



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 Ibrahimi 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 :

Comparaison des réponses morpho-physiologiques aux stress abiotiques chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.)

Présenté par :

KEBABZA Nassia & SEKHARA Djihad

Soutenu le 11/06/2025, Devant le Jury :

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
Président :	M. MAAMRI Khelifa	MCA	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. BELGUERRI Hemza	MCA	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Tout d'abord, louange à « Allah » qui nous a guidé sur le chemin droit tout au long du travail et nous a inspiré les bons pas et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aurait pas abouti.

*Nous voudrions remercier du fond du cœur notre encadrant **Dr. FELLAHI Zine El Abidine** pour son soutien, ces conseils et remarques utiles, sa gentillesse et pour ces appréciations sur ce travail. Merci pour tout ce que nous avons appris de vous.*

Nous tenons à remercier les membres de jury :

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

***Dr. BELGUERRI Hemza**, 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 l'INRAA de Sétif particulièrement **Dr. 'HANNACHI Abderrahmane'** pour nous avoir aidé tout au long de la période de stage.*

Nous ne pourrions jamais exprimer pleinement notre gratitude envers nos parents, lumière de nos vies, dont les prières et les encouragements nous ont permis de surmonter tous les obstacles.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Nous espérons que celui-ci saura témoigner de notre profonde reconnaissance.

Dédicace

J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail à tous ceux qui sont chers :

A ma mère

Pour ton amour inconditionnel, Pour ta patience infinie, Et pour tous les sacrifices que tu as faits sans jamais les compter. Tu es ma force, mon repère, et mon refuge. Tout ce que je suis, je te le dois en grande partie. Merci d'avoir toujours cru en moi.

A mon père

Pour ta sagesse, ton courage et ta force tranquille, Pour tous ces conseils donnés sans bruit mais avec tant de justesse, Pour ta présence, même dans le silence, toujours rassurante.

Merci pour ton amour discret mais profond. Je te rends hommage avec tout mon respect et mon cœur

A mes frères et sœurs

compagnons de mon enfance, témoins de mon chemin. Que cette dédicace vous rappelle combien vous comptez pour moi.

A mon cher binôme. Nassia Pour son entente et sa sympathie

A mesa mis Karima, Souha, Manel, Ahlem, Khawla, Chaima, Salsabil, Wided et Kholoud.

A tout ma famille SEKHARA

N'oublions pas les personnes qui ont apporté leur aide, de près ou de loin, lors de la réalisation de ce travail, en particulier Dr Fellahi. Z. et Mr Hannachi .

Dédicace :

Ne saurait être plus sincère que celle du Très-Haut :

« Allah élèvera en degrés ceux d'entre vous qui croient et ceux qui ont reçu le savoir. »

Louange à Allah, d'une louange abondante, pure et bénie. Une nouvelle page de ma vie vient de se tourner, marquée par l'effort, la persévérance et la patience.

À moi-même, qui ai osé dire : « Je peux le faire ! » Et aujourd'hui, me voilà sur le seuil de mon diplôme, récoltant enfin les fruits de mes sacrifices, avec fierté et gratitude.

À ma chère mère, toi que Dieu a choisie pour être la source de ma vie, mon pilier et mon refuge. Tes prières ont été mon rempart, ton amour ma lumière, et ta présence mon soutien inconditionnel. Que Dieu te préserve, te comble de santé et de sérénité. Ce travail t'est dédié, toi qui m'as portée dans ton cœur avant même de me porter dans tes bras.

Qu'Allah te récompense pour chaque battement de ton cœur que tu as consacré à moi.

À l'âme chère de mon père, arrachée à la mienne bien trop tôt. Ton départ m'a laissée avec un vide, mais ton souvenir, ton sourire et ta bonté demeurent vivants dans mon cœur. Papa, ce succès est un hommage à ton amour, à tes sacrifices, à ton héritage gravé en moi. Que mes prières t'atteignent chaque jour comme un doux message du monde des vivants. Que le Paradis soit ta demeure éternelle.

. À mes frères, Alaa et Osama, Je vous dédie ce mémoire avec beaucoup d'affection et de reconnaissance. Merci pour votre présence discrète mais précieuse, pour vos encouragements dans les moments de doute, et pour avoir su, chacun à votre manière, m'apporter le soutien dont j'avais besoin. Votre confiance en moi a été une force silencieuse mais essentielle dans l'accomplissement de ce parcours.

À ma précieuse amie Jihad, avec qui j'ai partagé non seulement ce mémoire, mais tout un parcours universitaire. Merci pour ta loyauté, ton engagement et ton amitié sincère.

À mon encadrant Dr. Fellahi Zine El Abidine, pour ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de ce travail. À Mr. Hannachi Abdelrahmane, pour son soutien et sa disponibilité.

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

Sommaire

Liste des tableaux	
Liste des figures et photos	
Liste des abréviations	
Introduction	1
Chapitre I : Matériel et méthodes	
I.1. Matériel végétal et site expérimental	4
I.2. Protocole expérimental en laboratoire	4
I.2.1. Essai de germination	4
I.2.1.1. Paramètres mesurés	5
a. Pourcentage final de germination	5
b. Temps moyen de germination	5
c. Indice de germination	5
d. Germination moyenne journalière	6
I.2.2. Essai de croissance des jeunes plantules.	6
I.2.2.1. Paramètres mesurés	6
a. Longueur maximale des racines	6
b. Nombre de racines	6
c. Longueur de la 1 ^{ère} feuille	7
d. Matières fraîches, racinaire (MFR, mg) et aérienne	7
I.2.3. Essai de croissance en alvéoles	7
I.2.3.1. Dosage de la teneur en proline des feuilles	7
I.3. Essai en plein champ	9
I.3.1. Conditions climatiques	9
I.3.2. Caractères mesurés	10
a. Surface foliaire de la feuille étendard	10
b. Teneur relative en eau	10
c. Dommages cellulaires	11
d. Teneur en chlorophylle des feuilles	12
e. Teneur en proline	13
I.4. Analyse des données	13
Chapitre II : Résultats et discussion	
II.1. Essai de laboratoire	14

II.1.1. Paramètres de germination.....	14
II.1.1.1. Analyse de la variabilité observée	14
a. Effet moyen ‘variété’	15
b. Effet moyen ‘stress’	16
c. Effet de l’interaction ‘variété*stress’	17
II.1.1.2. Cinétique de germination.....	19
II.1.2. Paramètres de croissance des jeunes plantules	21
II.1.2.1. Analyse de la variabilité observée.....	21
a. Effet moyen ‘variété’	22
b. Effet moyen ‘stress’	22
c. Effet de l’interaction ‘variété*stress’	24
II.1.2.2. Analyse de la teneur en proline de l’essai de laboratoire.....	26
II.2. Essai de plein champ.....	29
II.2.1. Analyse de la variance des caractères mesurés.....	29
II.2.2. Comparaison des moyennes.....	29
Conclusion.....	32
Références bibliographiques	33

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de germination mesurés	14
Tableau 2 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de germination mesurés	15
Tableau 3 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress' des caractères de germination mesurés.....	16
Tableau 4 :	Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de croissance mesurés.....	21
Tableau 5 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de croissance mesurés.....	22
Tableau 6 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress' des caractères de croissance mesurés	23
Tableau 7 :	Carrés moyens de l'analyse de la variance de la teneur en proline des feuilles chez les variétés étudiées.....	26
Tableau 8 :	Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères morpho-physiologiques mesurés.....	29
Tableau 9 :	Valeurs moyennes des caractères morpho-physiologiques mesurés.....	30

Liste des figures et photos

Figure 1 :	Précipitations et températures mensuelles moyennes, minimales et maximales enregistrées au niveau de la région d'étude.....	9
Figure 2 :	Ecarts (en %) observés sur les caractères de germination mesurés en T1 et T2 relativement au témoin T0 des variétés de blé tendre étudiées.....	17
Figure 3 :	Variation des valeurs prises par les paramètres de germination aux traitements T0, T1 et T2 des variétés de blé tendre étudiées.....	18
Figure 4 :	Réponse germinative des grains de blé tendre selon l'intensité du stress hydrique (valeurs moyennes des niveaux de stress)	20
Figure 5 :	Réponse germinative des grains de blé tendre selon l'intensité du stress hydrique (valeurs moyennes des variétés).....	20
Figure 6 :	Ecarts observés sur les caractères de croissance mesurés en T1 et T2 relativement au témoin T0 des variétés de blé tendre étudiées.....	23
Figure 7 :	Variation des paramètres de croissance aux traitements T0, T1 et T2 des variétés de blé tendre étudiées.	25
Figure 8 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' de la teneur en proline des feuilles au stade plantule.....	27
Figure 9 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress' de la teneur en proline des feuilles au stade plantule.....	28
Figure 10:	Valeurs moyennes de l'interaction 'variété × stress' de la teneur en proline des feuilles au stade plantule.....	28
Photo 1 :	Mise en place des graines dans les boîtes de Pétri et comptage journalier.....	5
Photo 2 :	Transplantation des plantules dans les tubes à essai.....	6
Photo 3 :	Croissance des plantules dans des alvéoles remplies de terreaux.	7
Photo 4 :	Dosage de la teneur en proline des feuilles.....	8
Photo 5 :	Détermination de la teneur relative en eau des génotypes de blé étudiés. ...	11
Photo 6 :	Mesure de dommages cellulaires.	12
Photo 7 :	Lecture in situ de la chlorophylle des feuilles.....	12

Liste des abréviations

%G : Pourcentage final de germination.

ANOVA : Analyse de la variance.

Chl : Teneur de chlorophylle.

ddl : degré de liberté.

FAO : Food and Agriculture Organisation (L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture).

GMJ : Germination moyenne journalière.

IWGSC : International Wheat Genome Sequencing Consortium.

DC : dommage cellulaire

IG: Indice de Germination.

INRAA: Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie.

LF: Longueur de la 1^{ère} Feuille.

LR: Longueur des Racines.

MFA: Matière Fraiche Aérienne.

MFR: Matière Fraiche Racinaire.

NR: Nombre des Racines.

OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development.

PEG-6000: Polyéthylène glycol 6000.

Ppds : Plus petite différence significative.

Pro : Teneur en proline.

SE : Erreur Standard.

SF : Surface Foliaire de la feuille étendard.

TMG : Temps Moyen de Germination.

TRE : Teneur Relative en Eau.

Introduction

Introduction

Les céréales, dont le nom dérive de *Ceres*, déesse romaine des moissons et de l'agriculture, constituent depuis des millénaires la base de l'alimentation humaine et animale. Parmi elles, le blé (*Triticum sp.*) occupe une place prépondérante, tant sur le plan nutritionnel qu'économique. Cultivé sur 222 millions d'hectares à travers le monde, le blé demeure une céréale incontournable, avec une production avoisinant 783 millions de tonnes en 2022 (FAO, 2023). Bien qu'il ne représente plus que 30 % de la production céréalière mondiale en raison de l'essor du maïs, il reste la base alimentaire de 35 % de la population, notamment en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et en Asie centrale (IWGSC, 2023). Les rendements varient considérablement selon les régions, passant de 1,5-2 t/ha dans les zones arides d'Afrique du Nord à plus de 6 t/ha dans les systèmes intensifs d'Europe occidentale, reflétant l'impact majeur des stress abiotiques sur la productivité (OECD-FAO, 2023). Son importance historique et socio-économique en fait une culture stratégique, particulièrement en région méditerranéenne où il constitue l'aliment de base sous forme de pain, de semoule et de produits dérivés.

En Algérie, les céréales, principalement le blé dur (*Triticum durum* Desf.), le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et l'orge (*Hordeum vulgare* L.), représentent la pierre angulaire de l'agriculture, couvrant environ 3,3 millions d'hectares, majoritairement dans des zones arides et semi-arides (Benbelkacem, 2023). Le blé tendre, en particulier, joue un rôle crucial dans l'industrie agroalimentaire locale, servant de matière première pour la production de farine, de pain et de produits de boulangerie, tandis que ses sous-produits, comme le son, sont utilisés dans l'alimentation du bétail (Lamara, 2025). Cependant, malgré son importance, la production céréalière algérienne reste fortement tributaire des conditions climatiques, subissant d'importantes fluctuations interannuelles dues aux aléas environnementaux (Chourghal et al., 2015).

Parmi les principaux défis auxquels fait face la culture du blé figurent les stress abiotiques, c'est-à-dire les contraintes physico-chimiques du milieu qui perturbent le développement normal de la plante. Ces stress, qui incluent la sécheresse, la salinité, les températures extrêmes et les déséquilibres minéraux du sol, constituent des facteurs limitants majeurs pour la productivité agricole, en particulier dans les régions arides et semi-arides (Zandalinas et al., 2018 ; Fellahi et al., 2024a). Selon Levitt (1982), un stress peut être défini comme toute condition environnementale défavorable qui induit des réponses physiologiques,

biochimiques et moléculaires chez la plante, affectant ainsi sa croissance, son développement et, in fine, son rendement.

Le stress hydrique, résultant d'un déficit en eau disponible, est l'un des plus grands facteurs de réduction des rendements céréaliers à l'échelle mondiale. Il survient lorsque l'évapotranspiration de la plante dépasse l'approvisionnement en eau, soit en raison de précipitations insuffisantes, soit à cause d'une mauvaise gestion des ressources hydriques (**Fahad et al., 2017 ; Boudiar et al., 2024**). Les mécanismes physiologiques affectés par le stress hydrique sont multiples et complexes. Dès la germination, un déficit en eau perturbe l'imbibition des graines et l'activation des enzymes de réserve, réduisant ainsi le taux et la vitesse de levée (**Hussain et al., 2019 ; Ozden et al., 2021**). En phase végétative, il affecte l'expansion foliaire, la conductance stomatique et l'efficacité photosynthétique, tandis qu'au stade reproducteur, il compromet gravement la fertilité des épis et le remplissage des grains (**Farooq et al., 2012 ; Khaeim et al., 2022**). Face à ces défis, l'identification de variétés tolérantes et l'élucidation de leurs mécanismes d'adaptation constituent des enjeux majeurs pour l'agriculture durable.

Face à ces défis, la sélection de variétés de blé tolérantes à la sécheresse apparaît comme une solution prometteuse pour assurer une production stable dans des conditions climatiques de plus en plus imprévisibles. Plusieurs mécanismes de tolérance ont été identifiés chez le blé, incluant des adaptations morphologiques (enracinement profond, réduction de la surface foliaire), physiologiques (régulation stomatique, accumulation de solutés compatibles) et biochimiques (activation d'enzymes antioxydantes, synthèse de protéines de stress) (**Chahbar, 2008**). Cependant, la variabilité génétique entre cultivars influence fortement leur capacité à résister ou à s'adapter à des conditions de stress hydrique, ce qui justifie des études comparatives approfondies.

Dans ce contexte, notre travail se propose d'évaluer et de comparer les réponses physiologiques de trois variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) soumises à un stress hydrique induit en conditions contrôlées (laboratoire) et en conditions réelles (champ). L'expérimentation en laboratoire reposera sur l'utilisation du PEG-6000, un agent osmotique couramment employé pour simuler un déficit hydrique, afin d'étudier son impact sur la germination et la croissance précoce des plantules (**Ahmed et al., 2025**). Parallèlement, des essais en champ permettront d'observer le comportement des mêmes variétés sous des

conditions naturelles de stress hydrique, notamment dans les zones semi-arides de haute altitude.

L'objectif principal de cette étude est d'identifier les variétés présentant les meilleures capacités de résilience face à la sécheresse, en analysant des paramètres tels que le taux de germination, la vigueur des plantules, la biomasse racinaire et aérienne, ainsi que la teneur en proline (marqueurs biochimiques du stress). Les résultats obtenus pourraient contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes de tolérance chez le blé tendre et fournir des pistes pour l'amélioration génétique ou l'adaptation des pratiques culturales dans les régions arides.

Chapitre I :
Matériel et méthodes

I. Matériel et méthodes

I.1. Matériel végétal et site expérimental

L'étude a porté sur trois variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) : El Zina (V1), Maouna (V2) et El Hidhab (V3), sélectionnées pour leur importance agronomique en Algérie. Les essais ont été conduits au niveau de la station expérimentale de l'INRAA (Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie) situé à Sétif (4 km au sud du chef-lieu de la Wilaya) durant l'année universitaire 2024/2025.

I.2. Protocole expérimental en laboratoire

L'expérimentation en laboratoire s'est articulée autour de trois volets principaux :

- (i) l'étude de l'effet du stress hydrique simulé par le polyéthylène glycol (PEG-6000) sur la germination des graines.
- (ii) l'évaluation de l'impact du même stress sur la croissance initiale des jeunes plantules en hydroponie.
- (iii) l'étude de la réponse physiologique (accumulation de proline) des plantules soumises à un stress hydrique réel au stade de pré-tallage en conditions semi-contrôlées.

Le PEG-6000, polymère hydrosoluble, stable, inerte et non ionique, a été utilisé pour simuler un déficit hydrique sans pénétration cellulaire ni toxicité directe (**Benjelloun et al., 2013**). Trois niveaux de traitement hydrique ont été appliqués :

- T0 : témoin (0 %, eau minérale seule),
- T1 : stress modéré (10 %, soit 98 g/L de PEG-6000),
- T2 : stress sévère (20 %, soit 185 g/L de PEG-6000).

I.2.1. Essai de germination

Des graines homogènes et saines ont été désinfectées à l'hypochlorite de sodium (NaClO) à 3 % pendant 4 minutes, puis rincées trois fois à l'eau distillée. Cent graines par boîte de Pétri (Photo 1), sur trois couches de papier buvard, ont été soumises aux trois traitements hydriques (T0, T1, T2), avec trois répétitions par traitement. La germination était définie par l'émission d'une racine ≥ 2 mm, selon la méthode décrite par **Adjel et al.**

(2013). Le décompte du nombre de graines germées a été effectué quotidiennement durant 7 jours après le semis.



Photo 1 : Mise en place des graines dans les boîtes de Pétri et comptage journalier.

I.2.1.1. Paramètres mesurés

a. Pourcentage final de germination (%G) : Il est déterminé la fin de l'expérience selon **Shirefaw et Baker (1996)** par formule ci-dessous :

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

Où :

NTGG = est le nombre total de graines qui ont germé.

NTGS = est le nombre total de graines soumises à la germination dans les boites de pétri.

b. Temps moyen de germination (TMG, jours) : Il est calculé selon **Ellis et Roberts (1981)** par l'équation 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,

n_i = est le nombre de graines germées dans l' $i^{\text{ème}}$ jour.

c. Indice de germination (IG, No) : Ce paramètre reflète le temps (en jours) nécessaire pour qu'un certain pourcentage de germination se produise. Il est déterminé selon **Ranal et Santana (2006)** par :

$$IG = \sum_{i=1}^k n_i / t_i$$

Où

n_i = nombre de graines germées dans le $i^{\text{ème}}$ temps,

t_i = temps nécessaire pour que les graines germent au $i^{\text{ème}}$ compte.

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

I.2.2. Essai de croissance des jeunes plantules

Trente graines par variété ont d'abord été germées dans de l'eau distillée pendant 72 heures. Les jeunes plantules ont ensuite été transférées dans des tubes à essai contenant 25 mL de solution de PEG (T0, T1, T2), maintenues par des supports en mousse synthétique (Photo 2). Chaque tube contenait une seule plantule, et chaque traitement a été répété cinq fois. L'expérience a duré 12 jours.

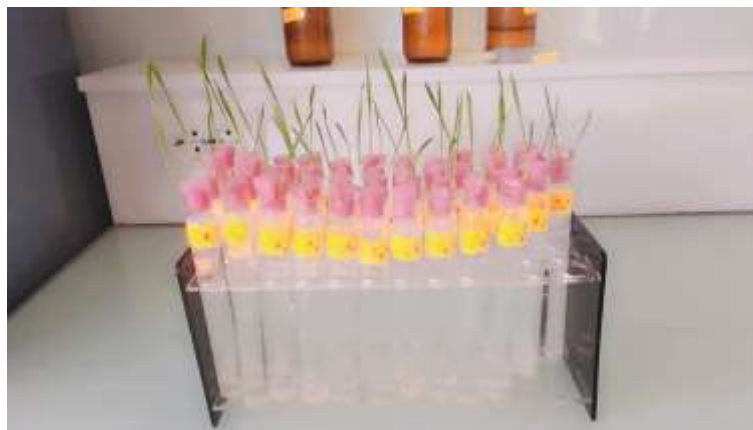


Photo 2 : Transplantation des plantules dans les tubes à essai.

I.2.2.1. Paramètres mesurés

a. Longueur maximale des racines (LR, cm) : Elle est déterminée par variété, traitement et répétition comme la longueur de la racine la plus longue des graines germées

b. 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.

c. Longueur de la 1^{ère} feuille (LF, cm) : Elle est mesurée à partir de la graine jusqu'à l'extrémité de la feuille par une règle graduée.

d. 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.2.3. Essai de croissance en alvéoles

Un total de 192 graines (64 par variété) a été pré-germé sur papier imbibé d'eau distillée en conditions obscures, avec humidification régulière. Après 6 à 8 jours, les plantules vigoureuses ont été repiquées dans des alvéoles (32 par variété), avec deux plantules par puit, remplis de terreau horticole (Photo 3). Trois régimes hydriques ont été appliqués à partir du stade de la troisième feuille :

- T0 : arrosage quotidien (aucun stress hydrique).
- T1 : arrosage tous les 3 jours (stress hydrique modéré).
- T2 : suspension totale de l'arrosage (stress hydrique sévère).



Photo 3 : Croissance des plantules dans des alvéoles remplies de terreaux.

Les effets du stress hydrique ont été suivis jusqu'à l'apparition de symptômes morphologiques distincts pour chaque traitement.

I.2.3.1. Dosage de la teneur en proline des feuilles

La teneur en proline des feuilles (Pro, ug/ 100 mg MF) a été déterminée selon la méthode acide-ninhydrine décrite par **Troll et Lindsley (1955)**, simplifiée par **Dreier (1978)** et modifiée par **Monneveux et Nemmar (1987)**. Cent milligrammes de matière fraîche ont

été prélevés, découpés, puis placés dans des tubes à essai hermétiquement fermés contenant 2 ml de méthanol à 40 %. Les tubes ont été incubés dans un bain-marie à 85 °C pendant 1 heure, puis refroidis dans un bac à glace pendant 30 minutes. Pour le dosage, une solution de réaction a été préparée en mélangeant 120 ml d'eau distillée, 300 ml d'acide acétique glaciale et 80 ml d'acide orthophosphorique ($H_4P_2O_5$) (solution A). Parallèlement, une solution de ninhydrine à 3 % a été préparée en dissolvant 3 g de ninhydrine dans 100 ml d'éthanol pur. Pour chaque échantillon, 1 ml de l'extrait végétal a été mélangé avec 1 ml d'acide acétique, 1 ml de la solution A et 2 ml de la solution de ninhydrine, puis incubé dans un bain-marie à 100 °C pendant 30 minutes, jusqu'à apparition d'une coloration rouge. Après refroidissement, 5 ml de toluène ont été ajoutés, suivis d'une agitation vigoureuse pour séparer les phases. La phase supérieure contenant la proline a été récupérée et déshydratée avec du sulfate de sodium anhydre (Na_2SO_4). La densité optique a été mesurée à 528 nm à l'aide d'un spectrophotomètre, et les résultats exprimés en microgrammes de proline par gramme de matière fraîche ($\mu g/g$ MF) (Photo 4).



Photo 4 : Dosage de la teneur en proline des feuilles.

La concentration en proline a été calculée à partir de l'équation de la courbe d'étalonnage suivante :

$$y = 0.0178 x \quad (R^2 = 0.9842)$$

Où :

x = quantité de proline en $\mu\text{g}/100 \text{ mg}$ de matière fraîche,

y = densité optique mesurée.

I.3. Essai en plein champ

Un essai en conditions naturelles de culture a été conduit sur le site de Rmada, avec semis en décembre selon un dispositif complètement randomisé. Les trois variétés ont été semées à une densité de 350 graines/m² sur une ancienne jachère travaillée, avec fertilisation de fond, apport azoté, et désherbage chimique. Trois stations de 1 m² par variété ont été suivies pour l'observation du comportement morpho-physiologique des plantes, notamment au stade d'anthèse, en réponse au stress hydrique naturel.

I.3.1. Conditions climatiques

La Figure 1 présente l'évolution mensuelle des précipitations et des températures (moyenne, maximale et minimale) enregistrées dans la région d'étude.

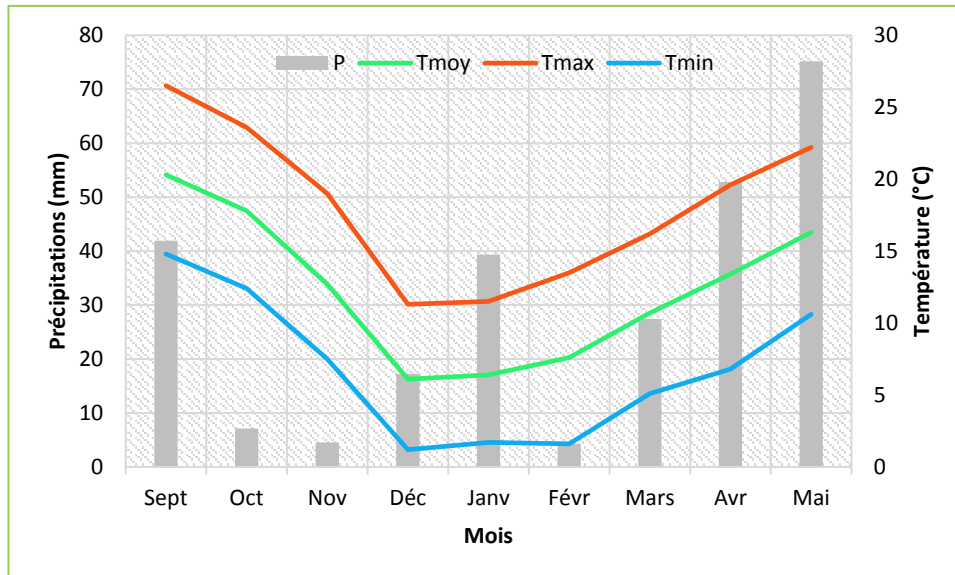


Figure 1 : Précipitations et températures mensuelles moyennes, minimales et maximales enregistrées au niveau de la région d'étude (<https://fr.tutiempo.net>).

Les précipitations enregistrées dans la région d'étude présentent une forte variabilité saisonnière. La période allant d'octobre à février est globalement sèche, avec des cumuls particulièrement faibles en novembre (4.56 mm) et février (4.32 mm), et seulement 17.24 mm

en décembre, mois de semis du blé. Bien que ces précipitations aient permis une levée correcte de la culture, une sécheresse marquée s'est installée durant la période post-levée, de fin janvier à mi-avril. Cette phase, qui englobe des stades clés comme le tallage, la montaison et le début de la floraison, a été caractérisée par des précipitations insuffisantes (notamment 27.43 mm en mars), compromettant sérieusement le développement végétatif du blé. Cette contrainte hydrique effective a eu un effet très négatif sur la croissance des plantes et leur potentiel de rendement.

Sur le plan thermique, les températures ont été globalement basses pendant la période hivernale. Entre décembre et février, les températures moyennes sont restées inférieures à 10 °C (6.1 °C en décembre, 6.4 °C en janvier et 7.6 °C en février), avec des minimales proches de 1–2 °C. Ces conditions, bien qu'adéquates pour la vernalisation, ont probablement ralenti l'activité métabolique des plantes, entraînant un développement végétatif lent durant les premières phases du cycle. Ce ralentissement thermique, combiné à une disponibilité hydrique limitée, a accru les contraintes pesant sur la culture. À partir de mars, la remontée progressive des températures (jusqu'à 16.3 °C en mai) a permis la reprise de la croissance et le déroulement des stades reproductifs, mais dans un contexte hydrique encore déficitaire, ce qui a pu limiter le potentiel de production.

I.3.2. Caractères mesurés

a. Surface foliaire de la feuille étendard (SF, cm²) : Au stade épiaison, la longueur (L) et la largeur maximale (l) de la feuille étendard ont été mesurées sur 5 feuilles prélevées aléatoirement par variété et par répétition. La surface foliaire moyenne a été estimée selon **Spagnoletti-Zeuli et Qualset (1990)** à l'aide de la formule :

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

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).

b. Teneur relative en eau (TRE, %) : La TRE est un indicateur clé de l'état hydrique des plantes, reflétant la disponibilité en eau dans le sol. Elle a été mesurée au stade épiaison selon la méthode de **Pask et al. (2012)**, à partir de 15 feuilles par parcelle (5 par répétition).

Les feuilles, prélevées à la base du limbe, ont d'abord été pesées pour obtenir leur poids frais (PF), puis placées 24 h dans l'obscurité à l'eau distillée pour atteindre la turgescence (PT) (Photo 5). Après essuyage, elles ont été repesées, puis séchées à 65 °C pendant 24 h pour déterminer le poids sec (PS). La TRE a été calculée selon la formule suivante :

$$TRE (\%) = [(PF - PS) / (PT - PS)] \times 100$$

Où :

PF = poids frais,

PT = poids à pleine turgescence,

PS = poids sec.



Photo 5 : Détermination de la teneur relative en eau des génotypes de blé étudiés.

c. Dommages cellulaires (DC, %) : Le pourcentage de dommages cellulaires a été estimé par la fuite d'électrolytes, méthode inspirée de **Sullivan (1971)** et **Shanahan et al. (1990)**. Au stade anthèse, des feuilles étendard ont été prélevées sur 10 plants sélectionnés aléatoirement en champ. Après rinçage à l'eau déionisée et séchage par tamponnement, deux lots de 15 disques foliaires (1 cm²) ont été préparés par génotype : l'un exposé à un stress thermique (49 °C, 1 h dans un bain-marie GFL 1002) dans une solution de PEG 30 %, l'autre conservé à température ambiante (25 °C) dans de l'eau déionisée. Les conductivités électriques ont été mesurées après une nuit de repos à l'aide d'un conductimètre (Hanna Instruments TM HI76310). Tous les échantillons ont ensuite été autoclavés (SUN23-II-D) à 120 °C et 0.10 MPa pendant 10 min pour obtenir la conductivité maximale (Photo 6). Le pourcentage de dommage cellulaire relatif a été calculé par la formule :

$$Dommages\ cellulaires (\%) = [1 - (1 - T1/T2) / (1 - C1/C2)] \times 100$$

Où :

T1 = conductivité après traitement thermique (49 °C),

T2 = conductivité après autoclave (120 °C),

C1 = conductivité du témoin (25 °C),

C2 = conductivité du témoin après autoclave.



Photo 6 : Mesure des dommages cellulaires.

d. Teneur en chlorophylle des feuilles (Chl, CCI) : Elle est déterminée au stade épiaison à l'aide d'un chlorophylle-mètre portable CCM-200 (Photo 7). Cet appareil portable fonctionne sur pile et est conçu pour faire des mesures rapides et non destructives sur des échantillons de feuilles intactes. Trois lectures sont réalisées par variété et par répétition.



Photo 7 : Lecture *in situ* de la teneur en chlorophylle des feuilles.

e. Teneur en proline (Pro, ug/ 100 mg MF) : La méthode de dosage utilisée est identique à celle décrite précédemment pour les plantules en alvéoles (cf. section I.2.3.1).

I.4. Analyse des données

Les données ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) bifactorielle (variété × stress) pour les essais en laboratoire, et à une ANOVA unifactorielle pour les essais en plein champ. En cas de différences significatives, les moyennes ont été comparées au test de la plus petite différence significative (Ppds) au seuil de 5 %.

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide des logiciels Past (v4.06) (**Hammer et al., 2001**) et Microsoft Excel.

Chapitre II :
Résultats et discussion

II. Résultats et discussion

II.1. Essai de laboratoire

II.1.1. Paramètres de germination

II.1.1.1. Analyse de la variabilité observée

L'analyse de la variance à deux facteurs (Tableau 1) révèle que l'effet du facteur variété est hautement à très hautement significatif pour l'ensemble des caractères de germination analysés : pourcentage final de germination (%G), temps moyen de germination (TMG), indice de germination (IG) et germination moyenne journalière (GMJ). Cette signification statistique traduit une variabilité génétique marquée entre les variétés en ce qui concerne leur performance germinative. Plus précisément, l'effet du facteur variété explique 34,42 % de la variation totale observée pour le pourcentage final de germination.

Par ailleurs, le facteur stress constitue également une source de variation hautement significative pour le TMG et l'IG, avec des carrés moyens supérieurs à ceux associés au facteur variété (Tableau 1). Cela suggère une influence importante du stress sur la dynamique temporelle de la germination, notamment en ce qui concerne la vitesse et la précocité d'émergence des plantules. Toutefois, aucun effet significatif du stress n'a été observé sur le pourcentage final de germination (%G) ni sur la germination moyenne journalière (GMJ), indiquant une certaine résilience de ces paramètres à la contrainte appliquée. En termes quantitatifs, l'effet du stress n'explique que 8.67 % de la variation totale du pourcentage final de germination.

Tableau 1 : Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de germination mesurés.

SV	ddl	%G	TMG	IG	GMJ
Variété	2	45,45**	0,16***	51,02***	0,23**
Stress	2	11,44	1,65***	296,73**	0,06
Variété*Stress	4	4,72	0,03	8,84	0,02
Erreur	18	7,30	0,01	1,68	0,04

SV = Source de variation, ddl = degré de liberté, %G = Pourcentage final de germination, TMG = Temps moyen de germination, IG = Indice de germination, GMJ = Germination moyenne journalière, ^{ns}, ** et *** = Effets non significatifs et significatifs aux seuils de probabilité de 1 % et 0,1 %, respectivement.

L'analyse de l'interaction entre la variété et le stress révèle une influence différenciée des traitements en fonction du génotype (Tableau). Bien que les carrés moyens de cette interaction soient inférieurs à ceux des effets principaux (Tableau 1), leur signification statistique indique que les variétés réagissent de manière distincte aux conditions de stress.

L'interaction 'variété × stress' explique 7,15 % de la variation totale observée dans le pourcentage final de germination (%G), soulignant une composante génotypique dans la tolérance au stress.

a. Effet moyen 'variété'

Les moyennes des différents paramètres de germination selon les variétés sont présentées dans le Tableau 2. Les résultats indiquent une variabilité significative entre les variétés pour tous les caractères étudiés, avec des écarts notables entre les valeurs extrêmes.

Tableau 2 : Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de germination mesurés.

Variété	%G	SE	TMG	SE	IG	SE	GMJ	SE
V1	95,00 ^a	0,41	2,78 ^b	0,10	37,67 ^a	1,29	6,79 ^a	0,03
V2	94,22 ^a	1,13	2,83 ^b	0,16	36,91 ^a	2,19	6,73 ^a	0,08
V3	90,78 ^b	0,98	3,03 ^a	0,13	33,22 ^b	1,64	6,48 ^b	0,07
Moyenne	93,33		2,88		35,93		6,67	
Ppds (5 %)	2,68		0,12		1,29		0,19	

%G = pourcentage final de germination (%), TMG = Temps moyen de germination (jours), IG = Indice de germination, 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 %.

Le pourcentage final de germination (%G) varie de 90,78 %, valeur la plus faible observée chez la variété V3, à 95 %, valeur maximale enregistrée chez V1, avec une moyenne générale de 93,33 %. La plus petite différence significative (Ppds_{5%}) étant de 2,68 %, les différences entre V1 et V3 sont statistiquement non significatives. Concernant le temps moyen de germination (TMG), des différences significatives sont également observées : V1 présente la germination la plus rapide avec 2,78 jours, tandis que V3 est la plus lente avec 3,03 jours, pour une moyenne générale de 2,88 jours. La Ppds_{5%} est de 0,12 jour, ce qui confirme la signification des écarts observés. L'indice de germination (IG) suit la même tendance, avec une valeur minimale de 33,22 chez V3, et une maximale de 37,67 chez V1, autour d'une moyenne générale de 35,93. L'écart minimal significatif est ici de 1,29. Enfin, la germination moyenne journalière (GMJ) varie de 6,48 % (V3) à 6,79 % (V1), avec une moyenne générale de 6,67 %. L'écart significatif minimal requis (Ppds_{5%}) est de 0,19 %, confirmant que les différences observées sont statistiquement significatives.

b. Effet moyen 'stress'

L'analyse conjointe des données du Tableau 3 et des écarts relatifs présentés dans la Figure 2 met en évidence l'impact différentiel du stress osmotique sur les paramètres de germination du blé tendre. Le pourcentage final de germination (%G) reste globalement stable malgré l'application de stress, avec des valeurs comprises entre 92,11 % (T2) et 94,33 % (T1), et des variations relatives allant de -1,55 % à +0,82 % par rapport au témoin (T0). Ces différences restent inférieures à la plus petite différence significative ($P_{pds5\%} = 2,68$), indiquant une absence d'effet significatif sur la capacité germinative.

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

Stress	%G	SE	TMG	SE	IG	SE	GMJ	SE
T0	93,56 ^a	0,71	2,57 ^c	0,05	40,13 ^a	0,73	6,68 ^a	0,05
T1	94,33 ^a	0,99	2,70 ^b	0,06	38,27 ^b	1,01	6,74 ^a	0,07
T2	92,11 ^a	1,37	3,37 ^a	0,06	29,39 ^c	0,89	6,58 ^a	0,10
Moyenne	93,33		2,88		35,93		6,67	
<i>Ppds (5 %)</i>	2,68		0,12		1,29		0,19	

%G = Pourcentage final de germination (%), TMG = Temps moyen de germination (jours), IG = Indice de germination, 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 %.

En revanche, les paramètres relatifs à la dynamique de la germination sont nettement plus sensibles au stress. Le temps moyen de germination (TMG) s'accroît significativement avec l'intensité de la contrainte : de 2,57 jours en T0 à 3,37 jours en T2, soit une augmentation relative de +31,25 %, bien au-delà du seuil de signification ($P_{pds5\%} = 0,12$ jour). Cette hausse traduit un net ralentissement du processus germinatif sous stress sévère. De même, l'indice de germination (IG) diminue de façon marquée avec l'intensité du stress, passant de 40,13 (T0) à 29,39 (T2), ce qui représente une réduction de -26,73 %, confirmant une altération significative de la vigueur germinative ($P_{pds5\%} = 1,29$). Sous stress modéré (T1), la réduction reste mesurée (-4,73 %), suggérant une tolérance partielle à des contraintes hydriques légères. En ce qui concerne la germination moyenne journalière (GMJ), les écarts sont faibles et non significatifs ($P_{pds5\%} = 0,19$), bien que l'on note une légère amélioration sous stress modéré (+0,82 %) et une baisse sous stress sévère (-1,55 %). Ces observations indiquent que, bien que la capacité de germination reste globalement préservée, la vitesse et la vigueur de la germination sont fortement compromises à partir d'un certain seuil de stress osmotique, en particulier sous 20 % de PEG-6000.

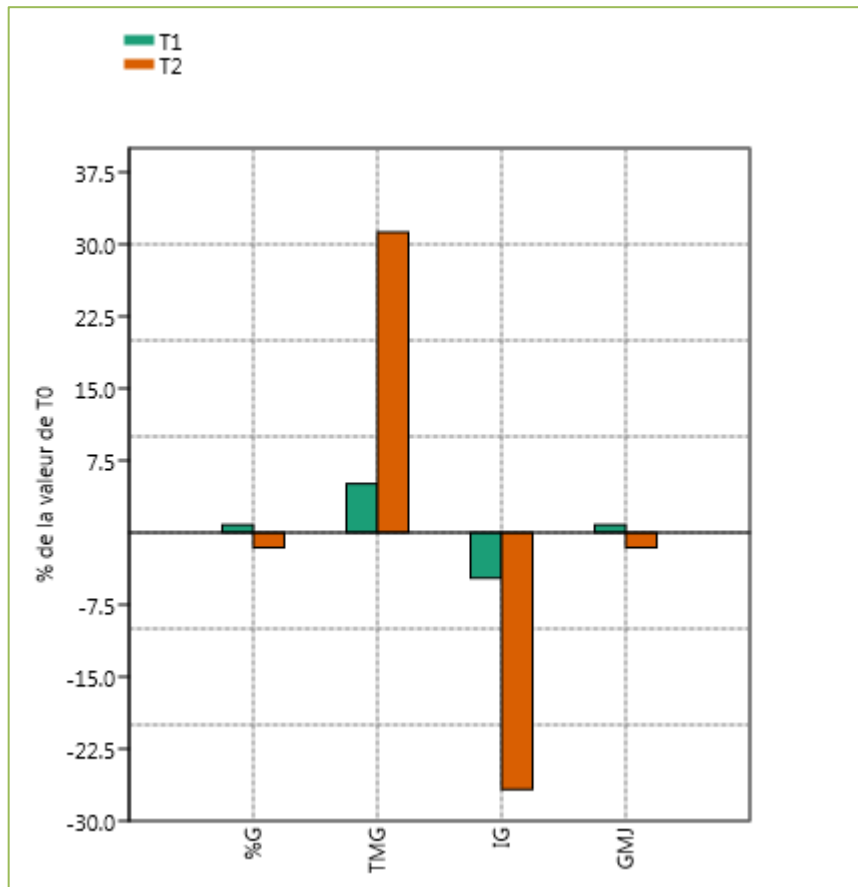


Figure 2 : Ecarts (en %) observés sur les caractères de germination mesurés en T1 et T2 relativement au témoin T0 des variétés de blé tendre étudiées.

Ces variations confirment que si la capacité de germination reste relativement stable, le stress affecte notablement la rapidité et la vigueur du processus, surtout à des niveaux élevés. Ce comportement peut s’expliquer par la sensibilité des mécanismes métaboliques et enzymatiques impliqués dans la germination aux conditions de stress hydrique ou osmotique, comme rapporté dans plusieurs études antérieures (Farooq et al., 2017 ; Kaya et al., 2020).

*c. Effet de l’interaction ‘variété*stress’*

D’après la Figure 3, La variété V1 se distingue par une stabilité remarquable : le %G reste élevé, variant de 94,00 % (T0) à 95,67 % (T1), avec une légère baisse à 95,33 % sous T2. Le temps moyen de germination (TMG) s’allonge modérément (de 2,55 à 3,18 jours), tandis que l’indice de germination (IG) chute de 40,42 à 32,63 sous stress sévère. Malgré cela, la GMJ reste élevée et stable, oscillant entre 6,71 % et 6,83 %, traduisant une capacité journalière de germination peu affectée. Chez V2, une tendance similaire est observée avec un %G élevé

jusqu'à T1 (95,67 %), puis une baisse sous T2 (92,00 %). Le TMG augmente de 2,46 à 3,43 jours, tandis que l'IG diminue fortement de 42,01 à 28,40.

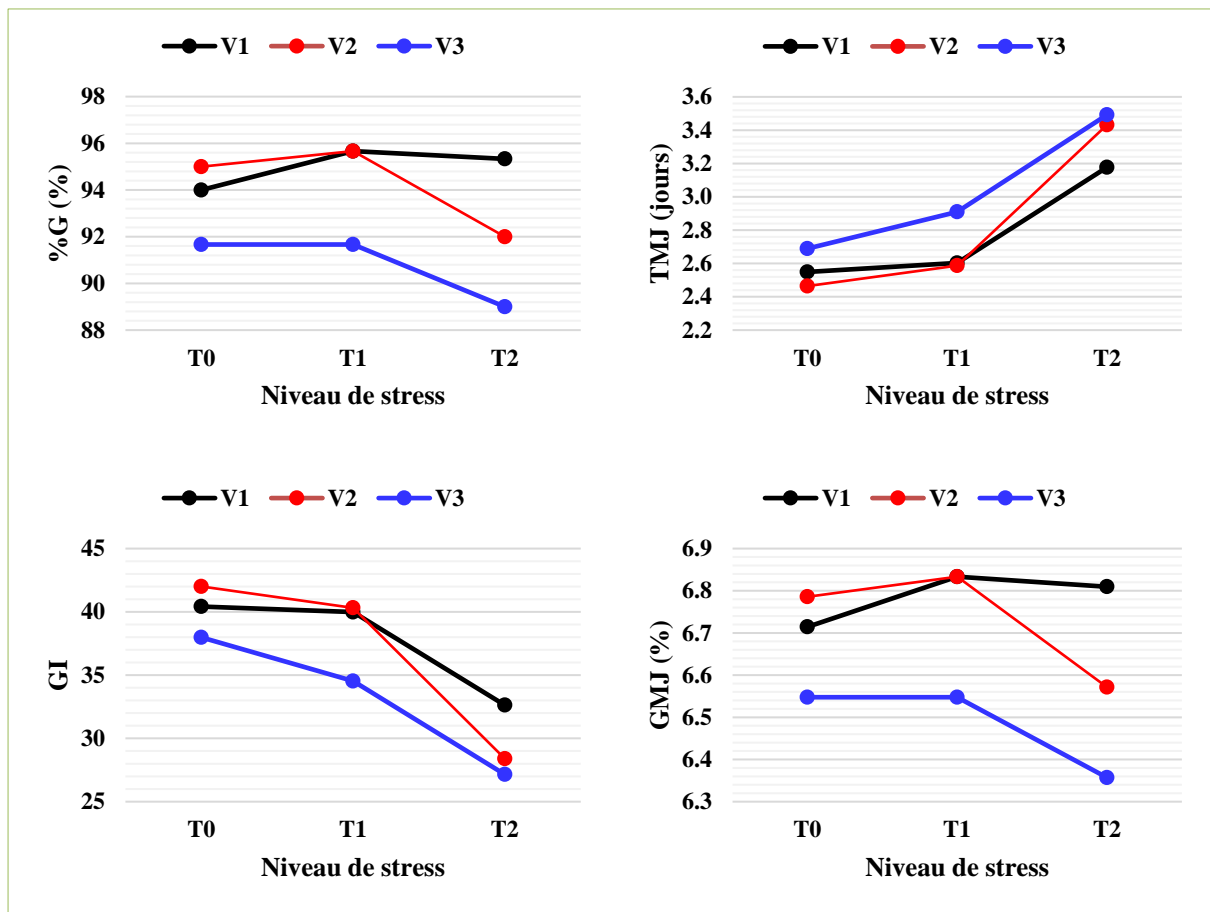


Figure 3 : Variation des valeurs prises par les paramètres de germination aux traitements T0, T1 et T2 des variétés de blé tendre étudiées.

La GMJ passe de 6,79 % à 6,57 %, signalant une légère réduction de la performance journalière sous stress sévère. En revanche, la variété V3 présente une plus grande sensibilité : le %G diminue de 91,67 % (T0 et T1) à 89,00 % (T2), le TMG passe de 2,69 à 3,49 jours, et l'IG chute drastiquement de 37,98 à 27,15. La GMJ suit également une tendance décroissante, passant de 6,55 % à 6,36 %, indiquant une altération progressive de la vitesse et de la régularité de la germination. Ces résultats confirment l'existence d'une variabilité génétique dans la réponse au stress, avec V1 comme génotype le plus tolérant, V2 modérément sensible, et V3 nettement plus affectée, notamment en termes de vigueur germinative (IG) et de performance journalière (GMJ).

Parmi les étapes clés du cycle de vie d'une plante, la germination constitue une phase particulièrement vulnérable aux contraintes environnementales, notamment au stress hydrique.

Au début de ce processus, les graines traversent une phase d'imbibition, durant laquelle elles absorbent de l'eau pour réhydrater leurs cellules, activer leur métabolisme, et amorcer l'activité enzymatique essentielle à la germination. Toutefois, en présence d'un déficit hydrique, cette absorption d'eau est compromise, ce qui ralentit le métabolisme cellulaire et perturbe les fonctions biochimiques associées à la germination (**Khaeim et al., 2022**). Ce déséquilibre hydrique affecte notamment le fonctionnement des enzymes hydrolytiques mobilisant les réserves, ce qui se traduit par un retard de l'émergence des plantules, une diminution du taux de germination, ainsi qu'un affaiblissement de leur vigueur (**Ali, 2019**). Plusieurs études, dont celles de **Alam et al. (2020)** et **Othmani et al. (2021)**, ont mis en évidence une relation inverse entre l'intensité du stress hydrique induit par le PEG-6000 et la vitesse de germination, illustrée par une augmentation du temps moyen de germination (TMG) avec la concentration du stress. Par ailleurs, le stress hydrique peut entraîner une altération de l'intégrité des membranes cellulaires et une réduction de la viabilité des graines (**Khaeim et al., 2022**). Comprendre les mécanismes d'adaptation des graines face au stress hydrique lors de la germination revêt une importance stratégique pour la sélection variétale en conditions arides. Des approches telles que la sélection de génotypes tolérants à la sécheresse, l'optimisation de la gestion de l'eau ou encore l'utilisation de techniques de prétraitement des semences (priming) sont aujourd'hui explorées pour améliorer la capacité germinative en conditions de stress hydrique (**Chen et al., 2023**).

II.1.1.2. Cinétique de germination

La cinétique de germination permet de suivre l'évolution journalière du pourcentage cumulé de graines germées. Les résultats présentés dans la Figure 4 révèlent des différences notables entre les trois variétés de blé tendre. À partir du jour 2 (J2), la variété V1 affiche une progression plus rapide de la germination, atteignant 46,89 %, contre 44,56 % pour V2 et seulement 31,67 % pour V3. Cette tendance se maintient jusqu'au jour 7 (J7), où V1 atteint un taux final de 95 %, suivie de V2 (94,22 %) et V3 (90,78 %). La supériorité de V1 se manifeste particulièrement entre J2 et J4, période durant laquelle elle enregistre les augmentations les plus marquées, traduisant une dynamique de germination plus efficace.

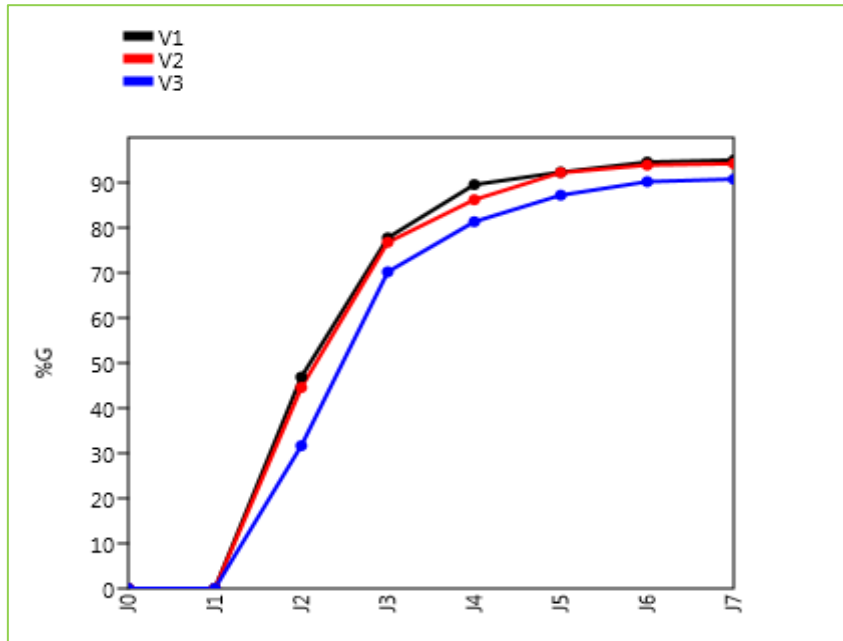


Figure 4 : Réponse germinative des grains de blé tendre selon l'intensité du stress hydrique (valeurs moyennes des niveaux de stress).

La Figure 5 illustre quant à elle l'effet de l'intensité du stress hydrique sur la cinétique moyenne de germination, toutes variétés confondues.

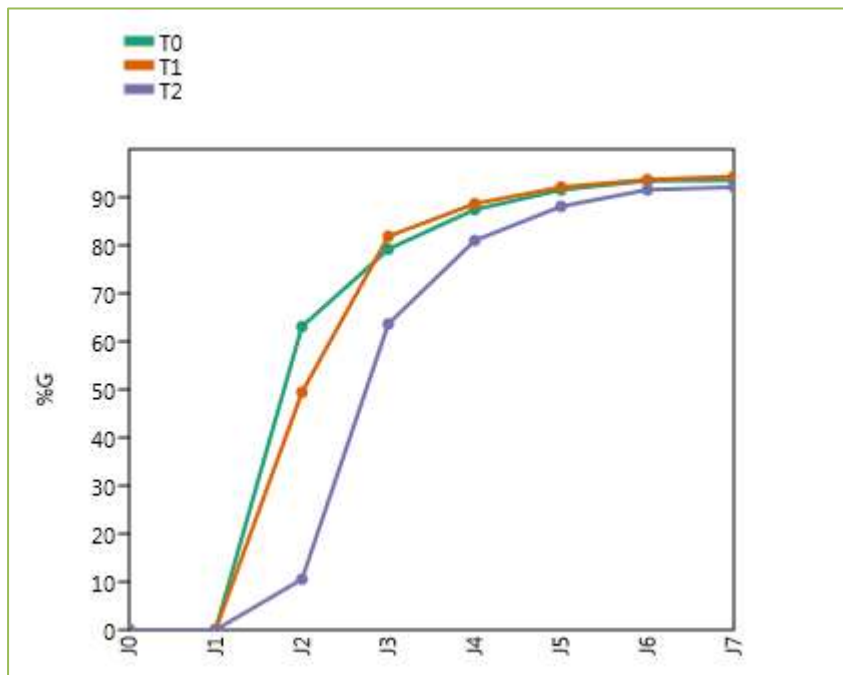


Figure 5 : Réponse germinative des grains de blé tendre selon l'intensité du stress hydrique (valeurs moyennes des variétés)

En condition témoin (T0), la germination est plus rapide, atteignant 63,11 % dès J2. Sous stress modéré (T1), un léger retard est observé avec 49,44 % à J2, mais la progression

reste constante jusqu'à atteindre 94,33 % à J7. En revanche, sous stress sévère (T2), la germination est fortement retardée, avec seulement 10,56 % à J2 et un pourcentage final réduit (92,11 % à J7), malgré un rattrapage partiel à partir de J4. Ces résultats mettent en évidence l'effet inhibiteur du stress hydrique sévère sur la vitesse de germination, en accord avec les augmentations significatives du temps moyen de germination (TMG) observées précédemment.

Ces cinétiques montrent ainsi à la fois des différences génétiques en termes de précocité et d'homogénéité de germination, et l'impact différentiel des intensités de stress hydrique, influençant directement la vitesse et la progression des plantules émergentes.

II.1.2. Paramètres de croissance des jeunes plantules

II.1.2.1. Analyse de la variabilité observée

L'analyse de la variance (ANOVA) présentée dans le Tableau 4 met en évidence des différences significatives dans la réponse des jeunes plantules de blé tendre soumises à différents niveaux de stress osmotique. L'effet de la 'variété' n'est pas significatif pour l'ensemble des caractères de croissance étudiés. Ce résultat suggère une réponse relativement homogène entre les variétés dans les conditions de l'essai.

En revanche, le 'stress osmotique' appliqué par le PEG-6000 a exercé un effet très hautement significatif sur tous les caractères, à l'exception du nombre de racines (NR) pour lequel aucune différence significative n'a été détectée entre les différents niveaux de stress. Cela indique que le nombre de racines serait un caractère plus stable et moins sensible aux variations hydriques dans les conditions expérimentales, contrairement aux autres paramètres qui se sont avérés très sensibles au déficit hydrique induit.

Tableau 4 : Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de croissance mesurés.

SV	ddl	LR	NR	LF	MFR	MFA
Variété	2	15,60 ^{ns}	1,49 ^{ns}	6,09 ^{ns}	1121,48 ^{ns}	769,55 ^{ns}
Stress	2	849,09***	0,96 ^{ns}	52,49***	15853,52***	5149,73***
Variété*Stress	4	6,13 ^{ns}	2,22 ^{ns}	4,99 ^{ns}	2729,17**	801,06 ^{ns}
Erreur	36	7,52	1,30	5,05	686,09	426,98

SV = Source de variation, ddl = degré de liberté, LR = Longueur des racines, NR = Nombre de racines, LF = Longueur de la 1^{ère} feuille, MFR = Matière fraîche racinaire, MFA = Matière fraîche aérienne, ^{ns}, ** et *** = Effets non significatifs et significatifs aux seuils de probabilité de 1 % et 0,1 %, respectivement.

L'interaction 'variété × stress' n'est significative qu'au niveau de la matière fraîche racinaire (MFR), ce qui laisse supposer que certaines variétés pourraient mieux maintenir leur

développement racinaire sous stress que d'autres. Cette interaction non significative pour les autres caractères indique que la variation du stress a un impact similaire sur l'ensemble des génotypes évalués, ce qui simplifie l'interprétation des effets du stress indépendamment du facteur variétal.

Ces résultats soulignent ainsi le rôle prédominant du stress osmotique dans la régulation de la croissance post-germination, en particulier sur la longueur des racines, la première feuille, et la biomasse fraîche, ce qui en fait des indicateurs pertinents pour la sélection de génotypes tolérants en conditions de sécheresse simulée.

a. Effet moyen 'variété'

Bien que l'analyse de la variance n'ait pas révélé d'effet significatif de la variété sur les caractères de croissance étudiés, l'examen des moyennes (Tableau 5) met en évidence une certaine variabilité entre les génotypes. Par exemple, la longueur moyenne des racines varie de 14,91 cm (V3) à 16,94 cm (V2), tandis que la matière fraîche racinaire oscille entre 78,49 mg (V1) et 94,45 mg (V2). Toutefois, ces différences, bien que numériquement notables, ne sont pas statistiquement significatives, ce qui suggère une réponse relativement homogène des variétés testées dans les conditions expérimentales de stress osmotique simulé.

Tableau 5 : Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de croissance mesurés.

Variété	LR	SE	NR	SE	LF	SE	MFR	SE	MFA	SE
V1	15,79 ^{ab}	1,58	4,87 ^a	0,27	12,77 ^a	0,55	78,49 ^a	9,09	95,09 ^a	5,99
V2	16,94 ^a	1,91	4,73 ^a	0,37	11,86 ^a	0,54	94,45 ^a	9,44	92,93 ^a	5,57
V3	14,91 ^b	1,83	4,27 ^a	0,25	11,55 ^a	0,93	80,70 ^a	12,20	81,75 ^a	8,40
Moyenne	15,88		4,62		12,06		84,54		89,92	
Ppds (5 %)	2,03		0,84		1,66		19,40		15,30	

LR = Longueur des racines (cm), NR = Nombre de racines (No), LF = Longueur de la 1^{ère} 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 %.

b. Effet moyen 'stress'

L'effet du stress hydrique simulé par le PEG-6000 sur les caractères de croissance des plantules de blé tendre est présenté dans le Tableau 6 et la Figure 6. Une diminution progressive des valeurs moyennes est observée avec l'augmentation de la concentration en PEG, traduisant une réponse négative et dose-dépendante à la contrainte osmotique.

Tableau 6 : Valeurs moyennes de l’effet moyen ‘stress’ des caractères de croissance mesurés.

Stress	LR	SE	NR	SE	LF	SE	MFR	SE	MFA	SE
T0	23,03 ^a	0,56	4,73 ^a	0,27	12,70 ^a	0,41	113,57 ^a	6,86	23,03 ^a	0,56
T1	16,57 ^b	1,06	4,80 ^a	0,28	13,53 ^a	0,63	90,65 ^a	8,29	16,57 ^b	1,06
T2	8,03 ^c	0,35	4,33 ^a	0,36	9,95 ^b	0,67	49,41 ^a	8,03	8,03 ^c	0,35
Moyenne	15,88		4,62		12,06		84,54		89,92	
Ppds (5 %)	2,03		0,84		1,66		19,40		15,30	

LR = Longueur des racines (cm), NR = Nombre de racines (No), LC = Longueur du coléoptile (cm), LF = Longueur de la 1^{ère} 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 %.

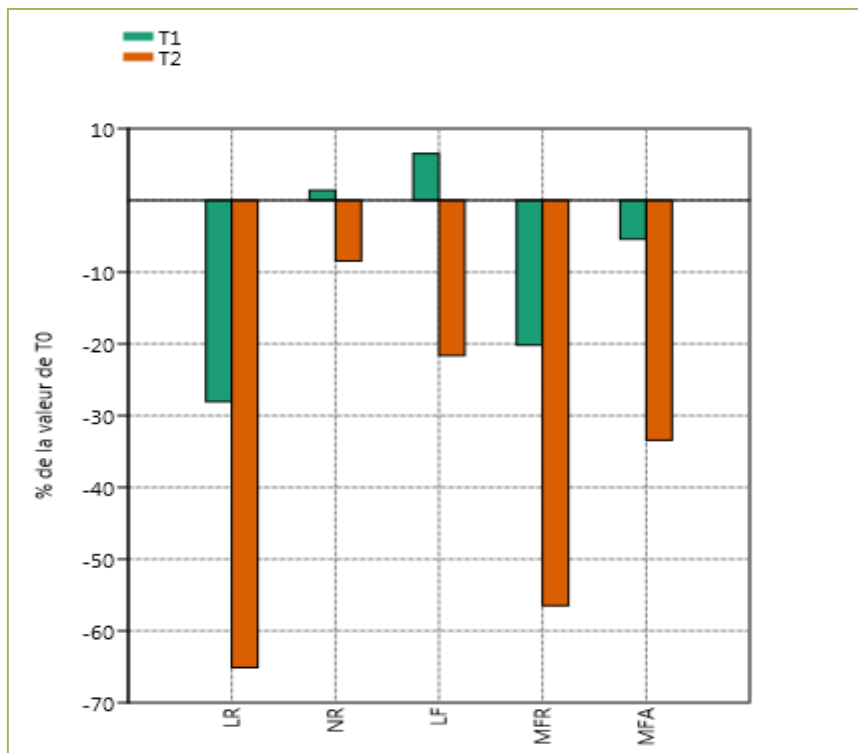


Figure 6 : Ecarts observés sur les caractères de croissance mesurés en T1 et T2 relativement au témoin T0 des variétés de blé tendre étudiées.

Par exemple, la longueur des racines (LR) diminue significativement, passant de 23,03 cm en condition témoin (T0) à 16,57 cm sous T1 et à seulement 8,03 cm sous T2, ce qui représente des réductions respectives de 28,08 % et 65,12 % par rapport au témoin. Ce caractère apparaît ainsi comme un indicateur très sensible au stress hydrique. La longueur de la première feuille (LF) présente une légère augmentation sous stress modéré (+6,51 % en T1), mais chute significativement sous stress sévère (-21,63 % en T2), passant de 13,53 cm à 9,95 cm. Cette réaction suggère une possible stimulation initiale suivie d’une forte inhibition lorsque le stress s’intensifie. Les matières fraîches racinaire (MFR) et aérienne (MFA) suivent des tendances

similaires : elles chutent respectivement de 20,18 % et 5,43 % en T1, puis de 56,49 % et 33,42 % en T2. En valeurs absolues, la MFR passe de 113,57 mg (T0) à 90,65 mg (T1), puis à 49,41 mg (T2), tandis que la MFA diminue de 23,03 mg à 8,03 mg. Ces résultats soulignent une vulnérabilité plus prononcée de la biomasse racinaire, ce qui peut impacter négativement l'absorption de l'eau et des nutriments en conditions de sécheresse. En revanche, le nombre de racines (NR) reste relativement stable entre les traitements, avec des valeurs comprises entre 4,33 et 4,80 racines, correspondant à une variation allant de +1,41 % (T1) à -8,45 % (T2), sans différence significative. Ce caractère apparaît ainsi comme le moins affecté par le stress osmotique, confirmant sa relative stabilité physiologique dans les conditions expérimentales appliquées.

c. Effet de l'interaction 'variété*stress'

L'interaction entre les génotypes (variétés) et les niveaux de stress hydrique appliqués met en évidence une variabilité différenciée de la réponse des caractères de croissance. La Figure 7 montre que, bien que toutes les variétés subissent une réduction de croissance sous l'effet du stress, l'intensité de cette réduction varie selon les génotypes et les paramètres mesurés. Concernant la longueur des racines (LR), toutes les variétés présentent une réduction marquée entre T0 et T2, mais à des degrés différents : V3 enregistre la chute la plus importante (-67,2 %, de 22,76 à 7,46 cm), suivie de V2 (-65,7 %, de 23,76 à 8,16 cm), tandis que V1 montre une réduction légèrement moins sévère (-62,5 %, de 22,58 à 8,48 cm). Cela suggère une légère supériorité de V1 en termes de maintien de la croissance racinaire sous stress. La matière fraîche racinaire (MFR) varie également fortement. V2 conserve une biomasse relativement plus élevée sous T1 (122,82 mg), traduisant une meilleure aptitude à maintenir sa croissance racinaire sous stress modéré. À l'inverse, V3 montre une chute drastique de la MFR sous stress sévère (-75,8 %, de 132,66 à 32,08 mg), indiquant une sensibilité accrue. Concernant la matière fraîche aérienne (MFA), V1 conserve une valeur relativement élevée même sous T2 (81,12 mg), contrairement à V3 qui chute à 49,24 mg. Cela reflète une meilleure tolérance de V1 à la dessiccation au niveau de la partie aérienne. La longueur de la première feuille (LF) montre une variabilité moindre entre variétés, bien que V3 subisse une chute plus marquée sous T2 (-35,9 %, de 12,80 à 8,20 cm), comparée à V1 (-18,8 %, de 13,50 à 10,96 cm). Enfin, le nombre de racines (NR) reste le caractère le moins affecté par le stress, avec de faibles fluctuations entre traitements. Toutefois, V2 affiche une hausse notable sous T1 (de 4,00 à 5,40), suggérant une plasticité raculaire sous stress modéré. Ces résultats soulignent que,

bien que le stress osmotique ait globalement un effet dépressif sur la croissance, certaines variétés comme V1 et V2 montrent une meilleure résilience, en particulier au niveau racinaire.

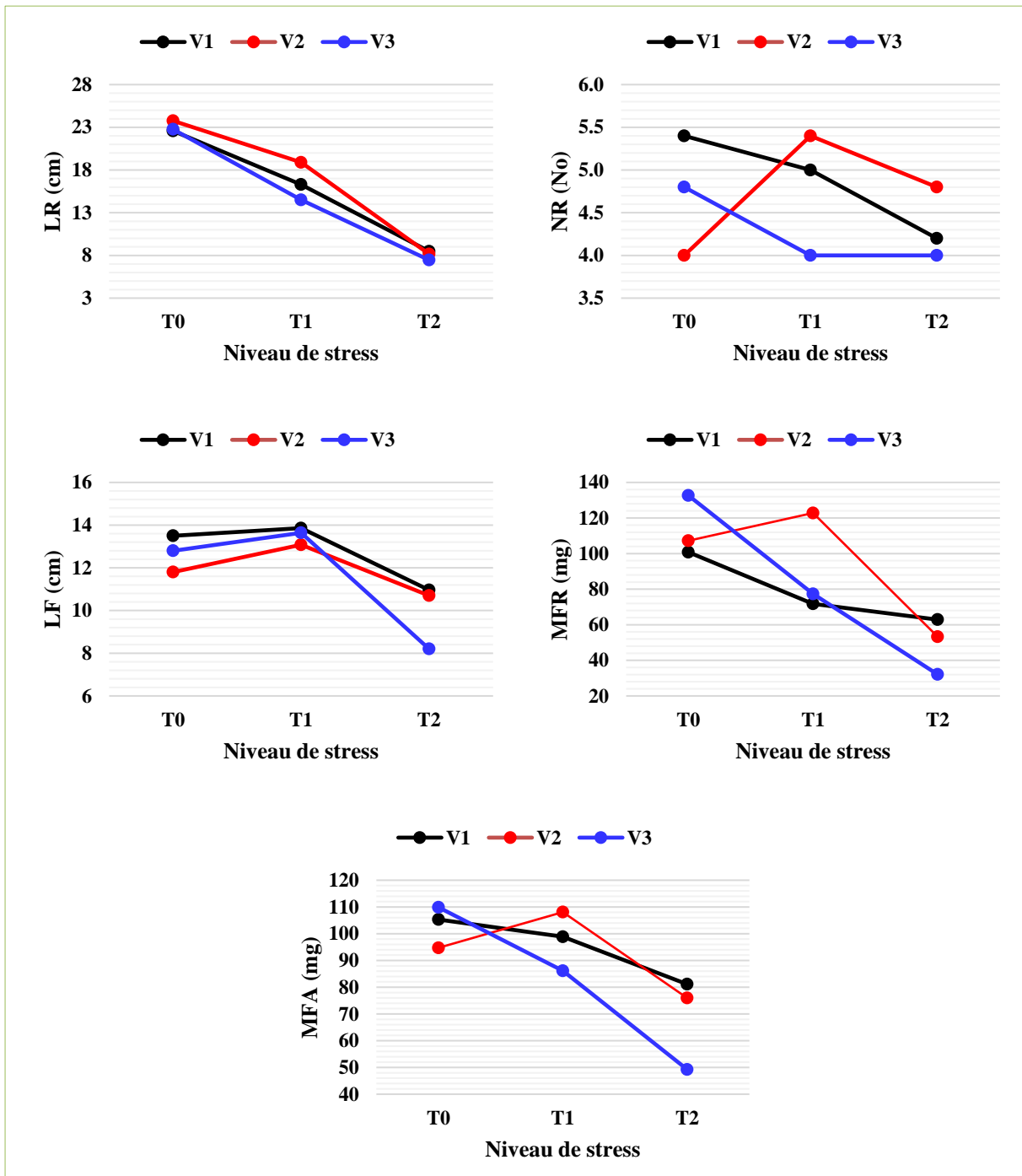


Figure 7 : Variation des paramètres de croissance aux traitements T0, T1 et T2 des variétés de blé tendre étudiées.

Selon la stratégie d'adaptation de chaque variété, l'effet du stress hydrique sur la culture peut se traduire à divers stades de son développement par des changements morphologiques tant dans les parties aériennes que souterraines de la plante (Faroq et al., 2009). Dans des

conditions de stress hydrique, l'aptitude des plantes à capter l'eau est étroitement liée au développement et à la croissance de leur système racinaire. D'après **Bendarradji et al. (2016)**, une réduction significative de la longueur et du nombre est provoquée par le manque d'eau. Comme l'ont également souligné d'autres recherches (**Xu et al., 2010**), une diminution plus prononcée de la biomasse des tiges et des racines, induite par le PEG-6000 est observée chez les génotypes sensibles à la sécheresse, comparativement aux génotypes tolérants. D'après **Farooq et al. (2009)** ainsi que **Rajjou et al. (2012)**, l'effet du stress hydrique précoce se manifeste de manière concomitante sur le développement des racines et des parties aériennes des végétaux. Quand le stress hydrique est appliqué de façon osmotique, on note une diminution marquée de la biomasse fraîche des racines et des parties aériennes, surtout en présence de conditions de stress extrême. Toutefois, l'impact du PEG-6000, un puissant agent de stress osmotique, semble plus marqué au niveau de la partie inférieure de la plante, comme l'ont aussi noté **Vuković et al. (2022)**.

II.1.2.2. Analyse de la teneur en proline de l'essai de laboratoire

L'analyse de la variance (Tableau 7) indique que la teneur en proline foliaire est significativement affectée par l'effet principal de la 'variété', du 'stress hydrique', ainsi que par leur interaction ('variété × stress'). Ces trois sources de variation expliquent respectivement 15,27 %, 42,58 % et 28,03 % de la variabilité totale observée dans l'accumulation de proline. Ces résultats mettent en évidence une diversité génétique dans la réponse au stress hydrique parmi les variétés de blé tendre étudiées, et suggèrent que l'accumulation de proline est fortement influencée à la fois par l'intensité du stress hydrique et par le génotype.

Tableau 7 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de la teneur en proline des feuilles chez les variétés étudiées.

SV	ddl	Pro ₁
Variété	2	11,39*
Stress	2	31,75**
Variété*Stress	4	10,45*
Erreur	9	2,34

SV = Source de variation, ddl = degré de liberté, Pro₁ = Teneur en proline des feuilles au stade pré-tallage, * et ** = Effets significatifs aux seuils de probabilité de 5 % et 1 %, respectivement.

L'effet moyen 'variété' (Figure 8) indique que la variété V1 présente la teneur en proline la plus faible avec 12,40 µg/100 mg MF, tandis que les variétés V2 (14,67 µg) et V3 (14,89 µg) affichent des valeurs significativement plus élevées (Ppds_{5%} = 2,00 µg). Ces différences

suggèrent une meilleure capacité osmorégulatrice des variétés V2 et V3 face à un déficit hydrique. La proline, en tant qu'osmoprotecteur reconnu, joue un rôle clé dans le maintien de l'équilibre hydrique cellulaire et la stabilisation des structures macromoléculaires en conditions de stress (Ashraf & Foolad, 2007 ; Szabados & Savouré, 2010).

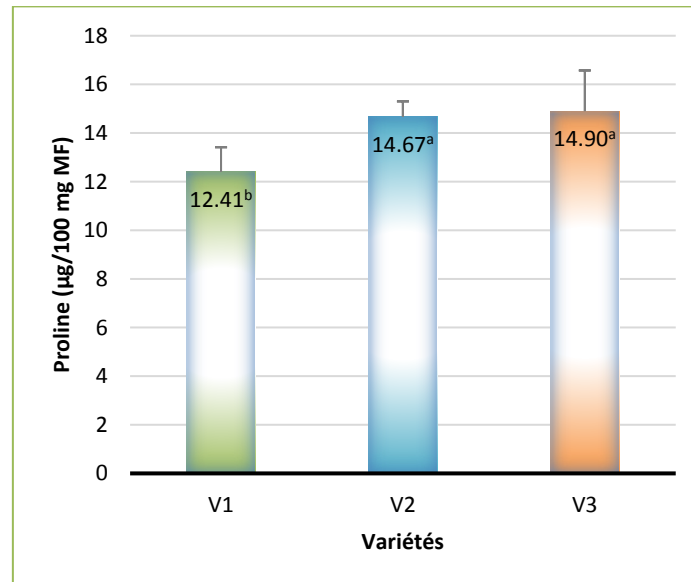


Figure 8 : Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' de la teneur en proline des feuilles au stade plantule. Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5 %.

Concernant l'effet du stress hydrique (Figure 9), la teneur en proline augmente significativement sous contrainte. Le traitement témoin (T0) affiche une valeur moyenne de 11,44 µg/100 mg MF, tandis que les traitements T1 (15,90 µg) et T2 (14,64 µg) montrent des accumulations nettement supérieures, dépassant la Ppds_{5%} de 2,00 µg. Cette tendance reflète l'activation de mécanismes adaptatifs permettant aux plantules de compenser l'effet de la contrainte osmotique par une synthèse accrue de proline, comme observé dans divers travaux sur le blé et d'autres céréales (Shao et al., 2008 ; Farooq et al., 2009).

L'analyse de l'interaction 'variété × stress' (Figure 10) met en évidence des réponses différenciées selon les combinaisons génotype × traitement. La variété V3 en condition de stress sévère (T2) atteint une teneur maximale de 18,73 µg/100 mg MF, tandis que V3 sous T0 affiche la valeur la plus faible (10 µg). Cette interaction illustre que certains génotypes, notamment V3, disposent d'un potentiel accru d'accumulation de proline en réponse à une contrainte hydrique sévère, ce qui pourrait en faire un indicateur pertinent de tolérance au stress à un stade précoce du développement végétatif.

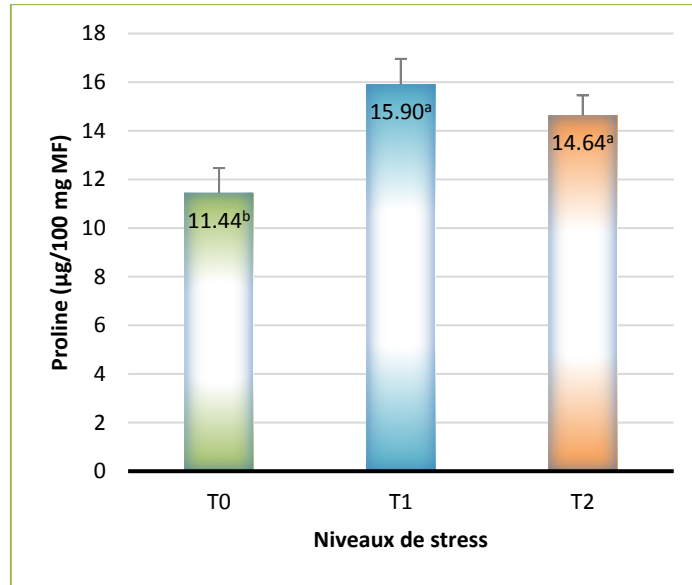


Figure 9 : Valeurs moyennes de l’effet moyen ‘stress’ de la teneur en proline des feuilles au stade plantule. Les valeurs suivies d’une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5 %.

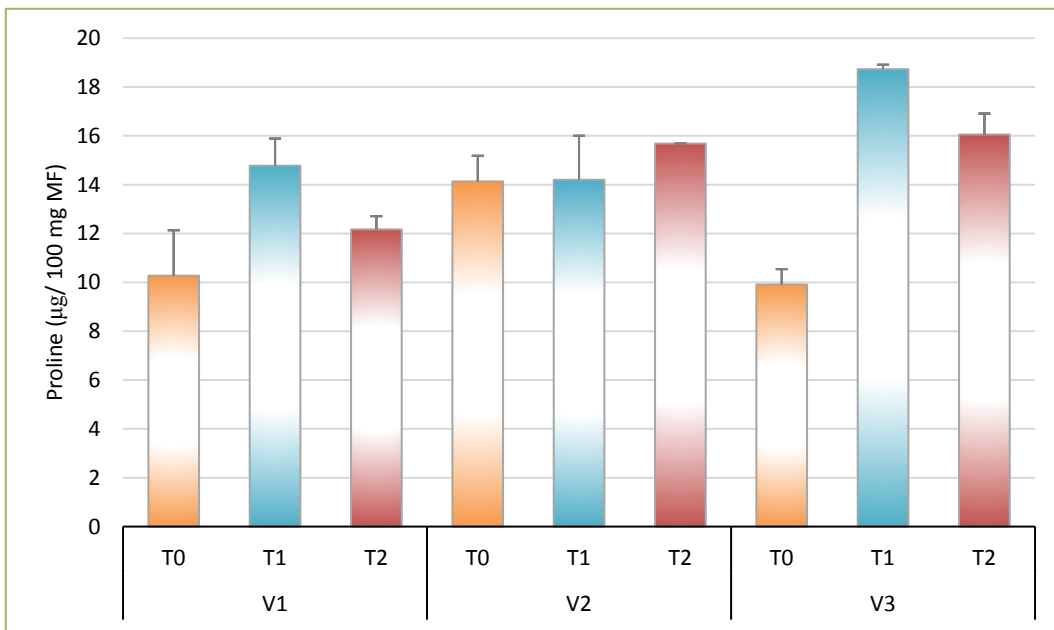


Figure 10 : Valeurs moyennes de l’interaction ‘variété × stress’ de la teneur en proline des feuilles au stade plantule.

II.2. Essai de plein champ

II.2.1. Analyse de la variance des caractères mesurés

L'analyse de la variance réalisée sur les caractères morpho-physiologiques mesurés au champ (Tableau 8) révèle une variabilité significative à très hautement significative entre les variétés de blé tendre pour l'ensemble des paramètres étudiés. Cette variabilité traduit une diversité génétique substantielle dans les réponses physiologiques à la contrainte hydrique, notamment pour des indicateurs clés de tolérance tels que la proline et la chlorophylle. Ces résultats suggèrent que certains génotypes disposent de mécanismes d'adaptation plus efficaces face aux conditions abiotiques défavorables, un constat en accord avec les observations précédentes sur le blé en milieu semi-aride (Seleiman et al., 2021 ; Lamara et al., 2022 ; Fellahi et al., 2024b). Cette diversité représente un levier crucial pour les programmes d'amélioration génétique, permettant de sélectionner des variétés dotées d'une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau et d'une résilience accrue à la sécheresse (Belagrouz et al., 2018).

Tableau 8 : Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères morpho-physiologiques mesurés.

SV	ddl	SF	TRE	DC	Chl	Pro ₂
Variété	2	18,54*	25,47*	1783,09*	369,02***	76,92*
Erreur	6	2,47	4,00	286,54	4,29	6,22

SV = Source de variation, ddl = degré de liberté, SF = Surface foliaire de la feuille étendard, TRE = Teneur relative en eau, IC = Dommages cellulaires, Chl = Teneur en chlorophylle, Pro₂ = Teneur en proline des feuilles au stade épiaison. ^{ns}, ** et *** = Effets non significatifs et significatifs aux seuils de probabilité de 1 % et 0,1 %, respectivement.

II.2.2. Comparaison des moyennes

Les moyennes des caractères morpho-physiologiques mesurés sont présentées dans le Tableau 9. La surface foliaire (SF) varie significativement entre les génotypes. La variété V3 se distingue par la plus grande surface foliaire (16,02 cm²), contre 11,05 cm² pour V1, avec une moyenne générale de 13,51 cm². L'écart observé entre V3 et V1 dépasse l'écart significatif minimal requis (Ppds_{5%}) de 2,53 cm², indiquant une supériorité morphologique de V3 en conditions de stress. Cette capacité d'expansion foliaire peut contribuer à maintenir un bon potentiel assimilateur, comme souligné par Royo et al. (2000).

Concernant la teneur relative en eau (TRE), les valeurs les plus élevées sont enregistrées chez V3 (81,43 %) et V2 (81,15 %), alors que V1 affiche une valeur inférieure (76,25 %). Les différences observées entre V1 et les deux autres variétés dépassent l'écart significatif minimal requis ($P_{pds5\%} = 3,99\%$), suggérant une meilleure capacité de rétention hydrique chez V2 et V3, un trait directement corrélé à la tolérance à la sécheresse (Sinclair & Ludlow, 1985).

Tableau 9 : Valeurs moyennes des caractères morpho-physiologiques mesurés.

Variété	SF	SE	TRE	SE	DC	SE	Chl	SE	Pro ₂	SE
V1	11,05 ^b	0,96	76,25 ^b	1,45	85,32 ^a	13,40	39,43 ^a	1,07	12,21 ^b	0,92
V2	13,45 ^{ab}	0,86	81,15 ^a	0,22	82,83 ^a	8,52	20,83 ^b	1,00	11,71 ^b	2,81
V3	16,02 ^a	0,84	81,43 ^a	1,36	41,91 ^b	4,04	40,6 ^a	1,46	22,69 ^a	0,76
Moyenne	13,51		79,61		70,02		33,62		15,54	
Ppds (5 %)	2,53		3,99		32,74		4,14		7,94	

SF = Surface foliaire de la feuille étendue (cm²), TRE = Teneur relative en eau (%), IC = Dommages cellulaires (%), Chl = Teneur en chlorophylle (CCI), Pro₂ = Teneur en proline des feuilles au stade épiaison (µg/100 mg MF), SE = Erreur standard. Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5 %.

L'analyse des dommages cellulaires révèle une différence marquée entre les génotypes. V3 présente la valeur la plus faible (41,91 %), tandis que V1 et V2 enregistrent des taux plus élevés (85,32 % et 82,83 %, respectivement). Ces écarts excèdent largement la $P_{pds5\%}$ de 32,74 %, témoignant d'une meilleure intégrité membranaire chez V3 sous stress, un critère reconnu pour la sélection de génotypes résistants (Kocheva et al., 2005).

Pour la teneur en chlorophylle, V3 (40,60 CCI) et V1 (39,43 CCI) affichent des niveaux significativement plus élevés que V2 (20,83 CCI). L'écart entre ces génotypes dépasse le seuil significatif requis de 4,14 CCI, traduisant une meilleure préservation des pigments chlorophylliens chez V1 et V3. Une telle stabilité est cruciale pour maintenir la photosynthèse en période de stress, comme démontré chez diverses céréales (Anjum et al., 2011).

Enfin, la teneur en proline au stade épiaison varie fortement selon les variétés. V3 enregistre la concentration la plus élevée (22,69 µg/100 mg MF), tandis que V1 et V2 présentent des niveaux comparativement plus faibles (12,21 et 11,71 µg/100 mg MF, respectivement). Les écarts observés excèdent le seuil de signification de 7,94 µg, indiquant une capacité osmorégulatrice nettement plus marquée chez V3. Cette suraccumulation suggère une réponse osmorégulatrice plus robuste, facilitant l'ajustement osmotique et la protection cellulaire (Szabados & Savouré, 2010).

Dans l'ensemble, la variété V3 se distingue par l'expression concertée de plusieurs traits physiologiques avantageux en condition de sécheresse naturelle : une surface foliaire étendue, une forte capacité de rétention hydrique, une meilleure intégrité membranaire, une stabilité des pigments chlorophylliens, et une accumulation marquée de proline. Ces attributs physiologiques font de V3 un candidat prometteur pour les programmes de sélection en zones semi-arides, où la pression de sélection sur la tolérance à la sécheresse est particulièrement forte.

Conclusión

Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer la réponse de différentes variétés de blé tendre sous stress hydrique, en combinant des essais en laboratoire et des observations en plein champ. Les résultats révèlent une variabilité génétique marquée dans les performances germinatives et la croissance des plantules, mettant en évidence des stratégies d'adaptation distinctes selon les génotypes. En conditions contrôlées, le stress osmotique a principalement affecté la vitesse de germination (TMG, IG) plutôt que le taux final (%G), soulignant une résilience partielle des graines à court terme. La variété El Zina (V1) s'est distinguée par sa stabilité germinative sous stress, tandis que El Hidhab (V3) a montré une sensibilité accrue à ce stade, mais une meilleure accumulation de proline, suggérant des mécanismes de défense activés plus tardivement.

En conditions réelles, El Hidhab (V3) a confirmé son potentiel adaptatif avec une meilleure rétention d'eau (TRE), une intégrité membranaire préservée et une teneur élevée en chlorophylle, des traits essentiels pour maintenir la productivité sous sécheresse. À l'inverse, El Zina (V1), bien que performante en germination, a présenté des limitations en plein champ, notamment une TRE réduite. Ces contrastes suggèrent que la tolérance au stress hydrique est multifactorielle et dépendante du stade de développement, nécessitant une approche intégrée dans les programmes de sélection.

En conclusion, cette étude identifie des marqueurs physiologiques prometteurs (proline, TRE, dynamique racinaire) pour la sélection de génotypes adaptés aux environnements secs. Les variétés El Zina (V1) et El Hidhab (V3) représentent des profils complémentaires : la première pour une résilience précoce, la seconde pour une tolérance prolongée. Des recherches supplémentaires intégrant des analyses moléculaires et des essais multi-locaux permettraient d'affiner ces résultats, ouvrant la voie à des stratégies d'amélioration ciblées pour renforcer la durabilité du blé face aux stress hydriques croissants.

*Références
Bibliographiques*

Références bibliographiques

- Ahmed, K., Shabbir, G., & Ahmed, M. (2025).** Exploring drought tolerance for germination traits of diverse wheat genotypes at seedling stage: a multivariate analysis approach. *BMC Plant Biology*, **25**(1), 390.
- Ali, O.A. (2019).** Wheat responses and tolerance to drought stress. In: *Wheat Production in Changing Environments*. Springer, pp 129–138.
- Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007).** Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, **59**(2), 206–216.
- Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011).** Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, **6**(9), 2026–2032.
- Belagrouz, A., Chennafi, H., Bouzerzour, H., Hakimi, M., Razem, R., & Sahraoui, A. H. (2018).** Relationships among water use efficiency and the physio-agronomic traits in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars assessed under rainfed conditions of the eastern high plateaus of Algeria. *Agriculture and Forestry*, **64**(3), 159–172.
- Benbelkacem, A. (2023).** Overview of Wheat Breeding in Algeria. *International Symposium on 'La Production du Blé et la Sécurité Alimentaire*. INRAA, 12–13 Décembre 2023.
- Chahbar, S. (2008).** Études des paramètres morphologiques et physiologiques de résistance à la sécheresse chez la fève (*Vicia faba* L.). *Laboratoire de physiologie végétale*, Oran. Mémoire de magister, 15–16 p.
- 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.
- Chourghal, N., Lhomme, J. P., Huard, F., & Aidaoui, A. (2015).** Climate change in Algeria and its impact on durum wheat. *Regional Environmental Change*, **16**, 1623–1634.
- Dreier, W. (1978).** Possibilité d'une élaboration d'un test de présélection des variétés des plantes ayant une haute tolérance ou résistance aux sels, sur la base de la relation entre la teneur de proline des tissus végétaux et la résistance aux sels. *Journée d'études et de recherche agronomique*, 22–30 Mars, I.N.A. El Harrach, Algérie.
- Ellis, R. H., & Roberts, E. H. (1981).** The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. *Seed Science and Technology*, **9**, 373–400.
- Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., & Saud, S. (2017).** Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*, **8**, 1147.
- FAO (2023).** *World Food and Agriculture – Statistical yearbook 2023*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/statistics/yearbook>

- 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.
- Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K. H. M. (2012).** Drought stress in plants: An overview. In: Aroca, R. (Ed.), *Plant Responses to Drought Stress* (pp. 1–33). Springer.
- Fellahi, Z. E. A., Boubellouta, T., Bentouati, I., Safsaf, H., Hannachi, A., Utkina, A. O., & Rebouh, N. Y. (2024a).** Hydroponic screening at early seedling stage identified sources of salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) crop. *Agronomy*, **14**(5), 984.
- Fellahi, Z. E. A., Boubellouta, T., Hannachi, A., Belguet, H., Louahdi, N., Benmahammed, A., Utkina, A. O., & Rebouh, N. Y. (2024b).** 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.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001).** PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, **4**, 1–9.
- Hussain, H. A., Men, S., Hussain, S., Chen, Y., Ali, S., Zhang, S., ... & Wang, L. (2019).** Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. *Scientific Reports*, **9**, 3890.
- IWGSC (2023).** *International Wheat Genome Sequencing Consortium – Annual report 2023*. Retrieved from <https://www.wheatgenome.org/>
- 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.
- Kocheva, K., Lambrev, P., Georgiev, G., Goltsev, V., & Karabaliev, M. (2005).** Evaluation of chlorophyll fluorescence and membrane injury in drought-stressed barley. *Bioelectrochemistry*, **63**(1–2), 121–124.
- Lamara, A., Fellahi, Z., Hannachi, A., & Benniou, R. (2022).** Assessing the phenotypic variation, heritability and genetic advance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) candidate lines grown under rainfed semi-arid region of Algeria. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, **75**(3), 10107–10118.
- Lamara, A. (2025).** *Contribution à l'étude de la sélection de l'adaptation de quelques génotypes de blé tendre (Triticum aestivum L.) dans les conditions agro-climatiques semi-aride de la région de Sétif*. Thèse de Doctorat LMD, Université Ferhat Abbas Sétif1, 131 p.
- Monneveux, P., & Nemmar, M. (1987).** Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) ; Étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, **6**, 583–590.
- OECD-FAO. (2023).** *OECD-FAO agricultural outlook 2023–2032*. OECD Publishing.
- Othmani, A., Ayed, S., Chamekh, Z., Slama-Ayed, O., Teixeira Da Silva, J. A., Rezgui, M., Slim Amara, H., & Ben Younes, M. (2021).** Screening of seedlings of durum wheat

- (*Triticum durum* Desf.) cultivars for tolerance to PEG-induced drought stress. *Pakistan Journal of Botany*, **53**(3), 823–832.
- 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.
- Pask, A. J. D., Pietragalla, J., Mullan, D. M., & Reynolds, M. P. (2012).** *Physiological breeding: A field guide to wheat phenotyping*. Mexico, D.F.: CIMMYT.
- 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.
- Ranal, M. A., & Santana, D. G. D. (2006).** How and why to measure the germination process? *Brazilian Journal of Botany*, **29**, 1–11.
- Royo, C., Abaza, M., Blanco, R., & del Moral, L. F. G. (2000).** Triticale grain growth and morphometry as affected by drought stress, late sowing and simulated drought stress. *Australian Journal of Plant Physiology*, **27**(11), 1051–1059.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., & Shami, A. (2021).** Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, **10**(2), 259.
- Shao, H. B., Chu, L. Y., Jaleel, C. A., & Zhao, C. X. (2008).** Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes Rendus Biologies*, **331**(3), 215–225.
- Sinclair, T. R., & Ludlow, M. M. (1985).** Who taught plants thermodynamics? The unfulfilled potential of plant water potential. *Australian Journal of Plant Physiology*, **12**(3), 213–217.
- Szabados, L., & Savouré, A. (2010).** Proline: A multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*, **15**(2), 89–97.
- Troll, W., & Lindsley, J. (1955).** A photometric method for the determination of proline. *Journal of Biological Chemistry*, **215**(2), 655–660.
- Vuković, R., Čamagajevac, I. Š., Vuković, A., Šunić, K., Begović, L., Mlinarić, S., Sekulić, R., Sabo, N., & Španić, V. (2022).** Physiological, biochemical and molecular response of different winter wheat varieties under drought stress at germination and seedling growth stage. *Antioxidants*, **11**(4), 693.
- Xu, Z., Zhou, G., & Shimizu, H. (2010).** Plant responses to drought and rewatering. *Plant Signaling & Behavior*, **5**(6), 649–654.
- Zandalinas, S. I., Mittler, R., Balfagón, D., Arbona, V., & Gómez-Cadenas, A. (2018).** Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. *Physiologia Plantarum*, **162**(1), 2–12.

Résumé

Cette étude a évalué la réponse de trois variétés de blé tendre (El Zina, Maouna, El Hidhab) à un stress hydrique induit en laboratoire par le PEG-6000, puis en conditions réelles de plein champ. Les résultats ont révélé une variabilité génétique significative dans les paramètres de germination et de croissance. En conditions contrôlées, le stress a fortement affecté la vitesse de germination (augmentation du temps moyen et diminution de l'indice de germination), mais peu le taux final, indiquant une résilience partielle. La variété El Zina (V1) s'est montrée la plus stable lors de la germination, tandis que El Hidhab (V3), bien que plus sensible initialement, a présenté une meilleure accumulation de proline et une meilleure tolérance aux stades ultérieurs. En plein champ, El Hidhab (V3) a confirmé sa supériorité avec une plus grande surface foliaire, une meilleure rétention d'eau, une intégrité cellulaire préservée et des teneurs élevées en chlorophylle et proline, contrairement à El Zina (V1) qui a montré des limitations en conditions réelles. Ces résultats soulignent l'importance d'une sélection variétale intégrant à la fois la résilience germinative et les mécanismes d'adaptation physiologique pour améliorer la tolérance à la sécheresse chez le blé tendre.

Mots clé : *Triticum aestivum*, stress hydrique, polyéthylène glycol, Indicateurs physiologiques, tolérance.

Abstract

This study evaluated the response of three soft wheat varieties (El Zina, Maouna, El Hidhab) to water stress induced in the laboratory using PEG-6000, followed by real-world field conditions. The results revealed significant genetic variability in germination and growth parameters. Under controlled conditions, stress strongly affected germination speed (increased mean time and decreased germination index) but had little impact on the final germination rate, indicating partial resilience. Variety El Zina (V1) showed the most stable germination performance, while El Hidhab (V3), though initially more sensitive, exhibited better proline accumulation and enhanced tolerance at later growth stages. In field conditions, El Hidhab (V3) confirmed its superiority with greater leaf area, improved water retention, preserved cellular integrity, and higher chlorophyll and proline levels, unlike El Zina (V1), which showed limitations under real-world stress. These findings highlight the importance of varietal selection that integrates both germination resilience and physiological adaptation mechanisms to enhance drought tolerance in soft wheat.

Keywords: *Triticum aestivum*, water stress, polyethylene glycol, physiological indicators, tolerance.

ملخص

في هذه الدراسة، تم تقييم استجابة ثلاث أصناف من القمح اللين (الزينة، معاونة، الهضاب) للإجهاد المائي المُحدث في المختبر باستعمال الـPEG-6000، ثم في ظروف حقلية واقعية. أظهرت النتائج وجود تباين وراثي كبير في مؤشرات الإنبات والنمو. في الظروف المضبوطة، أثر الإجهاد بشكل كبير على سرعة الإنبات (زيادة متوسط الوقت وانخفاض مؤشر الإنبات) لكن تأثيره كان محدوداً على معدل الإنبات النهائي، مما يدل على وجود مقاومة جزئية. تميز صنف الزينة (V1) بثباته أثناء مرحلة الإنبات، في حين أظهر صنف الهضاب (V3)، رغم كونه أكثر حساسية في البداية، قدرة أفضل على تراكم البرولين وتحسناً في التحمل في المراحل النموية المتأخرة. في التجربة الحقلية، أكد صنف الهضاب (V3) تفوقه من خلال مساحة ورقة أكبر، قدرة أعلى على الاحتفاظ بالماء، واستقرار في سلامة الخلايا، بالإضافة إلى مستويات مرتفعة من الكلوروفيل والبرولين، وذلك بخلاف صنف الزينة (V1) الذي أظهر محدودية في الظروف الواقعية. تبرز هذه النتائج أهمية اعتماد انتقاء صنفى يأخذ بعين الاعتبار كلاً من مقاومة الإنبات والآليات الفيزيولوجية للتكيف، بهدف تحسين تحمل الجفاف لدى القمح اللين.

كلمات مفتاحية: *Triticum aestivum*، PEG-6000، إجهاد مائي، بولي إيثيلين جلايكول، مؤشرات فيزيولوجية، مقاومة.