



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 بوعريش

Université Mohamed 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 النحالحة

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 :

Caractérisation précoce de la tolérance aux stress
abiotiques chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.)

Présenté par :

BELMILOUD Ichrak & CHEKHABA Dalal

Soutenu le 24/ 06/ 2023, Devant le Jury :

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
Président :	M. BIBAK Mohamed	MAA	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. BAHLOULI Fayçal	Pr	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

*Après avoir rendu grâce à ALLAH le Clément et le Miséricordieux de nous avoir données la force, le courage et la patience durant nos études pour arriver à ce jour - là, nous tenons à adresser en premier lieu nos vifs remerciements à notre encadreur **Dr. FELLAHI Zine El Abidine**, qui nous a proposés ce thème et nous a initiés dans cette voie de recherche. On avoue qu'il a toujours été présent, compétent et surtout efficace dans sa supervision. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance la plus dévouée pour toutes les informations, références bibliographiques, réflexions, corrections... qu'il nous apporté et qui ont nourrit ce travail.*

*Nous tenons à remercier **M. BIBAK Mohamed** pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.*

*Nous tenons à remercier sincèrement **Pr. BAHLOULI Fayçal** qui nous a fait le grand honneur d'examiner ce travail.*

*Nous aimerons remercier **tous nos enseignants** durant tout notre parcours d'étude pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.*

*Nous tenons également à remercier **tous les cadres de l'ITGC, CNCC et INRAA** de Sétif d'avoir été si gentils avec*

nous et de nous avoir permis de réaliser notre mémoire avec eux.

Nous ne saurons jamais assez reconnaissants pour la lumière de nos vies, nos parents qui par leurs prières et leurs encouragements, nous avons pu surmonter tous les obstacles.

Enfin, nous remercions gracieusement toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci

Dédicace

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

A MA TRES CHERE MERE

Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie. Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance.

J'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta confiance et tes sacrifices.

Puisse ALLAH tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longevie et Bonheur.

A MON TRES CHER PERE

De tous les pères, tu es le meilleur. Tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance et perfectionnisme. En témoignage de brut d'années de sacrifices, desollicitudes, d'encouragement et de prières.

Pourriez-vous trouver dans ce travail le fruit de tous vos espoirs et tous de vos efforts. En ce jour, j'espère que j'ai réalisé l'un de tes rêves. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour.

Puisse ALLAH vous préserver et vous procurer santé et bonheur.

ET mon cher frère, Amin pour qui Dieu a décrété la mort il y a 9 mois, merci beaucoup pour ce que vous avez fait, et vous me l'avez donné et l'avez mis à mon service. *J'espère que Dieu fera de vous un des propriétaires du plus haut paradis.*

*Et mes très chères sœurs **Ibtissam, Neserin, A ma jumelle et mon soutien dans la vie, Abir,** merci pour votre soutien constant, votre humour contagieux et votre présence réconfortante. Vous êtes ma source de joie et de bonheur, et je suis fière de vous avoir dans ma vie.*

*A la fleur de la maison ma nièce **Douaa** qu'a remplie ma vie de tant de bonheur et de joie.*

*A toute ma famille **BELMILOUD***

*A ma binôme **Dalal** qui m'a accompagnée pendant le long de cette période pour réaliser ce mémoire, et qui est devenue une chère sœur et une collaboratrice talentueuse, merci pour ta gentillesse, ton soutien et ton amour ton collaboration fructueuse et ton amitié sincère.*

*A mon ami **ZEROUK ABDREZEK**, tu as été une source d'inspiration et de motivation pour moi tout au long de ce parcours, Merci de m'avoir soutenu et encouragé.*

***TOUTES MES AMIES** : surtout, Houda, Nabawiya, Hala, Rania, AyaChaima, Amina, Amira, Lamia, Souad, Sara, Katia, Sihem, Loubna, Rihab, Khawla, Mouna (Manar), Ines, Hadil, Iman, Dhahbiya, Ilham, Arwa, Rayan, Hadjer, Asma, Kamilia, Nourehan, Sounia, Manel, Chahinez et Roula.*

A tous ceux que j'aime et je respecte.

ICHRAK

Dédicaces

Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie

A mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié, maman.

A celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, D'amour et d'affection, à mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et 'encourager, à mon prince papa

A mon frère Oussama pour l'amour qu'il me réserve.

A ma grande sœur Wafa qui n'ont pas cessée de me conseiller encourager et soutenir tout au long de mes études.

A mon adorable petite sœur Retadj qui sait toujours comment procurer la joie pour toute la famille.

Mes neveux Wail, Rihab et Nadjem El Ddine qui sont la source de joie de la maison et le fruit de notre foyer.

A mes très chères amies Ines, Khawla, Asma, Manar, Maria, Nesrin et Marwa qui ont été piliers dans les moments difficiles et mes partenaires de fête dans les moments de joie, merci pour votre amitié sincère, votre soutien sans faille et votre amour inconditionnel.

A mon collègue Abdou pour son soutien précieux dans la réalisation de mon mémoire, ses directives, conseils et partage de connaissances, de méthodes de recherche et de méthodologie ont été d'une grande aide.

Enfin, à mon binôme Ichrak qui est devenue une amie chère et une collaboratrice talentueuse, merci pour notre collaboration fructueuse et notre amitié.

Tu as été une source d'inspiration et de motivation pour moi tout au long de ce parcours.

A mes collègues et amies de la promotion 2022/2023.

Dalal

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 comportement des plantules de blé	5
I.3. Caractères mesurés et paramètres étudiés	6
I.3.1. Essai de germination	6
I.3.1.1. Pourcentage final de germination (%G, %)	7
I.3.1.2. Temps moyen de germination (TMG, jours)	7
I.3.1.3. Indice de germination (IG, No)	7
I.3.1.4. 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)	8
I.3.2.4. Longueur de la 1 ^{ère} feuille (LF, cm)	8
I.3.2.5. Matières fraîches racinaire (MFR, mg) et aérienne (MFA, mg)	8
I.4. Analyse des données	8
Chapitre II : Résultats et discussion	
II.1. Essai de germination	9
II.1.1. Analyse de la variance	9
II.1.2. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété'	10
II.1.3. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress'	11
II.1.4. Effet de l'interaction 'variété*stress'	14
II.2. Essai de comportement des plantules de blé	16
II.2.1. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété'	17
II.2.2. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress'	19
II.2.3. Effet de l'interaction 'variété*stress'	21
II.3. Corrélations des caractères mesurés	23

II.4. Classification des variétés vis-à-vis de la tolérance au stress.....	24
Conclusion	27
Références bibliographiques	29

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Code et nom des variétés de blé dur étudiés.....	4
Tableau 2 :	Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de germination mesurés.....	9
Tableau 3 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de germination mesurés.....	11
Tableau 4 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress' des caractères de germination mesurés	12
Tableau 5 :	Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères de croissance mesurés.....	16
Tableau 6 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété' des caractères de croissance mesurés	18
Tableau 7 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen stress des caractères de croissance mesurés	18
Tableau 8 :	Ordre de classement des variétés de blé par caractère mesuré	24

Liste des figures et photos

Figure 1 : Réduction/augmentation (en %) des variables mesurées en T1 relativement au témoins T0 des géotypes étudiés	13
Figure 2 : Cinétique de germination des grains de blé dur en fonction de l'intensité du stress appliqué.....	14
Figure 3 : Réduction du % de germination des traitements T1 relativement au témoins T0 des variétés étudiés	15
Figure 4 : Réduction (en %) des variables mesurées en T1 relativement au témoins T0 des variétés étudiés	20
Figure 5 : Réduction/augmentation (en %) des paramètres de croissance aux traitements T1 relativement au témoins T0 des géotypes étudiés.....	22
Figure 6 : Corrélation phénotypique de Pearson entre les caractères de germination et de croissance des plantules mesurés chez les variétés de blé.	24
Figure 7 : Degré de sensibilité au stress hydrique des variétés de blé étudiées au stade germinatif.....	26
Photo 1 : Mise en place des graines de blé dans les boîtes de pétri et dénombrement des graines germées par jour.....	5
Photo 2 : Transplantation des graines germées vers les 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.

ICARDA: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas

IG : Indice de Germination.

LC : Longueur du Coléoptile.

LF : Longueur de la 1^{ère} 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.

Introduction

Introduction

Les céréales jouent un rôle primordial dans les systèmes agricoles à l'échelle mondiale. Elles sont l'une des cultures les plus importantes et les plus répandues, fournissant une source essentielle de nourriture, d'alimentation animale et de matières premières dans de nombreux pays (**Poutanen et al., 2022**). Les céréales les plus couramment cultivées et consommées à grande échelle comprennent le blé, le riz, le maïs, l'orge et le seigle. Ces cultures ont une grande valeur économique et nutritionnelle, et elles sont cultivées dans diverses régions du monde pour répondre à la demande croissante de produits céréaliers (**Shewry, 2021**). Parmi ces céréales, le blé occupe une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie des pays. Le blé dur (*Triticum durum*) est cultivé dans différentes régions du monde, notamment en Europe du Sud (Italie, France, Espagne, ...), en Afrique du Nord (Algérie, Tunisie, ...) au Moyen-Orient et en Amérique du Nord (**Rabti et al., 2020 ; Xynias et al., 2020 ; Haddad et al., 2021**).

Le blé dur est principalement transformé en semoule, qui est ensuite utilisée pour fabriquer des pâtes, comme les spaghettis, les macaronis, les lasagnes, etc. La semoule de blé dur peut également être utilisée pour préparer des couscous, des galettes, des pains plats et d'autres produits de boulangerie (**Feillet, 2000**). Le blé fournit également une ressource privilégiée pour l'alimentation animale et de multiples applications industrielles (**Hannachi, 2017**).

L'Algérie est l'un des principaux producteurs de blé dur en Afrique du Nord. La production de blé dur en Algérie est d'une grande importance pour l'économie agricole du pays et pour la sécurité alimentaire de sa population. Cette espèce est cultivée dans différentes régions du pays, principalement dans les régions du Centre, de l'Est et de l'Ouest. Selon les données statistiques du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, la superficie moyenne cultivée en blé dur en Algérie est d'environ 1.5 million d'hectares avec des rendements moyens qui peuvent varier en fonction des facteurs climatiques, des pratiques agricoles et des variétés de blé cultivées de tonnes par hectare (**DSASI, 2020**).

L'Algérie est un grand consommateur de blé dur en raison de sa forte demande pour la production de couscous, de pâtes et d'autres produits alimentaires à base de blé dur. Cependant, la production nationale ne suffit pas à couvrir les besoins du pays, ce qui conduit à des importations significatives (**Benbelkacem, 2022**).

La faiblesse de production est souvent expliquée par l'influence des mauvaises conditions climatiques associées, notamment à la sécheresse, la désertification, l'érosion, et la salinisation des sols (**Hannachi et al., 2013**). Le stress abiotique, particulièrement le manque d'eau, est donc considéré comme le principal responsable des pertes associées aux cultures. De nombreuses études ont abordé l'influence de ces contraintes sur la culture du blé dur en particulier et sur les moyens pour en réduire les effets (**Chourghal et al., 2016**). En effet, la germination est considérée comme l'une des étapes les plus critiques en ce qui concerne l'effet du stress hydrique sur les plantes. Lors de la germination, une graine absorbe l'eau, ce qui déclenche des réactions biochimiques permettant la croissance de l'embryon. Cependant, lorsque la disponibilité en eau est limitée ou que les conditions sont trop sèches, cela peut avoir un impact négatif sur la germination et compromettre la survie des plantes (**Laaboudi et Mouhouche, 2012**).

Pendant la germination, la graine a besoin d'eau pour ramollir et activer les enzymes responsables de la croissance de l'embryon. En cas de stress hydrique, lorsque l'eau est limitée, l'absorption d'eau par la graine peut être entravée, retardant ainsi la germination ou la rendant impossible (**Prakash et al., 2015**). La germination est une phase où le métabolisme de la plante est très actif, car il y a une augmentation significative de l'activité enzymatique pour décomposer les réserves nutritives de la graine et favoriser la croissance de l'embryon. En cas de stress hydrique, l'activité enzymatique peut être altérée, entraînant un dysfonctionnement métabolique et compromettant la germination (**Koch, 2018**). Aussi, les tissus embryonnaires et les structures en croissance de la jeune plante sont particulièrement sensibles au manque d'eau.

Le stress hydrique peut entraîner un développement anormal des tissus, des déformations ou des arrêts de croissance, voire la mort des parties en développement (**Abro et al., 2021**). La germination implique l'émergence de la radicule, qui donnera naissance aux racines de la plante. Lorsque le stress hydrique est présent, la croissance des racines peut être entravée, ce qui réduit la capacité de la plante à absorber l'eau et les nutriments du sol, et donc sa survie ultérieure (**Bousba et al., 2021**). Il convient de noter que la sensibilité de la germination au stress hydrique peut varier selon les espèces végétales. Certaines espèces sont plus tolérantes au manque d'eau pendant la germination, tandis que d'autres sont plus sensibles. De plus, d'autres facteurs tels que la température et la durée du stress hydrique peuvent également influencer l'impact sur la germination des plantes (**Othmani et al., 2021**).

Au stade post-germination, les racines de la jeune plante se sont développées et ont la capacité de rechercher l'eau dans le sol de manière plus efficace. La plante peut également réduire sa transpiration en fermant partiellement ses stomates, les petites ouvertures sur les feuilles par lesquelles l'eau s'évapore. Ces adaptations permettent à la plante de mieux résister au stress hydrique (**El Fakhri et al., 2010**). Cependant, cela ne signifie pas que le stress hydrique n'a aucun impact sur la phase post-germination. Si le stress hydrique persiste pendant une période prolongée, il peut encore affecter la croissance et le développement de la plante. La croissance racinaire peut être ralentie, ce qui limite la capacité de la plante à absorber l'eau et les nutriments. De plus, le développement des parties aériennes de la plante peut être altéré, entraînant un retard de croissance, une diminution de la production de biomasse et éventuellement des dommages irréversibles (**Španić et al., 2017**). Il est important de noter que la sensibilité des plantes au stress hydrique peut varier considérablement en fonction de l'espèce, de la variété et des conditions environnementales spécifiques. Certaines plantes sont naturellement plus résistantes à la sécheresse que d'autres et peuvent mieux faire face aux périodes prolongées de stress hydrique (**Papathanassiou et al., 2015**).

La présente étude a pour objectif de comparer le comportement de 10 variétés de blé dur, locales et améliorées, soumis au stress hydrique simulé et induit par le polyéthylène glycol (PEG6000) au stade précoce par la mesure de certains paramètres relatifs à la germination des graines et à la croissance des jeunes plantules en conditions semi-contrôlées.

Chapitre I :
Matériel et méthodes

I. Matériel et méthodes

I.1. Matériel végétal

La présente étude a porté sur l'évaluation du comportement de 10 variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) d'origines diverses (Tableau 1) vis-à-vis de la tolérance / sensibilité au stress hydrique induit par le polyéthylène glycol (PEG6000) au stade germination-croissance des jeunes plantules. Les semences de ces génotypes ont été fournies par le Centre National de Contrôle et de Certification de semences et plants (CNCC).

Tableau 1 : Code et nom des variétés de blé dur étudiées.

Code	Nom	Code	Nom
V1	Bousselam	V6	Sigus
V2	Wahbi	V7	M6
V3	Oued El Bared	V8	Kenobi
V4	Waha	V9	Marakas
V5	Vitron	V10	Mexicali75

I.2. Conditions expérimentales

L'expérimentation est réalisée au niveau du 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 au cours du mois de Mars de l'année universitaire 2022/2023. Le travail pratique comporte deux parties complémentaires. La première consiste à analyser l'impact du stress hydrique provoqué par l'application du polyéthylène glycol (PEG-6000) sur la germination des graines de blé alors que la seconde partie vise l'évaluation de l'effet du PEG-6000 sur les paramètres de croissance des jeunes plantules de blé.

Le polyéthylène glycol (PEG-6000) est un agent relativement stable inerte, non ionique mais, bien soluble dans l'eau et non perméable pour les cellules. Il est couramment utilisé pour simuler un déficit hydrique car il réduit la disponibilité en eau disponible pour la graine / plantule sans avoir des conséquences négatives à ces dernière (**Benjelloun et al., 2013**). Dans la présente étude nous avons préparé des solutions de PEG-6000 à un potentiel osmotique correspondant à une concentration de 20% (T1) soit une dissolution de quantité de 200 g de PEG-6000 dans un litre d'eau distillée. Cette concentration a été choisie en se référant aux travaux de recherche dans la même thématique et sur la même espèce étudiée et qui sont disponibles dans la littérature (**Kacem et al., 2017 ; Španić et al., 2017 ; Bouhaouel et al.,**

2021 ; Othmani *et al.*, 2021). L'eau distillée est utilisée comme témoin de référence (T0 = 0 g/l PEG-6000). L'expérience est conduite en chambre de culture du CNCC sous conditions semi-contrôlées avec une température de 22°C, une humidité relative de 85% et une photopériode de 16h de lumière et 8h d'obscurité.

1.2.1. Essai de germination

Des graines de blé saines, de tailles et de forme identiques ont choisies pour cet essai. Ces graines ont été lavées à l'eau courante et rincées avec de l'eau distillée puis placées dans des boites de Petri contenant trois couches de papier buvard. Deux intensités de stress hydrique ont été appliquées à savoir le témoin (T0 = 0 g/l PEG-6000) et l'environnement stressé (T1 = 200 g/l PEG-6000). L'unité expérimentale est donc formée par la boite de pétri contenant chacune 100 graines. L'expérience est répétée trois fois. Le nombre de graines germées a été noté quotidiennement du 1^{er} jusqu'au 7^{ème} jour après semis. Selon **Adjel *et al.* (2013)** la germination est marquée par la sortie de la racicule dont la longueur est d'au moins de 2 mm (Photo 1).



Photo 1 : Mise en place des graines de blé dans les boites de pétri et dénombrement des graines germées par jour.

1.2.2. Essai de comportement des plantules de blé

Au début de cet essai de comportement des plantules, 30 graines de blé de chaque variété testée ont été soumises à germinations dans des boites de Pétri contenant du papier

buvard en l'absence de stress c'est-à-dire que toutes les boîtes ensemencées ont été arrosées avec de l'eau distillée pour assurer la germination des graines de blé (Photo 2).



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

Pour évaluer l'impact du stress induit par le PEG6000 au stade croissance (phase post-germination), les graines germées de chaque variété ont été transférées après 72 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 sont déposées (Photo 2). L'unité expérimentale est matérialisée cette fois-ci par le tube à essai, à raison d'une graine par tube et les différents traitements sont répétés 5 fois. Cette expérience a duré dix jours après transplantation des graines dans les tubes à essai.

I.3. Caractères mesurés et paramètres étudiés

Le suivi du comportement des 10 variétés de blé dur vis-à-vis du stress hydrique au stade germinatif a été basé sur plusieurs variables physiologiques et morphologiques.

I.3.1. Essai de germination

Cette première partie réservée à l'essai de germination nous a permis de déterminer les 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 formule ci-dessous :

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

Où : NTGG est le nombre total de graines qui ont germé, et NTGS est le nombre total de graines soumises à la germination dans les boîtes de pétri.

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

1.3.1.3. 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 est le nombre de graines germées dans le $i^{\text{ème}}$ temps, et t_i est le temps nécessaire pour que les graines germent au $i^{\text{ème}}$ compte.

1.3.1.4. 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.

1.3.2. Essai de comportement

Dans cette seconde partie de l'expérience, nous avons étudié les paramètres de croissances suivants :

1.3.2.1. 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.

1.3.2.2. 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^{ère} 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 le premier essai de germination et à cinq répétitions pour le deuxième essai de comportement des plantules durant la phase post-germination. Dans le cas où l'ANOVA montre un effet 'traitement' significatif, les moyennes des traitements sont comparées en utilisant le test de la plus petite différence significative (Ppds). Les liaisons entre les différents caractères et paramètres mesurés / calculés ont été analysées en calculant les coefficients de corrélations phénotypiques de Pearson sur la base des valeurs moyennes de l'interaction 'variété*stress'. Toutes les analyses statistiques ont été faites en utilisant le logiciel Past, version 4.06 (Hammer *et al.*, 2001) et le programme Microsoft Excel avec un seuil de risque de 5%.

Chapitre II :
Résultats et discussion

II. Résultats et discussion

II.1. Essai de germination

II.1.1. Analyse de la variance

L'analyse de la variance à deux facteurs étudiés (ANOVA) montre un effet 'variété' très hautement significatif ($p < 0.001$) pour l'ensemble des variables mesurées (Tableau 2) de plus, la variation due au 'stress' révèle des effets significatif ($p < 0.05$) pour le pourcentage de germination (%G), l'indice de germination (IG) et la germination moyenne journalière (GMJ) à hautement significatif ($p < 0.01$) pour le temps moyenne de germination (TMG). Ce dernier montre également une interaction 'variété*stress' hautement significative ($p < 0.01$). L'ensemble de ces résultats suggèrent la présence de la variabilité génotypique au sein du matériel végétal étudié et les caractères mesurés subissent des modifications importantes sous l'effet du stress hydrique induit par le polyéthylène glycol (PEG-6000). Les valeurs prises par le coefficient de variation (CV, %) sont faibles variant de 3.73% pour le temps moyenne de germination et le coefficient de vélocité de germination à 14.92% pour le pourcentage de germination et la germination moyenne journalière (Tableau 2). Ces résultats reflètent la bonne précision lors de la manipulation de l'expérience.

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

SV	ddl	%G	TMG	IG	GMJ
Variété	9	8900.40***	2.81***	998.80***	181.64***
Stress	1	437.40*	0.14*	67.31**	8.93*
Variété*Stress	9	141.40 ^{ns}	0.09**	10.68 ^{ns}	2.89 ^{ns}
Erreur	40	75.45	0.02	6.15	1.54
CV (%)		14.92	3.73	14.67	14.92

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, CV = Coefficient de variation. ns, *, ** et *** = Effets non significatifs et significatifs aux seuils de probabilité de 5%, 1% et 0.1%, respectivement.

L'effet 'variété' explique 94.39% du total de la variation observée au niveau du pourcentage final de germination (%G). Le 'stress' n'explique que 4.64% de cette variation alors que le reste est expliqué par l'interaction 'variété*stress' et la résiduelle tel qu'il est indiqué par les sommes des carrés de l'ANOVA.

La phase de germination des graines est l'une des étapes les plus sensibles aux effets du stress hydrique. Pendant la germination, la graine se réhydrate et commence à se développer

pour donner naissance à une nouvelle plante. Cependant, si l'eau nécessaire n'est pas disponible ou limitée, cela peut avoir des conséquences négatives sur la germination. Le stress hydrique pendant cette phase peut entraîner une germination retardée, une réduction du taux de germination et une diminution de la vigueur des plantules. Lorsque les graines manquent d'eau, leur métabolisme ralentit, ce qui peut entraîner une inhibition des enzymes responsables de la germination. De plus, le stress hydrique peut affecter la membrane cellulaire des graines et entraîner une perte de viabilité (**Bewley et Black, 2012**).

Les graines peuvent également être sensibles à des périodes de stress hydrique intermittentes ou fluctuantes, où elles sont exposées à des cycles alternatifs de sécheresse et de réhydratation. Ces fluctuations de l'humidité peuvent entraîner des ruptures de dormance irrégulières ou une germination désynchronisée, ce qui affecte la survie et la croissance des plantules (**Kermode, 2005**).

La compréhension des mécanismes de réponse et d'adaptation des graines au stress hydrique pendant la germination est essentielle pour développer des stratégies d'optimisation de la germination et de la croissance des plantes dans des conditions de sécheresse. Cela peut inclure l'utilisation de techniques de préservation de l'eau, l'amélioration génétique des caractères de tolérance à la sécheresse et l'application de traitements pré-germinatifs pour améliorer la germination dans des conditions de stress hydrique (**Bewley et Black, 2012 ; Amein, 2013**).

II.1.2. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété'

Les moyennes des caractères mesurés sont données dans le tableau 3. Les résultats indiquent que les valeurs extrêmes minimale et maximale sont variables d'un caractère à un autre et d'un génotype à un autre. Le pourcentage final de germination (%G) varie 17.33%, valeur minimale obtenue chez la variété Kenobi (V8) à 96.83%, valeur maximale exprimée par le cultivar Bousselam (V1) autour d'une moyenne générale de 58.20% et une plus petite différence significative de 10.14%. Les valeurs du temps moyen de germination (MGT) oscillent entre une valeur minimale de 3.25 jours observée chez la variété Bousselam (V1), et une valeur maximale de 4.84 jours observée chez Kenobi (V8), avec une moyenne générale de 4.05 jours et plus petite différence significative de 0.18 jours (Tableau 3). Ainsi, Boussalam (V1) et Kenobi (V8) présentent respectivement les valeurs moyennes maximales et minimales pour l'indice de germination (30.95 et 3.61%) et la germination moyenne

journalière (13.83 et 2.48%) avec des moyennes générales respectives de 16.91 et 8.31% et des valeurs de la plus petite différence significative de 2.89 et 1.45% dans le même ordre (Tableau 3).

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

Variété	%G	SE	TMG	SE	IG	SE	GMJ	SE
V1	96.83 ^a	1.82	3.25 ^d	0.07	30.95 ^a	0.62	13.83 ^a	0.26
V2	17.50 ^c	2.68	4.77 ^a	0.05	3.68 ^c	0.55	2.50 ^c	0.38
V3	95.50 ^a	2.51	3.45 ^c	0.05	29.07 ^{ab}	0.81	13.64 ^a	0.36
V4	24.00 ^{bc}	4.85	4.59 ^b	0.05	5.31 ^c	1.07	3.43 ^{bc}	0.69
V5	89.50 ^a	4.55	3.61 ^c	0.17	26.36 ^b	2.33	12.79 ^a	0.65
V6	28.67 ^b	6.80	4.55 ^b	0.07	6.37 ^c	1.49	4.10 ^b	0.97
V7	94.67 ^a	2.08	3.48 ^c	0.05	28.32 ^{ab}	0.57	13.52 ^a	0.30
V8	17.33 ^c	2.99	4.84 ^a	0.04	3.61 ^c	0.62	2.48 ^c	0.43
V9	96.33 ^a	1.36	3.27 ^d	0.09	30.63 ^a	1.04	13.76 ^a	0.19
V10	21.67 ^{bc}	5.94	4.69 ^{ab}	0.06	4.75 ^c	1.32	3.10 ^{bc}	0.85
Moyenne	58.20		4.05		16.91		8.31	
Ppds (5%)	10.14		0.18		2.89		1.45	

%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%.

La viabilité des graines dépend de plusieurs facteurs, dont les conditions de conservation, les conditions de germination et l'héritabilité génétique (**Bewley et Black, 2012**). Cependant, il est important de noter que la viabilité des graines peut également être influencée par d'autres facteurs, tels que les maladies, les attaques d'insectes ou les dommages mécaniques (**Roberts, 1972**). Une gestion appropriée de la conservation des graines, combinée à une sélection génétique appropriée, peut contribuer à maintenir et à améliorer la viabilité des graines pour une utilisation future.

La capacité des variétés de blé dur à tolérer la sécheresse pendant la germination est un critère important pour leur identification. Plusieurs auteurs, dont **Boudiar et al. (2019)** et **Abro et al. (2021)**, ont précédemment signalé des variations génétiques dans la sensibilité au stress hydrique au stade de la germination.

II.1.3. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress'

Les valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress' des caractères mesurés sont illustrées dans le tableau 4. Les moyennes minimales et maximales sont variables suivant le niveau de

stress appliqué. Les résultats montrent que les valeurs de l'ensemble des caractères sont réduites en passant du témoin (T0) aux conditions de stress hydrique (T1) hormis le temps moyen de germination (TMG) pour lequel la valeur maximale (4.10 jours) est exprimée sous stress 20% PEG-6000 et celle minimale (4.00 jours) est notée en l'absence de stress.

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

Stress	%G	SE	TMG	SE	IG	SE	GMJ	SE
T0	60.90 ^a	6.50	4.00 ^b	0.13	17.96 ^a	2.29	8.70 ^a	0.93
T1	55.50 ^b	7.40	4.10 ^a	0.11	15.85 ^b	2.34	7.93 ^b	1.06
Moyenne	58.20		4.05		16.91		8.31	
Ppds (5%)	4.53		0.08		1.29		0.65	

%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 moyenne de toutes les variétés testées, le pourcentage final de germination a régressé de 60.90% en absence de stress (0% PEG-6000) à 55.50% en présence de stress (20% PEG-6000) avec une plus petite différence significative de 4.53%. L'indice de germination a décliné d'une valeur maximale de 17.96 en conditions normales à 15.85 sous stress autour d'une plus petite différence significative de 1.29. La moyenne prise par la germination moyenne journalière a diminué sous les mêmes traitements de 8.70% en T0 à 7.93% en T1 avec une plus petite différence significative de 0.65.

D'une manière générale, le stress induit par le PEG6000 a altéré le pourcentage final de germination et toutes les variables qui lui sont associé. Cette variation du comportement des variétés a allongé la durée nécessaire pour que le processus de germination se procure. La figure 1 représente la réduction / augmentation des valeurs moyennes prises par les variables mesurées en présence de stress (T1) relativement au témoin (T0) des variétés de blé dur testées. Le temps moyen de germination a augmenté de 3.24% en T1 alors que le pourcentage final de germination, l'indice de germination et la germination moyenne journalière sont réduite de -16.26%, -18.88% et -16.26%, respectivement. Ces résultats s'accordent avec les résultats de plusieurs chercheurs dont **Alam et al. (2020)** et **Othmani et al. (2021)** qui ont démontré la relation inversée entre l'intensité du stress hydrique provoqué par le PEG6000 et le temps moyen de germination.

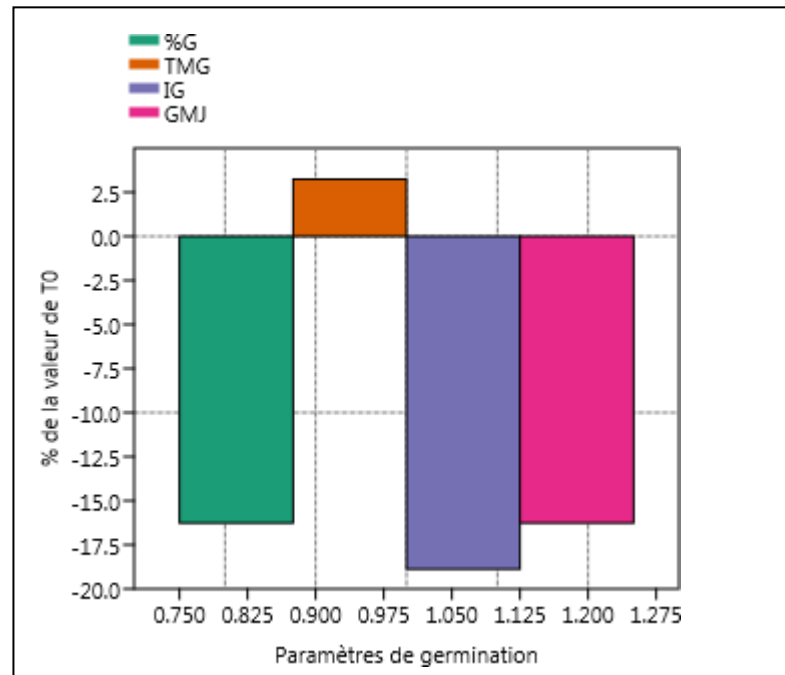


Figure 1 : Réduction / augmentation (en %) des caractères de germination mesurés en T1 relativement au témoin T0 des variétés de blé dur étudiées.

La cinétique de germination des graines de variétés de blé dur testées en fonction de l'intensité de stress osmotique appliqué durant l'expérience est illustrée dans la figure 2. Nous observons une large variation entre les deux traitements étudiés (T0 et T1). Néanmoins, pour la cinétique de germination emprunte une évolution qui peut être divisée en trois phases distinctes quelle que soit l'intensité de stress. Une première phase latence de 24 heures pour T0 et 48 heures pour T1, qui suivent la mise en germination, pendant laquelle le pourcentage de germination reste presque nul. Une deuxième phase exponentielle allant du 1^{er} jour pour T0 et le 2^{ème} jour pour T1 jusqu'au 6^{ème} jour pour les deux traitements, pour laquelle les pourcentages de germination connaissent une augmentation remarquable chez T0 et juste moyenne chez T1. La troisième phase stationnaire correspond à un palier où les pourcentages cumulés de germination cessent de s'accroître jusqu'à la fin de l'expérience. Globalement, tous les génotypes de blé dur ont atteint le pourcentage final de germination après six jours de l'essai (Figure 2). Ces résultats démontrent que le processus de germination est largement affecté par le stress osmotique appliqué. Ainsi, les différences observées surtout au niveau de la deuxième phase de germination des graines peuvent s'expliquer par le fait que le stress hydrique est à l'origine de l'augmentation du milieu d'imbibition, d'où une diminution de la pénétration de l'eau vers les graines. De ce fait, nous pouvons conclure que le PEG-6000 a induit une phase de latence longue, due aux difficultés d'imbibition qui induit une faible

dégradation des réserves de la graine. Donc plus l'intensité de stress augmente plus la capacité germinative diminue. Nos résultats corroborent avec ceux de Španić *et al.* (2017) qui observent l'effet répressif de la contrainte hydrique induite par le polyéthylène glycol 6000 (PEG-6000).

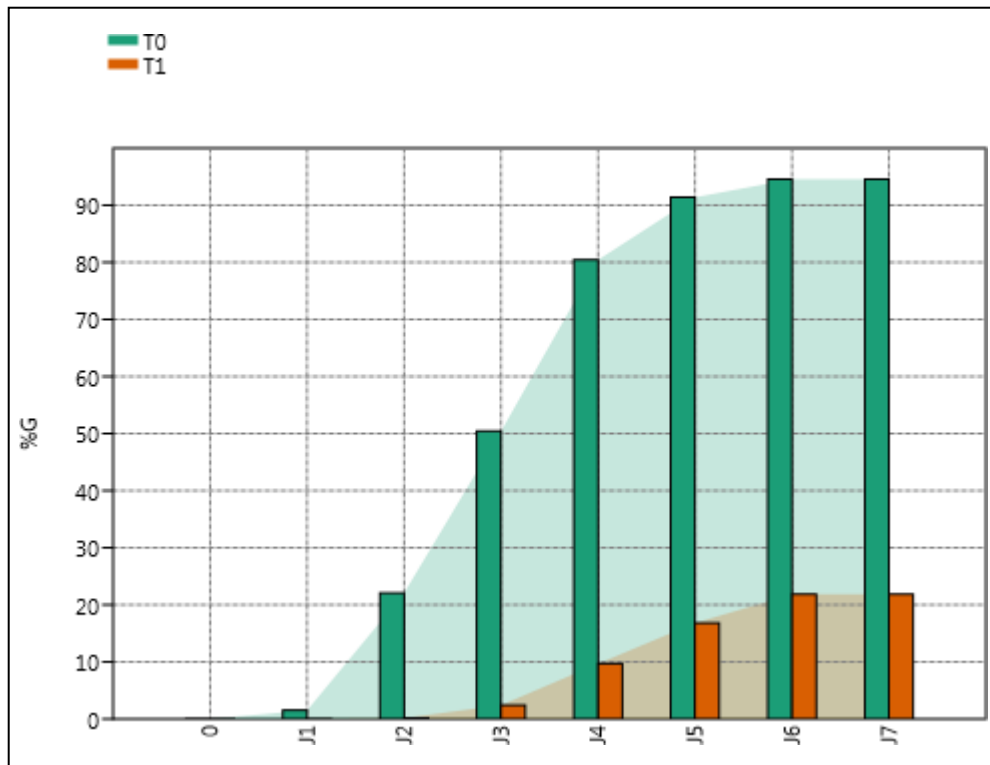


Figure 2 : Cinétique de germination des grains de blé dur en fonction de l'intensité du stress appliqué.

II.1.4. Effet de l'interaction 'variété*stress'

La figure 3 représente la régression par génotype du pourcentage de germination et des caractères qui lui sont liés du traitement T1 (20% PEG-6000) relativement au témoin T0 (0% PEG-6000). Le degré de tolérance de telle variété est alors jugé par les valeurs des écarts générés exprimés en % de T0, plus la valeur de l'écart est importante plus la variété considérée est sensible et vice versa. En présence de stress, les changements (augmentation / réduction) du pourcentage de germination varient de -57.43%, valeur minimale notée chez Waha (V4) à 7.30%, valeur maximale observée chez M6 (V7). Ainsi Bousselam (V1), Oued El Bared (V3), M6 (V7) et à moindre degré Marakas (V9) ne semblent pas être affectés par le stress hydrique quant à la germination de leurs graines et peuvent alors être qualifiés comme tolérants à ce niveau de stress de 20%. Les autres variétés comme Waha (V4), Sigus (V6), Mexicali75 (V10) et à degré moindre Vitron (V5), Wahbi (V2) et Kenobi (V8) ont subi des

réductions conséquentes et peuvent être considérées comme sensible à ce stade du cycle de développement. La même tendance est marquée pour la germination moyenne journalière.

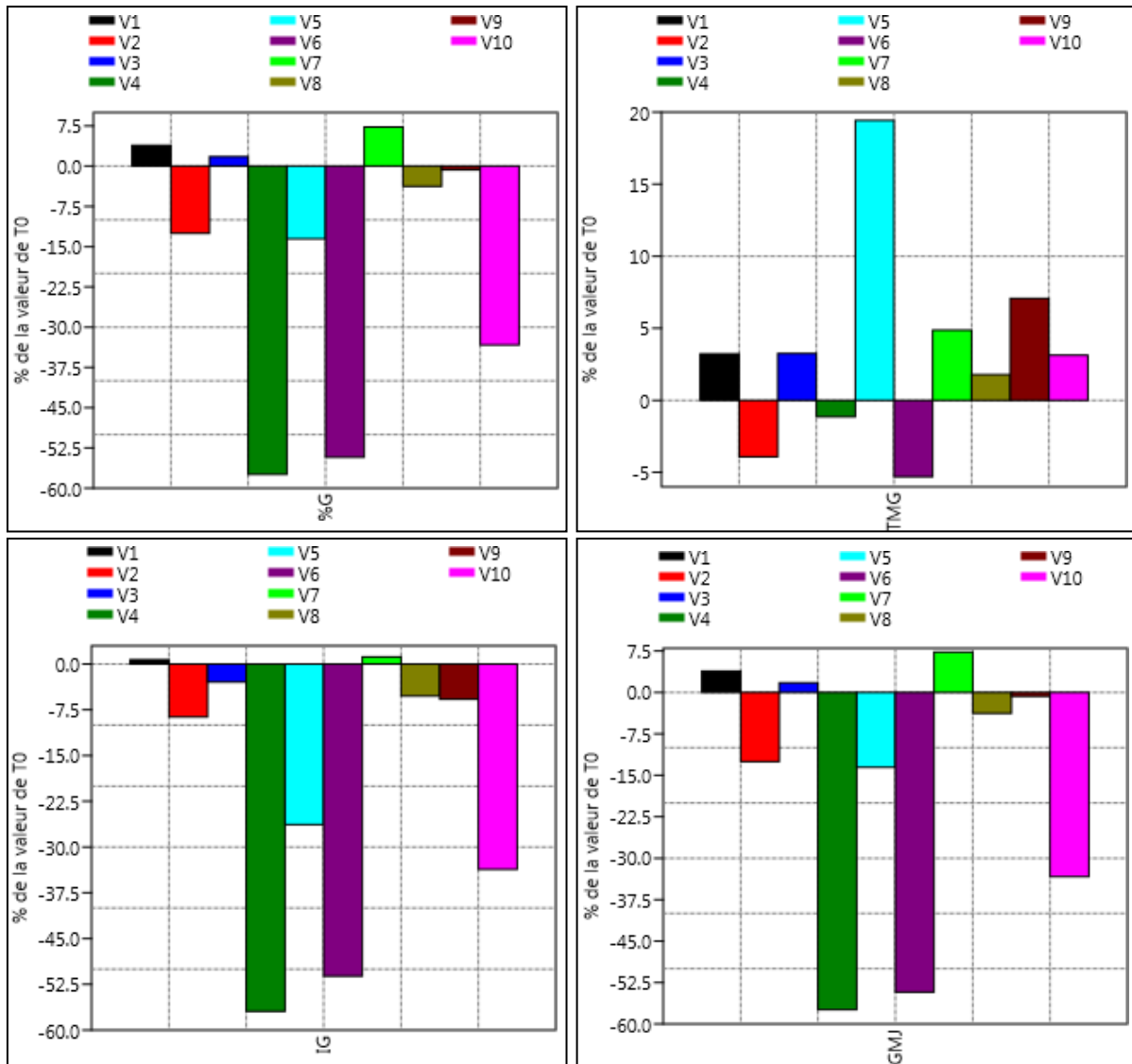


Figure 3 : Réduction du % de germination du traitement T1 relativement au témoins T0 des variétés de blé dur étudiées.

Pour le temps moyen de germination Boussem (V1), Oued El Bared (V3), Vitron (V5), M6 (V7), Kenobi (V8), Marakas (V9) et Mexicali75 (V10) exhibent des écarts positifs suggérant une accélération du processus de germination en présence de stress. D'autre part, Wahbi (V2), Waha (V4) et Sigus (V6) expriment des écarts négatifs indiquant que le PEG-6000 a prolongé le temps nécessaire pour que le processus de germination se procure. Hormis Boussem (V1) et M6 (V7) avec des écarts positifs négligeables, l'ensemble des autres

variétés testées ont enregistré des réductions notables de l'indice de germination qui reflète le temps nécessaire pour qu'un certain pourcentage de germination se produise.

Bien que le taux de germination en conditions de stress hydrique ne reflète pas entièrement le comportement des plantes dans leur environnement naturel, il fournit néanmoins une indication plus ou moins précise du comportement des variétés étudiées. L'augmentation de la concentration de PEG-6000 a entraîné un allongement de la période de germination des graines. Ce retard peut être attribué au temps nécessaire aux graines pour déclencher les mécanismes permettant de réguler leur pression osmotique (Amein, 2013). Outre la réduction du taux de germination, cette diminution pourrait résulter de l'altération des enzymes et des hormones présentes dans la graine (Prao *et al.*, 2000). La quantité d'eau dans les graines est réduite ce qui entraîne une diminution de la pression de turgescence des cellules et une faible accumulation de la matière organique due à une moindre disponibilité des produits de réserves cotylédonaires (Bewley et Black, 2012). Le PEG-6000 ralentit la pénétration de l'eau vers les graines, ce qui diminue la turgescence cellulaire ainsi l'expansion des cellules radiculaires est réduite et l'émergence de la radicule est retardée. D'après Bousba *et al.*, 2021), ce phénomène entraîne la diminution de la capacité d'imbibition et un ralentissement de la vitesse de germination.

II.2. Essai de comportement des plantules de blé

L'analyse de la variance (ANOVA) révèle des effets 'variété', 'stress' et une interaction 'variété*stress' significatifs ($p < 0.05$) à très hautement significatifs ($p < 0.001$) pour l'ensemble des variables mesurées au cours de la phase post-germination (Tableau 5).

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

SV	ddl	LR	NR	LC	LF	MFR	MFA
Variété	9	30.15***	5.71***	2.77***	60.82***	332.15*	1363.87**
Stress	1	143.35***	12.62***	4.15***	492.47***	6167.85***	73299.14****
Variété*Stress	9	15.56**	2.45**	1.37***	53.93***	645.70***	4602.14***
Erreur	79	5.57	0.79	0.22	8.57	137.20	512.48
CV (%)		26.21	18.32	21.82	24.41	37.48	25.82

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^{ère} feuille, MFR = Matière fraîche racinaire, MFA = Matière fraîche aérienne, CV = Coefficient de variation. *, ** et *** = Effets significatifs aux seuils de probabilité de 5%, 1% et 0.1%, respectivement.

Ces résultats montrent la présence de la variabilité à l'intérieure du matériel végétal étudié et les caractères mesurés subissent des modifications appréciables sous l'effet du stress

hydrique induit par le PEG-6000. Aussi, les résultats montrent que les variétés testées réagissent différemment vis-à-vis de ce stress comme il est indiqué par la significativité de l'interaction 'variété*stress'.

Les sources de variation 'variété', 'stress' et 'variété*stress' expliquent, respectivement, 27.29, 14.41 et 14.08% du total de la variation observée au niveau de la longueur des racines tel qu'il est indiqué par les résultats de l'ANOVA (Tableau 5). Ces trois sources contribuent avec 34.62, 8.50 et 14.88% à la variation du nombre de racines/plante, le reste est dû à la résiduelle. L'effet 'variété' explique 42.67% de variation totale observée pour la longueur du coléoptile, le reste est partagé entre les autres sources de variation, 7.10% pour l'effet 'stress', 21.07% pour l'interaction des deux effets précédents et le reste par la variation résiduelle.

Pour la longueur de la 1^{ère} feuille, les trois sources de variation étudiées contribuent équitablement à l'explication de la variation totale observée chez ce caractère avec des valeurs de 24.85, 22.36 et 22.04%, respectivement. Quant à la fraiche racinaire, le 'stress' contribue avec 23.90% suivi de l'interaction 'variété*stress' avec 22.52% et en fin de l'effet 'variété' avec seulement 11.58.52% du total observé. De même pour la variable matière fraiche aérienne dont le 'stress' contribue avec 43.77% suivi de l'interaction 'variété*stress' avec 24.73% et en fin de l'effet 'variété' avec 7.33% uniquement expliquent la variabilité observée pour ce caractère. La résiduelle explique le reste de variation.

II.2.1. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'variété'

Le tableau 6 illustre les valeurs moyennes prises par les caractères mesurés, tous niveaux de stress inclus. Les résultats indiquent que les valeurs minimales et maximales sont variables suivant le caractère étudié et la variété testée. La moyenne générale de la longueur des racines est de 9.19 cm avec une plus petite différence significative de 2.14 cm. La plus courte racine est observée chez la variété Kenobi (V8) avec 6.03 cm et celle la plus longue est exprimé par la variété Waha (V4) avec 11.92 cm. La moyenne générale de nombre de racines est de 4.82 racines/plante avec une plus petite différence significative de 0.97 racines. La lignée Wahbi (V2) présente le nombre de racines le plus important (5.70 racines) alors que celui le plus réduit (3.40 racines) est noté chez Kenobi (V8). Cette dernière exhibe aussi la longueur du coléoptile la plus courte avec 1.50 cm alors que celle la plus longue est observée chez Vitron (V5). Kenobi (V8) et M6 (V7) expriment, respectivement, les valeurs moyennes les plus faibles et les plus élevées (7.86 et 16.63 cm) concernant la longueur de la 1^{ère} feuille.

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	7.63 ^{de}	0.43	5.50 ^a	0.31	2.58 ^{ab}	0.14	13.05 ^b	1.17	22.30 ^c	2.95	89.10 ^{abc}	9.89
V2	10.88 ^{ab}	0.74	5.70 ^a	0.15	2.52 ^{ab}	0.17	12.91 ^b	0.96	34.80 ^{ab}	3.83	96.20 ^{ab}	8.73
V3	8.55 ^{cd}	0.68	5.30 ^{ab}	0.26	2.77 ^{ab}	0.12	12.70 ^b	0.69	28.90 ^{bc}	4.42	97.00 ^{ab}	6.42
V4	11.92 ^a	0.74	5.00 ^{abc}	0.33	2.40 ^{bc}	0.10	13.01 ^b	0.64	44.10 ^a	6.98	86.30 ^{abcd}	8.87
V5	10.18 ^{abc}	0.66	5.60 ^a	0.34	2.92 ^a	0.06	13.89 ^{ab}	0.48	31.20 ^{bc}	2.54	93.20 ^{abc}	6.94
V6	7.79 ^{de}	0.80	4.60 ^{bcd}	0.31	1.58 ^{de}	0.17	9.66 ^{cd}	1.39	29.00 ^{bc}	4.92	67.90 ^d	12.21
V7	9.69 ^{bcd}	1.19	4.67 ^{bc}	0.29	2.60 ^b	0.20	16.63 ^a	0.91	26.78 ^{bc}	3.06	106.67 ^a	10.62
V8	6.03 ^e	1.56	3.40 ^e	0.58	1.50 ^e	0.37	7.86 ^d	2.64	30.30 ^{bc}	8.26	80.30 ^{bcd}	27.30
V9	9.20 ^{bcd}	1.09	4.50 ^{cd}	0.31	1.64 ^{de}	0.24	9.69 ^{cd}	1.97	34.10 ^{ab}	6.92	73.50 ^{cd}	16.37
V10	9.99 ^{abc}	0.68	3.90 ^{de}	0.28	2.01 ^{cd}	0.18	11.51 ^{bc}	1.29	29.00 ^{bc}	2.98	88.60 ^{abc}	11.73
Moyenne	9.19		4.82		2.25		12.09		31.05		87.88	
Ppds (5%)	2.14		0.79		0.43		2.62		10.36		21.24	

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%.

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	10.39 ^a	0.44	5.18 ^a	0.12	2.45 ^a	0.07	14.27 ^a	0.32	39.18 ^a	2.41	115.10 ^a	3.70
T1	8.00 ^b	0.40	4.46 ^b	0.21	2.05 ^b	0.13	9.86 ^b	0.78	23.16 ^b	1.56	60.82 ^b	5.05
Moyenne	9.19		4.82		2.25		12.07		31.17		87.96	
Ppds (5%)	0.95		0.35		0.19		1.17		4.63		9.10	

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%.

La moyenne générale de la matière fraîche racinaire est de 31.05 mg avec une plus petite différence significative de 10.36 mg. La variété Bousselam (V1) présente la moyenne la plus réduite (22.30 mg) alors que Waha (V4) présente la valeur la plus élevée (44.10 mg). La matière fraîche aérienne varie de 67.90 mg, valeur minimale trouvée chez la variété Sigus (V6) à 106.67 mg, valeur maximale observée chez M6 (V7) autour d'une moyenne générale de 87.88 mg, avec une plus petite différence significative de 21.24 mg. Sous des conditions de stress hydrique, l'assimilation de l'eau par la plante est directement liée au degré de développement du système racinaire, plus le système racinaire est long est dense, il peut conférer un avantage en augmentant l'apport en eau de la partie aérienne (Temagoult, 2009 ; El Fakhri *et al.*, 2010).

II.2.2. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress'

L'effet induit par le stress hydrique à n'importe quel stade de développement de la culture peut se traduire selon la stratégie d'adaptation de chaque variété, par des changements d'ordre morphologiques au niveau des parties aérienne et souterraine du végétal (Boudiar *et al.*, 2019). L'analyse du 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 (20% PEG-6000) alors que celles les plus élevées sont notées chez le témoin (0% PEG-6000) pour l'ensemble des caractères étudiés. Ainsi, la longueur des racines a varié de 8.00 à 10.39 cm, avec une plus petite différence significative de 0.95 racines. De même, le nombre des racines a changé de 4.46 à 5.18 racines, autour d'une Ppds_{5%} de 0.35 racines. Pour la longueur de la coléoptile, les moyennes ont varié entre 2.05 cm à 2.45 cm avec une Ppds_{5%} de 0.19 cm. L'amplitude observé pour la longueur de la 1^{ère} feuille est de 9.86 à 14.27 cm avec une Ppds_{5%} de 1.14 cm. Les matières fraîches racinaire et aérienne ont varié, respectivement, entre 23.16 et 60.82 mg en T1 à 39.18 et 115.10 mg en T0, autour des valeurs de la Ppds_{5%} de 4.63 et 9.10 mg.

La figure 4 montre l'écart en % des valeurs prises par les variables mesurées en présence de stress T1 (20% PEG-6000) relativement au témoin T0 (0% PEG-6000). Les résultats indiquent que l'altération due à l'effet du PEG-6000 est variable en fonction du caractère mesuré. Ainsi, les diminutions observées sont de l'ordre de -21.60%, -14.02, -17.34, -30.88, -32.07 et -44.74%, respectivement pour LR, NR, LC, LF, MFR et MFA (Figure 4).

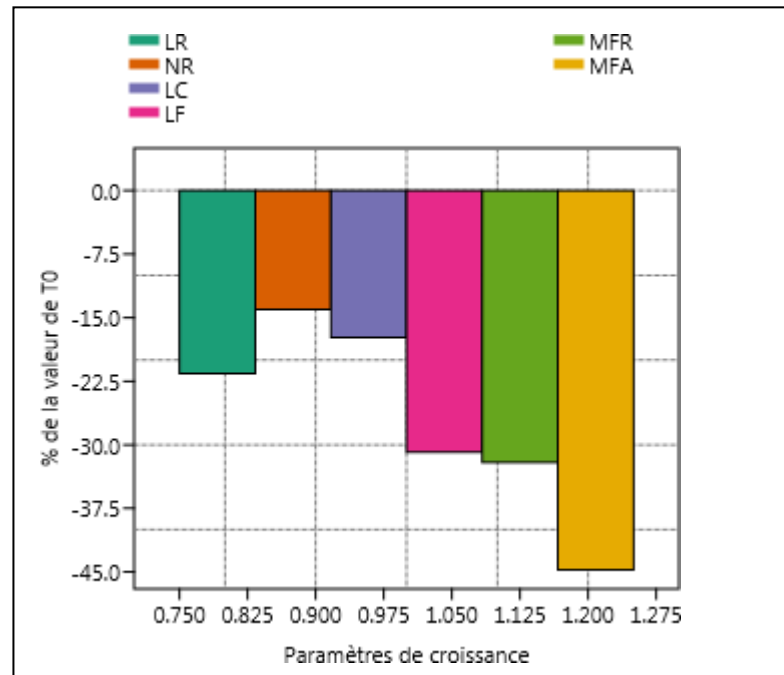


Figure 4 : Réduction (en %) des caractères de croissance mesurés en T1 relativement au témoin T0 des variétés de blé dur étudiées.

Le polyéthylène glycol (PEG-6000) n'est généralement pas utilisé comme un indicateur de stress hydrique, mais plutôt comme un agent osmotique dans les expériences en laboratoire. Il est couramment utilisé pour créer des conditions de stress hydrique artificielles dans les plantes ou les tissus végétaux. Une amélioration de la croissance racinaire permet aux plantes d'absorber l'eau des couches de sol plus profondes en cas de déficit hydrique (**Arai-Sanoh et al., 2014**). Selon les travaux de **Ioio et al. (2007)**, l'allongement accru des racines pourrait être une conséquence de la formation de méristèmes racinaires plus grands, car les cytokinines contrôlent la sortie des cellules en division du méristème racinaire. 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 diminution induite par le PEG de la biomasse des tiges, des racines et de la longueur des coléoptiles est plus prononcée chez les génotypes sensibles à la sécheresse que chez les génotypes tolérants (**Bayoumi et al., 2008**). Selon **Farooq et al. (2009)** et **Rajjou et al. (2012)**, le stress hydrique précoce affecte en parallèle sur la croissance des racines et des parties aériennes. Le stress hydrique osmotique imposé a provoqué une réduction des matières fraîches racinaires et aérienne, d'autant importante que le stress est sévère mais l'effet du PEG-6000 semble plus conséquent sur la partie inférieure de la plante. **Vuković et al. (2022)** ont constaté que le traitement avec

10% de PEG a augmenté la biomasse racinaire, tandis qu'un traitement plus sévère de 20% a augmenté la biomasse racinaire. Ces résultats suggèrent que la réponse au stress précoce dépend de la sévérité de stress et du fond génétique soumis à cette contrainte abiotique.

II.2.3. Effet de l'interaction 'variété*stress'

Nous avons observé précédemment que les résultats de l'analyse de la variance à deux facteurs (variété et stress) ont révélé des réponses différentielles des génotypes étudiés vis-à-vis de l'intensité de stress appliqué et la variété testée. Dans cette partie, nous sommes intéressés par l'étude de ces interactions de façon plus approfondie. Dans la mesure de faciliter l'interprétation de ces interactions, nous nous sommes basés sur l'étude des valeurs prises par les écarts résultant des différences entre les moyennes de chaque génotype aux traitements T1 (20% PEG-6000) relativement au témoin T0 (0% PEG-6000) et ce pour chaque caractère. Le degré de tolérance d'une telle variété est alors jugé en se basant sur les valeurs des écarts ainsi générés ; plus la valeur de l'écart est importante moins la variété est tolérante et vice-versa. Le degré de tolérance / sensibilité d'une telle variété est alors jugé en se basant sur les valeurs des écarts ainsi générés ; plus la valeur de l'écart est importante moins la variété est tolérante et vice-versa. Pour cela, nous avons adopté l'échelle de tolérance décrit par **Fellahi et al. (2019)**. On considère alors une telle variété comme tolérante à une dose de stress donnée si la valeur absolue de l'écart généré est inférieure à 20%. Si cet écart est supérieur à 40%, la variété concernée est jugée comme sensible au stress. Lorsque la valeur absolue de l'écart est comprise entre 20 et 40%, alors la variété concernée est jugée intermédiaire.

La figure 5 montre les valeurs de réduction / augmentation des variables mesurées au traitement T1 relativement au témoin T0 pour les 10 variétés de blé dur testées. Pour la longueur des racines (LR), les écarts oscillent entre -72.78%, valeur minimale notée chez Kenobi (V8) à 22.08%, valeur maximale observée chez Oued El Bared (V3). D'après la classification ci-dessus, les variétés Bousselam (V1), Oued El Bared (V3), Vitron (V5) et Mexicali75 (V10) sont considérées comme tolérantes. Kenobi (V8) et Marakas (V9) sont hautement sensibles alors que les variétés restantes sont moyennement tolérantes au stress à la dose de 20% de PEG-6000 (T1). Pour le nombre des racines (NR), hormis, Kenobi (V8) qui est fortement sensible et Waha (V4), Sigus (V6) et Marakas (V9) qualifiées comme intermédiaires, toutes les variétés restantes sont tolérantes à ce niveau de stress.

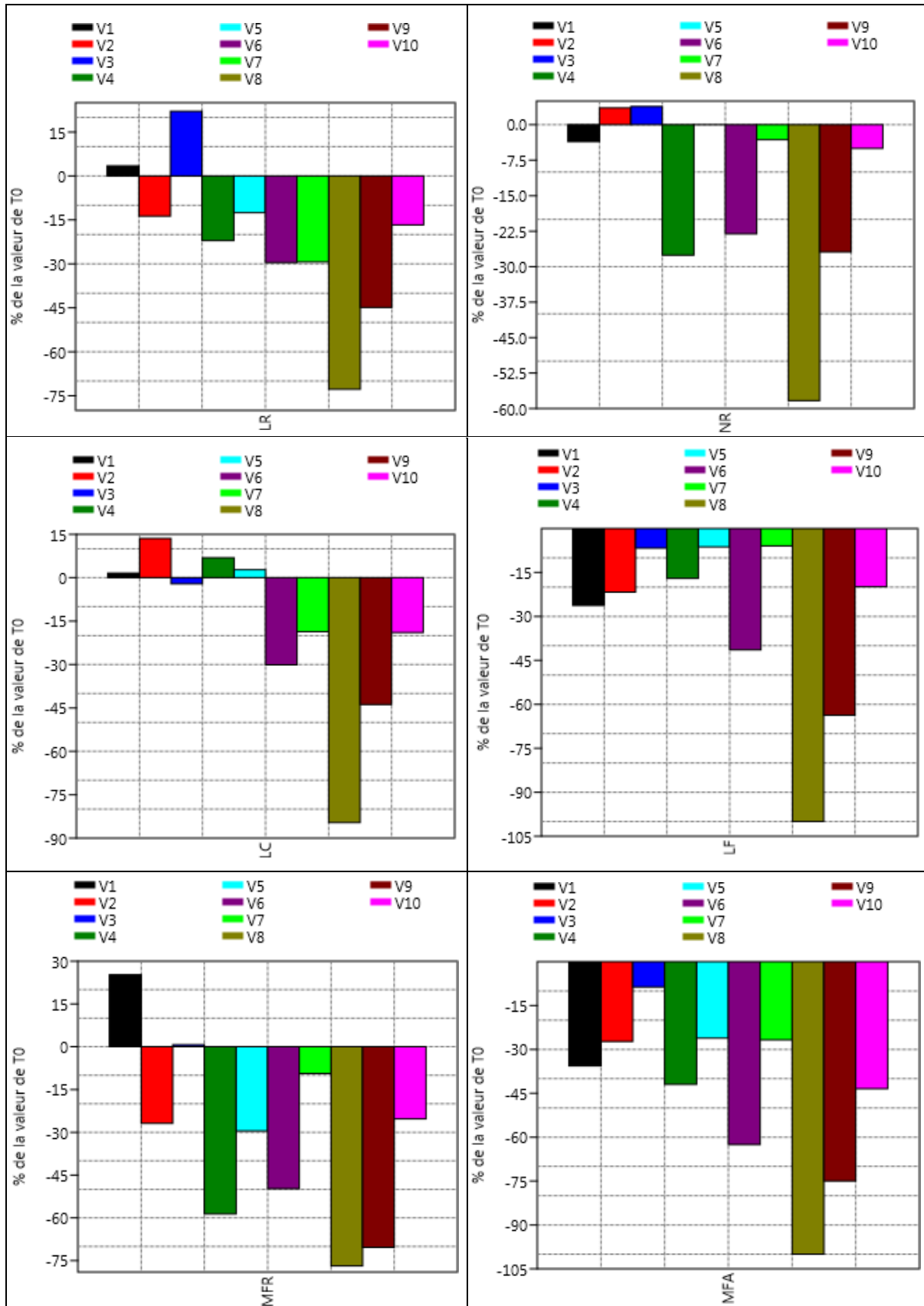


Figure 5 : Réduction / augmentation (en %) des paramètres de croissance aux traitements T1 relativement au témoins T0 des variétés de blé dur étudiées.

La figure montre aussi que la majorité des variétés étudiées sont tolérantes considérant les valeurs prises par l'écart de la longueur du coléoptile (LC) entre l'environnement stressé et non stressé, Sigus (V6) est moyennement sensible alors que Kenobi (V8) et Marakas (V9) sont fortement affecté par le potentiel osmotique induit par le PEG-6000. Les résultats pris par les écarts associés au caractère longueur de la 1^{ère} feuille (LF) montrent que les variété Oued El Bared (V3), Waha (V4), Vitron (V5), M6 (V7) et Mexicali75 (V10) sont tolérantes, Sigus (V6), Kenobi (V8) et Marakas (V9) sont sensibles. Les variétés restantes en l'occurrence Bousselam (V1) et Wahbi (V2) sont juste intermédiaire. En ce qui concerne les matières fraîches racinaires (MFR) et aériennes (MFA), Waha (V4), Sigus (V6), Kenobi (V8) et Marakas (V9) sont fortement sensibles au stress de par l'effet nocif résultant du PEG-6000.

De plus Mexicali75 (V10) est qualifiée moyennement sensible par rapport à MFR et Fortement sensible concernant MFA. Oued El Bared (V3) est jugée tolérante alors que Bousselam (V1), Wahbi (V2) et Vitron (V5) sont intermédiaire considérant les deux caractères en question. M6 (V7) est tolérante par rapport poids racinaire frais à la fin de l'expérience alors qu'elle est qualifiée moyennement sensible en ce qui concerne la partie aérienne de la jeune plantule. D'une manière générale, nos résultats montrent que la réponse au stress hydrique au stade juvénile induit par le PEG-6000 est variable suivant le caractère mesuré et le génotype testé.

II.3. Corrélations des caractères mesurés

Les résultats de l'analyse de corrélation phénotypique entre les différents caractères de germination et de croissance des plantules mesurés chez les variétés de blé sont illustrés dans la figure 6. Le pourcentage de germination (%G) est significativement corrélé aux paramètres qui lui sont associés, positivement avec l'indice de germination (IG) et la germination moyenne journalière (GMJ) et négativement avec le temps moyen de germination (TMG). Ce dernier est négativement lié à IG et GMJ qui sont positivement et significativement corrélés entre eux. La même observation est notée entre le nombre de racines/plante et la longueur du coléoptile. L'autre corrélation significative est celle liant la longueur des racines (LR) à la matière fraîche racinaire (MFR). De même la longueur du coléoptile et celle de la 1^{ère} feuille de la jeune plantule sont hautement corrélées à la matière fraîche aérienne produite (MFA). Ceci suggère que les variétés à coléoptile et à feuille longs ont réussi à matérialiser une biomasse aérienne élevée en conditions de stress. La même constatation est valide concernant la partie souterraine de la plante.

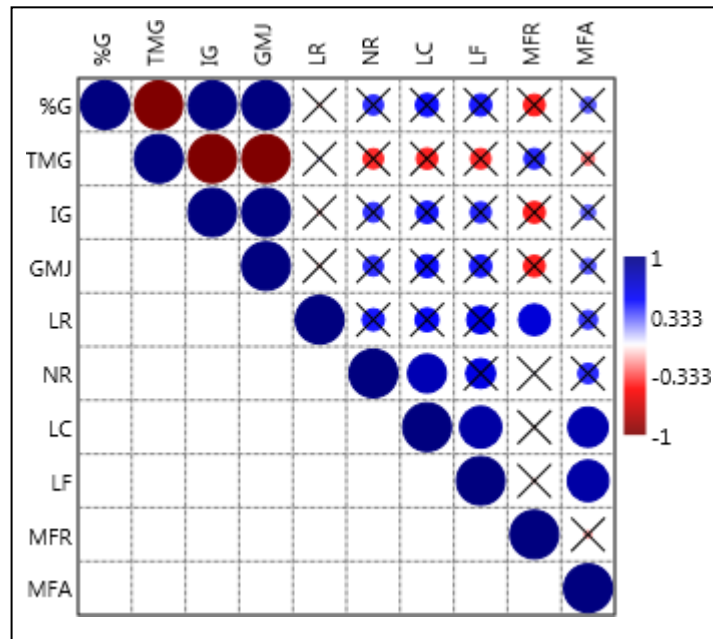


Figure 6 : Corrélation phénotypique de Pearson entre les caractères de germination et de croissance des plantules mesurés chez les variétés de blé. Les cases barrées indiquent des corrélations statistiquement non significatives au seuil de probabilité de 5%.

II.4. Classification des variétés vis-à-vis de la tolérance au stress

Dans la partie de l’interaction ‘variété*stress’, nous avons vu que la réponse est variable suivant la variété elle-même et l’organe mesuré. Le tableau 8 illustre l’ordre de classement des variétés testées par caractère.

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

Variétés	%G	LR	NR	LC	LF	MFR	MFA	MSR
V1	2	2	5	4	7	1	5	3.71
V2	6	4	2	1	6	5	4	4.00
V3	3	1	1	5	3	2	1	2.29
V4	10	6	9	2	4	8	6	6.43
V5	7	3	3	3	2	6	2	3.71
V6	9	8	7	8	8	7	8	7.86
V7	1	7	4	6	1	3	3	3.57
V8	5	10	10	10	10	10	10	9.29
V9	4	9	8	9	9	9	9	8.14
V10	8	5	6	7	5	4	7	6.00

%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^{ère} feuille (cm), MFR = Matière fraîche racinaire (mg), MFA = Matière fraîche aérienne (mg), MSR = Moyenne de la somme des rangs.

Les résultats montrent que ce classement des génotypes défère en fonction du caractère et du traitement de stress appliqué. Nous avons par la suite ordonné nos variétés, en se basant sur les valeurs prises par les écarts précédemment discutés par caractère d'où nous avons conclu que d'autant plus que l'écart est important, moins la variété est tolérante. Elle se retrouve alors en bas du classement. La moyenne de la somme des rangs (MSR) est une méthode utilisée comme un critère de distinction entre les variétés testées, moins MSR est réduite plus la variété est tolérante et vice versa. La MSR est calculée par variété en additionnant les valeurs des classements obtenues et en divisant le total par le nombre de caractères mesurés (7 dans notre cas). Les résultats indiquent que les valeurs de MSR varient de 2.29, valeur minimale prise par la variété Oued El Bared (V3) à 9.29, valeur maximale notée chez Kenobi (V8) (Tableau 8). Ce sont respectivement, les variétés les plus tolérantes et sensibles. Les valeurs de MSR sont soumises par la suite à une classification univariée en fixant un nombre de classes égale à 5 (très tolérantes, tolérantes, intermédiaire, sensibles et très sensibles).

La figure 7 résume et illustre le degré de tolérance au stress hydrique des variétés de blé dur étudiées au stade germinatif. D'après l'approche ci-dessus expliquée, Oued El Bared (V3) est jugé très tolérante, M6 (V7), Bousselam (V1), Vitron (V5) et Wahbi (V2) sont considérées comme tolérantes. D'autre part, Kenobi (V8) est qualifiée très sensible alors que Marakas (V9) et Sigus (V6) sont sensible au stress. Les variétés restantes à savoir, Waha (V4) et Mexicali75 (V10) sont intermédiaires à l'égard du stress osmotique causé par le PEG-6000.

Dans la littérature, il est rapporté que la réduction de la longueur et du nombre de racines peut être attribuée à un arrêt de la division et de l'élongation cellulaire au niveau des racines, ce qui entraîne une sorte de tubérisation où le système racinaire se lignifie, permettant à la plante de ralentir sa croissance (**Lynch, 2007**). Dans des conditions de stress sévère, il est également possible d'observer un arrêt total du développement des feuilles. Ces observations ont été signalées par **Chekkal et Derrachi (2022)**, qui ont constaté que la variation du taux de germination du blé dépend de l'intensité du stress hydrique appliqué et du génotype testé.

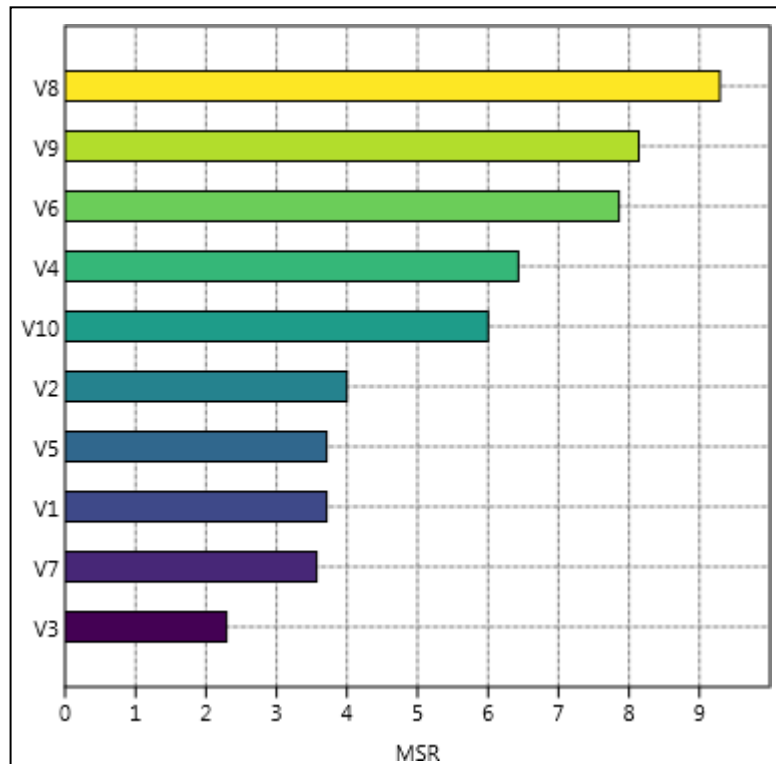


Figure 7: Degré de sensibilité au stress hydrique des variétés de blé étudiées au stade germinatif.

Conclusion

Conclusion

Le manque d'eau ou déficit hydrique est le principal facteur environnemental, responsable des faibles rendements et leurs irrégularités chez les céréales en général et le blé dur en particulier. Néanmoins, l'effet causé par ce stress abiotique sur la productivité de cette espèce, est dépendant de sa sévérité et la durée de sa persévérance. La phase germination et post-germination sont considérées parmi les phases les plus critiques sur lesquelles repose l'installation de la culture et le départ de la croissance de la plante.

Les travaux effectués dans cette étude ont porté sur l'évaluation du degré de tolérance au stress hydrique simulé par le polyéthylène glycol 6000 (PEG-6000), de dix variétés de blé dur d'origines diverses, à une dose de 20% PEG-6000 appliquée au stade germination et croissance des jeunes plantules et ce en comparaison avec un témoin non stressé (0% PEG-6000). Les résultats indiquent la présence d'une large variation génétique à l'intérieur du matériel végétal testé pour l'ensemble des caractères et paramètres de germination et de croissance mesurés. Ces derniers ont subi des changements conséquents sous l'impact de stress hydrique imposé. La variabilité ainsi observée est à d'origine de la diversité des gènes présent chez les variétés évaluées et qui représente une caractéristique fortement recherchée par les sélectionneurs.

En moyenne de l'ensemble des variétés, le pourcentage final de germination a régressé de 60.90% en absence de stress (0% PEG-6000) à 55.50% en présence de stress (20% PEG-6000) soit une diminution de l'ordre de -16.26%. La même tendance est marquée pour les paramètres qui lui sont associés en l'occurrence l'indice de germination et la germination moyenne journalière qui ont décliné, respectivement de 17.96 et 8.70% en absence de stress à 15.85 et 7.93% sous conditions stressantes soient des réductions estimées à -18.88% et -16.26% dans le même ordre. Cependant, une légère augmentation du temps moyen de germination équivalente à 3.24% en T1 comparativement à T0, suggérant l'effet retardatif du PEG-6000 quant à la germination des graines de blé.

Concernant les paramètres de croissance des plantules de blé, une régression remarquable est observée sous stress hydrique en moyenne de l'ensemble des variétés évaluées. Toutefois, cette réduction reste dépendante du génotype testé et du type d'organes mesurés tel qu'il est indiqué par la significativité de l'interaction 'variété*stress' générée par l'analyse de la variance. Ces modifications ont varié de -72.78 à 22.08% pour LR, -58.33 à 3.85% pour NR, -84.62 à 13.56 pour LC, -100.00 à -6.28% pour LF, -76.83 à 25.25% pour MFR et en fin de -100.00 à -8.68% pour MFA.

Les résultats obtenus après une analyse de corrélation entre variables mesurées indiquent que le pourcentage final de germination (%G), l'indice de germination (IG) et la germination moyenne journalière (GMJ) sont positivement liés entre eux. De plus, ils expriment tous des corrélations négatives au temps moyen de germination (TMG). Concernant les caractères de croissance des plantules de blé, des corrélations positives et significatives sont rapportées comme celle liant le nombre de racines/plante à la longueur du coléoptile (LC), ce dernier à la longueur de la 1^{ère} feuille (LF) de la jeune plantule, la longueur des racines (LR) à la matière fraîche racinaire (MFR) et en fin LC et LF à MFR. Ces résultats suggèrent que la variation d'un tel caractère induit des changements de l'autre variable qui se traduisent ensemble par une augmentation ou une diminution de la biomasse totale (racinaire et/ou aérienne) accumulée. Ceci offre au sélectionneur la possibilité d'utiliser l'un des caractères qui présente une corrélation significative avec l'autre, un critère de sélection dans les programmes d'amélioration de la tolérance au stress hydrique au stade post-germination.

La classification des variétés étudiées vis-à-vis de la tolérance au stress hydrique appliqué en se basant sur la méthode de la moyenne de la somme des rangs a identifié Oued El Bared (V3) et à moindre degré M6 (V7), Bousselam (V1), Vitron (V5) et Wahbi (V2) comme des sources de tolérance de choix. En contrepartie, Kenobi (V8) est la variété la plus sensible parmi le matériel végétal testé et soumis au stress.

Globalement, nous devons dire que Le PEG-6000 est un polymère très utile pour évaluer la tolérance des plantes à la sécheresse. En exposant les plantes à différentes concentrations de PEG-6000, il est possible d'observer leur capacité à survivre et à maintenir leur fonctionnement normal en période de stress hydrique. Cependant, il convient de noter que l'utilisation du PEG-6000 comme agent de stress hydrique artificiel présente certaines limitations. Les conditions créées par le PEG-6000 ne reflètent pas toujours fidèlement les stress hydriques naturels rencontrés par les plantes dans leur environnement naturel. Par conséquent, et en termes de perspectives, il est important de combiner les résultats obtenus avec d'autres méthodes d'évaluation du stress hydrique pour obtenir une image complète de la réponse des plantes à la sécheresse à différents stades du cycle de développement de la céréale.

Références
Bibliographiques

Références bibliographiques

Abro, A. A., Akher, S. A., Memon, S., Huda, M. N., Abro, S. A., Naznin, S., & Jahan, S. N. (2021). Influence of Polyethylene Glycol (PEG 6000) generate osmotic stress on seed germination of different wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Gorteria Journal*, **34**(3), 28-36.

Ahmadi, A., Mohammadi, V., Siosemardeh, A., & Poustini, K. (2008). Evaluation of wheat yield and drought resistance indices across water regimes. *Acta Biologica Szeged*, **52**(1), 97-100.

Alam, H., Khattak, J. Z. K., & Ksiksi, T. S. (2020). Comparative effects of NaCl and polyethylene glycol on seed germination of four native species for landscaping under arid environment. *Sarhad Journal of Agriculture*, **36**(2), 374-733.

Amein, T. (2013). Seed germination under osmotic stress: an overview on the roles of polyamines. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, **9**(3), 193-202.

Arai-Sanoh, Y., Takai, T., Yoshinaga, S., Nakano, H., Kojima, M., Sakakibara, H., Kondo, M., & Uga, Y. (2014). Deep rooting conferred by DEEPER ROOTING 1 enhances rice yield in paddy fields. *Scientific Reports*, **4**(1), 5563.

Athar, H. R., & Ashraf, M. (2009). Strategies for crop improvement against salinity and drought stress: an overview. In: *Salinity and Water Stress: Improving Crop Efficiency*, Ashraf, M., Ozturk, M. & Athar, H. R. Eds., pp. 1-16, Springer, Dordrecht, The Netherlands.

Bahlouli, F., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., & Hassous, K. L. (2005). Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions. *Journal of Agronomy*, **4**(4), 360-365.

Barlow, E. W. R. (1986). Water relations of expanding leaves. *Functional Plant Biology*, **13**(1), 45-58.

Bayoumi, T. Y., Eid, M. H., & Metwali, E. M. (2008). Application of physiological and biochemical indices as a screening technique for drought tolerance in wheat genotypes. *African Journal of Biotechnology*, **7**(14), 2341-2352.

Belaid, D. (2015). Le semis-direct, une opportunité de développement. Communication au Séminaire International « Systèmes de Production en Zones Semi arides. Diversité Agronomique et Systèmes de Cultures ». Université Mohamed Boudiaf, M'sila. 04 et 05 Novembre, 6 p.

Benbelkacem, A. (2022). Principes d'amélioration des plantes : Stratégies de sélection variétale des céréales en Algérie. Journées scientifiques sur la Connaissance et le savoir, 16-17 Mai 2022, Faculté SNV-STU & LCVRN, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi -Bordj Bou Arreridj.

Bewley, J. D., & Black, M. (2012). Seeds: Physiology of development, germination and dormancy. Springer Science & Business Media.

Bidinger, F. R., Mahalakshmi, V., & Rao, G. D. P. (1987). Assessment of drought resistance in pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke). II. Estimation of genotype response to stress. *Australian Journal of Agricultural Research*, **38**(1), 49-59.

Boudiar, R., Mekhlouf, A., Bachir, A., Rouabhi, A., & Igartua, E. (2019). Assessment of early drought tolerance of Algerian durum wheat reveals superiority of landraces. *Egyptian Journal of Agronomy*, **41**(3), 275-292.

Bousba, R., Bounar, R., Sedrati, N., Lakhal, R., Hamla, C., & Rached-Kanouni, M. (2021). Effects of osmotic stress induced by Polyethylene Glycol (Peg) 6000 and Mannitol on seed germination and seedling growth of durum wheat. *Journal of Bioresource Management*, **8**(3), 57-66.

Bousslama, M., & Schapaugh Jr, W. T. (1984). Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance 1. *Crop Science*, **24**(5), 933-937.

Chennafi, H., Aïdaoui, A., Bouzerzour, H., & Saci, A. (2006). Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi- arid growth conditions. *Asian Journal of Plant Sciences*, **5**(5), 854-860.

Chourghal, N., Lhomme, P., Huard, F., & Aïdaoui, A. (2016). Climate change in Algeria and its impact on durum wheat. *Regional Environmental Change*, **16**(16), 1623-1634

Debaeke, P., Cabelguenne, M., Casals, M. L., & Puech, J. L. (1996). Elaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. II. Mise au point et test d'un modèle de simulation de la culture de blé d'hiver en conditions d'alimentation hydrique et azotée variées : Epicphase-Blé. *Agronomie*, **16**(1), 25-46.

DSASI (2021). Direction de la Statistique Agricole et des systèmes d'Information. Ministère de l'Agriculture et du développement Rural.

El Fakhri, M., Mahboub, S., Benchekroun, M., & Nsarellah, N. (2010). Effet du stress hydrique sur les caractéristiques d'enracinement du blé dur (*Triticum Durum*. Desf). *Nature & Technology*, **3**, 6-12.

- Ellis, R. H., & Roberts, E. H. (1981).** The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. *Seed Science and Technology*, **9**, 373-40.
- 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.
- Feillet, P. (2000).** Le grain de blé : composition et utilisation. *INRA*. Paris.
- Fellahi, Z., Hannachi, A., & Bouzerzour, H. (2020).** Expected genetic gains from mono trait and index-based selection in advanced bread wheat (*Triticum aestivum* L.) populations. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, **73**(2), 9131-9141.
- Fenando, E. P., Boero, C., Gallardo, M., & Gonzalez, J. (2000).** Effect of NaCl on germination, growth, and soluble sugar content in *Chenopodium quinona* seeds. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, **41**, 27-34.
- Fernandez, G. C. (1992).** Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: *Proceeding of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress, Aug. 13-16, Shanhua, Taiwan, 1992* (pp. 257-270).
- Fischer, R. A., & Maurer, R. (1978).** Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, **29**(5), 897-912.
- Fischer, R. A., & Wood, J. T. (1979).** Drought resistance in spring wheat cultivars. III.* Yield associations with morpho-physiological traits. *Australian Journal of Agricultural Research*, **30**(6), 1001-1020.
- Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campanile, R. G., Ricciardi, G. L., & Borghi, B. (1997).** Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Canadian Journal of Plant Science*, **77**(4), 523-531.
- Haddad, L., Bachir, A., Benmahammed, A., & Bouzerzour, H. (2021).** Durum wheat (*Triticum turgidum* ssp *durum*) improvement during the past 67-year in Algeria: Performance assessment of a set of local varieties under rainfed conditions of the eastern high plateaus. *Jordan Journal of Biological Sciences*, **14**(2), 327-336.
- Hannachi, A., Fellahi, Z., Bouzerzour, H., & Boutekrabet, A. (2013).** Diallel- cross analysis of grain yield and stress tolerance-related traits under semi- arid conditions in Durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Electronic Journal of Plant Breeding*, **4**(1), 1027-1033.

- Hannachi, A. (2017).** Aptitude à la combinaison sélection mono et multi caractères et adaptabilité du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux conditions semi-arides. Thèse de Doctorat. Université Ferhat Abbas-Sétif 113 p.
- Ioio, R. D., Linhares, F. S., Scacchi, E., Casamitjana-Martinez, E., Heidstra, R., Costantino, P., & Sabatini, S. (2007).** Cytokinins determine Arabidopsis root-meristem size by controlling cell differentiation. *Current Biology*, **17**(8), 678-682.
- Jatoi, S. A., Latif, M. M., Arif, M., Ahson, M., & Siddiqui, S. U. (2014).** Comparative assessment of wheat landraces against polyethylene glycol simulated drought stress. *Science Technology and Development*, **33**(1), 1-6.
- Kermode, A. R. (2005).** Role of abscisic acid in seed dormancy. *Journal of Plant Growth Regulation*, **24**(4), 319-344.
- Kirouani, A., Kiar, R. O., Boukhalfoun, L., & Fellahi, Z. (2019).** Caractérisation de quelques variétés Algériennes de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) par le biais des marqueurs phénotypiques. *Journal of Applied Biosciences*, **142**, 14464-14477.
- Koch, G. (2018).** Effet du stress hydrique sur la croissance de la tomate : une étude multi-échelle : De la cellule à la plante entière pour une meilleure compréhension des interactions entre les différentes échelles. Thèse de doctorat, Sciences agricoles. Université d'Avignon. France, 244 p.
- Kolehmainen, M., & Lindberg, R. (2022).** GRAINS – a major source of sustainable protein for health. *Nutrition reviews*, **80**(60), 1684-1663.
- Laaboudi, A., & Mouhouche, B. (2012).** Water requirement modelling for wheat under arid climatic conditions. *Hydrology: Current Research*, **3**(4), 130.
- Lynch, J. (2007).** Roots of the Second Green Revolution. *Australian Journal of Botany*, **55**(5), 493-512.
- Madic, M., Paunovic, A., Djurovic, D., Knezevic, D., & Tanaskovic, S. (2012).** Breeding barley (*Hordeum vulgare* L.) for abiotic and biotic limiting factors. In: *Proceedings of the Third International Scientific Symposium "Agrosym 2012". "Agrosym 2012", Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 15–17 November 2012*; Faculty of Agriculture, University of East Sarajevo: Istočno Sarajevo, Serbia, 2012; pp. 257-262.
- Meneses, C. H. S. G., Bruno, R. D. L. A., Fernandes, P. D., Pereira, W. E., Lima, L. H. G. D. M., Lima, M. M. D. A., & Vidal, M. S. (2011).** Germination of cotton cultivar seeds under water stress induced by polyethyleneglycol-6000. *Scientia Agricola*, **68**, 131-138.

- Miled, D., Boussaid, M., Abdelkefi, A., & Cherif, A. (1986).** Tolérance au sel d'espèces annuelles du genre *Medicago* au cours de la germination. Séminaire international sur les végétaux en milieu aride, 8 au 10 septembre, Jerba., Tunisie.
- Morgan, J. M. (1984).** Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual Review Of Plant Physiology*, **35**, 299-319.
- Moud, A. M., & Maghsoudi, K. (2008).** Application of coleoptile growth response method to differentiate osmoregulation capability of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Research Journal of Agronomy*, **2**(2), 36-43.
- Nonami, H., & Boyer, J. S. (1989).** Turgor and growth at low water potentials. *Plant Physiology*, **89**(3), 798-804.
- 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.
- Papathanasiou, F., Dordas, C., Gekas, F., Pankou, C., Ninou, E., Mylonas, I., Konstantinos Tsantarmas, K., Sistanis, I. Sinapidou, E. Lithourgidis, A., Petrevska, J. Papadopoulos, I., Zouliamis, P., Kargiotidou, A., & Tokatlidis, I. (2015).** The use of stress tolerance indices for the selection of tolerant inbred lines and their correspondent hybrids under normal and water-stress conditions. *Procedia Environmental Sciences*, **29**, 274-275.
- Poutanen, K. S., Karlund, A. O., Gomez-Gallego, C., Johannson, D. P., Scheers, N. M., Marklinder, I. M., Eriksen, A. K., Silventoinen, P. C., Nordlund, E., Soze, N., Hanhineva, K. J., Kolehmainen, M., & Lindberg, R. (2022).** GRAINS – a major source of sustainable protein for health. *Nutrition reviews*, **80**(60), 1684-1663.
- Prakash, V., Tiwari, S., Shukla, R. S., Tripathi, N., & Sapre, S. (2015).** Evaluation of drought stress tolerance efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes at germination and seedling stages. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, **6**, 602-609.
- Rabti, A. Mekaoussi, R., Fellahi, Z., Hannachi, A., Benbelkacem, A., Benmahammed, A., & Bouzerzour, H. (2020).** Characterization of Old and Recent Durum Wheat [*Triticum turgidum* (L.) TELL. Convar. *Durum* (Desf.) Mackey] Varieties Assessed under South Mediterranean Conditions. *Egyptian Journal of Agronomie*, **42**(3), 307-320.
- Rajjou, L., Duval, M., Gallardo, K., Catusse, J., Bally, J., Job, C., ... & Job, D. (2012).** Seed germination and vigor. *Annual Plant Reviews*, **43**, 187-222.
- Ranal, M. A., & Santana, D. G. D. (2006).** How and why to measure the germination process?. *Brazilian Journal of Botany*, **29**, 1-11.

- Roberts, E. H. (1972).** Viability of Seeds. Chapman & Hall.
- Romo, S., Labrador, E., & Dopico, B. (2001).** Water stress-regulated gene expression in *Cicer arietinum* seedlings and plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, **39**(11), 1017-1026.
- Rosielle, A. A., & Hamblin, J. (1981).** Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment 1. *Crop Science*, **21**(6), 943-946.
- Ruel, T. (2006).** Document sur la culture du blé. Ed: Educagri, 18 p.
- Scott, S. J., Jones, R. A., & Williams, W. (1984).** Review of data analysis methods for seed germination 1. *Crop Science*, **24**(6), 1192-1199.
- Shewry, P. R. (2021).** The Contribution of Wheat to Human Nutrition and Health. A year on the field. (Nov 20). <https://www.yearonthefield.net/post/the-contribution-of-wheat-to-human-nutrition-and-health>.
- Shiferaw, B., & Baker, D. A. (1996).** An evaluation of drought screening techniques for *Eragrostis tef*. In: *Proceeding New Genetical Approaches to crop improvement II*. Ed. Naqvi, S.S.M. pp. 469-496.
- Singh, S., Sengar, R. S., Kulshreshtha, N., Datta, D., Tomar, R. S., Rao, V. P., Garg, D., & Ojha, A. (2015).** Assessment of multiple tolerance indices for salinity stress in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Agricultural Science*, **7**(3), 49-57.
- Sio-Se Mardeh, A., Ahmadi, A., Poustini, K., & Mohammadi, V. (2006).** Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crops Research*, **98**(2-3), 222-229.
- Španić, V., Ižaković, M., & Marček, T. (2017).** Wheat germination and seedlings under PEG-induced conditons. *Agronomski glasnik: Glasilo Hrvatskog agronomskog društva*, **79**(3), 99-109.
- Subhani, G. M., Ahmad, J., Anwar, J., Hussain, M., & Mahmood, A. (2015).** Identification of drought tolerant genotypes of barley (*Hordeum vulgare* L.) through stress tolerance indices. *Journal of Animal & Plant Sciences*, **25**(3), 686-692.
- Turner, N. C. (1986).** Adaptation to water deficits: a changing perspective. *Functional Plant Biology*, **13**(1), 175-190.
- 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.

Werner, T., Holst, K., Pörs, Y., Guivarc'h, A., Mustroph, A., Chriqui, D., Grimm, B., & Schmülling, T. (2008). Cytokinin deficiency causes distinct changes of sink and source parameters in tobacco shoots and roots. *Journal of Experimental Botany*, **59**(10), 2659-2672.

Xynias, I. N., Mylonas, I., Korpetis, E. G., Ninou, E., Tsaballa, A., Avdikos, I. D., & Mavromatis, A. G. (2020). Durum Wheat Breeding in the Mediterranean Region: Current Status and Future Prospects. *Agronomy*, **10**, 432.

Zhu, J. K. (2001). Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, **6**(2), 66-71.

Résumé

La phase de germination des semences est l'une des étapes les plus sensibles aux effets du stress hydrique. Cette étude est menée au Centre National de Contrôle et de Certification des semences et des plants (CNCC-Sétif) au cours de l'année 2023 avec comme objectif de comparer le comportement de quelques variétés de blé dur vis-à-vis de leur tolérance / sensibilité au stress hydrique induit par le polyéthylène glycol 6000 (PEG-6000) à deux niveaux différents (0, et 20%) au stade juvénile. Les résultats indiquent la présence d'une large variabilité génétique à l'intérieur du matériel végétal évalué la réponse des variétés au stress est fonction du caractère mesuré et du niveau de stress appliqué. Globalement, le pourcentage final de germination a régressé, en présence de stress de -16.26% en moyenne de l'ensemble des variétés testées. Quant aux paramètres de croissance des jeunes plantules, les ont subis des modifications remarquables sous stress allant jusqu'à -100% pour certains caractères chez certaines variétés. La méthode de la moyenne de la somme des rangs (MSR) a identifié Oued El Bared (V3) et à moindre degré M6 (V7), Bousselam (V1), Vitron (V5) et Wahbi (V2) comme de bonnes sources de tolérance au stress. Ces cultivars peuvent être exploités dans les programmes futurs d'amélioration de blé pour la tolérance au stress hydrique au stade plantule.

Mots clé : *Triticum durum*, PEG-6000, germination, jeunes plantules.

Abstract

The seed germination phase is one of the most sensitive stages to the effects of water stress. This study is being carried out at the National Center for the Control and Certification of Seeds and Plants (CNCC-Sétif) during the year 2023 with the objective to compare the behavior of some durum wheat varieties with regard to their tolerance / sensitivity to water stress induced by polyethylene glycol 6000 (PEG-6000) at two different levels (0, and 20%) at the juvenile stage. The results indicate the presence of wide genetic variability within the plant material evaluated. The response of the varieties to stress is a function of the character measured and the level of stress applied. Overall, the final percentage of germination regressed, in the presence of stress by -16.26% on average for all the varieties tested. As for the growth parameters of the young seedlings, they underwent remarkable modifications under stress of up to -100% for certain characters in some varieties. The mean sum of ranks (MSR) method identified Oued El Bared (V3) and to a lesser degree M6 (V7), Bousselam (V1), Vitron (V5) and Wahbi (V2) as good sources of tolerance to stress. These cultivars can be used in future wheat breeding programs for water stress tolerance at the seedling stage.

Keywords: *Triticum durum*, PEG-6000, germination, young seedlings.

ملخص تعد مرحلة إنبات البذور من أكثر المراحل حساسية لتأثيرات الإجهاد المائي. أجريت هذه الدراسة على مستوى المركز الوطني لمراقبة البذور والشتات والمصادقة عليها (CNCC-Sétif) خلال العام 2023 بهدف مقارنة سلوك بعض أصناف القمح الصلب نيمًا ونوعًا بحسب الملاءمة / حساسيتها للإجهاد المائي المستحث بواسطة البولي إيثيلين جليكول (PEG-6000) عند مستويين مختلفين (0، و20%) في مرحلة الزموم المبكرة. تشير النتائج إلى وجود تنوع وراثي كبير داخل المادة النباتية المدروسة. تتغير استجابة الأصناف للإجهاد حسب الصنف المقاس ومسنوى الإجهاد المطبق. بشكل عام، تراجع النسبة المئوية النهائية للإنتاش، في ظل وجود الإجهاد بنسبة -16.26% كمتوسط لجميع الأصناف المختبرة. أما بالنسبة لإصافات نمو الشتات الصغيرة، فقد خضعت في ظل وجود الإجهاد لتغيرات ملحوظة تصل إلى -100% لبعض الصفات لدى بعض الأصناف. حددت طريقة متوسط مجموع الرتب (MSR) (Oued El Bared (V3) ودرجة أقل (M6 (V7، (Bousselam (V1، (Vitron (V5 و (Wahbi (V1) كمصادر جيدة لتحمل الإجهاد. يمكن استخدام هذه الأصناف في برامج تربية القمح المستقبلي لتحمل الإجهاد المائي في مرحلة الزموم المبكرة.

كلمات مفتاحية: *Triticum durum*، PEG-6000، إنتاش، شتات شابة.