



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعرييرج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahim 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 :

Analyse comparative de la tolérance au stress hydrique  
chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.)

### Présenté par :

BENKHALFALLAH Safa & BELHOUL Nourelhouda

Soutenu le 12 / 06/ 2024, Devant le Jury :

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
Président :	M. BELGUERRI Hemza	MCB	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.
Encadrant :	M. FELLAHI Zine El Abidine	MCA	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.
Examineur :	M. SEBBANE Mahieddine	MAB	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.

Année Universitaire 2023/2024

# Remerciements

*Tout d'abord, grâce à ALW'WAHID qui nous a créé, nous a protégé, qui est toujours avec nous qu'il ne nous laisse jamais seule. Louanges à ALLAH.*

*Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude ainsi que nos sincères remerciements à :*

*Dr. FELLACHI Zine El Abidine, notre encadrant de mémoire pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter nos réflexions.*

*Nous tenons à remercier les membres de jury :*

*Dr. BELGUERRI Hemza, enseignant à l'université de B.B.A pour avoir bien voulu présider le jury.*

*Dr. SABBANE Mahieddine, enseignant à l'université de B.B.A pour examiner et juger ce travail.*

*Toute ma gratitude à mes collègues de promotion ainsi qu'aux mes amies*

*Nous exprimons également notre gratitude à tous les cadres de la CNCC de Sétif.*

*Enfin, ce travail n'aurait pas été mené à terme sans les concessions et les encouragements de **nos parents** auxquels nous disons tout simplement merci.*

*Un grand merci à toute notre famille.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modest travail*

*A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection.*

*A mon petit frère **Yahia**, source de joie et de bonheur.*

*A mes très chers soeurs **Maroua, Khadidja et Chaima** source d'espoir et  
de motivation.*

*A toute ma famille, qui m'a soutenue jusqu'au la fin.*

*À mes amies **Imene, Cheyma, Chahra et Houda**, en reconnaissance de  
votre soutien inébranlable et de votre amitié précieuse, qui a illuminé  
même mes moments de joie les plus simples.*

*A mon cher encadrant **FELLAHI Zine El Abidine**, pour leur conseil  
précieux qui nous a accompagné tout au long de nos mémoires et qui  
nous a donné une grande confiance.*

*Merci*

*Safa*

# Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail a tous qui me sont chers

## **A mes chers parents**

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être

Je vous remercie pour tous le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours  
Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, puisse dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie

**Mama**, reposez votre cœur, votre rêve est devenu réalité, enfin votre petite fille est devenue diplômée comme que tu as tant imaginée et désirée

## **A mon très cher père : Belhoul Lakhder**

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es.

**A mes merveilleux frères, Younes et Saif**, que Dieu ait pitié de lu

Chacun de vos sourires a illuminé mon chemin.

Chaque mot d'encouragement a nourri mes rêves.

A travers ce travail, je célèbre notre lien indéfectible.

Merci d'avoir été mes anges gardiens, cette réussite est aussi la votre.

## **A ma chère sœur Douaa**

Pour se soutien moral et leur conseil précieux tout au long de mes études

## **A mon cher binôme.**

Pour son entente et sa sympathie

## **A toute ma famille. A tous mes amis**

(Dalal, Manel, Lina, Israa, Donia, Nessrine, Chaima, Lamis, Amira )

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment

**Nourelhouda**

# Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures et photos

Liste des abréviations

**Introduction ..... 1**

## **Chapitre I : Matériel et méthodes**

I.1. Matériel végétal .....	4
I.2. Conditions expérimentales .....	4
I.2.1. Essai de germination .....	5
I.2.2. Essai de de la croissance des plantules de blé .....	5
I.3. Mesures et notions .....	6
I.3.1. Essai de germination .....	6
I.3.1.1. Pourcentage final de germination (%G, %) .....	6
I.3.1.2. Temps moyen de germination (TMG, jours) .....	7
I.3.1.3. Germination moyenne journalière (GMJ, %) .....	7
I.3.2. Essai de comportement .....	7
I.3.2.1. Longueur maximale des racines (LR, cm) .....	7
I.3.2.2. Nombre de racines (NR, No) .....	7
I.3.2.3. Longueur du coléoptile (LC, cm) .....	7
I.3.2.4. Longueur de la 1 <sup>ère</sup> feuille (LF, cm) .....	7
I.3.2.5. Matières fraîches racinaire (MFR, mg) et aérienne (MFA, mg) .....	7
I.4. Analyse des données .....	7

## **Chapitre II : Résultats et discussion**

II.1. Essai de germination .....	9
II.1.1. Effet de la variété .....	9
II.1.2. Effet du stress .....	10
II.1.3. Interaction 'variété*stress' .....	12
II.1.4. Cinétique de germination.....	14
II.2. Essai de comportement des plantules de blé .....	15
II.2.1. Effet de la variété .....	15
II.2.2. Effet du stress.....	18
II.2.3. Interaction 'variété*stress' .....	20

II.3. Classification des variétés vis-à-vis de la tolérance au stress.....	24
<b>Conclusion</b> .....	<b>26</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>28</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b>	Code et nom des variétés de blé tendre étudiés.....	4
<b>Tableau 2 :</b>	Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de germination mesurés.....	9
<b>Tableau 3 :</b>	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de germination mesurés.....	10
<b>Tableau 4 :</b>	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress' des caractères de germination mesurés .....	11
<b>Tableau 5 :</b>	Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de croissance mesurés.....	16
<b>Tableau 6 :</b>	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de croissance mesurés .....	17
<b>Tableau 7 :</b>	Valeurs moyennes de l'effet moyen stress des caractères de croissance mesurés .....	19
<b>Tableau 8 :</b>	Ordre de classement des variétés de blé par caractère mesuré .....	24

## Liste des figures et photos

<b>Figure 1 :</b>	Réduction / augmentation (en %) des caractères de germination mesurés en T1 relativement au témoin T0 des variétés de blé tendre étudiées.....	11
<b>Figure 2 :</b>	Réduction du % de germination du traitement T1 relativement au témoins T0 des variétés de blé tendre étudiées .....	13
<b>Figure 3 :</b>	Cinétique de germination des grains de blé tendre en fonction de l'intensité du stress appliqué.....	15
<b>Figure 4 :</b>	Réduction (en %) des caractères de croissance mesurés en T1 relativement au témoin T0 des variétés de blé tendre étudiées .....	20
<b>Figure 5 :</b>	Réduction / augmentation (en %) des paramètres de croissance aux traitements T1 relativement au témoin T0 des variétés de blé dur étudiées...	21
<b>Figure 6 :</b>	Degré de sensibilité au stress hydrique des variétés de blé étudiées au stade germinatif.....	25
<b>Photo 1 :</b>	Préparation des graines de blé pour l'essai de germination.....	5
<b>Photo 2 :</b>	Transplantation des graines de blé germées dans des tubes à essai.....	6

## Liste des abréviations

%G : Pourcentage final de germination.

ANOVA : Analyse de la variance.

CNCC : Centre Nationale de Contrôle et de Certification des semences et plants.

CV : Coefficient de variation.

ddl : degré de liberté.

DSASI : Direction de la Statistique Agricole et des systèmes d'Information.

GMJ : Germination Moyenne Journalière.

LC : Longueur du Coléoptile.

LF : Longueur de la 1<sup>ère</sup> Feuille.

LR : Longueur des Racines.

MFA : Matière Fraiche Aérienne.

MFR : Matière Fraiche Racinaire.

MSR : Moyenne de la Somme des Rangs.

NR : Nombre des Racines.

PEG-6000 : Polyéthylène glycol 6000.

Ppds : Plus petite différence significative.

SE : Erreur standard.

TMG : Temps Moyen de Germination.

OCDE-FAO : Organisation de Coopération et de Développement Economique-Food and Agriculture Organisation.

# *Introduction*

## Introduction

La culture des céréales en Afrique du Nord, notamment en Algérie, est ancrée dans une histoire millénaire remontant à l'Antiquité. Les céréales, cultivées principalement pour leurs grains, sont une composante essentielle de l'alimentation tant humaine qu'animale. À l'échelle mondiale, ces cultures occupent une place prépondérante, couvrant environ 15% de la surface agricole totale de la planète, soit 733 millions d'hectares, ce qui représente environ 52% des terres arables disponibles (USDA/FAO, 2022).

Aujourd'hui, environ 95% du blé cultivé dans le monde est du blé tendre (*Triticum aestivum* L.), utilisé principalement sous forme de farine complète et de farine raffinée pour produire une grande variété de pains plats et fermentés et pour la fabrication d'une grande variété d'autres produits de boulangerie (Beres *et al.*, 2020). Les 5% restants sont principalement constitués de blé dur utilisé pour produire de la semoule, principale matière première pour la fabrication d'une grande variété de produits de boulangerie différents (Ammar, 2023).

Le blé tendre se distingue comme l'une des cultures céréalières les plus consommées au monde, servant de pilier alimentaire à plus de ~40% de la population mondiale (Zhao *et al.*, 2023). Cultivé principalement dans l'hémisphère nord de la Terre (Zala *et al.*, 2014), le blé tendre fournit 20% des calories dans le monde mais jusqu'à 50 % dans certaines régions, soulignant ainsi son rôle crucial dans l'alimentation humaine (Shewry, 2021).

En Algérie, le blé tendre occupe une position de premier plan parmi les cultures céréalières, étant une source vitale d'énergie pour la population locale. Selon les données du DSASI (2022), le blé tendre représente 13% de la production céréalière totale en Algérie, moyenne de la période 2017-2021. En 2021, le pays a produit 0.34 million de tonnes de blé tendre, tandis que le blé dur et l'orge ont respectivement atteint 1.84 million et 0.56 million de tonnes. La consommation annuelle de blé par habitant en Algérie est d'environ 230 kilogrammes (OCDE-FAO, 2021).

Toutefois, la production céréalière en Algérie, tout comme dans le reste du monde, est sujette à des variations significatives, principalement en raison de facteurs abiotiques tels que la sécheresse (Fellahi *et al.*, 2024). La germination, la croissance des jeunes plants et la floraison comptent parmi les étapes cruciales et les plus sensibles au stress hydrique tout au

long du cycle de vie des plantes (**Berg et al., 2014**). Chez le blé, le stress hydrique peut considérablement retarder le processus de germination du blé. L'absorption initiale d'eau par les graines, appelée imbibition, est cruciale pour activer les enzymes qui déclenchent la germination. En cas de déficit hydrique, cette absorption est insuffisante, retardant ainsi l'activation enzymatique et la croissance embryonnaire (**Ozden et al., 2021 ; Khaeim et al., 2022**). Cela conduit à un retard dans la germination, prolongeant le temps nécessaire pour que les plantules émergent du sol.

Outre le retard de germination, le stress hydrique peut également réduire le taux de germination des graines de blé. Lorsque les graines ne reçoivent pas suffisamment d'eau, le processus de germination peut être interrompu ou ne pas se produire du tout, diminuant ainsi le nombre de graines qui germent avec succès. Ce phénomène peut entraîner une densité de semis plus faible, affectant la couverture végétale et la compétition entre les plantes pour les ressources (**Khaeim et al., 2022**). Même lorsque les graines de blé parviennent à germer sous des conditions de stress hydrique, la croissance des plantules peut être fortement compromise. Les plantules peuvent présenter un développement racinaire et foliaire réduit, ce qui limite leur capacité à absorber l'eau et les nutriments du sol. Cette croissance limitée peut réduire la vigueur des plantules, les rendant plus vulnérables aux autres stress environnementaux et biologiques, tels que les maladies et les ravageurs (**Farooq et al., 2009**).

Le stress hydrique peut également induire un stress oxydatif chez les graines de blé en germination, entraînant la production de radicaux libres qui endommagent les cellules (**Hasanuzzaman et al., 2020**). Ces dommages cellulaires peuvent entraver la germination et compromettre la viabilité des plantules. Les plantules affectées peuvent présenter des anomalies de croissance et une réduction de la capacité photosynthétique, limitant leur potentiel de croissance et de rendement (**Huseynova, 2016**).

Certaines variétés de blé ont développé des adaptations morphologiques et physiologiques pour mieux tolérer le stress hydrique. Par exemple, certaines variétés peuvent développer des racines plus profondes pour accéder à l'eau présente dans les couches plus profondes du sol, ou produire des osmolytes qui aident à maintenir l'équilibre hydrique cellulaire (**Ma et al., 2018**). Ces adaptations permettent à ces variétés de mieux résister aux périodes de sécheresse et de continuer à croître dans des conditions de stress hydrique.

La qualité de la germination et des plantules de blé peut être affectée par le stress hydrique. Les plantules issues de graines soumises à un stress hydrique sévère peuvent être moins vigoureuses, ce qui peut entraîner une réduction de la biomasse et du rendement grainier (**Fathi *et al.*, 2016**). Les agriculteurs doivent donc porter une attention particulière à la gestion de l'eau, notamment en utilisant des techniques d'irrigation efficaces et en sélectionnant des variétés de blé tolérantes à la sécheresse.

Dans le domaine de la recherche sur la tolérance au stress hydrique, le polyéthylène glycol (PEG-6000) est largement utilisé en laboratoire pour simuler le stress osmotique induit par la sécheresse (<https://plantstress.com/use-of-peg/>). Cette substance permet de créer des conditions de stress contrôlées sans causer de dommages physiologiques aux plantes (**Mehmandar *et al.*, 2023**). La méthode de dépistage *in vitro* utilisant le PEG-6000 est reconnue comme une approche fiable pour évaluer la tolérance au manque d'eau chez différentes variétés de blé tendre. Quant aux effets du stress induit par le PEG sur le blé, plusieurs études ont exploré ces aspects. Par exemple, une recherche menée par **Sharma *et al.* (2022)** a examiné l'impact du stress hydrique induit par le PEG sur la croissance, la physiologie et la biochimie de différentes variétés de blé. Les résultats ont montré que le stress causé par le PEG a entraîné des altérations significatives dans la morphologie des plantes, ainsi que dans les niveaux de divers métabolites impliqués dans la réponse au stress. De même, une étude réalisée par (**Elhanafi *et al.*, 2020**) a évalué les effets du stress hydrique induit par le PEG sur l'expression des gènes liés à la tolérance au stress chez le blé, fournissant des informations précieuses sur les mécanismes moléculaires sous-jacents à cette tolérance. Ces exemples illustrent l'importance et la diversité des recherches menées sur l'effet du stress induit par le PEG sur le blé et mettent en lumière les avancées significatives dans ce domaine.

Dans ce contexte, notre étude vise à analyser le comportement de plusieurs variétés de blé tendre exposées au stress hydrique induit par le PEG-6000, tout en réalisant une analyse comparative de divers paramètres liés à la germination des graines et à la croissance des jeunes plantules en conditions de laboratoire. En nous appuyant sur cette recherche, nous aspirons à mieux comprendre la réponse des différentes variétés de blé tendre au stress hydrique, ouvrant ainsi la voie au développement de variétés plus résistantes et à une amélioration de la sécurité alimentaire dans des environnements sujets à la sécheresse.

*Chapitre I :*  
*Matériel et méthodes*

## I. Matériel et méthodes

### I.1. Matériel végétal

Dans le cadre de notre recherche, nous avons évalué la réponse de 12 variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) de différentes provenances (Tableau 1) au stress hydrique. Le stress hydrique a été induit par l'utilisation de polyéthylène glycol (PEG6000) aux stades de germination et de croissance des jeunes plantules. Le choix des variétés s'est basé sur leur diversité génétique et leur adaptation potentielle à des conditions de sécheresse.

**Tableau 1** : Liste des variétés de blé tendre étudiées.

Code	Nom	Code	Nom
V1	Sagitaria	V7	Gades
V2	Resulton	V8	Djemila
V3	Ain El Hadjer	V9	Anapo
V4	Akhamokh	V10	Zanzibar
V5	Mahon Démias	V11	Florence Aurore
V6	Almirante	V12	Avvento

### I.2. Conditions expérimentales

L'expérimentation a été effectuée dans le laboratoire régional du Centre National de Contrôle et Certification des semences et des plants (CNCC), laboratoire régional de Sétif, situé à 4 km sud du chef-lieu de la wilaya de Sétif, pendant le mois de février de l'année universitaire 2023/2024. Le travail pratique comprend deux parties complémentaires. La première partie étudie l'influence du stress hydrique causé par l'utilisation du polyéthylène glycol (PEG-6000) sur la germination des graines de blé. La seconde partie évalue l'effet du PEG-6000 sur la croissance des jeunes plantules de blé.

Les graines de chaque variété ont été soigneusement sélectionnées pour assurer une homogénéité des échantillons. Elles ont été désinfectées en utilisant une solution de sodium hypochlorite à 5% pendant 10 minutes, suivie d'un rinçage abondant à l'eau distillée pour éliminer tout résidu de désinfectant. Ces étapes préliminaires sont cruciales pour minimiser les risques de contamination par des pathogènes qui pourraient interférer avec les résultats de l'expérience.

### *1.2.1.1. Étude de la germination*

Pour induire le stress hydrique, une solution de PEG6000 a été préparée à une concentration de 20% (T1), soit une dissolution de 200 g de PEG-6000 dans un litre d'eau distillée pour simuler des conditions de déficit hydrique. Les graines ont été placées dans des boîtes de Pétri contenant du papier filtre imbibé soit d'eau distillée (pour les contrôles), soit de solution de PEG6000 (pour les traitements de stress hydrique). Les boîtes de Pétri ont ensuite été incubées dans une chambre de croissance à une température constante de 22°C, une humidité relative de 85% et une photopériode de 8 heures de lumière et 16 heures d'obscurité pour favoriser la germination.

L'essai de germination est répété trois fois. L'unité expérimentale est matérialisée par la boîte de pétri, portant 100 graines par variété et par boîte (Photo 1). La germination a été surveillée quotidiennement, du 1<sup>er</sup> au 7<sup>ème</sup> jour après la mise en germination. La germination est indiquée lorsque la radicule a atteint au moins 2 mm de longueur (Adjel *et al.* 2013).



**Photo 1 :** Préparation des graines de blé pour l'essai de germination.

### *1.2.1.1. Étude de la croissance des plantules*

Pour évaluer le comportement des plantules vis-à-vis du stress, 30 graines de blé de chaque variété ont été soumises à germinations dans des boîtes de Pétri contenant du papier buvard en l'absence de stress (Photo 2). Les graines germées par variété et par traitement ont été transférées après 48 heures dans des tubes à essai contenant 25ml d'eau aux mêmes

intensités de stress hydrique préalablement utilisées pour le test de germination (0%, 20% PEG6000). Des morceaux ronds d'éponge ont été utilisés comme un support pour les graines à l'extrémité intérieure des tubes et sur lesquels les graines ont été déposées (Photo 2). L'unité expérimentale est cette fois-ci matérialisée par le tube à essai, à raison d'une graine par tube, et les différents traitements sont répétés 5 fois. Cet essai a duré dix jours après la transplantation des graines dans les tubes à essai.



**Photo 2 :** Transplantation des graines de blé germées dans des tubes à essai.

### **I.3. Mesures et notations**

La germination a été surveillée quotidiennement, et les plantules ont été mesurées pour évaluer la croissance sous stress hydrique.

#### ***I.3.1. Essai de germination***

La phase initiale consacrée à l'essai de germination a abouti à la détermination des paramètres suivants :

***I.3.1.1. Pourcentage final de germination (%G, %)*** : il est déterminé la fin de l'expérience selon **Shirefaw et Baker (1996)** par le rapport du nombre de graines germés (NTGG) sur le nombre total de graines soumises à la germination (NTGS) :

$$\%G = 100 (NTGG/NTGS)$$

**I.3.1.2. Temps moyen de germination (TMG, jours) :** il est calculé selon **Ellis et Roberts (1981)** par la formule suivante :

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i t_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$$

Où :  $n_i t_i$  est le produit des graines germées à l' $i^{\text{ème}}$  intervalle à l'intervalle de temps correspondant, et  $n_i$  est le nombre de graines germées dans l' $i^{\text{ème}}$  jour.

**I.3.1.3. Germination moyenne journalière (GMJ, %) :** c'est une estimation du pourcentage de germination sur chaque jour de la période de germination. Elle est obtenue selon **Scott et al. (1984)** en divisant le pourcentage cumulé de germination par le nombre de jours écoulés depuis le semis.

### **I.3.2. Essai de comportement**

Au cours de cette deuxième partie de l'expérience, nous avons déterminé les paramètres de croissances suivants :

**I.3.2.1. Longueur maximale des racines (LR, cm) :** elle est mesurée par variété, traitement et répétition comme la longueur de la racine la plus longue des graines germées.

**I.3.2.2. Nombre de racines (NR, No) :** il est déterminé par génotype, traitement et répétition par comptage des racines séminales ayant plus de 2 mm par graine germée.

**I.3.2.3. Longueur du coléoptile (LC, cm) :** elle est mesurée à partir de la graine jusqu'à la sortie de la première feuille avec une règle graduée.

**I.3.2.4. Longueur de la 1<sup>ère</sup> feuille (LF, cm) :** elle est mesurée à partir de la graine jusqu'à l'extrémité de la feuille par une règle graduée.

**I.3.2.5. Matières fraîches racinaire (MFR, mg) et aérienne (MFA, mg) :** elles sont déterminées à la fin de l'expérience à l'aide d'une balance à précision.

### **I.4. Analyse des données**

Les données collectées ont été soumises à une analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs étudiés (variété et stress) suivant un dispositif expérimental factoriel complètement randomisé à trois répétitions pour l'essai de germination et cinq répétitions pour l'essai de comportement des plantules durant la phase post-germination. Si l'ANOVA montre un effet

‘traitement’ significatif, les moyennes des traitements sont comparées en utilisant le test de la plus petite différence significative au seuil de risque de 5% (Ppds<sub>5%</sub>). Toutes les analyses statistiques ont été faites en utilisant le logiciel Past, version 4.06 (**Hammer et al., 2001**) et le programme Microsoft Excel.

*Chapitre II :*  
*Résultats et discussion*

## II. Résultats et discussion

### II.1. Essai de germination

#### II.1.1. Effet de la variété

La variation entre les différentes variétés est significative pour tous les caractères de germination étudiés (%G, TMG, GMJ), avec des valeurs de carrés moyens très élevées et des niveaux de signification à 0.1% comme indiqué par les résultats de l'analyse de la variance à deux facteurs étudiés (Tableau 2). Cela indique que les différentes variétés de semences ont des performances de germination distinctes. L'effet 'variété' explique 39.4% du total de la variation observée au niveau du pourcentage final de germination (%G).

**Tableau 2 :** Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de germination mesurés.

SV	ddl	%G	TMG	GMJ
Variété	11	262.76***	0.56***	5.36***
Stress	1	1577.35***	60.70***	32.19***
Variété*Stress	11	148.56***	0.20**	3.03***
Erreur	48	25.67	0.06	0.52

SV = Source de variation, ddl = degré de liberté, %G = pourcentage final de germination, TMG = Temps moyen de germination, GMJ = Germination moyenne journalière, \*\* et \*\*\* = Effets significatifs aux seuils de probabilité de 1% et 0.1%, respectivement.

Les moyennes des paramètres mesurés sont données dans le Tableau 3. Les résultats révèlent que les valeurs extrêmes minimales et maximales diffèrent selon le caractère et la variété. Le pourcentage final de germination (%G) varie de 81.00%, valeur minimale observée chez la variété V3, à 99.67%, valeur maximale atteinte par V7, avec une moyenne générale de 93,88 % et une plus petite différence significative (Ppds<sub>5%</sub>) de 5.88%.

Les temps moyens de germination (TMG) varient significativement entre les variétés, avec une valeur minimale de 2.97 jours pour V2 et maximale de 3.96 jours pour V9, pour une moyenne générale de 3.54 jours. V7 et V3 se distinguent par leurs valeurs moyennes journalières de germination (MJG), respectivement, de 14.24% et 11.57%. La moyenne générale de germination journalière est de 13,41% et la plus petite différence significative (Ppds<sub>5%</sub>) est de 0.84% (Tableau 3).

**Tableau 3** : Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de germination mesurés.

Variété	%G	SE	TMG	SE	GMJ	SE
V1	95.33 <sup>a</sup>	2.12	3.56 <sup>bc</sup>	0.45	13.62 <sup>a</sup>	0.30
V2	99.33 <sup>a</sup>	0.33	2.97 <sup>d</sup>	0.29	14.19 <sup>a</sup>	0.05
V3	81.00 <sup>b</sup>	4.36	3.51 <sup>c</sup>	0.39	11.57 <sup>b</sup>	0.62
V4	99.00 <sup>a</sup>	0.82	3.58 <sup>bc</sup>	0.45	14.14 <sup>a</sup>	0.12
V5	96.83 <sup>a</sup>	2.06	3.61 <sup>bc</sup>	0.45	13.83 <sup>a</sup>	0.29
V6	96.00 <sup>a</sup>	2.49	3.03 <sup>d</sup>	0.27	13.71 <sup>a</sup>	0.36
V7	99.67 <sup>a</sup>	0.33	3.42 <sup>c</sup>	0.39	14.24 <sup>a</sup>	0.05
V8	83.00 <sup>b</sup>	8.04	3.80 <sup>ab</sup>	0.44	11.86 <sup>b</sup>	1.15
V9	98.67 <sup>a</sup>	0.71	3.96 <sup>a</sup>	0.53	14.10 <sup>a</sup>	0.10
V10	96.00 <sup>a</sup>	2.29	3.54 <sup>bc</sup>	0.41	13.71 <sup>a</sup>	0.33
V11	95.67 <sup>a</sup>	4.14	3.95 <sup>a</sup>	0.50	13.67 <sup>a</sup>	0.59
V12	86.00 <sup>b</sup>	5.07	3.60 <sup>bc</sup>	0.46	12.29 <sup>b</sup>	0.72
<i>Moyenne</i>	93.88		3.54		13.41	
<i>Ppds (5%)</i>	5.88		0.29		0.84	

%G = pourcentage final de germination (%), TMG = Temps moyen de germination (jours), MGJ = Germination moyenne journalière (%), SE = Erreur standard. Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

### II.1.2. Effet du stress

Le stress est également une source de variation hautement significative pour tous les caractères de germination, avec des carrés moyens encore plus élevés que ceux de la variété (Tableau 2). Cela montre que le stress a un impact considérable sur la germination, modifiant substantiellement le pourcentage final de germination, le temps moyen de germination et la germination moyenne journalière. L'effet 'stress' explique 21.51% du total de la variation observée au niveau du pourcentage final de germination (%G).

Dans le Tableau 4, sont résumées les moyennes des effets du 'stress' sur les caractères mesurés. Les moyennes minimales et maximales démontrent une variabilité significative en fonction du niveau de stress appliqué. Les résultats de l'essai montrent que, sous l'effet du stress hydrique, les caractéristiques des graines diminuent généralement, sauf pour le temps moyen de germination (TMG). En effet, le TMG atteint une valeur maximale de 4.46 jours sous stress hydrique de 20% PEG-6000 et une valeur minimale de 2.63 jours en l'absence de stress.

Selon les résultats de l'étude, le stress hydrique a un impact négatif significatif sur la germination des graines de blé tendre. Globalement, en moyenne de toutes les variétés testées, le pourcentage final de germination a diminué de manière significative, passant de 98.56% en

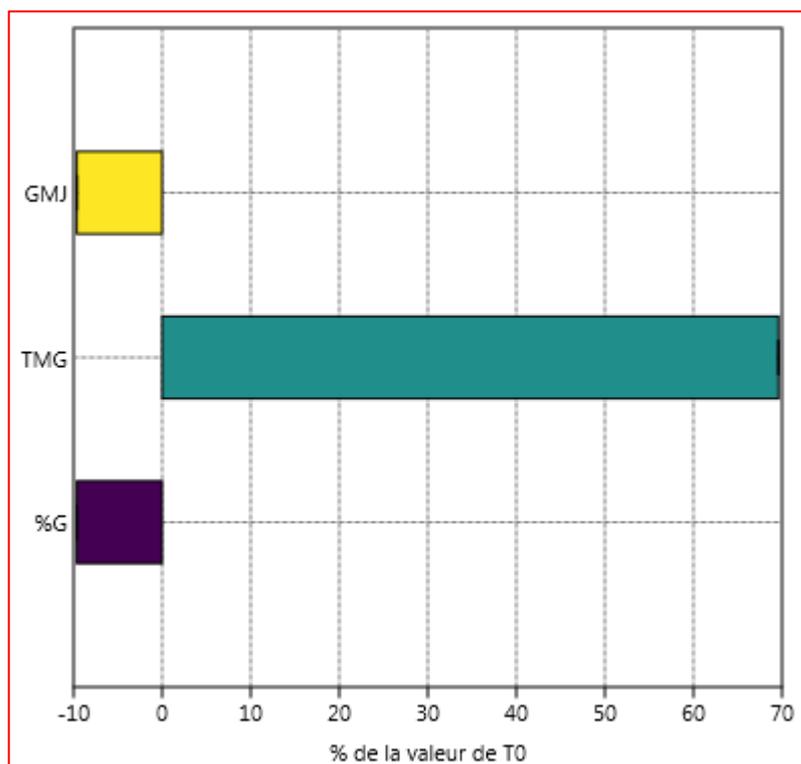
l'absence de stress (0% PEG-6000) à 89.19% sous stress hydrique de 20% PEG-6000, avec une plus petite différence significative de 2.40%. La germination moyenne journalière, a aussi diminué de manière significative de 14.08% en l'absence de stress à 12.74% sous stress hydrique de 20% PEG-6000, avec une plus petite différence significative de 0.43%.

**Tableau 4 :** Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress' des caractères de germination mesurés.

Stress	%G	SE	TMG	SE	GMJ	SE
T0	98.56 <sup>a</sup>	0.49	2.63 <sup>b</sup>	0.03	14.08 <sup>a</sup>	0.07
T1	89.19 <sup>b</sup>	2.08	4.46 <sup>a</sup>	0.09	12.74 <sup>b</sup>	0.30
Moyenne	93.88		3.54		13.41	
Ppds (5%)	2.40		0.12		0.34	

%G = Pourcentage final de germination (%), TMG = Temps moyen de germination (jours), GMJ = Germination moyenne journalière (%), SE = Erreur standard. Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

La variation du comportement germinatif observée entre les différentes variétés de blé tendre soumises à un stress hydrique a entraîné un ralentissement de la durée nécessaire pour que le processus de germination. La Figure 2 représente la réduction / augmentation (en %) des caractères de germination mesurés en T1 relativement au témoin T0 des variétés de blé tendre étudiées.



**Figure 2 :** Réduction / augmentation (en %) des caractères de germination mesurés en T1 relativement au témoin T0 des variétés de blé tendre étudiées.

Dans T1, on observe une augmentation de 69.61% du temps moyen de germination, tandis que le pourcentage final de germination ainsi que la moyenne journalière de germination ont diminué de -9.62% chacun.

### *II.1.3. Interaction variété\*stress*

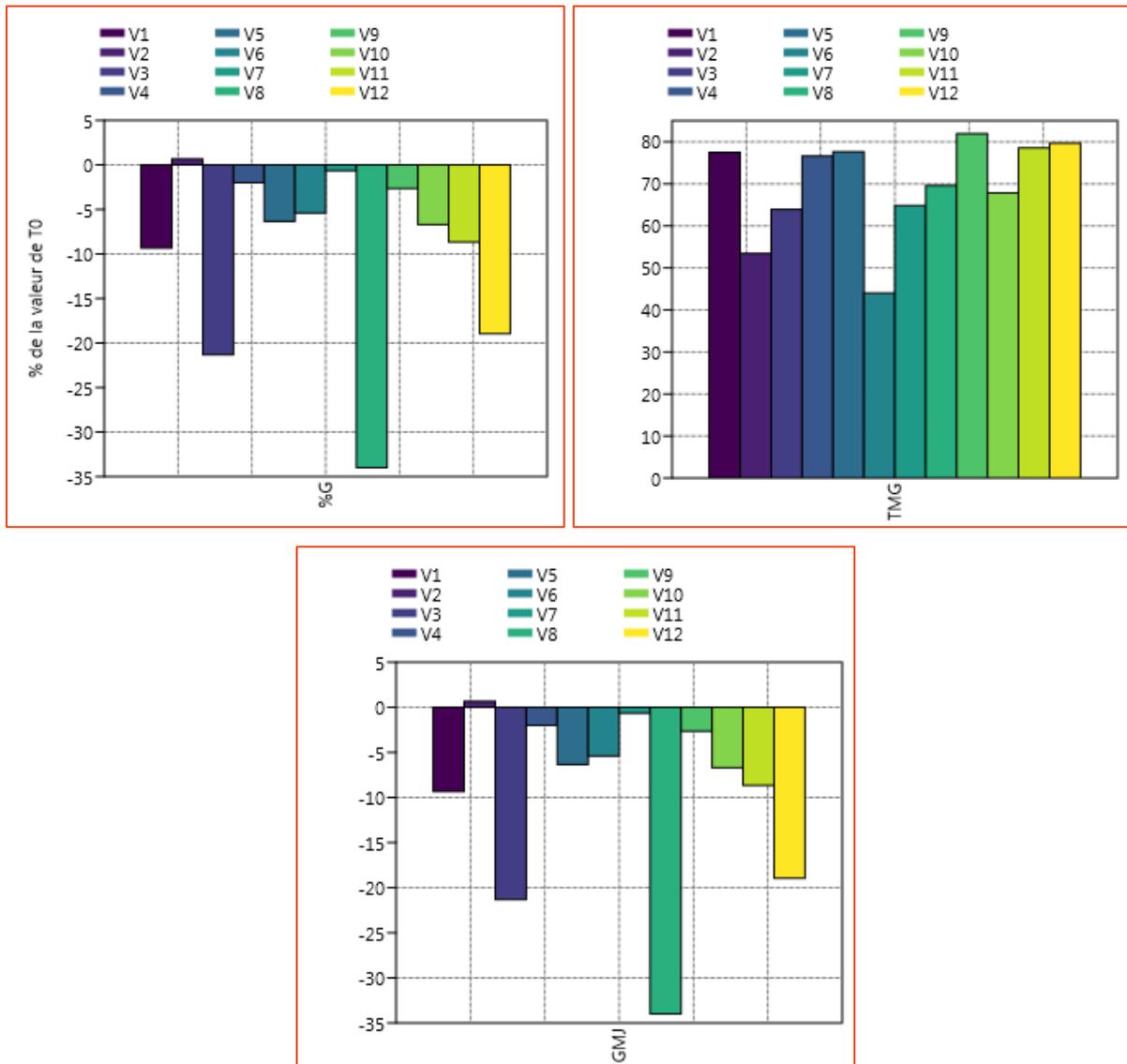
L'interaction entre la variété et le stress est significative pour tous les caractères, bien que les carrés moyens soient inférieurs à ceux des effets principaux (Tableau 2). Cela suggère que l'effet du stress varie selon les variétés, ce qui pourrait indiquer une résilience ou une sensibilité différente au stress parmi les variétés. L'effet 'variété\*stress' explique 22.28% du total de la variation observée au niveau du pourcentage final de germination (%G).

La Figure 3 montre les écarts de performance en termes de pourcentage de germination (%G), temps moyen de germination (TMG), et germination moyenne journalière (GMJ) pour différentes variétés sous le traitement de stress T1 (20% PEG-6000) par rapport au témoin T0 (0% PEG-6000). Ces écarts permettent d'évaluer la tolérance de chaque variété au stress hydrique induit par le PEG-6000. Plus l'écart est faible, plus la variété est tolérante au stress.

En présence de stress, les changements (augmentation / réduction) du pourcentage de germination varient de -34.00%, valeur minimale notée chez V8 à 0.67%, valeur maximale observée chez V2. Ainsi, il apparaît que cette dernière suivie de la variété V7 démontre une tolérance accrue à l'effet du stress hydrique sur la germination de ses graines, étant donné l'absence d'effet significatif observé. Elles peuvent donc être considérées comme tolérantes à ce niveau de stress de 20%.

La variété V8 et dans une moindre mesure V3 et V12 montrent les plus grandes sensibilités au stress hydrique, avec des pourcentages de germination et des germinations journalières très réduits et des temps moyens de germination significativement allongés.

Les variétés V4, V9, V6, V5, V10, V11 et V1 montrent des écarts négatifs de plus en plus importants, indiquant une sensibilité croissante au stress hydrique. Les TMG élevés pour ces variétés suggèrent des délais plus longs pour la germination sous stress.



**Figure 3 :** Réduction du % de germination du traitement T1 relativement au témoins T0 des variétés de blé tendre étudiées.

La phase de germination est l’une des étapes les plus critiques et sensibles dans le cycle de vie d’une plante. À ce stade, les graines commencent par l’imbibition, où la graine absorbe de l’eau pour réhydrater ses cellules et activer les enzymes. Toutefois, en cas de manque ou d’insuffisance d’eau, cela peut affecter négativement la germination. Par conséquent, lorsque les graines subissent un stress hydrique pendant la phase de germination, leur capacité à absorber l’eau est compromise, ce qui entraîne un ralentissement du métabolisme (**Khaeim et al., 2022**). Ce ralentissement peut perturber le processus enzymatique nécessaire à la germination, entraînant ainsi un retard dans l’émergence des plantules, une diminution du taux de germination et une réduction de la vigueur des plantules (**Ali, 2019**). **Alam et al. (2020)** ainsi

qu'Othmani *et al.* (2021) ont tous deux établi une corrélation inverse entre l'intensité du stress hydrique induit par le PEG-6000 et la durée moyenne de germination. D'autre part, le stress hydrique peut perturber la membrane cellulaire des graines et entraîner une diminution de leur viabilité (Khaeim *et al.*, 2022).

Les graines, en raison de leur nature biologique, sont sensibles aux variations dans les conditions environnementales notamment aux cycles de sécheresse et de réhydratation. Ces conditions de stress hydrique peuvent affecter de manière significative la germination et la croissance des plantes en modifiant les processus physiologiques et biochimiques à l'intérieur des graines (Liu *et al.*, 2022). Les réponses des semences à ces fluctuations environnementales peuvent jouer un rôle crucial dans leur survie et leur développement.

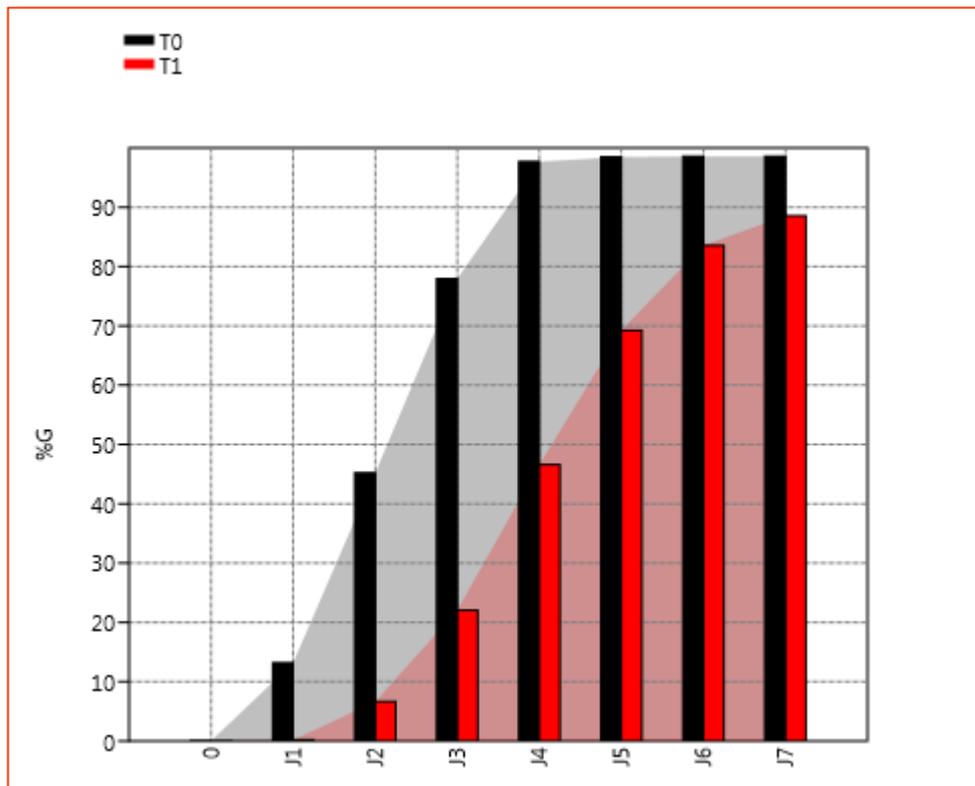
La connaissance des mécanismes de réaction et d'adaptation des graines face au stress hydrique durant la germination est essentielle pour élaborer des stratégies visant à améliorer la germination et la croissance des plantes en période de sécheresse. Ces approches peuvent englober l'adoption de méthodes de conservation de l'eau, le développement génétique de traits de résistance à la sécheresse, ainsi que l'emploi de traitements pré-germinatifs pour optimiser la germination en situation de stress hydrique (Chen *et al.*, 2023).

### *II.1.3. Cinétique de germination*

La cinétique de germination des graines de différentes variétés de blé tendre, testées sous des conditions de stress osmotique (traitement T1) par rapport à des conditions normales (traitement T0), est présentée dans la Figure 4. Une disparité significative est constatée entre les deux traitements analysés, T0 et T1, lors de l'étude.

Sous traitement T0, les graines germinent rapidement et atteignent un taux de germination presque maximal en quelques jours. Cependant, sous traitement T1 (20% PEG-6000), la germination est fortement retardée et, bien que le taux de germination augmente régulièrement, il reste inférieur à celui observé en conditions normales. Ces résultats confirment que le stress osmotique affecte significativement le taux et la rapidité de germination des graines de blé tendre. Les variétés montrant une germination plus rapide et plus élevée sous stress peuvent être considérées comme plus tolérantes au stress hydrique, une caractéristique cruciale pour la sélection de variétés adaptées aux conditions de stress. Dans une étude menée par Španić *et al.*

(2017), ils ont constaté l'effet inhibiteur de la contrainte hydrique provoquée par le polyéthylène glycol 6000 (PEG-6000).



**Figure 4 :** Cinétique de germination des grains de blé tendre en fonction de l'intensité du stress appliqué.

## II.2. Essai de comportement des plantules de blé

### II.2.1. Effet de la variété

Les variations entre les différentes variétés sont hautement significatives ( $p < 0.001$ ) pour tous les caractères de germination étudiés, sauf pour la longueur de la première feuille (LF) où l'effet n'est pas significatif (Tableau 2). Cela indique une diversité génétique importante influençant la croissance des plantules de blé pour ces caractères. La différence non significative de l'effet 'variété suggère que ce caractère pourrait être moins influencé par la variation génétique ou plus homogène entre les variétés étudiées.

Le Tableau 6 présente les valeurs moyennes des caractéristiques mesurées pour les différentes variétés de blé, en incluant tous les niveaux de stress hydrique appliqués. Les résultats montrent que les valeurs minimales et maximales varient en fonction du caractère

étudié et de la variété testée, montrant ainsi que les génotypes réagissent de manière distincte à ces conditions de stress.

**Tableau 5 :** Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de croissance mesurés.

SV	ddl	LR	NR	LC	LF	MFR	MFA
Variété	11	23.98***	3.42***	2.47***	133.49 <sup>ns</sup>	667.37***	1847.75***
Stress	1	383.42***	7.50**	0.28 <sup>ns</sup>	290.47 <sup>ns</sup>	935.21***	11940.08***
Variété*Stress	11	19.77***	1.57*	0.51 <sup>ns</sup>	67.31 <sup>ns</sup>	757.75***	348.22 <sup>ns</sup>
Erreur	96	5.51	0.69	0.31	97.70	60.10	318.51

SV = Source de variation, ddl = degré de liberté, LR = Longueur des racines, NR = Nombre de racines, LC = Longueur du coléoptile, LF = Longueur de la 1<sup>ère</sup> feuille, MFR = Matière fraîche racinaire, MFA = Matière fraîche aérienne, <sup>ns</sup>, \*, \*\* et \*\*\* = Effets non significatifs et significatifs aux seuils de probabilité de 5%, 1% et 0.1%, respectivement.

La longueur moyenne des racines des différentes variétés de blé testées est de 9.70 cm, avec une plus petite différence significative de 2.08 cm. La variété V6 a produit les racines les plus courtes, avec 6.23 cm, tandis que la variété V3 a développé les racines les plus longues, atteignant en moyenne 12.14 cm. Ces différences de longueur des racines entre les variétés illustrent la variabilité génétique existante au sein du matériel végétal étudié, certains génotypes étant capables de produire un système racinaire plus développé que d'autres en réponse aux conditions de stress hydrique appliquées.

La moyenne générale de nombre de racines par plante pour l'ensemble des variétés testées est de 4.62 racines, avec une plus petite différence significative (Ppds<sub>5%</sub>) de 0.74 racines. Les variétés V1 et V8 présentent le nombre de racines le plus important, avec une moyenne de 5.60 racines par plante, tandis que les variétés V10 et V12 a développé le nombre de racines le plus réduit, avec seulement 4.00 racines en moyenne.

La variété V9 présente la longueur du coléoptile la plus courte, avec 1.59 cm, tandis que V11 a développé les coléoptiles les plus longs avec 3.13 cm. La moyenne générale est de 2.34 cm et la plus petite différence significative (Ppds<sub>5%</sub>) est de 0.5 cm.

Concernant la longueur de la première feuille, V9 et V6 expriment respectivement les valeurs moyennes les plus faibles et les plus élevées, avec 6.59 cm et 20.90 cm pour une moyenne générale de 3.54 jours et une plus petite différence significative (Ppds<sub>5%</sub>) est de 8.77 cm.

Tableau 6 : Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de croissance mesurés.

Variété	LR	SE	NR	SE	LC	SE	LF	SE	MFR	SE	MFA	SE
V1	10.84 <sup>abc</sup>	0.84	5.60 <sup>a</sup>	0.34	2.59 <sup>bc</sup>	0.09	12.02 <sup>b</sup>	0.58	35.90 <sup>bc</sup>	4.48	79.30 <sup>a</sup>	6.89
V2	9.56 <sup>bcd</sup>	0.56	4.30 <sup>cd</sup>	0.21	2.26 <sup>cd</sup>	0.26	11.52 <sup>b</sup>	1.36	27.00 <sup>d</sup>	1.86	57.40 <sup>bc</sup>	8.03
V3	12.14 <sup>a</sup>	0.84	4.30 <sup>cd</sup>	0.33	2.99 <sup>ab</sup>	0.07	15.24 <sup>ab</sup>	0.56	29.30 <sup>cd</sup>	2.29	74.40 <sup>a</sup>	4.59
V4	11.32 <sup>ab</sup>	0.74	4.50 <sup>bcd</sup>	0.31	2.01 <sup>def</sup>	0.12	11.31 <sup>b</sup>	1.03	23.40 <sup>de</sup>	3.22	56.00 <sup>bcd</sup>	5.09
V5	9.85 <sup>bcd</sup>	1.09	4.40 <sup>cd</sup>	0.31	2.97 <sup>ab</sup>	0.27	12.09 <sup>b</sup>	1.28	27.70 <sup>d</sup>	3.35	66.00 <sup>ab</sup>	7.91
V6	6.23 <sup>e</sup>	0.43	5.20 <sup>ab</sup>	0.20	2.07 <sup>def</sup>	0.15	20.90 <sup>a</sup>	10.14	16.50 <sup>f</sup>	1.51	48.70 <sup>cd</sup>	3.29
V7	10.00 <sup>bcd</sup>	1.39	4.40 <sup>cd</sup>	0.22	2.29 <sup>cd</sup>	0.15	9.15 <sup>b</sup>	0.96	17.50 <sup>ef</sup>	2.30	40.40 <sup>d</sup>	5.18
V8	10.72 <sup>abc</sup>	1.37	5.60 <sup>a</sup>	0.31	2.30 <sup>cd</sup>	0.15	8.76 <sup>b</sup>	1.17	43.90 <sup>a</sup>	6.49	46.80 <sup>cd</sup>	6.94
V9	9.19 <sup>cd</sup>	1.63	4.10 <sup>d</sup>	0.35	1.59 <sup>f</sup>	0.26	6.59 <sup>b</sup>	1.64	29.10 <sup>cd</sup>	5.70	40.50 <sup>d</sup>	10.12
V10	9.55 <sup>bcd</sup>	0.97	4.00 <sup>d</sup>	0.26	1.69 <sup>ef</sup>	0.21	9.32 <sup>b</sup>	0.82	27.70 <sup>d</sup>	3.11	47.20 <sup>cd</sup>	5.39
V11	8.49 <sup>d</sup>	0.64	5.00 <sup>abc</sup>	0.30	3.13 <sup>a</sup>	0.18	12.77 <sup>ab</sup>	0.97	40.00 <sup>ab</sup>	3.49	74.70 <sup>a</sup>	5.61
V12	8.46 <sup>d</sup>	1.03	4.00 <sup>d</sup>	0.30	2.17 <sup>cde</sup>	0.13	10.62 <sup>b</sup>	0.98	24.70 <sup>d</sup>	3.58	52.50 <sup>bcd</sup>	6.70
Moyenne	9.70		4.62		2.34		11.69		28.56		56.99	
Ppds (5%)	2.08		0.74		0.50		8.77		6.88		15.84	

LR = Longueur des racines (cm), NR = Nombre de racines (No), LC = Longueur du coléoptile (cm), LF = Longueur de la 1<sup>ère</sup> feuille (cm), MFR = Matière fraîche racinaire (mg), MFA = Matière fraîche aérienne (mg), SE = Erreur standard. Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

La moyenne générale de la matière fraîche racinaire est de 28.56 mg et la plus petite différence significative ( $P_{pds5\%}$ ) est de 6.88 mg. La variété V6 présente la moyenne la plus faible, avec 16.50 mg, tandis que V8 a produit la valeur la plus élevée, avec 43.90 mg. Ces différences de production de matière fraîche racinaire entre les variétés illustrent la variabilité génétique existante au sein du matériel végétal étudié.

La matière fraîche aérienne moyenne pour l'ensemble des variétés testées est de 56.99 mg, avec une plus petite différence significative ( $P_{pds5\%}$ ) de 15.84 mg. La variété V7 présente la valeur minimale de matière fraîche aérienne, avec 40.40 mg. À l'opposé, la variété V1 présente la valeur maximale, atteignant 79.30 mg.

### *II.2.2. Effet du stress*

Le stress osmotique a un effet hautement ( $p < 0.01$ ) à très hautement significatif ( $p < 0.001$ ) pour LR, NR, MFR, MFA, soulignant son impact considérable sur la croissance des racines et la matière fraîche des plantules (Tableau 2). Concernant, LC et LF, l'analyse de la variance n'a pas démontré de différences significatives entre les niveaux de stress appliqués, indiquant que ces caractères pourraient être moins sensibles au stress osmotique appliqué dans cette étude.

Le Tableau 7 montre que les valeurs moyennes extrêmes minimales et maximales des caractères mesurés varient en fonction de l'intensité du stress hydrique appliqué. Les valeurs moyennes les plus faibles sont observées en présence de stress hydrique (20% PEG-6000) pour la plupart des paramètres mesurés, à l'exception du nombre de racines (NR) et de la longueur du coléoptile (LC).

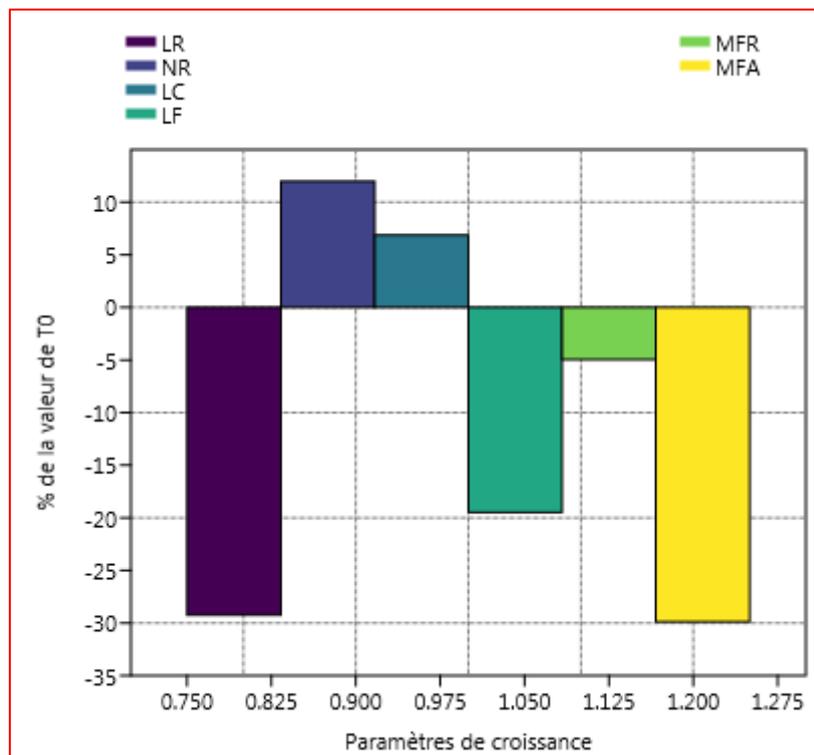
La longueur des racines a varié entre 7.91 et 11.48 cm, avec une plus petite différence significative ( $P_{pds5\%}$ ) de 0.85 cm. Le nombre de racines a également changé, passant de 4.87 à 4.37 racines, avec une plus petite différence significative ( $P_{pds5\%}$ ) de 0.30 racines. La longueur de la coléoptile a varié entre 2.39 et 2.29 cm, avec une plus petite différence significative ( $P_{pds5\%}$ ) de 0.20 cm. La longueur de la première feuille a montré une amplitude de 10.14 à 13.25 cm, avec une plus petite différence significative de 3.58 cm. Les matières fraîches racinaire et aérienne ont également varié, respectivement, entre 25.77 et 47.02 mg en T1 et 31.35 et 66.97 mg en T0, avec des plus petites différences significatives ( $P_{pds5\%}$ ) de 2.81 et 6.47 mg, respectivement.

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

Stress	LR	SE	NR	SE	LC	SE	LF	SE	MFR	SE	MFA	SE
T0	11.48 <sup>a</sup>	0.40	4.37 <sup>b</sup>	0.12	2.29 <sup>a</sup>	0.10	13.25 <sup>a</sup>	1.72	31.35 <sup>a</sup>	2.16	66.97 <sup>a</sup>	2.77
T1	7.91 <sup>b</sup>	0.35	4.87 <sup>a</sup>	0.14	2.39 <sup>a</sup>	0.09	10.14 <sup>a</sup>	0.56	25.77 <sup>b</sup>	1.18	47.02 <sup>b</sup>	2.79
<i>Moyenne</i>	<i>9.70</i>		<i>4.62</i>		<i>2.34</i>		<i>11.69</i>		<i>28.56</i>		<i>56.99</i>	
<i>Ppds (5%)</i>	<i>0.85</i>		<i>0.30</i>		<i>0.20</i>		<i>3.58</i>		<i>2.81</i>		<i>6.47</i>	

LR = Longueur des racines (cm), NR = Nombre de racines (No), LC = Longueur du coléoptile (cm), LF = Longueur de la 1<sup>ère</sup> feuille (cm), MFR = Matière fraîche racinaire (mg), MFA = Matière fraîche aérienne (mg), SE = Erreur standard. Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

La Figure 5 illustre la variation en pourcentage des valeurs des variables mesurées sous l'effet du stress (T1 : 20% PEG-6000) par rapport au témoin (T0 : 0% PEG-6000). Les résultats mettent en évidence que l'impact du PEG-6000 varie en fonction de la caractéristique mesurée. Ainsi, les baisses observées s'élèvent à environ -29,26%, 11,99%, 6,87%, -19,47%, -4,96% et -29,90%, respectivement pour LR, NR, LC, LF, MFR et MFA.



**Figure 5 :** Réduction (en %) des caractères de croissance mesurés en T1 relativement au témoin T0 des variétés de blé tendre étudiées.

**II.2.3. Interaction variété\*stress**

L'analyse de la variance à deux facteur (ANOVA) montre une interaction entre la variété et le stress significative ( $p < 0.05$ ) à très hautement significative ( $p < 0.001$ ) pour LR, NR et MFR, bien que moins marquée que les effets principaux de la variété et du stress (Tableau 2). Cela suggère que certaines variétés répondent différemment au stress, ce qui pourrait être exploité pour la sélection de variétés plus tolérantes. En ce qui concerne LC, LF et MFA, l'interaction n'est pas significative pour ces caractères, indiquant que la réponse au stress pourrait être relativement uniforme parmi les variétés pour ces traits.

La Figure 6 illustre les valeurs de réduction / d'augmentation des variables mesurées lors du traitement T1 par rapport au témoin T0, pour les 12 variétés de blé tendre testées.

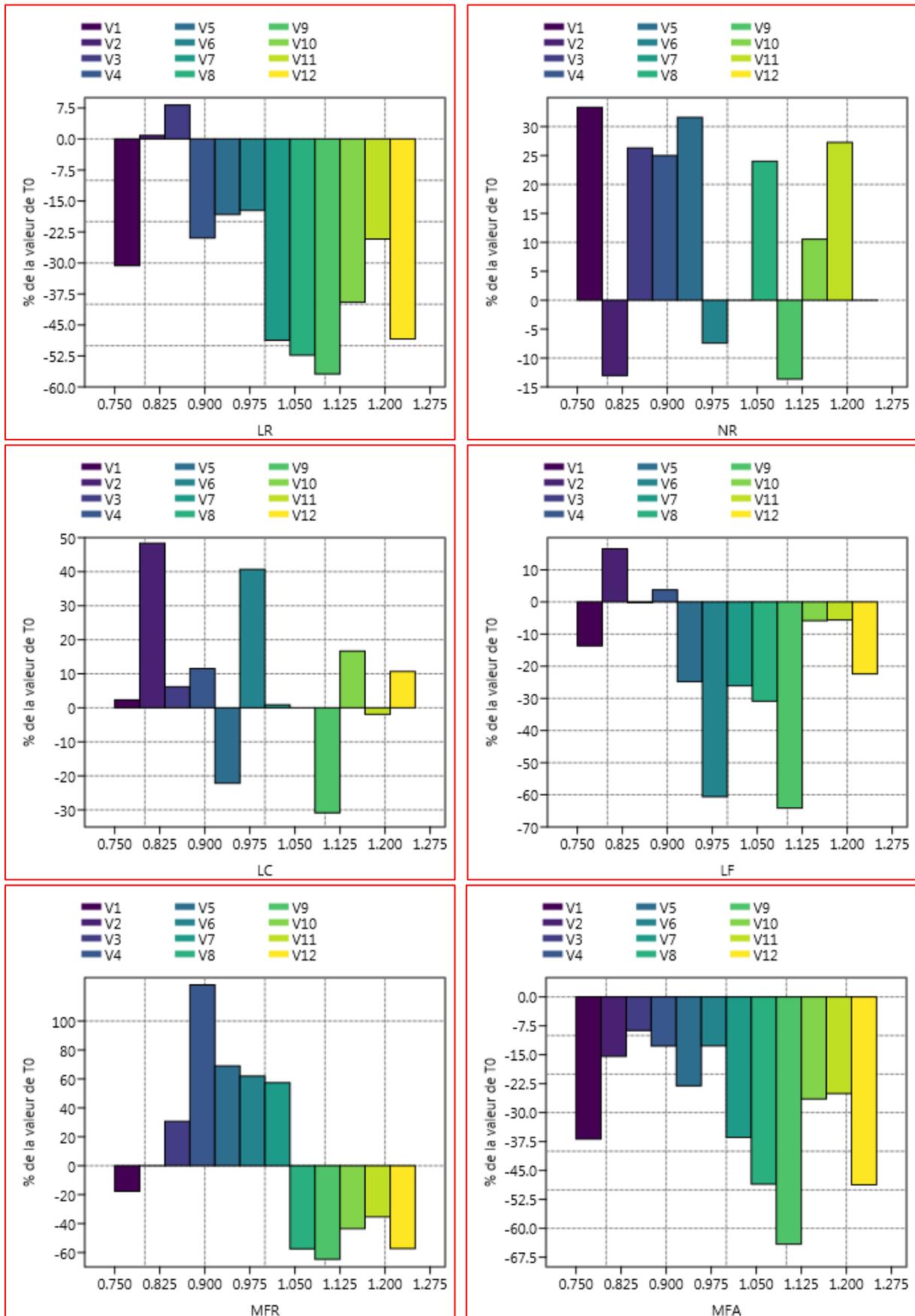


Figure 6 : Réduction / augmentation (en %) des paramètres de croissance aux traitements T1 relativement au témoins T0 des variétés de blé dur étudiées.

La longueur des racines a généralement diminué sous stress, avec des réductions significatives observées pour les variétés V9, V8, V7 et V12 (réductions allant de -48.39% à -56.85%). Certaines variétés, comme V2 et V3, montrent peu de changement ou une légère augmentation (V2 : 0.84%, V3 : 8.23%), ce qui pourrait indiquer une meilleure tolérance au stress osmotique pour ces caractères.

Les variétés V1, V3, V4, V5 et V11 montrent une augmentation notable du nombre de racines sous stress (25.00% à 33.33%), suggérant une adaptation pour maximiser l'absorption d'eau. En revanche, les variétés V2, V6 et V9 montrent une diminution du nombre de racines (-7.41% à -13.64%), ce qui pourrait refléter une sensibilité accrue au stress osmotique.

Les variétés V2 et V6 montrent une augmentation significative de la longueur du coléoptile (V2 : 48.35%, V6 : 40.70%), ce qui pourrait indiquer une adaptation pour chercher la lumière. Des réductions significatives sont observées chez V5 et V9 (-22.16% et -30.85%), suggérant une inhibition de la croissance du coléoptile sous stress.

La longueur de la première feuille a généralement diminué sous stress, avec des réductions marquées chez V6, V9 et V8 (-30.89% à -64.57%). Quelques variétés montrent une légère augmentation ou une faible réduction, telles que V2 (16.54%) et V4 (3.78%), ce qui pourrait indiquer une certaine tolérance au stress pour ce caractère.

Certaines variétés, comme V4, montrent une augmentation significative de la matière fraîche racinaire (125.00%), ce qui pourrait refléter une adaptation positive au stress. D'autres variétés, comme V8, V9 et V10, montrent des réductions importantes (-43.50% à -64.65%), indiquant une forte sensibilité au stress osmotique.

La matière fraîche aérienne a diminué sous stress pour la plupart des variétés, avec des réductions marquées chez V8, V9 et V12 (-48.54% à -64.09%). Quelques variétés montrent des réductions plus modérées, comme V3 et V4 (-8.74% et -12.71%), suggérant une meilleure tolérance pour ce caractère.

Globalement, les résultats montrent des variations significatives entre les variétés de blé tendre en réponse au stress osmotique. Certaines variétés, comme V2 et V4, montrent des adaptations positives telles qu'une augmentation du nombre de racines et de la matière fraîche racinaire, indiquant une meilleure tolérance au stress. En revanche, d'autres variétés, comme V8, V9 et V12, présentent des réductions importantes dans plusieurs caractères de croissance,

révélant une sensibilité accrue au stress osmotique. Ces observations sont cruciales pour la sélection de variétés de blé plus résilientes, capables de maintenir une croissance optimale sous des conditions de stress hydrique.

L'effet du stress hydrique à n'importe quel stade de développement de la culture peut se manifester, en fonction de la stratégie d'adaptation de chaque variété, par des modifications morphologiques tant au niveau des parties aériennes que des parties souterraines de la plante (**Farooq et al., 2009**). Ces changements dépendent de l'intensité du stress, de sa durée et du stade de développement auquel il intervient, mais aussi du génotype considéré.

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 **Bendarradji 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. Un système racinaire profond et étendu peut permettre une meilleure exploitation des ressources en eau dans le sol, offrant ainsi un avantage significatif en termes de résilience et de tolérance à la sécheresse (**Wasson et al., 2012 ; Comas et al., 2013**). La cytokinine joue un rôle important dans la régulation de la croissance et du développement des plantes. Selon **Joshi et al. (2019)** et **Nehnevajova et al. (2019)**, la cytokinine agit comme un facteur indirect pour limiter les dommages causés par le stress hydrique, augmentant ainsi les chances de survie des plantes en cas de pénurie d'eau. D'autre part, les cytokinines sont nécessaires à la croissance des tiges et leur diminution entraîne une croissance limitée de celles-ci afin de préserver les ressources en eau limitées et de les réaffecter à la croissance des racines (**Werner et al., 2008**).

La réduction de la biomasse des tiges, des racines et de la longueur des coléoptiles induite par le PEG-6000 est observée de manière plus significative chez les génotypes sensibles à la sécheresse par rapport aux génotypes tolérants, comme l'ont également souligné d'autres recherches (**Xu et al., 2010**). Selon **Farooq et al. (2009)** et de **Rajjou et al. (2012)**, le stress hydrique précoce a un effet simultané sur la croissance des racines et des parties aériennes des plantes. Lorsque le stress hydrique est imposé de manière osmotique, une réduction significative de la biomasse fraîche des racines et des parties aériennes est observée, en particulier sous des conditions de stress sévère. Cependant, l'effet du PEG-6000, un agent de stress osmotique, semble être plus prononcé sur la partie inférieure de la plante, comme l'ont également constaté **Vuković et al. (2022)**.

Ceci est corroboré par nos résultats où les réductions de la matière fraîche racinaire sont souvent plus importantes que celles de la matière fraîche aérienne pour certaines variétés, reflétant une réponse adaptative différentielle entre les parties souterraines et aériennes de la plante sous stress osmotique. **Chekkal et Derrachi (2022)**, ont observé qu'en cas de stress hydrique intense, un arrêt complet du développement des feuilles est également possible. Leur étude a révélé que la variation du taux de germination du blé dépend à la fois de l'intensité du stress hydrique appliqué et du génotype testé.

### II.3. Classification des variétés vis-à-vis de la tolérance au stress

L'interaction entre les variétés de blé et le stress osmotique montre des variations importantes selon les caractères mesurés, ce qui illustre la complexité de la réponse des plantes au stress hydrique. Le Tableau 8 présente le classement des variétés selon chaque caractère mesuré, avec une moyenne des rangs (MSR) pour évaluer la tolérance globale au stress.

**Tableau 8 :** Ordre de classement des variétés de blé par caractère mesuré.

Variétés	%G	LR	NR	LC	LF	MFR	MFA	MSR
V1	4	7	1	7	6	7	9	5.86
V2	3	2	11	1	1	6	4	4.00
V3	9	1	4	6	3	5	1	4.14
V4	11	5	5	4	2	1	3	4.43
V5	6	4	2	11	8	2	5	5.43
V6	1	3	10	2	11	3	2	4.57
V7	12	10	9	8	9	64	8	8.57
V8	7	11	6	9	10	11	10	9.14
V9	10	12	12	12	12	12	12	11.71
V10	2	8	7	3	5	9	7	5.86
V11	5	6	3	10	4	8	6	6.00
V12	8	9	8	5	7	10	11	8.29

%G = Pourcentage final de germination (%), NR = Nombre de racines (No), LR = Longueur des racines (cm), LC = Longueur du coléoptile (cm), LF = Longueur de la 1<sup>ère</sup> feuille (cm), MFR = Matière fraîche racinaire (mg), MFA = Matière fraîche aérienne (mg), MSR = Moyenne de la somme des rangs.

Les résultats montrent que le classement des variétés de blé tendre en fonction de leur tolérance au stress hydrique varie selon le caractère mesuré et le niveau de stress appliqué. Pour chaque variable étudiée (pourcentage de germination, longueur des racines, longueur du coléoptile, etc.), les variétés ont été ordonnées de la plus tolérante à la plus sensible, en se basant sur les écarts entre les moyennes sous stress et celles du témoin non stressé. Plus l'écart est important, moins la variété est tolérante pour ce caractère donné. Cependant, un même génotype

ne conserve pas forcément la même position dans le classement pour tous les caractères et tous les niveaux de stress.

La réponse dépend à la fois de la variété, de l'organe considéré et de l'intensité du stress appliqué. Ce classement met en évidence la variabilité génétique existante au sein du matériel végétal étudié, permettant d'identifier les variétés les plus tolérantes et les plus sensibles pour chaque caractère lié à la tolérance au stress hydrique. La méthode de la moyenne de la somme des rangs (MSR) est utilisée pour classer les variétés de blé tendre en fonction de leur tolérance globale au stress hydrique, en se basant sur leurs performances pour différents paramètres mesurés.

Les résultats montrent que les valeurs de MSR variant de 4.00 à 11.71 pour les variétés V2 et V9 respectivement, indiquent des niveaux de tolérance différents. La variété V2 est considérée comme la plus tolérante, tandis que la variété V9 est classée comme la plus sensible (Tableau 8 ; Figure 7).

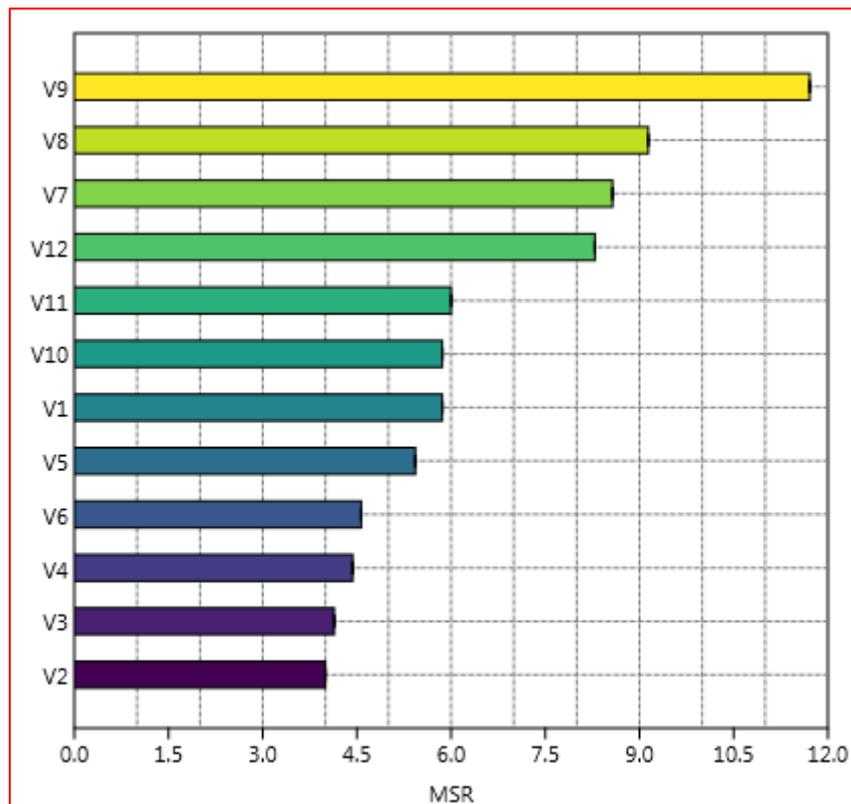


Figure 7 : Degré de sensibilité au stress hydrique des variétés de blé étudiées au stade germinatif.

*Conclusión*

## **Conclusion**

L'étude sur la germination des graines de blé tendre a révélé des différences significatives entre les variétés en termes de pourcentage final de germination (%G), de temps moyen de germination (TMG) et de germination moyenne journalière (GMJ). Ces résultats montrent que les performances de germination varient considérablement selon la variété, avec des effets significatifs observés au niveau de l'analyse de la variance. Les variétés V7 et V2 se sont démarquées par leurs performances supérieures, tandis que V3 et V8 ont montré des performances inférieures.

L'impact du stress hydrique sur la germination a également été significatif. En présence de stress hydrique, toutes les caractéristiques de germination ont diminué de manière substantielle, sauf pour le TMG, qui a augmenté. Cela indique que le stress hydrique ralentit le processus de germination et réduit le pourcentage final de germination et la germination moyenne journalière.

L'interaction entre la variété et le stress a montré que certaines variétés, comme V2 et V7, sont plus tolérantes au stress hydrique, tandis que d'autres, comme V8, V3, et V12, sont plus sensibles. Les variétés tolérantes ont montré des écarts de performance moins importants sous stress, indiquant une résilience accrue.

La cinétique de germination a confirmé que le stress osmotique retarde et réduit le taux de germination des graines. Les variétés qui maintiennent une germination rapide et élevée sous stress peuvent être considérées comme plus adaptées aux conditions de stress hydrique.

L'étude du comportement des plantules de blé tendre en conditions de stress hydrique révèle des variations significatives entre les différentes variétés pour plusieurs caractères de croissance. Les résultats montrent que certaines variétés, comme V3 et V1, ont des performances supérieures, produisant des systèmes racinaires plus développés et une matière fraîche plus abondante. À l'inverse, des variétés comme V6 et V9 ont montré des performances inférieures, indiquant une sensibilité accrue au stress hydrique. La longueur de la première feuille (LF) n'a pas montré de variation significative entre les variétés, suggérant une homogénéité génétique pour ce caractère.

Le stress osmotique induit par le PEG-6000 a eu un impact significatif sur la croissance des plantules. Les paramètres de croissance tels que la longueur des racines et la matière fraîche racinaire et aérienne ont diminué sous stress, tandis que le nombre de racines et la longueur du

coléoptile ont montré des variations moindres. Les réductions observées soulignent l'impact négatif du stress hydrique sur la croissance des plantules de blé.

L'interaction entre la variété et le stress hydrique a révélé que certaines variétés réagissent différemment au stress. Par exemple, V2 et V4 ont montré des adaptations positives, telles qu'une augmentation du nombre de racines et de la matière fraîche racinaire, indiquant une meilleure tolérance au stress. En revanche, les variétés V8, V9, et V12 ont présenté des réductions importantes pour plusieurs caractères de croissance, révélant une sensibilité accrue au stress hydrique.

La méthode de la moyenne de la somme des rangs (MSR) a été utilisée pour classer les variétés de blé tendre en fonction de leur tolérance globale au stress hydrique, basée sur leurs performances pour différents paramètres mesurés. La variété V2 a été identifiée comme la plus tolérante au stress hydrique, tandis que la variété V9 a été classée comme la plus sensible.

Ces résultats mettent en évidence la variabilité génétique existante au sein du matériel végétal étudié, permettant d'identifier les variétés les plus tolérantes et les plus sensibles pour chaque caractère lié à la tolérance au stress hydrique. Cette variabilité est cruciale pour les programmes de sélection et d'amélioration des cultures, visant à développer des variétés de blé tendre capables de maintenir une croissance et une production optimales sous des conditions de stress hydrique.

En conclusion, l'identification des variétés tolérantes, comme V2, constitue une avancée importante pour l'amélioration des cultures dans des environnements soumis à des contraintes hydriques. La variabilité observée dans les réponses au stress hydrique souligne l'importance de considérer plusieurs caractères et niveaux de stress pour une évaluation complète de la tolérance au stress, facilitant ainsi une sélection plus précise et efficace des variétés adaptées aux conditions de stress hydrique.

*Références  
Bibliographiques*

## Références bibliographiques

- Ali, O.A. (2019).** Wheat responses and tolerance to drought stress. In: Wheat production in changing environments. Springer, pp 129-138
- Ammar, K. (2023).** Breeding durum wheat for resiliency to climate change and extreme environments: Achievements and current strategy at CIMMYT. In : International Symposium on 'La Production du Blé et la Sécurité Alimentaire'. INRAA, 12-13 Décembre 2023.
- Beres, B.L., Rahmani, E., Clarke, J.M., Grassini, P., Pozniak, C.J., Geddes, C.M., Porker, K.D., May, W.E., Ransom, J.K. (2020).** A Systematic Review of Durum Wheat: Enhancing Production Systems by Exploring Genotype, Environment, and Management ( $G \times E \times M$ ) Synergies. *Front. Plant Sci.*, **11**, 568657.
- Berg, A., Karna, N., Fuentealba, C. (2014).** Viabilité énergétique du fractionnement de la paille de blé par procédé acétosolv. *Cellul Chem Technol.*, **48**: 787-792.
- Comas, L. H., Becker, S. R., Cruz, V. M., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013).** Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, **4**, 442.
- Chen, Y., Leng, Y. N., Zhu, F. Y., Li, S. E., Song, T., & Zhang, J. (2023).** Water-saving techniques: physiological responses and regulatory mechanisms of crops. *Advanced Biotechnology*, **1**(4), 3.
- DSASI (2022).** Direction de la Statistique Agricole et des systèmes d'Information. Ministère de l'Agriculture et du développement Rural.
- 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.
- Fathi, A., & Tari, D. B. (2016).** Effect of drought stress and its mechanism in plants. *International Journal of Life Sciences*, **10**(1), 1-6.
- Fellahi, Z. E. A., Boubellouta, T., Hannachi, A., Belguet, H., Louahdi, N., Benmahammed, A., Utkina, A. O., & Rebouh, N. Y. (2024).** Exploitation of the Genetic Variability of Diverse Metric Traits of Durum Wheat (*Triticum turgidum* L. ssp. *durum* Desf.) Cultivars for Local Adaptation to Semi-Arid Regions of Algeria. *Plants*, **13**(7), 934.
- Joshi, R., Singla-Pareek, S. L., & Pareek, A. (2019).** Engineering abiotic stress response in plants for biomass production. *Journal of Biotechnology*, **290**, 29-38
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Al Mahmud, J., ... & Fujita, M. (2020).** Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial network." *Frontiers in Physiology*, **11**, 482.
- Huseynova, I.M., Rustamova, S.M., Suleymanov, S.Y., Aliyeva, D.R., Mam-madov, A.C., Aliyev, J.A. (2016).** Drought-induced changes in photo-synthetic apparatus and antioxidant components of wheat (*Triticum durum* Desf.) varieties. *Photosynth. Res.*, **130**, 215-223.
- Garcia, A., Rengel, Z., & Damon, P.M. (2020).** Influence of Water Stress on Root Morphology and

Physiology in Wheat. *Journal of Experimental Botany*, **71**(17), 4640-4653.

**Khaeim, H., Kende, Z., Balla, I., Gyuricza, C., Eser, A., & Tarnawa, Á. (2022).** The effect of temperature and water stresses on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Sustainability*, **14**(7), 3887.

**Rajjou, L., Duval, M., Gallardo, K., Catusse, J., Bally, J., Job, C., ... & Job, D. (2012).** Seed germination and vigor. *Annual Review of Plant Biology*, **63**, 507-533.

**Liu, S., Wang, W., Lu, H., Shu, Q., Zhang, Y., & Chen, Q. (2022).** New perspectives on physiological, biochemical and bioactive components during germination of edible seeds: A review. *Trends in Food Science & Technology*, **123**, 187-197.

**Ma, Z.; Guo, D.; Xu, X.; Lu, M.; Bardgett, R.D.; Eissenstat, D.M.; McCormack, M.L.; Hedin, L.O. (2018).** Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. *Nature*, **555**, 94-97.

**Mehmandar, M. N., Rasouli, F., Giglou, M. T., Zahedi, S. M., Hassanpouraghdam, M. B., Aazami, M. A., ... & Mlcek, J. (2023).** Polyethylene glycol and sorbitol-mediated in vitro screening for drought stress as an efficient and rapid tool to reach the tolerant *Cucumis melo* L. Genotypes. *Plants*, **12**(4), 870.

**OCDE-FAO, (2021).** Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2021-2030.

**Nehnevajova, E., Ramireddy, E., Stelzer, R., Wyss, U., Zoller, S., Reimann, R., ... & Rügsegger, A. (2019).** Soil-plant interaction affects differently the nutritional status of wheat in monoculture vs. wheat/maize intercropping systems. *Frontiers in Plant Science*, **10**, 687.

**Ozden, E., Light, M.E., Demir, I. (2021).** Alternating temperatures increase germination and emergence in relation to endogenous hormones and enzyme activities in aubergine seeds. *South African Journal of Botany*, **139**, 130-139.

**Sharma, V., Kumar, A., Chaudhary, A., Mishra, A., Rawat, S., Shami, V., & Kaushik, P. (2022).** Response of wheat genotypes to drought stress stimulated by PEG. *Stresses*, **2**(1), 26-51.

**Shewry, P. R. (2021).** The Contribution of Wheat to Human Nutrition and Health. A year on the field, (Nov 20).

**Xu, Y., Gao, S., Yang, Y., Huang, M., Cheng, L., Wei, Q., ... & Li, L. (2010).** Transcriptome analysis of rice roots in response to potassium deficiency. *Molecular Breeding*, **25**(1), 75-86.

**Xu, Z., Zhou, G., & Shimizu, H. (2010).** Plant responses to drought and rewatering. *Plant signaling & behavior*, **5**(6), 649-654.

**Zhao, L.; Zheng, Y.; Wang, Y.; Wang, S.; Wang, T.; Wang, C.; Chen, Y.; Zhang, K.; Zhang, N.; Dong, Z.; et al. (2023).** A HST1-like gene controls tiller angle through regulating endogenous auxin in common wheat. *Plant Biotechnol. J.* **2023**, **21**, 122–135.

**Zhao, L., Zheng, Y., Wang, Y., Wang, S., Wang, T., Wang, C., ... & Chen, F. (2023).** A HST1-like gene controls tiller angle through regulating endogenous auxin in common wheat. *Plant Biotechnology Journal*, **21**(1), 122-135.

## Résumé

L'étude évalue la réponse de douze variétés de blé tendre au stress hydrique, induit par le polyéthylène glycol (PEG6000) à deux concentrations différentes (0% et 20%), pendant les stades de germination et de croissance précoce des plantules. Menée au Centre National de Contrôle et de Certification des semences et des plants (CNCC-Sétif) au cours de l'année 2023-2024, l'expérience se déroule dans des conditions hydroponiques semi-contrôlées. Les résultats révèlent une diminution significative de 9.62% du pourcentage de germination sous stress. Le stress osmotique provoqué par le PEG-6000 a entraîné une réduction de la longueur des racines et de la matière fraîche racinaire et aérienne, avec un impact moindre sur le nombre de racines et la longueur du coléoptile. Des variétés telles que V2, V3 et V4 ont montré des adaptations positives au stress hydrique, tandis que V7, V8, V9 et V12 ont affiché des réductions notables dans plusieurs caractères de croissance. Ces résultats mettent en lumière l'importance cruciale de la diversité génétique pour la sélection de variétés adaptées au stress hydrique, un aspect essentiel pour améliorer la productivité et la résilience du blé tendre dans des environnements difficiles. La capacité de certaines variétés à mieux s'adapter au stress hydrique offre des perspectives prometteuses pour le développement de cultures plus robustes face aux contraintes environnementales, ce qui pourrait avoir un impact significatif sur la sécurité alimentaire et la durabilité agricole.

**Mots clé :** *Triticum durum*, stress osmotique, polyéthylène glycol, germination, croissance.

## Abstract

The study evaluates the response of twelve varieties of bread wheat to water stress induced by polyethylene glycol (PEG6000) at two different concentrations (0% and 20%) during the germination and early seedling growth stages. Conducted at the National Center for the Control and Certification of Seeds and Plants (CNCC-Sétif) during the 2023-2024 year, the experiment takes place under semi-controlled hydroponic conditions. The results reveal a significant decrease of 9.62% in germination percentage under stress. Osmotic stress caused by PEG-6000 led to a reduction in root length and fresh root and shoot biomass, with a lesser impact on root number and coleoptile length. Varieties such as V2, V3, and V4 exhibited positive adaptations to water stress, while V7, V8, V9, and V12 showed notable reductions in several growth traits. These findings highlight the crucial importance of genetic diversity in selecting varieties suited to water stress, a critical aspect for enhancing productivity and resilience of bread wheat in challenging environments. The ability of certain varieties to better adapt to water stress offers promising prospects for the development of more resilient crops against environmental constraints, which could have a significant impact on food security and agricultural sustainability.

**Keywords:** *Triticum durum*, osmotic stress, polyethylene glycol, germination, growth.

## ملخص

تقيم الدراسة استجابة اثني عشر صنفا من القمح اللين للإجهاد المائي الناجم عن مادة البولي إيثيلين جلايكول (PEG6000) بتركيزين مختلفين (0% و20%)، خلال مراحل الانبات والنمو المبكر للشتلات. تمت الدراسة في المركز الوطني لمراقبة البذور والشتلات والمصادقة عليها (CNCC-Sétif) خلال العام 2024-2023، في ظروف هيدروponية شبه مراقبة. كشفت النتائج عن انخفاض ملحوظ بنسبة 9.62% في نسبة الانبات تحت الإجهاد. أدى الإجهاد الاسموزي الناتج عن PEG-6000 إلى انخفاض في طول الجذور والكتلة الحيوية الجذور والخضرية، مع تأثير أقل على عدد الجذور وطول الغمد. أظهرت بعض الأصناف مثل V2، V3 و V4 تكيفات إيجابية مع الإجهاد المائي، بينما أظهرت V7، V8، V9 و V12 انخفاضات ملحوظة في العديد من سمات النمو. تسلط هذه النتائج الضوء على الأهمية الحاسمة للتنوع الوراثي في اختيار الأصناف المناسبة للإجهاد المائي، وهو جانب أساسي لتحسين إنتاجية ومرونة القمح اللين في البيئات الصعبة. إن قدرة بعض الأصناف على التكيف بشكل أفضل مع الإجهاد المائي توفر آفاقاً واعدة لتطوير محاصيل أكثر مرونة في مواجهة القيود البيئية، والتي يمكن أن يكون لها تأثير كبير على الأمن الغذائي والاستدامة الزراعية.

**كلمات مفتاحية:** *Triticum durum*، PEG-6000، إجهاد أسموزي، بولي إيثيلين جلايكول، انبات، نمو.