GMJ avec l'augmentation de l'intensité des stress appliqués (de D0 à D150). En absence de stress (D0), l'orge et le triticale ont affiché les meilleures performances germinatives. Sous stress modéré (D50 et D100), une baisse de la GMJ a été enregistrée chez la majorité des groupes, bien que l'orge ait conservé une capacité de germination relativement stable. À un niveau de stress sévère (D150), une chute marquée de la GMJ a été observée, notamment chez les groupes G1, G3 et G7, traduisant une forte sensibilité au stress salin.

Ainsi, l'orge (G5) semble mieux tolérer ces contraintes, probablement en raison d'une meilleure capacité d'adaptation osmotique ou métabolique.



**Figure 12:** Effet de différentes concentrations de NaCl (0,50,100,150mM) sur la moyenne journalière de germination (GMJ%) du génotype étudié

Dassa (2019) a rapporté que l'augmentation de la concentration en NaCl entraîne une diminution significative de la GMJ. Des études similaires (Atiet-Allah et al., 2019 ; Mrani et al., 2013 ; Hajlaoui et al., 2007) confirment cette relation inverse entre la salinité et la GMJ, quel que soit le génotype considéré.

L'analyse de la variance (ANOVA), présentée en Annexe 3, met en évidence des différences hautement significatives de la germination moyenne journalière, aussi bien entre les génotypes qu'en fonction des concentrations de sel appliquées ( $p < 0,001$ ). Ces résultats traduisent à la fois une variabilité génétique marquée et une influence directe du stress salin sur la dynamique germinative.

En revanche, l'interaction génotype  $\times$  concentration n'est pas significative ( $p = 0,87$ ), indiquant que tous les génotypes réagissent de façon globalement similaire à l'augmentation du stress salin. La performance germinative dépend donc essentiellement du génotype et du niveau de stress, et non d'une interaction entre les deux.

## 2. Étude de la variabilité des traits de croissance selon les facteurs expérimentaux :

### 2.1. Analyse de la variance des réponses des plantules aux traitements :

L'analyse statistique a mis en évidence l'impact significatif du génotype, du stress salin, du stress hydrique ainsi que de leurs interactions sur plusieurs caractères morphologiques et biochimiques des jeunes plantules de génotype étudiée.

Le génotype a montré une influence très significative ( $p < 0,001$ ) sur l'ensemble des paramètres de croissance, notamment les longueurs des plantules (LC1, LC2, LC3), la longueur racinaire (LR) et la surface foliaire (SF), ainsi que sur les teneurs en chlorophylle A, B et totale (tableau 6). Cette variabilité révèle l'importance du patrimoine génétique dans la modulation des réponses aux contraintes environnementales.

Le stress salin a fortement réduit les dimensions morphologiques des plantules ( $p < 0,001$ ), en affectant aussi bien les parties aériennes que les racines. D'un point de vue biochimique, seule la teneur en chlorophylle A a été significativement altérée ( $p < 0,05$ ), tandis que les autres pigments n'ont pas réagi de manière significative à l'augmentation de la salinité (tableau 6).

Quant au stress hydrique, ses effets ont été limités aux longueurs LC2 et LC3 ( $p < 0,01$ ), sans modification notable des autres paramètres morphologiques. En revanche, il a provoqué une baisse marquée et très significative ( $p < 0,001$ ) des concentrations en pigments chlorophylliens (tableau 6), soulignant une sensibilité spécifique des fonctions photosynthétiques à la disponibilité en eau.

**Tableau 6:** Carrés moyens de l'analyse de la variance des paramètres de croissance mesurés.

SV	ddl	LC 1	LC2	LC 3	LR	SF	ddl	Chl A	Chl B	Chl AB
$R^2$		0,74	0,78	0,77	0,76	0,61		0,91	0,94	0,93
$F$		5,85 ***	7,23 ***	6,59 ***	6,49 ***	3,12 ***		20,27 ***	32,49 ***	28,51 ***
<i>Génotype</i>	6	8,37 ***	21,81 ***	19,27 ***	17,42 ***	7,86 ***	5	32,37 ***	32,67 ***	36,16 ***
<i>Stress salin (concentration)</i>	3	99,89 ***	76,72 ***	65,02 ***	65,95 ***	32,28 ***	1	6,46 *	1,59 ns	3,80 ns
<i>Stress hydrique (fréquence d'arrosage)</i>	2	0,28 ns	4,41 **	4,77 **	2,26 ns	0,82 ns	2	9,22 ***	19,85 ***	15,10 ***
<i>Génotype × Stress salin</i>	18	4,80 ***	8,27 ***	5,82 ***	6,62 ***	2,80 ***	5	11,87 ***	23,96 ***	18,66 ***
<i>Génotype × Stress hydrique</i>	12	0,80 ns	5,63 ***	1,73 ns	1,64 ns	1,46 ns	10	18,23 ***	28,08 ***	24,92 ***
<i>Stress salin × Stress hydrique</i>	6	0,98 ns	11,26 ***	0,61ns	1,16 ns	1,17 ns	2	25,24 ***	48,72 ***	40,26 ***
<i>Génotype × Stress salin × Stress hydrique</i>	36	0,91 ns	18,41 ***	2,61 ***	2,27 ***	1,07 ns	6	6,80 ***	8,04 ***	7,67 ***

SV = Source de variation, ddl = degré de liberté,  $F$  = Valeur F (statistique F de Fisher).  $R^2$  = Coefficient de détermination. LC = Longueur des coléoptiles (cm), LR = Longueur des racines (cm), SF = La surface foliaire (cm). ns, \*\* et \*\*\* = Effets non significatifs et significatifs aux seuils de probabilité de 1 % et 0.1 %, respectivement

Concernant les interactions, celle entre le génotype et le stress salin a affecté de manière significative tous les caractères analysés ( $p < 0,001$ ), traduisant des réponses génotypiques différenciées face à la salinité. L'interaction génotype  $\times$  stress hydrique a concerné uniquement la longueur LC2 et les paramètres biochimiques. Une réponse significative a également été notée pour la combinaison stress salin  $\times$  stress hydrique, impactant LC2 ainsi que les pigments chlorophylliens. Enfin, l'interaction triple a influencé plusieurs variables de croissance (LC2, LC3, LR, SF) ainsi que les teneurs en chlorophylle, mettant en évidence une interaction complexe entre les facteurs étudiés (tableau 6).

*a. Effet moyen 'genotype':*

Les résultats (tableau 7) mettent en évidence une variabilité marquée entre les génotypes étudiés. Sur le plan morphologique, El zina (G3), l'orge (G5) et le triticale (G6) présentent les meilleures longueurs foliaires et racinaires, ainsi qu'une surface foliaire bien développée, traduisant une bonne vigueur de croissance. À l'inverse, Hadba (G1) enregistre les valeurs les plus faibles pour l'ensemble de ces caractères, révélant une croissance nettement limitée. D'un point de vue physiologique, la teneur en eau relative est maximale chez Ofonto (G2), suivie d'Orge (G5) et Anco Marzio (G7), témoignant d'une meilleure capacité de rétention hydrique.

En revanche, Oued Zenati (G4) et le triticale (G6) affichent une stabilité hydrique plus faible, ce qui peut traduire une sensibilité au stress hydrique. Concernant l'aspect biochimique, Ofonto (G2), El Zina (G3) et l'orge (G5) se démarquent par leurs concentrations élevées en chlorophylles, indicatrices d'une activité photosynthétique soutenue. À l'opposé, Anco Marzio (G7) présente les teneurs en chlorophylles les plus faibles, ce qui reflète une efficacité photosynthétique limitée.

**Tableau 7:** Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de croissance mesurés.

<i>G</i>	LC1	LC2	LC3	LR	SF	TRE	ChL A	Chl B	Chl AB
<i>G1</i>	0,65 c	4,84 d	6,72 d	5,33 e	1,13 d				
<i>G2</i>	1,86 b	10,65 bc	12,29 c	10,80 bc	2,16 bc	68,28 a	0,74 a	0,93 a	1,67 a
<i>G3</i>	2,08 ab	14,61 a	18,80 a	14,75 a	3,83 a	51,48 bc	0,34 cd	0,52 cd	0,86 cd
<i>G4</i>	2,54 ab	15,62 a	16,53 ab	9,74 cd	2,74 b	43,66 c	0,39 c	0,58 c	1,00 c
<i>G5</i>	2,91 a	8,27 c	9,28 d	8,19 d	2,34 bc	63,96 ab	0,57 b	0,77 b	1,35 b
<i>G6</i>	2,69 ab	15,37 a	16,59 ab	12,64 ab	2,33 bc	49,08 c	0,41 c	0,59 c	1,35 b
<i>G7</i>	0,83 c	10,68 b	14,24 bc	13,56 a	1,81 cd	62,31 ab	0,29 d	0,48 d	0,77 d
<i>Moy</i>	<b>1,94</b>	<b>11,43</b>	<b>13,49</b>	<b>10,72</b>	<b>2,33</b>	<b>56,46</b>	<b>0,46</b>	<b>0,645</b>	<b>1,103</b>
<i>Ppds (5 %)</i>	<b>0,86</b>	<b>2,4</b>	<b>2,74</b>	<b>2,18</b>	<b>0,83</b>	<b>12,42</b>	<b>0,09</b>	<b>0,09</b>	<b>0,16</b>

LC = Longueur des coléoptiles (cm), LR = Longueur des racines (cm), SF = La surface foliaire (cm<sup>2</sup>). TER: La teneur en eau, Chl A : Chlorophylle A, Chl B : Chlorophylle B. Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

En somme, chaque génotype révèle un profil spécifique : *G3* et *G5* se distinguent par leur combinaison de performances morphologiques et biochimiques, *G2* par sa résilience hydrique, tandis que *G1* apparaît globalement comme le plus limité. Cette diversité phénotypique

constitue une base précieuse pour la sélection de génotypes adaptés aux conditions de stress abiotique.

L'analyse des groupes homogènes révèle une différenciation nette entre les génotypes selon leurs performances. Les génotypes G2, G3, G4, G5 et G6 se retrouvent majoritairement dans les groupes A ou B, indiquant des réponses statistiquement supérieures ou intermédiaires aux différents stress. En particulier, G3 et G2 se distinguent respectivement par leurs performances morpho-physiologiques et biochimiques : G3 occupe le groupe A pour la longueur racinaire, la surface foliaire et la chlorophylle totale, tandis que G2 se classe dans les groupes supérieurs pour la teneur en eau relative et les chlorophylles A, B et totales, traduisant une meilleure stabilité physiologique et photosynthétique. À l'opposé, G1 est systématiquement relégué aux groupes C ou D, ce qui reflète une faible aptitude adaptative face aux contraintes abiotiques.

Ces regroupements homogènes renforcent les conclusions de l'analyse comparative en consolidant l'identification des génotypes les plus prometteurs pour la sélection variétale en conditions de stress combiné.

#### ***b. Effet moyen 'Stress salin' :***

L'analyse statistique des différents paramètres mesurés révèle une réponse significative des plants au stress salin, avec des effets marqués selon les doses de NaCl. Les longueurs des coléoptiles (LC1, LC2, LC3), des racines (LR), et la surface foliaire (SF) diminuent progressivement avec l'augmentation de la salinité. Les témoins conservent les valeurs les plus élevées, tandis que les doses de 100 ml et 150 ml montrent des réductions sévères, particulièrement à 150 ml, indiquant une forte sensibilité au stress. En revanche, la teneur relative en eau (TRE) ne montre pas de variation significative selon les traitements ( $p = 0,23$ ), ce qui pourrait s'expliquer par une capacité de rétention hydrique relativement stable malgré le stress salin.

Concernant les pigments photosynthétiques, une chute brutale de la chlorophylle A, B et totale (Chlo A, Chlo B, Chlor AB) est observée dès 100 ml, où ces pigments deviennent indétectables, traduisant une inhibition quasi totale de l'activité chlorophyllienne sous forte salinité. L'analyse de variance confirme la significativité des effets ( $p < 0,001$  pour la plupart des paramètres) (tableau 8).

**Tableau 8 :** Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress salin' des caractères de croissance mesurés.

	LC 1	LC 2	LC 3	LR	SF	TRE	Chlo A	Chlo B	Chlor AB
<i>témoins</i>	5,37 a	18,60 a	21,06 a	16,50 a	3,90 a	51,15 a	0,51 a	0,71 a	1,22 a
<i>50 ml</i>	1,36 b	12,22 b	15,09 b	12,22 b	2,79 b	59,22 a	0,37 b	0,54 b	0,91 b
<i>100 ml</i>	0,76 bc	9,03 c	10,77 c	8,98 c	1,61 c	55,40 a	0	0	0
<i>150 ml</i>	0,27 c	5,88 d	7,06 d	5,16 d	1,04 c	59,27 a	0	0	0
<i>Pr &gt; F (Modèle)</i>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,05	< 0,001	< 0,001	< 0,001
<i>Pr &gt; F (Stress salin)</i>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,23	0,01	0,21	0,06
<i>Moyenne</i>	<b>1,94</b>	<b>11,93</b>	<b>13,99</b>	<b>10,72</b>	<b>2,33</b>	<b>56,26</b>	<b>0,22</b>	<b>0,31</b>	<b>0,53</b>
<i>Ppds %</i>	<b>0,65</b>	<b>1,81</b>	<b>2,07</b>	<b>1,65</b>	<b>0,63</b>	<b>10,14</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,1</b>

LC = Longueur des coléoptiles (cm), LR = Longueur des racines (cm), SF = La surface foliaire (cm<sup>2</sup>). TER: La teneur en eau, Chl A : Chlorophylle A, Chl B : Chlorophylle B. Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

### *c. Effet moyen 'Stress hydrique' :*

L'évolution des paramètres mesurés sous stress hydrique révèle des variations modérées au fil du temps. La croissance semble légèrement affectée, notamment au niveau de la longueur du coléoptile 2 (LC2), du coléoptile 3 (LC3) et des racines (LR), avec une tendance générale à la baisse. La surface foliaire (SF), quant à elle, reste relativement stable, indiquant une certaine résistance morphologique à court terme. La longueur du coléoptile 1 (LC1) ne montre pas de variation significative entre les durées (2, 4 et 6 jours), ce qui reflète une stabilité de ce paramètre face au déficit hydrique (tableau 9).

Du côté physiologique, les teneurs en chlorophylle (Chl A, B et totale) augmentent significativement au fil du temps, traduisant une possible réponse adaptative au stress hydrique visant à maintenir l'activité photosynthétique. Les tests statistiques montrent des effets significatifs du stress pour la plupart des paramètres, notamment sur les pigments chlorophylliens ( $p < 0,001$ ), ce qui souligne l'impact physiologique du déficit hydrique (tableau 9). Les faibles valeurs de PPSD % (entre 0,06 et 1,79) traduisent une bonne homogénéité et fiabilité des données.

**Tableau 9 :** Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress hydrique' des caractères de croissance mesurés.

	LC 1	LC 2	LC 3	LR	SF	Chl A	Chl B	Chl AB
<i>2 jours</i>	1,84 a	12,25 a	14,78 a	11,57 a	2,47 a	0,37 b	0,51 c	0,88 c
<i>4 jours</i>	1,92 a	11,56 ab	13,72 ab	10,51 ab	2,40 a	0,45 a	0,64 b	1,09 b
<i>6 jours</i>	2,05 a	10,48 b	11,98 b	10,07 b	2,14 a	0,51 a	0,73 a	1,24 a
<i>Pr &gt; F (Modèle)</i>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
<i>Pr &gt; F (Stress hydrique)</i>	0,76	0,01	0,01	0,11	0,44	< 0,001	< 0,001	< 0,001
<i>Moyenne</i>	<b>1,94</b>	<b>11,43</b>	<b>13,49</b>	<b>10,72</b>	<b>2,34</b>	<b>0,44</b>	<b>0,63</b>	<b>1,07</b>
<i>Ppds %</i>	<b>0,56</b>	<b>1,57</b>	<b>1,79</b>	<b>1,43</b>	<b>0,54</b>	<b>0,06</b>	<b>0,06</b>	<b>0,12</b>

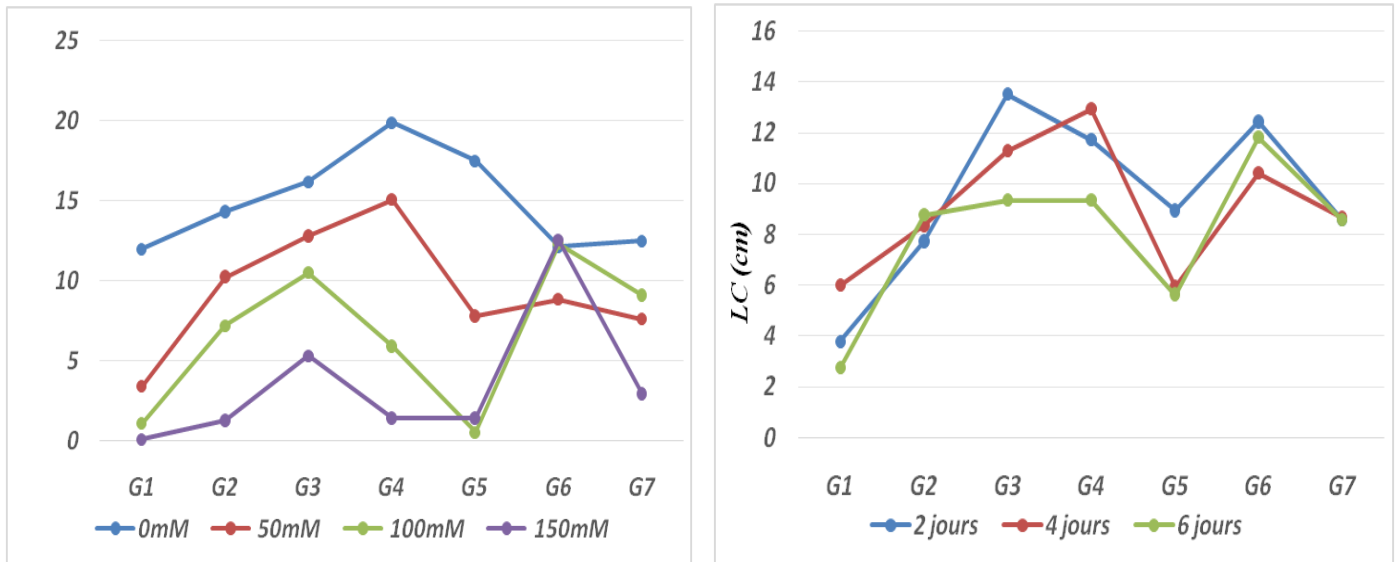
LC = Longueur des coléoptiles (cm), LR = Longueur des racines (cm), SF = La surface foliaire (cm<sup>2</sup>), Chl A : Chlorophylle A, Chl B : Chlorophylle B. Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

## 2.2. Effet du stress salin et hydrique sur les indicateurs de croissances mesuré

### 2.2.1. Évolution des longueurs de coléoptile (LC, cm) :

La Figure 12 représente la moyenne de trois mesures effectuées (Lc1, Lc2, Lc3), montre l'évaluation de la longueur de la coléoptile en conditions de stress salin (NaCl) et hydrique (fréquences d'arrosage). Elle met en évidence une variabilité significative entre les génotypes, accentuée par l'intensité croissante du stress.

Sous stress salin, une réduction progressive de la longueur est observée avec l'augmentation des concentrations. Le génotype (G4) Oued Zenati présente la plus grande longueur à 0 mM, mais subit une baisse marquée à 150 mM, traduisant une sensibilité élevée au sel. À l'inverse, Triticale (G6) et Anco Marzio (G7) conservent des longueurs plus stables, indiquant une meilleure tolérance au stress salin. En revanche, Orge (G5) et surtout Hadba (G1) ont présenté les longueurs les plus faibles dès les concentrations intermédiaires, ce qui traduit une forte sensibilité au sel.



**Figure 12 :** Évolution de la longueur de coléoptile sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50,100 et 150 mM) et sous condition de stress hydrique (2,4,6 jours) chez les génotypes étudiés.

Concernant le stress hydrique, une amélioration de la croissance est notée entre 2 et 4 jours d'arrosage, suivie d'une légère baisse à 6 jours. Les génotypes El Zina (G3), Oued Zenati (G4) et Triticale (G6) ont maintenu les longueurs de coléoptile les plus élevées, suggérant une bonne adaptation au stress hydrique. Ils se distinguent par leur capacité à conserver une croissance relativement stable même lorsque l'irrigation est espacée. Anco Marzio (G7) et Ofanto (G2) ont affiché une réponse intermédiaire, avec une légère réduction de la croissance à 6 jours, indiquant une tolérance modérée (Figure 12).

En revanche, les génotypes Orge (G5) et surtout Hadba (G1) ont enregistré les longueurs les plus faibles, montrant ainsi une forte sensibilité au déficit hydrique. Les génotypes G6 et G3 se démarquent par leur stabilité et leur tolérance combinée aux deux types de stress, ce qui en fait des candidats prometteurs pour des environnements contraignants.

La longueur de la coléoptile est un paramètre clé reflétant la vigueur initiale des plantules, fortement sensible aux contraintes abiotiques. Dans notre étude, une diminution significative de cette longueur a été observée sous l'effet du stress salin et hydrique.

Sous stress salin, l'augmentation de la concentration en NaCl a entraîné une réduction progressive de la longueur, en accord avec les résultats de Fellahi et al. (2019) et Kadri et al. (2009). Cette inhibition est généralement liée à une désorganisation des processus d'élongation et une faible aptitude à l'osmorégulation (Moud & Maghsoudi, 2008). Des réductions allant jusqu'à 80 % ont été rapportées chez le blé dur à fortes concentrations (Gasmi & Dehiri, 2018 ; Ben Hebireche, 2011), ce qui confirme les résultats obtenus dans notre essai.

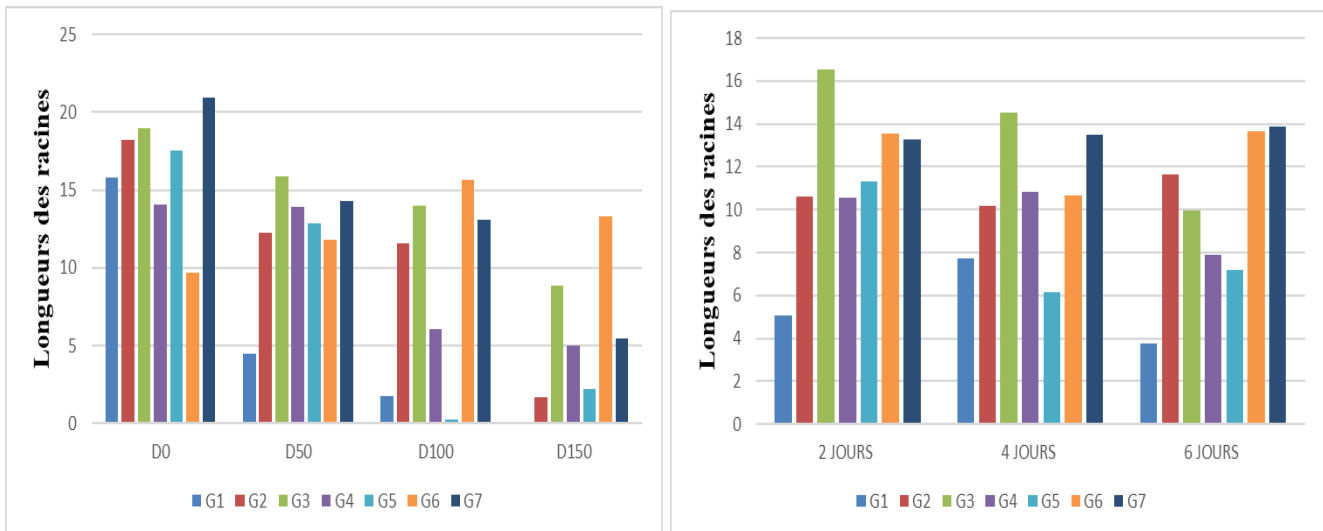
En conditions de stress hydrique, l'impact de l'espacement de l'arrosage sur la croissance de la coléoptile dans notre essai confirme les conclusions de Farooq et al. (2009) et Khayatnezhad et al. (2010). De plus, les génotypes ayant maintenu une bonne croissance valident les observations de Saddozai et al. (2025), qui soulignent l'intérêt agronomique des coléoptiles longs en conditions de déficit hydrique. Ainsi, les réponses observées dans notre étude soutiennent l'idée que la longueur de la coléoptile constitue un critère fiable pour la sélection de génotypes tolérants à la salinité et à la sécheresse.

### **2.2.2. Évolution des Longueurs racinaire (LR, cm) :**

L'analyse des longueurs des racines sous stress salin et hydrique révèle une variabilité considérable entre les différents génotypes étudiés (G1 à G7). En condition témoin, tous les génotypes présentent une croissance racinaire vigoureuse, avec des longueurs variantes entre 10 et plus de 20 cm, traduisant un développement normal en absence de stress (figure 13).

Toutefois, dès l'introduction du stress salin (à partir de D50), une réduction marquée est observée, en particulier chez G1 et G5, tandis que G3 et G4 conservent des longueurs relativement élevées, suggérant une certaine tolérance à la salinité modérée. À des niveaux plus sévères (D100 et D150), la chute de croissance devient plus accentuée ; néanmoins, G6 montre une capacité remarquable à maintenir des longueurs racinaires supérieures, contrairement à G1 et G2, qui révèlent une forte sensibilité (figure 13).

Concernant le stress hydrique, après deux jours, la plupart des génotypes conservent une croissance notable, avec une performance remarquable de G3. Au quatrième jour, une légère baisse est constatée, bien que G3 et G7 affichent une relative stabilité. Enfin, à six jours de stress, les réductions deviennent plus prononcées, notamment chez G1 et G5, alors que G6 et G7 maintiennent des longueurs racinaires importantes (figure 13). indiquant une meilleure aptitude à tolérer le déficit hydrique prolongé.



**Figure 13** : Évolution de la longueur des racines sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50,100 et 150 mM) et sous condition de stress hydrique (2,4,6 jours) chez les géotypes étudiés.

Gasmi et Dehiri (2018) ont mis en évidence une réduction de la longueur et du nombre des racines en réponse à l'intensification du stress. De son côté, Benderradji (2016) rapporte qu'une exposition prolongée au stress salin entraîne une diminution marquée de ces paramètres racinaires. Cette réduction serait probablement liée à un blocage des processus de division et d'élongation cellulaire au niveau des tissus racinaires, comme le suggèrent Fraser et al. (1990).

Sous des conditions de stress hydrique, la capacité des plantes à absorber l'eau dépend fortement de la croissance et du développement de leur système racinaire. Selon Benderradji et al. (2016), le déficit hydrique entraîne une diminution importante de la longueur et du nombre des racines, ce qui pourrait être attribué à un arrêt de la division et de l'élongation cellulaire au niveau des racines.

L'analyse de la variance (Annexe 4) met en évidence des effets hautement significatifs du géotype ( $F = 17,42$  ;  $p < 0,001$ ) et du stress salin ( $F = 65,95$  ;  $p < 0,001$ ) sur le paramètre étudié, traduisant une variabilité importante liée au matériel génétique et à la concentration en sel. L'interaction Géotype  $\times$  Stress salin est également très significative ( $F = 6,62$  ;  $p < 0,001$ ), indiquant que la réponse au sel dépend du géotype. L'interaction triple Géotype  $\times$  Stress salin  $\times$  Stress hydrique présente aussi un effet significatif ( $F = 2,27$  ;  $p < 0,001$ ), soulignant la complexité des réponses croisées aux deux types de stress. En revanche, le stress hydrique seul ( $p = 0,11$ ) ainsi que ses interactions bilatérales avec le géotype ( $p = 0,09$ ) ou avec le stress

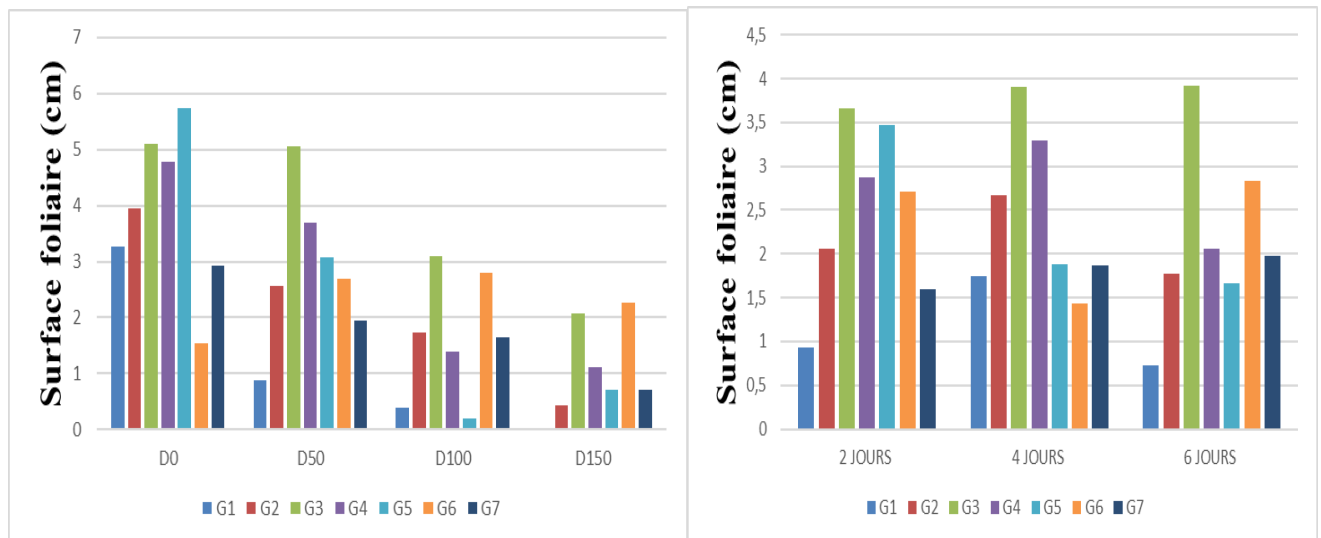
salin ( $p = 0,33$ ) ne sont pas significatifs, suggérant une influence plus limitée dans les conditions expérimentales appliquées.

### 2.2.3. La surface foliaire :

La dynamique de la surface foliaire sous stress salin met en évidence une diminution progressive en fonction de l'augmentation des concentrations en NaCl, traduisant une réponse physiologique différenciée entre géotypes.

Selon la figure 14, à 0 mM (D0), G5 et G4 enregistrent les surfaces maximales avec respectivement 5,8 et 4,8 unités, tandis que G6 reste inférieur (1,5 unité). À 50 mM (D50), la diminution devient notable, bien que G4 maintienne encore 5 unités, alors que G1 et G2 chutent autour de 1 à 2 unités. Sous 100 mM (D100), la plupart des géotypes voient leurs surfaces réduites en dessous de 2 unités, excepté G4 et G6 qui conservent respectivement environ 3 et 2 unités. Enfin, à 150 mM (D150), les surfaces foliaires atteignent des valeurs très faibles chez G1, G2 et G3 (environ 0,5 unité), tandis que G4 et G6 se maintiennent légèrement au-dessus de 1 unité, témoignant d'une meilleure tolérance au stress salin.

L'évolution de la surface foliaire sous stress hydrique met en évidence une variabilité inter-génotypique significative. Dès les premiers jours de stress, certains géotypes comme G3, G4 et G5 conservent des surfaces relativement élevées (autour de 3,3 à 4 unités), traduisant une bonne capacité de maintien de la croissance foliaire. En particulier, G3 maintient des valeurs stables tout au long de la période (4 unités), indiquant une tolérance marquée à la sécheresse prolongée. En revanche, des géotypes tels que G1 et G6 présentent des surfaces foliaires nettement plus faibles (variant entre 0,8 et 2 unités), dès les premiers stades pour G1, ce qui reflète une sensibilité précoce et persistante au déficit hydrique. Ainsi, la stabilité des surfaces élevées chez G3 et G4 contraste avec la chute rapide observée chez G1 et G6, soulignant des différences importantes en termes de résilience physiologique (figure 14).



**Figure 14** : Évolution de surface foliaire sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50, 100 et 150 mM) et sous condition de stress hydrique (2,4,6 jours) chez les géotypes étudiés.

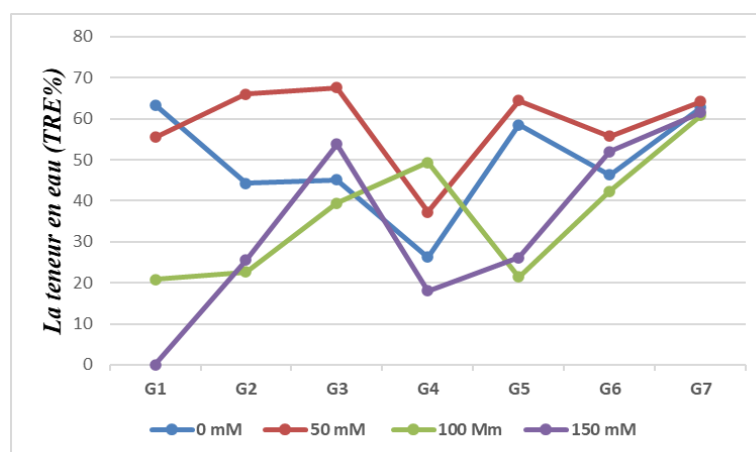
Selon plusieurs auteurs, la surface foliaire constitue un paramètre sensible aux contraintes abiotiques telles que la salinité et le déficit hydrique. Chez les espèces céréalières, la croissance foliaire est généralement plus affectée que la croissance racinaire en présence de sel (Lahouel, 2014 ; Hamza, 1982). Une salinité élevée réduit significativement la longueur des organes végétatifs et le nombre de feuilles, entraînant une baisse progressive de la surface foliaire totale (Bakht et al., 2011 ; Ben Khaled et al., 2007). En situation de sécheresse, cette réduction s'inscrit dans un mécanisme d'adaptation, la plante limitant sa surface foliaire pour réduire la transpiration et préserver ses ressources hydriques (Lebon et al., 2004 ; Ferryra et al., 2004).

Les résultats (Annexe 5) montrent un effet significatif du géotype ( $p < 0,001$ ) et du stress salin ( $p < 0,001$ ) sur la variable étudiée. Cela indique que la performance des plantes varie selon leur patrimoine génétique et selon le niveau de salinité. En revanche, le stress hydrique n'a pas d'effet significatif ( $p = 0,44$ ). Parmi les interactions, seule celle entre géotype et stress salin est significative ( $p < 0,001$ ), ce qui suggère que les géotypes ne réagissent pas tous de la même manière à la salinité. Les autres interactions (incluant le stress hydrique) sont non significatives.

#### 2.2.4. Teneur relative en eau (TRE, %) :

Les effets du stress salin sur la teneur en eau révèlent des comportements contrastés entre les génotypes. À un niveau élevé de salinité (150 mM), G6 (Triticale) et G7 (Anco Marzio) se distinguent par leur capacité à maintenir des taux hydriques relativement importants (52–61 %), traduisant une tolérance accrue. En revanche, G3 (El Zina) et G4 (Oued Zenati) affichent les niveaux les plus bas (15–17 %), témoignant d'une forte sensibilité. Cette tendance est déjà perceptible dès 100 mM, où la majorité des génotypes subissent une chute significative de leur teneur en eau (figure 15).

Fait remarquable, G2 (Ofanto) et G3 conservent encore des niveaux supérieurs à 50 mM (67–69 %), ce qui suggère une activation efficace des mécanismes d'ajustement osmotique. En situation témoin (D0), G1 (Hadba) et G7 présentent les meilleures capacités de rétention (63 %), tandis que G4 reste faible (25 %), ce qui pourrait expliquer sa vulnérabilité progressive face à la contrainte saline (figure 15).



**Figure 15 :** Évolution de la teneur en eau sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50, 100 et 150 mM)

Le stress salin et hydrique perturbe l'état hydrique des plantes, provoquant un dessèchement foliaire et une réduction de la teneur en eau (Ouhaddach et al., 2015). Cette déshydratation est principalement causée par l'accumulation excessive des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans le cytoplasme, dépassant la capacité de compartimentation vacuolaire et menant au flétrissement chez les plantes sensibles (Achour et al., 2015).

Ces observations concordent avec les résultats obtenus dans notre étude, où une diminution significative de la teneur en eau a été enregistrée chez certains génotypes sensibles sous stress salin élevé, confirmant les effets déshydratants rapportés par la littérature.

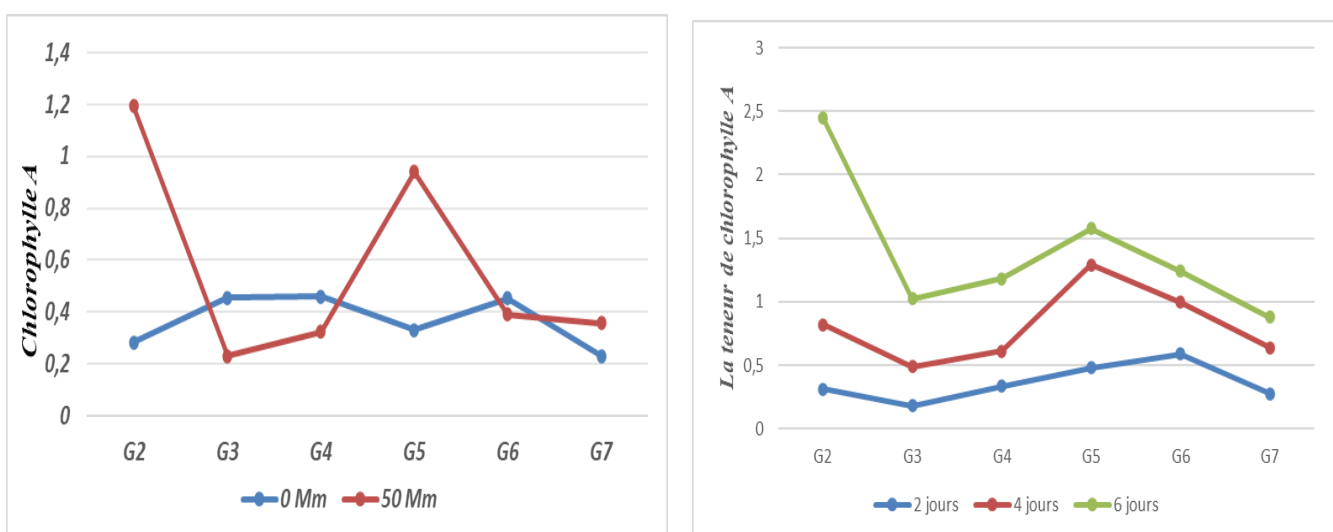
L'évaluation des résultats (Annexe 6) a révélé un effet significatif du facteur génotype ( $p = 0,01$ ), ce qui reflète une variabilité marquée entre les différents génotypes analysés. À l'inverse, l'effet du stress salin s'est révélé non significatif ( $p = 0,31$ ), indiquant que les variations de salinité n'ont pas eu d'impact notable sur la variable étudiée. Par ailleurs, l'interaction entre le génotype et le stress salin n'a pas présenté d'effet significatif ( $p = 0,28$ ), traduisant une réponse relativement uniforme des génotypes face aux différents niveaux de stress salin.

### 2.2.5. Evolution de la teneur en chlorophylle :

#### ➤ Chlorophylle A :

En condition de stress salin (50 mM), Ofanto (G2) et l'orge (G5) présentent une augmentation de la chlorophylle A (1,2 et 1,3), indiquant une bonne tolérance à cette dose. À l'inverse, El Zina (G3) et Anco Marzio (G7) montrent une nette diminution (0,5–0,7), traduisant une sensibilité accrue. Oued Zenati (G4) et Triticale (G6) conservent des valeurs proches du témoin, suggérant une stabilité modérée (figure 16).

Lors de l'exposition au stress hydrique prolongé (6 jours), Ofanto (G2) atteint la teneur maximale (2,5), suivi par Orge (G5) (1,3), témoignant d'une forte résilience. En revanche, El Zina (G3), Oued Zenati (G4) et Anco Marzio (G7) restent faibles (<1), révélant une réponse plus limitée.



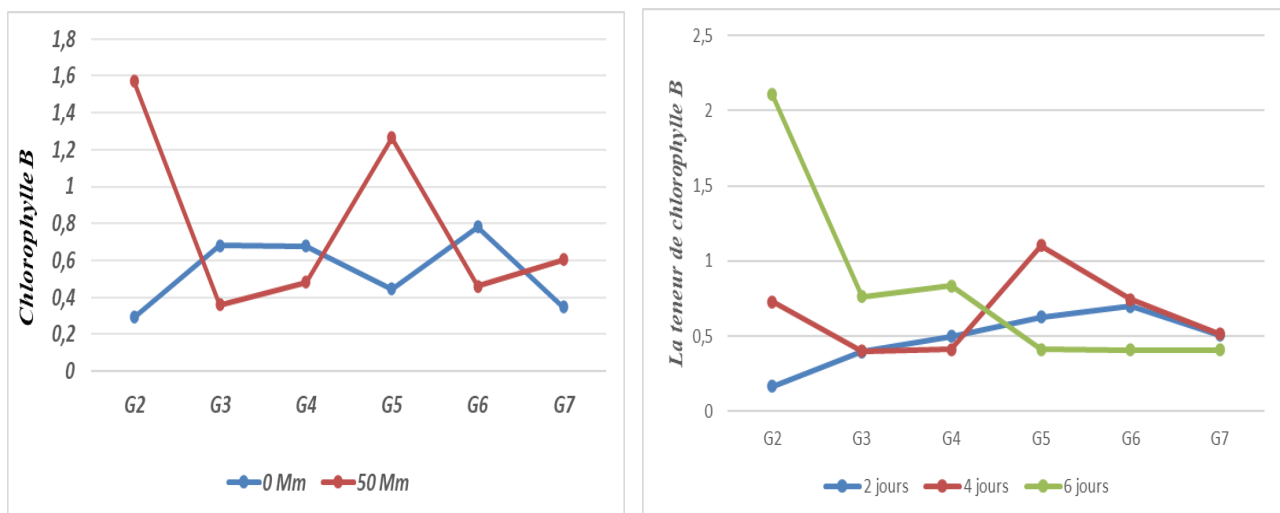
**Figure 16 :** Variation de la teneur en chlorophylle A sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50 mM) et stress hydrique (2,4,6 jours) chez les génotypes étudiés.

L'étude statistique (Annexe 7) met en évidence des effets très significatifs du génotype, du stress salin et du stress hydrique sur la variable mesurée ( $p < 0,001$ ). Les interactions entre ces facteurs s'avèrent également marquantes, en particulier celles entre génotype et stress salin, génotype et stress hydrique, ainsi que l'interaction entre les deux types de stress. L'effet combiné des trois facteurs (génotype  $\times$  stress salin  $\times$  stress hydrique) confirme la complexité des réponses physiologiques des plantes. Ce constat souligne la nécessité de cibler des génotypes capables de maintenir leurs performances dans des conditions de stress multiple.

### ➤ *Chlorophylle B* :

Face à la salinité (50 mM), Ofanto (G2) (1,5) et l'orge (G5) (1,2) montrent une accumulation importante de chlorophylle B, traduisant une bonne tolérance. En revanche, El Zina (G3), Triticale (G6) et Anco Marzio (G7) présentent une diminution, révélant une sensibilité variable. Oued Zenati (G4) reste relativement stable (figure 17).

Sous stress hydrique, Ofanto (G2) se démarque à 6 jours (2,1), indiquant une forte résilience. L'orge (G5) atteint un pic à 4 jours (1,1), puis chute rapidement. Les autres génotypes (G3, G6, G7) montrent des valeurs faibles à long terme ( $< 0,5$ ), signalant une vulnérabilité accrue.



**Figure 17** : Variation de la teneur en chlorophylle B sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50 mM) et stress hydrique (2,4,6 jours) chez les génotypes étudiés.

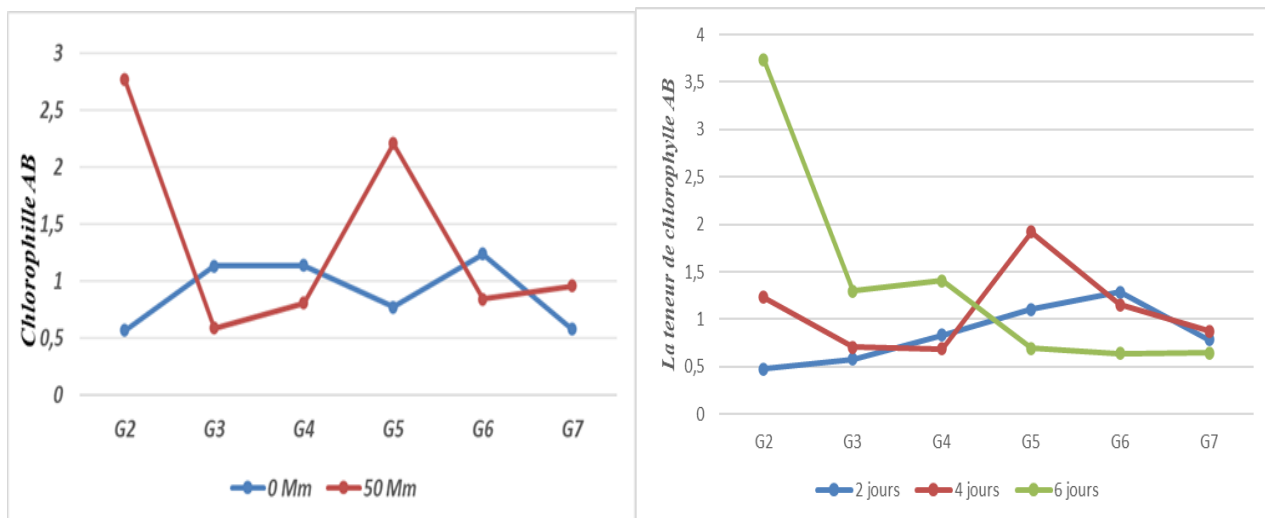
L'analyse de la variance (Annexe 8) a révélé des effets hautement significatifs ( $p < 0,001$ ) pour tous les facteurs étudiés. Le génotype a montré une variabilité significative ( $F = 24,24$ ), traduisant des différences notables entre les génotypes. Les stress salin ( $F = 47,64$ ) et hydrique

( $F = 25,22$ ) ont également eu un impact significatif sur le paramètre étudié. De plus, les interactions génotype  $\times$  stress salin ( $F = 84,59$ ) et génotype  $\times$  stress hydrique ( $F = 21,94$ ) indiquent que la réponse des génotypes dépend du type de stress appliqué. L'interaction stress salin  $\times$  stress hydrique ( $F = 48,72$ ) ainsi que l'interaction tripartite ( $F = 8,04$ ) confirment la présence d'effets combinés complexes influençant le comportement des plantes sous conditions de stress multiples.

### ➤ *Chlorophylle AB :*

La figure 18, indique que sous l'effet de la salinité (50 mM), Ofanto (G2) (3) et Orge (G5) (>2) montrent une accumulation importante de chlorophylle AB, traduisant une bonne adaptation. El Zina (G3) et Triticale (G6) enregistrent une baisse, indiquant une sensibilité. Oued Zenati (G4) et Anco Marzio (G7) restent stables.

En déficit hydrique, Ofanto (G2) se démarque après 6 jours (3,7), révélant une grande stabilité. Orge (G5) atteint un pic à 4 jours (~2) puis diminue. Les autres génotypes (G3, G4, G7) conservent des teneurs faibles (<1,5), reflétant une tolérance limitée (figure 18).



**Figure 18 :** Variation de la teneur en chlorophylle AB sous différentes conditions de stress salin (NaCl à 0,50 mM) et stress hydrique (2,4,6 jours) chez les génotypes étudiés.

La teneur en chlorophylle constitue un indicateur clé de l'activité photosynthétique, ce qui confère à l'étude de son comportement sous l'effet des stress abiotiques une importance particulière (Radhouane, 2006). Les stress hydrique et salin peuvent entraîner une diminution significative de cette teneur, notamment en limitant l'assimilation de l'azote par les racines. Or,

l'azote est un élément fondamental dans la biosynthèse de la chlorophylle ; sa carence se traduit donc par une baisse des pigments chlorophylliens (Parwata et al., 2012 ; Hajlaoui et al., 2015). Par ailleurs, le déficit hydrique peut provoquer une sur-réduction de la chaîne de transport des électrons lors de la photosynthèse, ce qui engendre des effets délétères tels que la photoinhibition ou encore la photo-oxydation (Bouchemal, 2018).

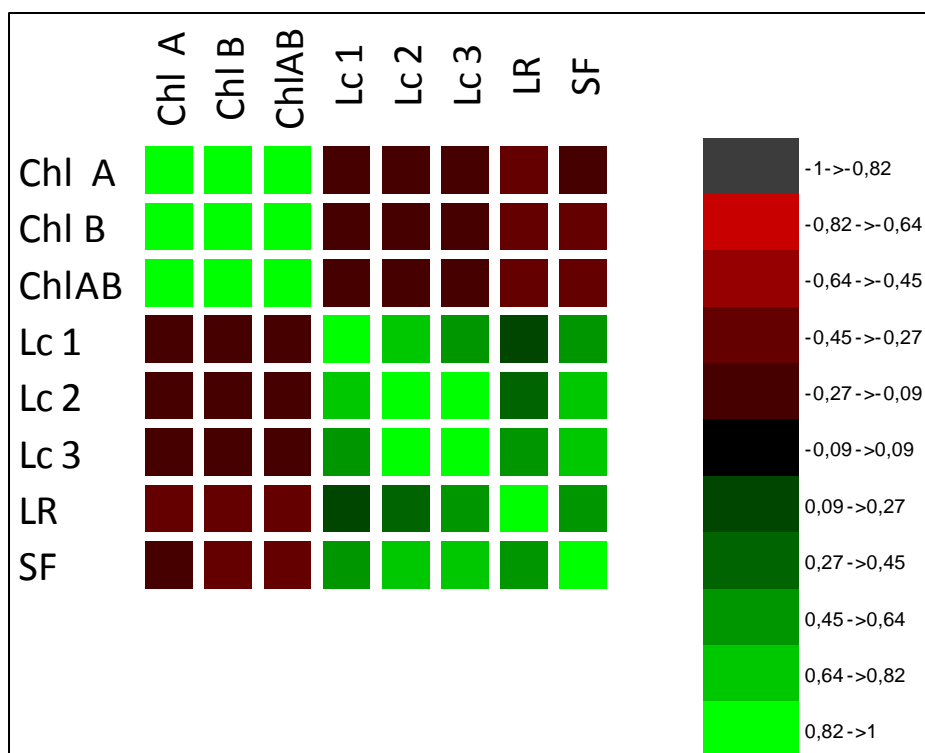
L'exploitation des résultats statistiques (Annexe 9) a mis en évidence des effets très hautement significatifs ( $p < 0,001$ ) pour tous les facteurs étudiés. Le facteur génotype ( $F = 26,76$ ) révèle une variabilité notable entre les différentes accessions. Les stress salin ( $F = 45,24$ ) et hydrique ( $F = 19,80$ ) exercent un impact significatif sur le paramètre analysé. Les interactions génotype  $\times$  stress salin ( $F = 68,85$ ) et génotype  $\times$  stress hydrique ( $F = 19,44$ ) confirment que la réponse des génotypes varie selon la nature du stress appliqué. En outre, l'interaction stress salin  $\times$  stress hydrique ( $F = 40,26$ ) et l'interaction tripartite ( $F = 7,67$ ) indiquent l'existence d'effets combinés complexes, influençant de manière significative le comportement des plantes sous conditions de stress multiples.

### **Discussion générale : Corrélations et ACP**

L'analyse des corrélations et l'ACP montre des interactions significatives entre les paramètres biochimiques, morphologiques et physiologiques mesurés chez les génotypes testés. Ces relations traduisent la diversité des réponses adaptatives exprimées face au stress combiné hydrique et salin, confirmant ainsi nos hypothèses de départ.

Une première relation remarquable concerne la corrélation négative entre la teneur en chlorophylle A et la longueur racinaire ( $r = -0,37$ ) (figure 19). Ce résultat suggère que certains génotypes investissent davantage dans la préservation de leur capacité photosynthétique au détriment du développement racinaire, une stratégie d'adaptation relevée également par Farooq et al. (2009), qui indiquent que les plantes, en situation de stress, réallouent leurs ressources pour maintenir les fonctions vitales.

Cependant, cette tendance n'est pas systématique : Bektas et al. (2023) ainsi qu'Arifuzzaman et al. (2018) ont observé une synergie entre la biomasse racinaire et aérienne, mettant en lumière l'existence de profils adaptatifs contrastés selon les génotypes et les conditions expérimentales. Cette observation corrobore l'idée que le stress combiné influence différemment la croissance morpho-physiologique selon le patrimoine génétique des plantes.



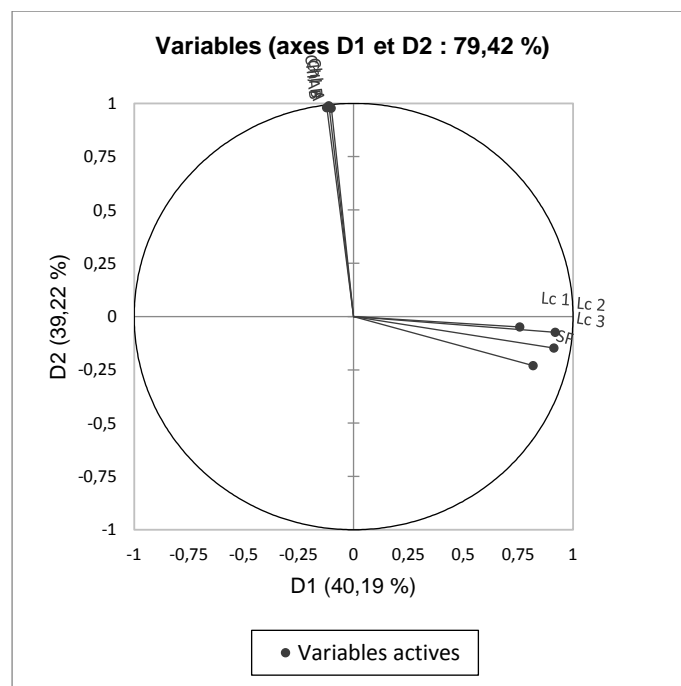
**Figure 19 :** Matrice des corrélations des paramètres de croissance étudiés

De plus, une corrélation positive significative a été mise en évidence entre la surface foliaire (SF) et les longueurs coléoptiles Lc1 ( $r = 0,58$ ) et Lc3 ( $r = 0,65$ ) (figure 19). Cette association illustre une continuité dans la vigueur végétative initiale, suggérant que les génotypes présentant une bonne émergence morphologique expriment également un développement foliaire plus étendu.

Ce constat rejoint les travaux de Benmahioul et al. (2011) et d'Ali et al. (2011), qui soulignent le rôle clé de la coléoptile dans l'établissement de la culture et son rendement potentiel en conditions de stress. À l'opposé, Shearer et al. (2022) rapportent que, dans certains contextes de déficit hydrique, le développement racinaire est favorisé au détriment de la masse foliaire, mettant en évidence une plasticité d'adaptation alternative.

Par ailleurs, les teneurs en chlorophylle A, B et AB sont fortement et positivement corrélées entre elles ( $r > 0,96$ ) (figure 19), révélant une coordination étroite dans la synthèse et la régulation des pigments photosynthétiques. Ce comportement traduit une stabilité de l'appareil photosynthétique chez les génotypes tolérants, comme le soutiennent Ashraf & Harris (2013), renforçant ainsi l'idée que certains génotypes disposent de mécanismes intégrés leur permettant de maintenir une efficacité physiologique élevée sous contrainte.

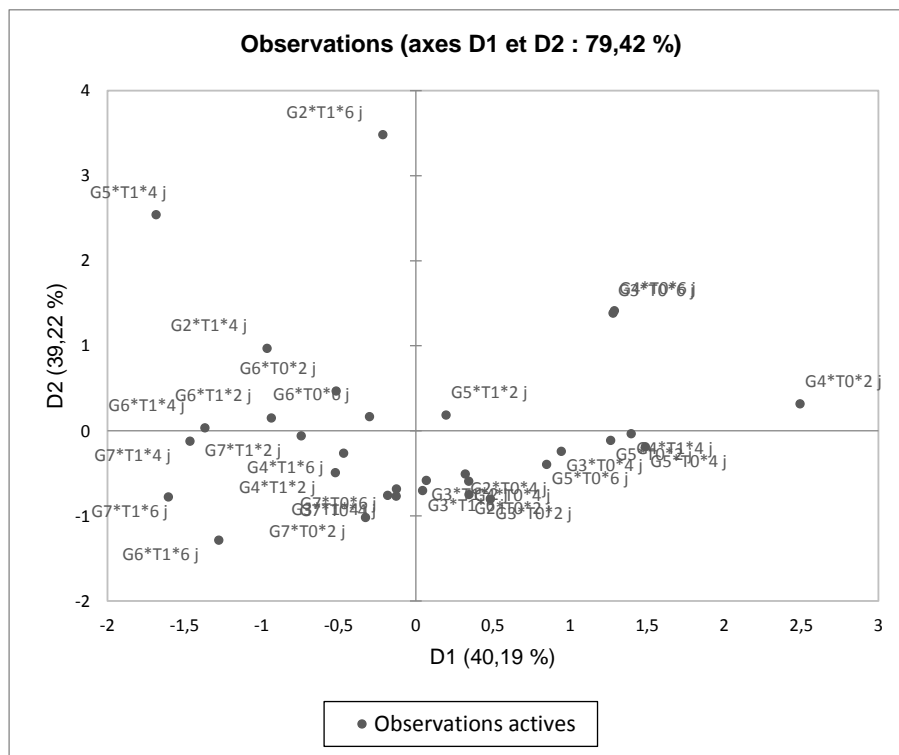
L'Analyse en Composantes Principales (ACP) corrobore les corrélations négatives observées entre les paramètres chlorophylliens et le développement racinaire. Les résultats ont permis d'identifier deux composantes indépendantes, D1 (axe de croissance morphologique) et D2 (axe d'accumulation chlorophyllienne), qui capturent 79,4% de la variance totale des données. Cette séparation suggère que les stratégies de développement des plantes étudiées sont structurées autour d'un compromis entre leur expansion physique et leur capacité à réaliser la photosynthèse. Les variables Lc 2, Lc 3, SF et ChLAB sont particulièrement importantes pour différencier ces aspects du développement (figure 20).



**Figure 20** : Analyse en Composantes Principales (ACP) des variables étudiées.

L'examen des observations met en évidence une structuration discernable des génotypes au regard des axes factoriels. Certains génotypes, tels que **G5T14 j** ( $\cos^2 = 0.94$ ) et **G4T14 j** ( $\cos^2 = 0.44$ ), affichent une forte corrélation avec l'axe de croissance morphologique (D1) (figure 21), caractérisée par un développement racinaire et foliaire prédominant, ce qui traduit une allocation préférentielle des ressources à l'expansion structurale. Par opposition, d'autres génotypes, notamment **G2T16 j** ( $\cos^2 = 0.91$ ) et **G3T06 j** ( $\cos^2 = 0.81$ ), sont clairement associés à l'axe chlorophyllien (D2) (figure 21), suggérant une optimisation de la préservation des pigments photosynthétiques. Cette divergence fonctionnelle illustre le découplage physiologique entre les processus de croissance et de photosynthèse en conditions de stress

combiné, chaque génotype manifestant une réponse adaptative spécifique, façonnée par son héritage génétique et les paramètres expérimentaux.



**Figure 21** : Analyse en Composantes Principales (ACP) des observations étudiées.

Ces résultats témoignent de la complexité des réponses des plantes face aux stress abiotiques, impliquant une interaction fine entre composantes morphologiques, physiologiques et biochimiques. Ils confirment que l'effet du stress combiné est significatif, que les réponses varient selon le génotype, et que la coordination entre croissance racinaire, développement foliaire et fonctionnement photosynthétique constitue un indicateur pertinent de la tolérance. Ce constat ouvre la voie à une sélection plus ciblée de génotypes performants dans des environnements contraignants.

# Conclusion

### Conclusion:

Cette étude visait à évaluer l'impact combiné du stress salin et hydrique sur les premières étapes du développement de sept géotypes céréaliers appartenant au blé dur, blé tendre, orge et triticale, dans l'objectif d'identifier les plus tolérants et de poser une base pour la sélection variétale adaptée aux zones arides.

Les résultats obtenus montrent que les deux types de stress exercent un effet inhibiteur significatif sur la germination, la vitesse de développement et la croissance morphologique, avec une intensité qui augmente en fonction du niveau de contrainte. Toutefois, cette réponse n'est pas uniforme entre les géotypes, révélant une variabilité génétique marquée.

Parmi eux, G5 (orge) et G6 (triticale) se sont révélés les plus tolérants, conservant une bonne vigueur germinative, des longueurs stables et des teneurs en chlorophylle relativement élevées, même sous stress élevé, ce qui suggère une capacité d'adaptation physiologique efficace. G7, représentant un autre géotype de blé dur, a également montré un comportement relativement stable, surtout en conditions de déficit hydrique, où il a maintenu des niveaux acceptables de croissance, bien qu'il soit légèrement plus affecté en conditions de salinité intense.

À l'inverse, G1 (Hedba) s'est distingué par une sensibilité prononcée aux deux stress, avec une forte diminution de tous les paramètres mesurés. Les géotypes G2, G3 et G4 ont présenté des comportements intermédiaires, montrant une certaine tolérance aux faibles niveaux de stress, mais une chute progressive sous contraintes sévères.

Ainsi, l'étude a permis d'atteindre pleinement ses objectifs, à savoir: l'évaluation de l'effet du stress abiotique combiné sur des paramètres agro-physiologiques clés, la comparaison des performances géotypiques, et l'identification de lignées prometteuses pour une valorisation future dans des programmes d'amélioration adaptés aux environnements soumis à des contraintes climatiques croissantes.

**Références**  
**bibliographies**

### Références bibliographies:

- **Achour, A., Bidai, Y., & Belkhodja, M. (2015).** L'impact de la salinité sur le comportement hydrique et métabolique d'une variété de Gombo (*Abelmoschus esculentus* L). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 12(4), 943.
- **Adjel F., & Bouzerzour H. (2004).** Etude de la variabilité de réponse des plantules de blé dur (*Triticum durum* Desf.) À la salinité. *Céréaliculture* 42(2), 5-13.
- **Ali, M. B., Jensen, C. R., & Andersen, M. N. (2011).** *Early vigour and coleoptile length in wheat: Relationship and relevance under stress.* *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(3), 243–251
- **Arifuzzaman, M., Kim, D. S., Kim, D. W., Kwak, J. G., Bhuiyan, M. S., Lee, Y. W., Kim, J. S., & Lee, Y. H. (2018).** Root traits confer grain yield advantages in wheat under drought stress. *Journal of Experimental Botany*, 69(9), 2339–2349.
- **Ashraf, M., & Harris, P. J. C. (2013).** Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*, 51(2), 163–190 2013.
- **Bakht J., Shafi M., Jamal Y. & Sher H. (2011).** Response of maize (*Zea mays* L.) to seed priming with NaCl and salinity stress. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9(1), 252-261.
- **Barrs H. (1968).** Determination of water deficit in plant tissues. In Kozlowski, T.T. (Ed.), *Water deficit and plant growth* (Vol. 1, pp. 235-863). New York: Academic press.
- **Ben Hebireche N. (2011).** Effet du stress salin sur l'accumulation de la chlorophylle chez le blé dur, 9p.
- **Ben Khaled L. Ouarraqi E.M. & Zid Z. (2007).** Impact du NaCl sur la croissance et la nutrition de la variété de blé dur Massa cultivée en milieu hydroponique, *Acta Botanica Gallica*, 154(1), 101-116
- **Benderradji L., Hadji N., Kellou K., Benniou R. & Brini F. (2016).** Effet du NaCl et PEG 6000 sur le comportement morpho-physiologique et biochimique des variétés de blé dur et tendre cultivées in vitro en milieu hydroponique. *Revue Agriculture, Numéro spécial* 1, 278-286
- **Benderradji, A., et al. (2016).** Effet de la salinité sur le développement du système racinaire : réduction de la longueur et du nombre des racines due à l'inhibition de la division et de l'élongation cellulaires.
- **Benidire L., Daoui K., Fatemi Z.A., Achouak W., Bouarab L. & Oufdou K. (2015).** Effet du stress salin sur la germination et le développement des plantules de *Vicia faba* L. *Journal of Materials and Environmental Science* 6 (3), 840-851
- **Benmahioul, B., Daguin, F., & Kaid-Harche, M. (2011)** "Contribution à l'étude de la tolérance au stress salin chez des génotypes d'orge." *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 15(2), 135–142.

## Références bibliographiques

---

- **Bektas, H., Aydin, M., & Buyukkeskin, T. (2023).** A study on root–shoot biomass relationship in wheat under salt stress. *Plants*, **12**(13), 2482.
- **Borlu H. O., Celiktas V., Duzenli S., Hossain A. & El Sabagh A. (2018).** Germination and Early Seedling Growth of Five Durum Wheat Cultivars (*Triticum durum* Desf.) Is Affected by Different Levels of Salinity. *Fresenius Environmental Bulletin* **27**(11), 7746-7757
- **Bouatrous Y. (2013).** Effet du stress salin et l'haplodiploïdisation chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Mémoire de Master. Algérie : Université Mentouri de constantine*
- **Bouchemel, k. (2018).** Etude des enzymes du stress oxydatif chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : caractérisation biochimique et moléculaire. Thèse de doctorat. Université des Frères Mentouri Constantine. 49p.
- **Brahimi, H.A. (2017).** Variations phénotypiques pour la tolérance aux stress salin et hydrique chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.). Mémoire de Master en Biotechnologie et Génomique Végétale. Université Mohames Boudiaf - M'Sila. 11-18p.
- **Charushahi V., Bargali K. & Bargali, S. S. (2015).** Influence of seed size and salt stress on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum*). *Indian Journal of Agricultural Sciences* **85**(9), 1134-1137.
- **Clarke J. M., & Mac-Gaic, T. N (1982).** Excised-leaf water retention capability as an indicator of drought resistance of *Triticum* genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*, **62**(3), 571-578.
- **Côme, D. (1970).** Les obstacles à la germination. In Bulletin mensuel de la Société linnéenne de Lyon (Ed.). (Pp. 162). Paris : Masson et Cie.
- **Dassa M., (2019).** L'effet de stress salin sur la germination de quelques variétés de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) *Mémoire de Master. Algérie : Université Mohamed Khider de Biskra*
- **FAO's new report on global grain production.2024**
- **Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009).** *Plant drought stress: effects, mechanisms and management.* *Agronomy for Sustainable Development*, **29**(1), 185–212.
- **Fellahi Z., Zaghoudi H., Bensaadi H., Boutalbi W. & Hannachi A. (2019).** Assessment of salt stress effect on wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars at seedling stage. *Agriculturae Conspectus Scientificus (in press)*.
- **Ferryra R., Sellés G., Ruiz R.S. & Sellés I.M, 2004.** Effect of water stress induced at different growth stages on grapevine cv. Chardonnay on production and wine quality. *ActaHort.664* : 233- 236p.
- **Fraser TE., Silk W.K. & Rost T.L. (1990).** Effect of low water potential on cortical cell length in growing region of maize roots. *Plant Physiology* **93**, 648-651.
- **Gasmi W., Dehiri A. (2019).** Effet de stress salin sur la germination et la croissance des deux variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf). *Mémoire de Master. Algérie : Université Mohamed El Bachir El Ibrahim B.B.A.*

## Références bibliographies

---

- **Gholamin R., Khayatnezhad M. (2011).** The Effects of water and salt stresses on germination in two bread Wheat genotypes. *African Journal of Biotechnology* 10(77), 17805-18711.
- **Gimeno Gilles, C. -2009-** Étude cellulaire et moléculaire de la germination chez *Medicago truncatula*. Thèse de doctorat en Biologie Cellulaire et Moléculaire Végétale. Université d'Angers (France), 174 p
- **GODON, B et WILLIAM, C.I ,1991**« les industries de première transformation des céréales.
- **Hadji Toka, Boulacel, M., Kebaili, F. F., Hadji Maroua, Ghennai, A., & Bendif, H. (2024).** Assessment of salt tolerance in Algerian oasis wheat landraces: An examination of biochemical, physiological, and agronomical traits. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, \*36\*, 1–14. <https://doi.org/10.3897/ejfa.2024.118894>
- **Hajlaoui, H., Denden, M., & Bouslama, M. (2007).** Etude de la variabilité intraspécifique de tolérance au stress salin du pois chiche (*Cicer arietinum L.*) au stade germination. *Tropicultura*, 25(3), 168-173.
- **Hamadache A. (2013).** Eléments de phytotechnie générale-Grandes Cultures-Tome 1 : le blé, 11-49
- **Hamza H., Bizid E. & Mezni M. (1999)** Effets de la salinité des eaux d'irrigation sur la survie et la croissance de trois cultivars de luzerne pérenne. *Fourrage* 158, 169-178.
- **Kadam, N. N., Xiao, G., Melgar, R. J., Bahuguna, R. N., Quinones, C., Tamilselvan, A., & Jagadish, S. V. K. (2014).** Agronomic and physiological responses to high temperature, drought, and elevated CO<sub>2</sub> interactions in cereals. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 127, pp. 111–156). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800131-8.00003-0>
- **Kadri K., Maalam S., Cheikh MH., Ben abdallah A., Rahmoune C., Ben Naceur M. (2009).** Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production en grains de quelques accessions Tunisiennes d'orge (*Hordeum vulgare L.*). *Science and Technologie*, (29), 72-79
- **Kaya A., Aydin O. & Dincer I. (2008).** Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward Kiwi fruits (*Actinidia Deliciosa Planch*). *Journal of Food Engineering* 88(3), 323-330.
- **Khan, M. A., & Weber, D. J. (2008).** *Ecophysiology of high salinity tolerant plants*. Springer.
- **Khayatnezhad, M., Gholamin, R., Jamaati-e-Somarin, S. H., & Zabihi-e-Mahmoodabad, R. (2010).** Effects of PEG stress on corn cultivars (*Zea mays L.*) at germination stage. *World Applied Sciences Journal*, 11(5), 504–506. *World Applied Sciences Journal*, 11(5), 504–506.
- **Kotowski F. (1926).** The efficiency of self- and cross- fertility in the onion. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 4, 11-16.

## Références bibliographiques

---

- **Lahouel H. (2014).** Contribution à l'étude de l'influence de salinité sur le rendement des céréales (cas de l'orge) dans la région de Hemadna à Relizane. Mémoire de Master. Algérie : Université d'Abou- Bekrbelkaid Tlemcen 18-30 p.
- **Lebon E., Pellegrino A. Tardieu F. & Lecoœur J, 2004.** Shoot development in grapevine is affected by the modular branching pattern of the stem and intra and inter-shoot trophic competition. *Annals of Botany*. 93 : 263 -274 p.
- **Lemekeddem., Debbach H. (2014).** Synthèse bibliographique sur l'effet du stress sur la germination de blé. *Mémoire de Master. Algérie : Université Kasdi Merbah, Ouargla*, 23-28.
- **Mahmoodzadeh H., Khorasani F. M. & Besharat H. (2013).** Impact of salt stress on seed germination indices of five wheat cultivars. *Annals of Biological Research* 4(6), 93-96.
- **Mahpara, S., Zainab, A., Ullah, R., Kausar, S., Bilal, M., Latif, M. I., Arif, M., Akhtar, I., Al-Hashimi, A., Elshikh, M. S., Zivcak, M., Zuan, A. T. K. (2022).** The impact of PEG-induced drought stress on seed germination and seedling growth of different bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *PLOS ONE*, \*17\*(9), Article e0274206. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274206>
- **Moud A.M., Maghsoudi K. (2008).** Salt stress effects on respiration and growth of germinated seeds of different wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *World J. Agric. Sci* 4 (3), 351-358
- **Mouellef A., 2010.** Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique, Mémoire de Magistère, Optio: Biotéchnologie végétale, Dept. Biologie. Univ. MENTOURI, Constantine. pp8-9.
- **Mrani Alaouil M., El Jourmi L., Ouarzane O., Lazar S., El Antri S., Zahouily M., Hmyene A. (2013).** Effet du stress salin sur la germination et la croissance de six variétés marocaines de blé (Effect of salt stress on germination and growth of six Moroccan wheat varieties). *J. Mater. Environ. Sci*, 4(6) 997-1004.
- **Ndiaye A., Faya E. & Touré M. (2014).** Effet du stress salin sur la germination des graines de (*Gossypium hirsutum* L). *Journal of Applied Biosciences* 80, 7081-7092.
- **Okçu G, Kaya MD, Atak M. (2005).** Effects of Salt and Drought Stresses on Germination and Seedling Growth of Pea (*Pisum sativum* L.). *Turk J Agric*. VOL (29) : 237-242.
- **Osborne, J.M., Fox, J.E.D., & Mercer, S. (1993).** Germination response under elevated salinities of six semi-arid blue bush species (Western Australia). In Lieth, H., & Al Masoom, A. (Ed.), *Towards the Rational Use of High Salinity tolerant Plants* (Vol. 27, pp. 323-338). Springer, Dordrecht.
- **Ouhaddach, M., Hmouni, M.F., ElYacoubi, D., Zidane, H., Douaik, L., & RochdiAtmane, A. (2015).** Effet du Chlorure de Sodium (NaCl) sur les Paramètres de Germination du blé Tendre (*Triticum aestivum* L.). *European Journal of Scientific Research*, 127(3), 298- 310.
- **Oukarroum A., El Madidi S., Schansker G., & Strasser R. J. (2007).** Probing the responses of barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.) by chlorophyll a fluorescence OLKJIP under drought stress and re-watering. *Environmental and Experimental Botany*, 60(3), 438-446.

## Références bibliographiques

---

- **Ould Bannana M. B. (1999).** Utilisation de quelque marqueur physiologique, biochimique et chimique (Équilibre ionique) dans l'étude de la tolérance à la salinité chez le blé dur (*Tricum durum* Desf). Thèse de Magister. Univ., Annaba, 104p.
- **Parwata, I., Indradewa, D., Yudono, P., Kertonegoro, B. D., & Kusmarwiyah, R. (2013).** Physiological Responses of *Jatropha* to Drought Stress in Coastal Sandy Land Conditions. *Makara Journal of Science*, 115-121.
- **Prado F. E., Boero C., Gallardo M. & Gonzalez J. A. (2000).** Effect of NaCl on germination, growth and soluble sugar content in *Chenopodium quinoa* Willd. Seeds. *Botanical Bulletin of Academia Sinica* 41, 27-34
- **Radhouane, L. (2006).** Diversité morpho-phénologique, caractérisation agro-physiologique et mécanismes d'adaptation aux contraintes hydriques et salines de populations autochtones de mil. Thèse de doctorat d'état, INAT. Université de Carthage Tunisie. 289p.
- **Saddozai, U. K., Ahmad, H., Ali, A., Khan, M. A., Alam, M. S., & Ahmad, I. (2025).** *Studies on Relationship Between Coleoptile Length and Growth Attributes of Diverse Wheat Genotypes to Moisture.* **Pakistan Journal of Botany**, 57(2), 553–560
- **Shearer, C. R., Liu, H., Niyogi, K. K., Collins, S. D., Jagadish, S. V. K., & Septiningsih, E. M. (2022).** *Root architecture affects shoot growth and photosynthesis in maize under drought.* **Frontiers in Plant Science**, 13, Article 802021.
- **Spagnoletti Zeuli, P., & Qualset, C. O. (1990).** Flag leaf variation and the response to nitrogen fertilization in durum wheat. *Plant Breeding*, 104(4), 306–314.
- **Toumi, M., Barris, S., & Aid, F. (2014).** Effects of water and osmotic stress on the accumulation of proline and malondialdehyde (MDA) in two varieties of colza (*Brassica napus* L.). *Bulletin de l'Institut Scientifique : Section Sciences de la Vie*, 36, 17-24.
- **Ullah, A., Manghwar, H., Shaban, M., Khan, A. H., Akbar, A., Ali, U., Ali, E., & Fahad, S. (2018).** Phytohormones enhanced drought tolerance in plants : A coping strategy. *Environmental Science and Pollution Research*, \*25\*(33), 33103–33118. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3364-5>
- **Zeng, L. H., & Shannon, M. C. (2000)** Salinity Effects on Seedling Growth and Yield Components of Rice. *Crop Science*, 40(4), 996-1003.

# **Annexe**

### Annexe.1.

**Tableau 1 :** Comparaison des moyennes du taux de germination (TG, %) obtenues à partir des différents traitements de stress appliqués aux sept génotypes étudiée. Résultats du test de l'analyse de la variance à deux facteurs fixe de classification modèle linéaire généralisée V × N

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Génotype	6	32266,67	5377,78	30,52	< 0,001
Stress salin	3	53975,00	17991,67	102,11	< 0,001
Génotype * Stress salin	18	7133,33	396,30	2,25	0,01
Erreur	56	9866,67	176,19		
Total corrigé	83	103241,67			

ns: effet non significatif, \*: effet significatif  $p < 0,05$ , \*\*: effet hautement significatif  $p < 0,01$ , \*\*\*: effet très hautement significatif  $p < 0,001$

### Annexe.2.

**Tableau 2 :** Comparaison des moyennes de la vitesse de germination (VG, %) obtenues à partir des différents traitements de stress appliqués aux sept génotypes étudiés. Résultats du test de l'analyse de la variance à deux facteurs fixe de classification modèle linéaire généralisée V × N

Source	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Génotype	6	8978,94	1496,49	15,04	< 0,001
Stress salin	3	9469,32	3156,44	31,72	< 0,001
Génotype*Stress salin	18	4607,99	256,00	2,57	0,00
Erreur	56	5573,29	99,52		
Total corrigé	83	28629,54			

### Annexe.3.

**Tableau 3 :** Comparaison des moyennes de la obtenues à partir des différents traitements de stress appliqués aux sept génotypes étudiés. Résultats du test de l'analyse de la variance à deux facteurs fixe de classification modèle linéaire généralisée V × N

Source	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Génotype	6	5125,46	854,24	11,14	< 0,001
Stress salin	3	3617,26	1205,75	15,72	< 0,001
Génotype*Stress salin	18	845,29	46,96	0,61	0,87
Erreur	56	4295,25	76,70		
Total corrigé	83	13883,25			

*Annexe.4.***Tableau 4 :** Comparaison des moyennes de la longueur des racines (LR, cm) obtenues à partir des différents traitements de stress appliqués aux sept géotypes étudiés. Résultats du test de l'analyse de la variance à trois facteurs fixe de classification modèle linéaire généralisée V × N

Source	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Géotype	6	2289,23	381,54	17,42	< 0,001
Stress salin	3	4333,43	1444,48	65,95	< 0,001
Stress hydrique	2	98,91	49,45	2,26	0,11
Géotype*Stress salin	18	2610,52	145,03	6,62	< 0,001
Géotype*Stress hydrique	12	430,33	35,86	1,64	0,09
Stress salin *Stress hydrique	6	152,16	25,36	1,16	0,33
Géotype*Stress salin *Stress hydrique	35	1743,23	49,81	2,27	< 0,001

*Annexe.5.***Tableau 5 :** Comparaison des moyennes de la surface foliaire (SF, cm<sup>2</sup>) obtenues à partir des différents traitements de stress appliqués aux sept géotypes étudiés. Résultats du test de l'analyse de la variance à trois facteurs fixe de classification modèle linéaire généralisée V × N

Source	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Géotype	6	149,07	24,84	7,86	< 0,001
Stress salin	3	306,11	102,04	32,28	< 0,001
Stress hydrique	2	5,17	2,58	0,82	0,44
Géotype*Stress salin	18	159,46	8,86	2,80	< 0,001
Géotype*Stress hydrique	12	55,23	4,60	1,46	0,15
Stress salin*Stress hydrique	6	22,21	3,70	1,17	0,32
Géotype*Stress salin*Stress hydrique	36	121,71	3,38	1,07	0,38

*Annexe.6.***Tableau 3 :** Comparaison des moyennes de la teneur relatif en eau obtenues à partir des différents traitements de stress appliqués aux sept géotypes étudiés. Résultats du test de l'analyse de la variance à deux facteurs fixe de classification modèle linéaire généralisée V × N

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Géotype	5	4532,62	906,52	4,01	<b>0,01</b>
Stress salin	3	835,32	278,44	1,23	0,31
Géotype*Stress salin	15	4232,02	282,13	1,25	0,28

*Annexe.7.***Tableau 6 :** Comparaison des moyennes de la chlorophylle A obtenues à partir des différents traitements de stress appliqués aux sept géotypes étudiés. Résultats du test de l'analyse de la variance à trois facteurs fixe de classification modèle linéaire généralisée  $V \times N$ 

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Géotype	5	2,11	0,42	24,24	< 0,001
Stress salin	1	0,83	0,83	47,64	< 0,001
Stress hydrique	2	0,88	0,44	25,22	< 0,001
Géotype * Stress salin	5	7,37	1,47	84,59	< 0,001
Géotype * Stress hydrique	10	3,82	0,38	21,94	< 0,001
Stress salin * Stress hydrique	2	1,70	0,85	48,72	< 0,001
Géotype * Stress salin * Stress hydrique	6	0,84	0,14	8,04	< 0,001

*Annexe.8.***Tableau 7 :** Comparaison des moyennes de la chlorophylle B obtenues à partir des différents traitements de stress appliqués aux sept géotypes étudiés. Résultats du test de l'analyse de la variance à trois facteurs fixe de classification modèle linéaire généralisée  $V \times N$ 

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Géotype	5	2,11	0,42	24,24	< 0,001
Stress salin	1	0,83	0,83	47,64	< 0,001
Stress hydrique	2	0,88	0,44	25,22	< 0,001
Géotype * Stress salin	5	7,37	1,47	84,59	< 0,001
Géotype * Stress hydrique	10	3,82	0,38	21,94	< 0,001
Stress salin * Stress hydrique	2	1,70	0,85	48,72	< 0,001
Géotype * Stress salin * Stress hydrique	6	0,84	0,14	8,04	< 0,001

*Annexe.9.***Tableau 8 :** Comparaison des moyennes de la chlorophylle AB obtenues à partir des différents traitements de stress appliqués aux sept géotypes étudiés. Résultats du test de l'analyse de la variance à trois facteurs fixe de classification modèle linéaire généralisée  $V \times N$ 

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Géotype	5	8,13	1,63	26,76	< 0,001
Stress salin	1	2,75	2,75	45,24	< 0,001
Stress hydrique	2	2,41	1,20	19,80	< 0,001
Géotype * Stress salin	5	20,92	4,18	68,85	< 0,001
Géotype * Stress hydrique	10	11,81	1,18	19,44	< 0,001
Stress salin * Stress hydrique	2	4,89	2,45	40,26	< 0,001
Géotype * Stress salin * Stress hydrique	6	2,79	0,47	7,67	< 0,001

## Résumé :

Cette étude a évalué l'impact combiné du stress salin (0-150 mM NaCl) et hydrique (irrigation tous les 2-6 jours) sur la germination et la croissance précoce de sept génotypes céréaliers (blé dur, blé tendre, orge, triticale), dans l'objectif d'identifier des variétés adaptées aux zones arides. Les résultats révèlent une inhibition significative des paramètres germinatifs et morphologiques (longueurs des coléoptiles/racines, surface foliaire) et physiologiques (teneur en chlorophylle), dont l'intensité croît avec le niveau de stress. Une variabilité génétique marquée est observée : les génotypes G5 (orge) et G6 (triticale) démontrent une tolérance élevée, conservant vigueur germinative, croissance stable et teneurs en chlorophylle sous stress sévère, tandis que G7 (blé dur) montre une résilience notable au déficit hydrique. À l'inverse, G1 (Hedba) présente une sensibilité prononcée, et les génotypes G2-G4 affichent une tolérance intermédiaire. Cette étude valide ainsi des candidats prometteurs (G5, G6, G7) pour des programmes d'amélioration variétale dans les régions soumises à des stress abiotiques combinés, tout en éclairant les mécanismes d'adaptation physiologique sous contraintes climatiques croissantes.

**Mots clés :** Stress abiotique combiné, salinité, déficit hydrique, céréales, germination, croissance.

## Abstract:

This study assessed the combined impact of saline stress (0–150 mM NaCl) and water stress (irrigation every 2–6 days) on the germination and early growth of seven cereal genotypes (durum wheat, bread wheat, barley, triticale), aiming to identify varieties adapted to arid regions. The results reveal significant inhibition of germination, morphological (coleoptile/root lengths, leaf area), and physiological (chlorophyll levels) parameters, with intensity escalating under higher stress levels. Marked genetic variability was observed: Genotypes G5 (barley) and G6 (triticale) exhibited high tolerance, maintaining germination vigor, stable growth, and chlorophyll levels under severe stress, while G7 (durum wheat) showed notable resilience to water deficit. Conversely, G1 (Hedba) displayed pronounced sensitivity, and genotypes G2–G4 demonstrated intermediate tolerance. This study thus validates promising candidates (G5, G6, G7) for varietal improvement programs in regions facing combined abiotic stresses, while elucidating physiological adaptation mechanisms under increasing climatic constraints.

**Keywords:** Combined abiotic stress, Salinity, Water deficit, Cereals, Germination, Growth.

## المخلص:

قامت هذه الدراسة بتقييم التأثير المشترك للإجهاد الملحي (0-150 ملي مولار كلوريد الصوديوم) والإجهاد المائي (ري كل 2-6 أيام) على إنبات ونمو المبكر لسبعة طرز وراثية من الحبوب (قمح صلب، قمح لين، شعير، تريتیکال)، بهدف تحديد أصناف متكيفة مع المناطق الجافة. كشفت النتائج عن تثبيط ملحوظ للمعايير الإنباتية والمورفولوجية (أطوال الأسلات/الجزور، المساحة الورقية) والفسيلوجية (محتوى الكلوروفيل)، تزداد شدتها بارتفاع مستوى الإجهاد. لوحظ تباين وراثي واضح: أظهرت الطرز الوراثية (G5 شعير و G6 تريتیکال) (تحملاً عالياً، مع الحفاظ على قوة إنباتية ونمو مستقر ومستويات كلوروفيل تحت إجهاد شديد، بينما أظهر) G7 قمح صلب (مرونة ملحوظة تجاه الإجهاد المائي. في المقابل، أظهر) G1 هضبة (حساسية واضحة، بينما أظهرت الطرز G2-G4 تحملاً متوسطاً. وبذلك تحدد الدراسة أصنافاً واعدة (G5)، G6، (G7) لبرامج تحسين النبات في المناطق المعرضة لإجهادات لحيوية مشتركة، مع إلقاء الضوء على آليات التكيف الفسيلولوجي تحت الضغوط المناخية المتزايدة.

**الكلمات المفتاحية:** إجهاد لحيوي مشترك، ملوحة، عجز مائي، حبوب، إنبات، نمو.