



UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

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 بوعريريج

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A.

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الارض 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



UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Amélioration des plantes

Intitulé

Caractérisation précoce de la tolérance de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique induit par le Polyéthylène glycol 6000

Présenté par : SAOUD Nassima
MEKHOUKH Haoua

Soutenu le : 14/07/2021 ;

Devant le jury :

Président :	M ^r BELGUERRI Hamza	MCB
Encadrant :	M ^r FELLAHI Zine El Abidine	MCA
Examineur :	M ^{me} MAAFI Oula	MAA

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Louanges à ALLAH, le tout puissant et le miséricordieux qui m'a guidé et m'a donné la volonté, la patience et le courage pour achever ce travail.

*Nous adressons notre plus vif remerciement à notre promoteur, **Dr FLLAHI Zine El Abidine** pour avoir de bien voulu de nous encadrer, pour sa patience, son aide, ses conseils et encouragements, pour le temps qu'il nous a consacré réaliser ce travail.*

*Nos profonds remerciements vont aux membres jury le **Dr BELGUERRI Hamza** et **M^{me} MAAFI Oula** qui nous ont fait l'honneur de participer et de juger notre mémoire.*

*Nous tenons à remercier tout le personnel du laboratoire régional du Centre National de Contrôle et de Certification de semences et plants (CNCC) de Sétif pour son appui et sa collaboration, avec beaucoup de dévouement pour la perfection de ce mémoire en particulier **Sara**.*

Dédicace

A mes chers parents

Quoi je fasse ou que je dise, je ne saurai point vous remercier comme il se doit, merci pour votre présence a mes coté, et de Me donner la force pour affronter les différents obstacles.

A mes chères sœurs

Aïchouch, Faiza et Lamia, qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études, que Dieux les protège et leur offre la chance et le bonheur.

A mes chers frères

Ilyas, oussama, fateh et tayeb merci de m'encourager toutes ces années et de me faite confiance, dieu vous donne bonheur, courage et surtout réussite.

A toute ma famille

A ma cher binôme Haoua

Pour son soutien et sa sympathie et sa patience.

A toutes mes amies

Houda, Ahlem et Abir et toute ma promo, merci pour tous nos bonheurs, je vous souhaite plus de succès.

Nassíma

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mon père, pour son appui et son encouragement celui m'a guidé vers la voix de réussite.

A ma mère, la source de mes joies, pour son amour son soutien sa tendresse.

A mon chère frère **Mohammad Lamine**.

A la fleur de la maison ma chère sœur **Asma**.

A mes **grand-mères**, que dieu leurs procure une bonne santé et longue vie.

A celle qui m'a accompagné, m'a supporté tout le long du travail mon amie et binôme **Nassima**.

A mes chères copines : **Remaissa, Ichrak, Wiaam et Ahlam**.

A tous mes collègues de la promo 'Amélioration des plantes 2020-2021', en particulier : **Abir, Khawla, Salwa, Rania, Yasser et Waniss**.

A toutes les personnes que je connais et que je n'ai pas cité, à ceux que j'aime et m'aiment.

Haoua

Sommaire

Liste des tableaux	
Liste des figures et photos	
Liste des abréviations	
Introduction	1
Chapitre I : Matériel et méthodes	
I.1. Matériel végétal	3
I.2. Conduite de l'expérimentation	3
I.2.1. Préparation de la solution de polyéthylène glycol (PEG6000)	3
I.2.2. Mise en place de l'expérience	3
I.3. Paramètres étudiés	5
I.3.1. Paramètres de germination	5
I.3.1.1. Taux de germination (%G, %)	5
I.3.1.2. Temps moyen de germination (MGT, jours)	6
I.3.1.3. Indice de germination (GI, jours)	6
I.3.1.4. Germination moyenne journalière (MDG, %)	6
I.3.2. Paramètres de croissance	6
I.3.2.1. Longueur et nombre de racines (LR, cm)	7
I.3.2.2. Longueur du coléoptile (LC, cm)	7
I.3.2.3. Longueur de la 1ère feuille (LF, cm)	7
I.3.2.4. Matières fraîches racinaire et aérienne	7
I.4. Analyse des données	7
Chapitre II : Résultats et discussion	
II.1. Paramètres de germination	8
II.1.1. Effet moyen 'génotype'	8
II.1.2. Effet moyen 'stress'	10
II.1.3. Effet de l'interaction 'génotype*stress'	13
II.2. Paramètres de croissance	14
II.2.1. Effet moyen 'génotype'	15
II.2.2. Effet moyen 'stress'	16
II.2.3. Effet de l'interaction 'génotype*stress'	19
II.3. Corrélations inter-caractères	23
Conclusion	25
Références bibliographiques	27

Liste des tableaux

Tableau 1 : Code, nom et origine des géotypes de blé dur étudiés	3
Tableau 2 : Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères mesurés	8
Tableau 3 : Valeurs moyennes de l'effet géotype des caractères mesurés	9
Tableau 4 : Valeurs moyennes de l'effet stress des caractères mesurés	10
Tableau 5 : Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères mesurés	15
Tableau 6 : Valeurs moyennes de l'effet géotype des caractères mesurés	16
Tableau 7 : Valeurs moyennes de l'effet stress des caractères mesurés	18
Tableau 8 : Réduction du % de germination des traitements T1 et T2 relativement aux témoins T0 des géotypes étudiés	21
Tableau 9 : Classement des géotypes étudiés en fonction du caractère et de l'intensité de stress appliqué	23
Tableau 10 : Coefficients de corrélation phénotypique (en dessus de la diagonale) et leurs probabilités respectives (en dessous de la diagonale) estimées entre les caractères mesurés	24

Liste des figures et photos

Figure 1 : Réduction (en %) des variables mesurées en T1 et T2 relativement aux témoins T0 des géotypes étudiés.....	12
Figure 2 : Cinétique de germination des grains de blé dur en fonction de l'intensité du stress.....	13
Figure 3 : Réduction du % de germination des traitements T1 et T2 relativement aux témoins T0 des géotypes étudiés.....	14
Figure 4 : Réduction (en %) des variables mesurées en T1 et T2 relativement aux témoins T0 des géotypes étudiés.....	19
Photo 1 : Mise en place des graines de blé dans les boîtes de pétri et le dénombrement des graines germées.....	4
Photo 2 : Transplantation des graines germées et étude des paramètres de la croissance.....	5
Photo 3 : Effet du stress hydrique modéré (T1) et sévère (T2) induit par le PEG6000 sur les paramètres de croissance du géotype BDbaa 1920/24 (G3) par rapport au témoin (T0).....	17

Liste des abréviations

%G : Pourcentage final de germination.

CEIC: Census and economic information center.

CIMMYT : Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.

CNCC : Centre nationale de contrôle et de certification des semences et plants.

ICARDA : International Center for Agricultural Research in the Dry Areas.

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

GI : Indice de germination.

LC : Longueur du coléoptile.

ISTA : International Seed Testing Association.

LF : Longueur de la 1^{ère} feuille.

LR : Longueur des racines.

MDG : Germination moyenne journalière.

MFA : Matière fraîche aérienne.

MFR : Matière fraîche racinaire.

MGT : Temps moyen de germination.

NR : Nombre des racines.

PEG 6000 : Polyéthylène glycol 6000.

Introduction

Introduction

Introduction

Les céréales constituent une part importante des ressources alimentaires de l'homme et de l'animale. Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est cultivé principalement dans les pays du bassin méditerranéen à climat des région arides et semi-arides là où l'agriculture est dans la plus mauvaise passe. Les zones céréalières se caractérisent le plus par l'augmentation de la température couplée à la baisse des précipitations, en plus de la désertification et la sécheresse qui tuent les sols agricoles (**Abeledo et al., 2008 ; Haddad et al., 2021**).

En Algérie, le blé dur est la deuxième céréale la plus importante du genre *Triticum* après le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et est cultivé annuellement sur plus de 1.5 millions d'hectares avec une production moyenne qui avoisine les 3.2 millions de tonnes (**CEIC, 2021**). La production en blé est très insuffisante pour couvrir les besoins alimentaires nationaux et les stocks poussent à faire un recours systématique aux importations (**Mekaoussi et al., 2021**). Actuellement l'Algérie importe une bonne part de son blé et se trouve dépendante du marché international (**Rabti et al., 2020**). Par sa position de grand importateur de blé, l'Algérie achète annuellement une grande portion de la production céréalière mondiale, cette situation risque de se prolonger à plusieurs années, faute de rendement insuffisants et des besoins de consommation sans cesse croissance devant une forte évolution démographique.

La faiblesse de la production nationale est associée à de nombreux facteurs d'ordre biotique et surtout abiotique qui limitent l'expression de tel génotype dans ces environnements de production (**Benmahammed et al., 2010**). En plus de ces facteurs, d'autre inconvénients de nature technique (travail de sol, fertilisation, mauvaises herbes, mécanisation, ... etc.) sont l'origine de cette faiblesse de production (**Hannachi et al., 2013**). Le déficit hydrique constitue le principal facteur limitant, non seulement par le manque de précipitation, mais aussi par la mauvaise répartition spatiotemporelle des pluies pendant l'année (**Chennafi et al., 2006 ; Chourghal et al., 2016**). Il s'installe à partir du moment où les besoins en eau de la plante sont supérieurs aux quantités disponibles. Sous un climat qui devrait devenir plus sec et plus chaud, la situation pourrait être encore exacerbée à mesure que la concurrence pour l'eau s'intensifie entre les cultures (**Laaboudi et Mouhouche, 2012**). Ce scénario appelle à accentuer les efforts de la sélection vis-à-vis de la tolérance à la sécheresse pour compenser les pertes de rendement prévues et maintenir la productivité du blé dans les sites vulnérables (**Fellahi et al., 2018**). Comme de nombreux autres pays, l'Algérie est confrontée à de grands défis de manque d'eau

Introduction

qui entraîne des baisses considérables de la production agricole chaque année pouvant aller d'après **Fleury *et al.* (2010)** jusqu'à 80% dans les régions arides et semi-arides.

Les mécanismes de tolérance à la sécheresse ne sont pas exclusifs les uns des autres et peuvent même être complémentaires. Ils impliquent des facteurs phénologiques, morphologiques, physiologiques et biochimiques à différents niveaux d'organisation des plantes qui les développent pour inhiber ou atténuer les effets néfastes du stress (**Marcińska *et al.*, 2013**). Des techniques de criblage ont été développées dans le cadre des programmes d'amélioration pour la création de variétés tolérantes au stress hydrique et de nombreux traits/indices conventionnels et spécifiques ont été proposés comme des critères de sélection pour atteindre cet objectif (**Fukai et Cooper, 1995 ; Sultan *et al.*, 2012 ; Fellahi *et al.*, 2020**). Classiquement, pour différencier les génotypes tolérants à la sécheresse, les améliorateurs sélectionnent directement ceux les plus intéressants en se basant sur le rendement en grains, comme critère principal, dans les environnements cibles. Pratiquement, ce criblage est l'approche la plus fiable pour évaluer leur tolérance à la sécheresse. Cependant, cette approche nécessite 2 à 3 ans, une très grande surface si plusieurs cultivars sont évalués en même temps et plus de moyens et d'efforts (**Prakash *et al.*, 2015**).

Autres techniques d'évaluation de la tolérance au stress hydrique en laboratoire ont été développées, proposées et utilisées pour obtenir des résultats appropriés et proches à ceux obtenus en conditions réelles. La germination des graines est considérée comme le stade de croissance le plus critique en conditions de stress hydrique chez le blé. Certains stimulateurs tels que le polyéthylène glycol 6000 (PEG6000) sont utilisés pour induire un stress hydrique artificiel chez les plantes au stade germinatif. L'application de PEG6000 est une approche non conventionnelle et utilisée avec succès pour cribler un grand nombre de génotypes et identifier ceux tolérants au stress hydrique à ce stade précoce (juvénile) dans des conditions de laboratoire (**Badr *et al.*, 2020 ; Hernández *et al.*, 2021**). Le PEG6000 dans une solution hydroponique agit comme un agent osmotique non pénétrant, ce qui augmente le potentiel de solutés dans le milieu et bloque l'absorption de l'eau par le système racinaire. Ceci entraîne une diminution significative du taux final de germination, de la croissance et de la biomasse produite d'après les travaux rapportés dans la littérature (**Yagmur et Kaydan 2008 ; Boudiar *et al.*, 2020 ; Othmani *et al.*, 2021**). La présente étude a pour objectif de comparer le comportement de 10 génotypes de blé dur, locaux et améliorés, soumis à différents niveaux de stress hydrique induit par le PEG6000 au stade germinatif par la mesure de certains paramètres relatifs à la germination des grains et à la croissance des jeunes plantules en conditions hydroponiques.

Chapitre I :
Matériel et méthodes

Chapitre I : Matériel et Méthodes

I.1. Matériel végétal

L'expérimentation a été conduite au niveau du laboratoire régional du Centre National de Contrôle et Certification des Semences et Plants (CNCC) de Setif situé à 4 km sud de la Wilaya de Sétif, au cours de l'année universitaire 2020/2021. L'expérience porte sur le suivi de 10 variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) locales et introduites dont la semence est fournie par l'Institut National de la Recherche Agronomique Algérie (INRAA), unité de Constantine (Tableau 1).

Tableau 1 : Code, nom et origine des géotypes de blé dur étudiés.

Code	Géotype	Origine
G1	BDbaa 1920/22	CIMMYT
G2	BDbaa 1920/23	ICARDA
G3	BDbaa 1920/24	ICARDA
G4	BDbaa 1920/25	ICARDA
G5	Djennah Khetifa	Locale
G6	Mohamed Ben Bachir	Locale
G7	T. Polo x ZB	Locale
G8	Hedba3	Locale
G9	Bidi 17	Locale
G10	Oued Zenati 368	Locale

I.2. Conditions expérimentales

I.2.1. Préparation des solutions de polyéthylène glycol 6000 (PEG6000)

Le polyéthylène glycol est un agent relativement stable, inerte, non ionique mais bien soluble dans l'eau (Benjelloun *et al.*, 2013). Le déficit hydrique a été induit par l'application de différent traitement de polyéthylène glycol (PEG6000) comme indicateur de stress hydrique osmotique. La solution est préparée en faisant dissoudre la quantité de PEG 6000 dans l'eau distillée. Ces solutions sont préparées pour avoir différents niveaux de stress hydrique osmotique suivant les traitements envisagés (T0 : 0 g/l, T1 : 150 g/l, T2 : 300 g/l de PEG6000 par 1 litre de l'eau distillée). Les différentes concentrations utilisées sont choisies en se référant aux données bibliographiques (Khakwani *et al.*, 2011 ; Baloch *et al.*, 2012 ; Prakash *et al.*, 2015).

I.2.2. Mise en place de l'expérience

Notre travail est constitué de deux parties, la première partie est réservée à l'essai de germination, alors que la deuxième partie est consacrée à l'étude des paramètres de la croissance.

Concernant la première partie, les graines de différents génotypes listés au tableau 1 ont été mise à germer dans des boîtes de pétri à raison de 100 graines/boîte/génotype/traitement (Photo 1). Les boîtes de pétri sont tapissées par une couche de papier buvard imbibé avec l'une des trois solutions de PEG6000 préalablement préparées. L'expérience est répétée trois fois. L'unité expérimentale est matérialisée par la boîte de Pétri, portant 100 graines par génotype et par boîte.



Photo 1. Mise en place des graines de blé dans les boîtes de pétri et le dénombrement des graines germées.

Une quatrième boîte supplémentaire par génotype contenant aussi 100 graines est réservée à la seconde partie de l'expérience (paramètre des croissance). Ses graines sont mises à germer en l'absence du stress hydrique (T0 : 0% PEG6000), elles sont imbibées avec de l'eau distillée.

L'ensemble des boîtes des deux partie de l'expérience sont placées dans un germoir automatique à une température de 22 C°, une photopériode de 16 heures de lumière et 8 heures d'obscurité et une humidité relative de l'air entre 70 et 80%.

Pour la germination, le nombre de graines germées a été noté quotidiennement durant les sept jours qui suivent le semis. On considère que la germination a lieu lorsque la radicule atteint 2 mm (Photo 1) (**Adjel *et al.*, 2013**).

Pour la croissance, les graines germées de la quatrième boîte de pétri sont transférées après 48 heures dans des tubes à essai (1 graine/tube/concentration) contenant 25 ml de solution de PEG6000 préparée aux mêmes intensités de stress hydrique préalablement utilisées pour le test de germination (T0, T1, T2). Des flacons de coton sont utilisés comme un support des graines à l'intérieur de l'extrémité ouverte des tubes à essai (Photo 2). L'unité expérimentale est matérialisée cette fois-ci par le tube à essai, à raison d'une graine par tube. L'expérience est répétée 4 fois (4 graines par traitement et 12 par génotype) et a duré dix jours après transfert des graines aux tubes à essai d'où un suivi quotidien des tubes est réalisé afin d'assurer le contact graine/racine avec de la solution dans le tube.



Photo 2 : Transplantation des graines germées et étude des paramètres de la croissance.

I.3. Paramètres étudiés

Dans notre expérimentation (parties 1 et 2), le suivi de comportement des dix variétés de blé dur vis-à-vis du stress hydrique imposé est basé sur plusieurs paramètres physiologiques et morphologiques.

I.3.1. Paramètres de germination

I.3.1.1. Taux de germination (%G, %)

Le nombre de graines germées est noté à la fin de l'expérience (7^{ème} jour après semis), il est exprimé par le rapport nombre total de graines germées sur nombre total de graines

initialement mises en germination ou semées. Le pourcentage de germination final est déduit par la formule suivante (Shiferaw et Baker, 1996) :

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

Où : %G = taux de germination, NTGG et NTGS = nombre total de graines germées et nombre total de graines soumises à la germination, respectivement.

I.3.1.2. Temps moyen de germination (MGT, jours)

Le temps moyen de germination (MGT) est calculé selon l'équation suivante (Ellis et Roberts, 1981) :

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

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

I.3.1.3. Indice de germination (GI, jours)

L'indice de germination est une estimation du temps (en jours) nécessaire pour qu'un certain pourcentage de germination se produise. L'indice de germination est calculé en utilisant l'expression suivante (Ranal et Santana, 2006) :

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

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.

I.3.1.4. Germination moyenne journalière (MDG, %)

Elle a été obtenue en divisant le pourcentage cumulé de germination par le nombre de jours écoulés depuis le semis (Scott *et al.*, 1984).

I.3.2. Paramètres de croissance

La seconde partie de l'expérience nous a permis d'étudier les paramètres de croissance suivant:

I.3.2.1. Longueur et nombre de racines (LR, cm)

La longueur maximale des racines c'est la longueur de la racine la plus longue, la mesure de la longue racine se fait avec une règle graduée.

I.3.2.2. Longueur du coléoptile (LC, cm)

La longueur de coléoptile est mesurée à partir de la graine jusqu'à la sortie de la première feuille avec une règle graduée.

I.3.2.3. Longueur de la 1^{ère} feuille (LF, cm)

La longueur de la 1^{ère} feuille est mesurée à partir de la graine jusqu'à l'extrémité de la feuille par une règle graduée.

I.3.2.4. Matières fraîches racinaire et aérienne

Le poids frais en mg des racines (MFR, mg) et des feuilles (MFA, mg) ont été déterminées à la fin de l'expérience à l'aide d'une balance à précision.

I.4. Analyse des données

Les données obtenues ont été traitées par l'analyse de la variance, à deux facteurs étudiés (génotype et PEG6000) suivant un dispositif expérimental factoriel complètement randomisé à trois répétitions pour la partie germination et à quatre répétitions pour la partie croissance. La comparaison des moyennes des traitements est faite sur la base du calcul de la plus petite différence significative au seuil de 5% ($P_{pds5\%}$). Les liaisons entre caractères mesurés ont été analysées en utilisant les corrélations phénotypiques et génotypiques. Les données ont été analysées en utilisant le logiciel CoStat (version 6,4. CoHort Software, Monterey, CA, USA) et le programme XLSTAT.

Chapitre II :
Résultats et discussion

Chapitre II : Résultats et discussion

II.1. Paramètres de germination

Les résultats d'analyse de la variance à deux facteurs montrent des effets 'génotype', 'stress' et 'génotype*stress' hautement ($p < 0.01$) à très hautement ($p < 0.001$) significatifs pour l'ensemble des variables mesurées à l'exception du pourcentage final de germination (%G) et de la germination moyenne journalière (MDG) pour lesquels l'interaction 'génotype*stress' n'est pas significative ($p > 0.05$) (Tableau 2). Ces résultats suggèrent la présence de la variabilité génotypique à l'intérieur du matériel végétal évalué d'une part et l'effet dépressif du stress hydrique imposé d'autre part en plus d'une réponse différentielle des génotypes vis-à-vis du stress notamment pour le temps moyen de germination (MGT) et l'indice de germination (GI) (Tableau 2).

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

SV	ddl	%G	MGT	GI	MDG
Génotype	9	873.8**	3.7**	148.6***	17.8**
Stress	2	65163.9***	48.5***	10374.2***	1329.9***
Génotype*Stress	18	389.0 ^{ns}	2.9**	66.6**	7.9 ^{ns}
Erreur	60	268.1	1.1	25.1	5.5

SV = Source de variation, %G = pourcentage final de germination, MGT = Temps moyen de germination, GI = Indice de germination, MDG = Germination moyenne journalière. ns, ** et *** = Effets non significatifs et significatif aux seuils de probabilité de 5%, 1% et 0.1%, respectivement.

Parmi les trois sources de variation suscitées et celle de l'erreur, l'effet 'stress' explique la quasi-totalité de la variation totale observée comme indiqué par les valeurs prises par le carré moyen de l'analyse de la variance et ce pour l'ensemble des variables étudiés. Elle est suivie par l'effet 'génotype' en deuxième position, l'interaction 'génotype*stress' en troisième position et l'erreur expérimentale en dernier (Tableau 2). Des résultats similaires sont rapportés dans la littérature par plusieurs auteurs dont **Almaghrabi (2012)**, **Španić et al. (2017)** et **Othmani et al. (2021)**.

II.1.1. Effet moyen 'génotype'

L'analyse du tableau indique que les valeurs moyennes prises par les caractères étudiés sont variables en fonction du caractère lui-même, du génotype et du niveau de stress appliqué. Le pourcentage final de germination varie de 22%, valeur minimale obtenue chez Oued Zenati 368 (G10) à 60.1 %, valeur maximale mesurée chez BDbaa 1920/22 (G1) autour d'une moyenne générale de l'essai de 44.9% et une plus petite différence significative de

15.4% (Tableau 3). D'après les normes de l'association internationale d'essais de semences (ISTA, 2019), une semence dont le pourcentage de germination en conditions optimales est inférieur à 85% est considérée comme une semence de mauvaise qualité. Le pouvoir germinatif des graines dépend majoritairement des conditions dans lesquelles on les place. Selon Côme (1970), les causes de la variabilité des propriétés germinatives sont multiples et dépend surtout du patrimoine héréditaire. Cette hétérogénéité est due essentiellement à trois catégories de facteurs : les conditions de développement des semences sur la plante, les conditions de conservation des graines et les conditions de germination (Mazliak, 1982).

Les valeurs moyennes de l'effet moyen 'génotype' (tous les niveaux de stress sont inclus) concernant le pourcentage de germination obtenues dans la présente contribution sont réduites en conditions indiquant surtout l'effet du stress hydrique imposé en milieu de culture associé à la qualité de la semence utilisée (Nijenstein *et al.*, 2008). Dans ce contexte, Alam *et al.* (2005) rapportent qu'il est nécessaire de combiner les informations au sujet du % de germination sous stress hydrique avec celle de la qualité de la semence pour pouvoir faire la différence entre les variétés qui germent faiblement parce qu'elles sont génétiquement sensibles aux stress hydriques, de celles qui germent faiblement parce que la semence est de mauvaise qualité.

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

Génotype	%G	MGT	GI	MDG
G1	60.1 ^a	3.2 ^{abc}	17.9 ^{abc}	8.6 ^a
G2	46.1 ^{ab}	3.9 ^a	17.5 ^{abc}	6.6 ^{ab}
G3	48.8 ^{ab}	3.6 ^{ab}	15.0 ^{bcd}	7.0 ^{ab}
G4	40.0 ^b	2.7 ^{bcd}	13.3 ^{cd}	5.7 ^b
G5	44.2 ^b	2.2 ^{cd}	17.2 ^{abcd}	6.3 ^b
G6	47.7 ^{ab}	2.1 ^d	18.8 ^{ab}	6.8 ^{ab}
G7	50.4 ^{ab}	2.6 ^{bcd}	20.0 ^a	7.2 ^{ab}
G8	49.0 ^b	2.7 ^{bcd}	17.6 ^{abc}	7.0 ^{ab}
G9	40.2 ^b	2.4 ^{cd}	12.5 ^d	5.7 ^b
G10	22.0 ^c	2.1 ^d	6.2 ^e	3.1 ^c
Moyenne	44.9	2.7	15.6	6.4
Ppds (5%)	15.4	1.0	4.7	2.2

%G = pourcentage final de germination (%), MGT = Temps moyen de germination (jours), GI = Indice de germination, MDG = Germination moyenne journalière (%). Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

Concernant les autres variables associées au pourcentage de germination, on constate que les valeurs prises par le temps moyen de germination oscillent entre 2.1 jours, valeur

minimale observée chez les cultivars locaux Mohamed Ben Bachir (G6) et Oued Zenati 368 (G10) et 3.9 jours, valeur maximale obtenue chez le génotype nouvellement sélectionné BDbaa 1920/23 (G2) avec une moyenne générale de caractère de 2.7 jours et une plus petite différence significative de 1.0 jour (Tableau 3).

Le génotype Oued Zenati 368 (G10) se distingue aussi par l'indice de germination (6.2 %) et la germination moyenne journalière (3.1 %) les plus réduits. T. Polo x ZB (G7) et BDbaa 1920/22 (G1) exhibent, respectivement, les valeurs les plus élevées (20 et 8.6%) pour ces deux caractères dont les moyennes générales sont 15.6 et 6.4% et les plus petites différences significatives sont de 4.7 et 2.2% dans le même ordre (Tableau 3).

La tolérance à la sécheresse pendant la germination est un critère important pour l'identification de variétés de blé dur capable de supporter un déficit hydrique pendant la première phase de développement. Des différences génotypiques de sensibilité au stress hydrique, au stade de germination, ont été signalées par plusieurs auteurs dont **Boudiar et al. (2019)** et **Lamara et al. (2021)**.

II.1.2. Effet moyen 'stress'

L'analyse de variance a révélé un effet 'stress' très hautement significatif pour l'ensemble des caractères mesurés (Tableau 2) et qui explique la partie majeure de la variation totale observée. Le tableau 4 montre les valeurs moyennes extrêmes minimales et maximales des caractères mesurés en fonction de la dose du stress hydrique appliqué (tous les génotypes sont inclus). Les résultats montrent que les valeurs de tous les caractères sont réduites à mesure que le degré de stress hydrique augmente en intensité.

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

Traitement	%G	MGT	GI	MDG
T0	94.6 ^a	2.9 ^a	36.4 ^a	13.5 ^a
T1	37.8 ^b	3.9 ^b	9.9 ^b	5.4 ^b
T2	2.2 ^c	1.4 ^c	0.5 ^c	0.3 ^c
Moyenne	44.9	2.7	15.6	6.4
Ppds (5%)	8.5	0.5	2.6	1.2

%G = pourcentage final de germination (%), MGT = Temps moyen de germination (jours), GI = Indice de germination, MDG = Germination moyenne journalière (%). Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

Le pourcentage final de germination a passé de 94.6% en absence de stress (T0) à 2.2 % en présence de 300 g/l de PEG6000 (T2) autour d'une moyenne générale de 44.9% et une plus petite différence significative de 8.5%. On note aussi le même effet sur l'indice de

germination dont la moyenne a diminué de 36.4% en T0 à 0.5% en T2 avec une moyenne générale de 15.6% et une plus petite différence significative de 2.6%. La germination moyenne journalière a pris la même tendance en se régressant de 13.5% en absence de stress (T0) à 0.3% en présence de stress sévère (T2), la moyenne générale de l'essai est de 6.4% et la plus petite différence significative est de 1.2%. Le temps moyenne de germination des génotypes testés a, par contre, connu une augmentation en présence de stress modéré (3.9 jours en T1) relativement au témoin (2.9 jours en T0) avant de chuter (1.4 jours) sous stress sévère (T2) induit par la présence de 300 g/l de PEG6000.

D'après la figure 1, les moyennes de tous les caractères sont réduites à mesure que la concentration de PEG6000 est augmentée et chaque dose est classée dans un groupe statistique distinct, à l'exception MGT à T1 qui surpasse le témoin (Tableau 4). **Abdoli et Saeidi (2012), Almaghrabi (2012), Dodig et al. (2015), Alam et al. (2020) et Othmani et al. (2021)** ont également observé la relation inversée entre la sévérité du stress hydrique induit par le PEG et le temps moyen de germination. Une telle réponse est due au fait qu'il faut plus de temps pour germer sous le stress osmotique (**Ahmad et al., 2017**). **Fuller et Hamza (2013)** ont affirmé que la vitesse de germination la plus élevée n'était pas toujours associée au pourcentage de germination le plus important. Toutefois, cette réponse reste prépondérante de l'intensité du stress appliqué. Les réductions/augmentations, relativement au témoin T0, sont de l'ordre de -60.1, 33, -72.8 et -60.1% pour T1 et -97.7, -53.2, -98.6, -97.7% pour T2, respectivement pour %G, MGT, GI et MDG (Figure 1).

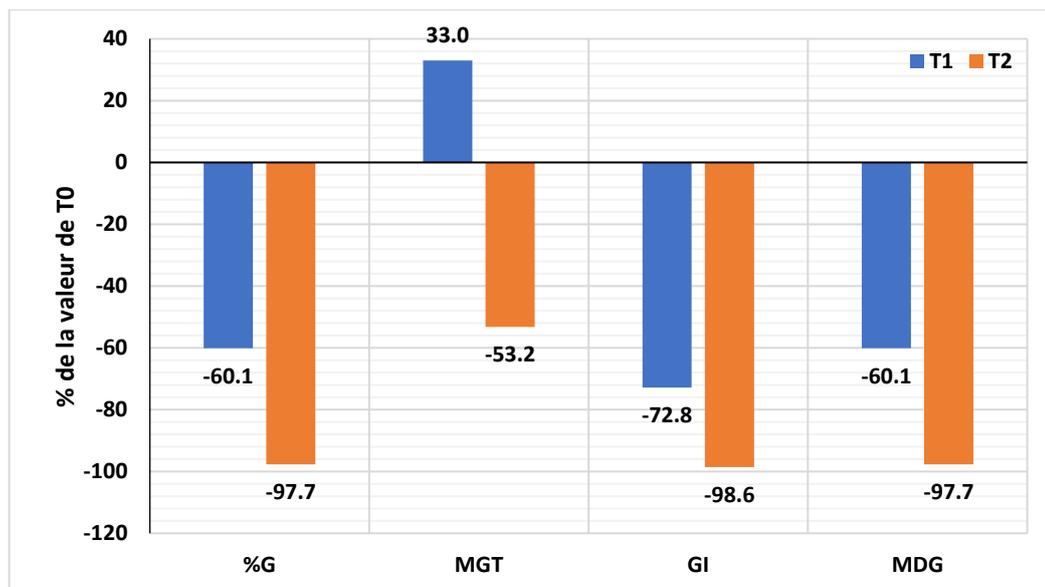


Figure 1 : Réduction/augmentation (en %) des variables mesurées en T1 et T2 relativement au témoins T0 des génotypes étudiés.

Alaei *et al.* (2010), Metwali *et al.* (2011), Tamiru et Ashagre (2014) et Mazandarani et Abdi (2017) ont rapporté une réponse variable des cultivars de blé pour les paramètres de germination à divers niveaux de stress abiotique. Les résultats de la présente étude sont en cohérence avec ceux précédemment rapportés dans la littérature selon laquelle certains critères de germination peuvent être utilisés pour sélectionner des cultivars tolérants à la sécheresse (Qayyum *et al.*, 2011).

La figure 2 représente la cinétique de germination des grains des 10 variétés de blé dur (effet moyen) en fonction de l'intensité du stress appliqué et ce pendant les sept jours de l'expérience. Cette figure montre une variation différentielle de la cinétique de germination par rapport aux trois traitement étudiés (T0, T1, T2). En effet, pour les trois intensités du stress le taux de germination emprunte une évolution différente pouvant être divisée en trois phases. Une phase latence durent les 24 heures qui suivent la mise en germination, durant laquelle le pourcentage de germination reste nul en T1 et T2, et très faible de l'ordre de 3% en T0. Une phase exponentielle entre 1 et 4 jours pour T1 et 5 jours pour T2, durant laquelle les pourcentages de germination connaissent une augmentation forte chez T0, moyenne chez T1 et négligeable chez T2. La troisième phase stationnaire correspond à un palier où les pourcentages cumulés de germination augmentent lentement (cas de T0) dans un premier temps pour se maintenir après jusqu'à la fin de l'expérience qui représente le pourcentage final de la germination. En moyenne, tous les génotypes de blé dur ont atteint le pourcentage final de germination après cinq jours de l'essai (Figure 2).

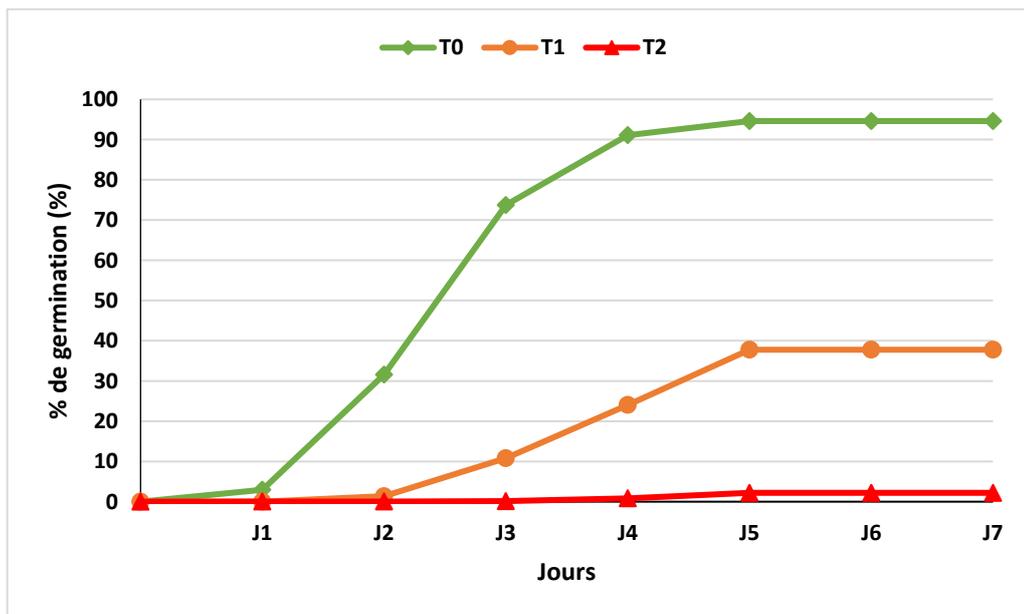


Figure 2 : Cinétique de germination des grains de blé dur en fonction de l'intensité du stress.

Almaghrabi (2012) a indiqué que le stress hydrique au stade germination peut entraîner une germination retardée et réduite ou peut complètement l’empêcher. De la figure 2, il semble que la concentration 150 g/l de PEG6000 est convenable pour faire un screening des génotypes de blé et une sélection pour la tolérance au stress hydrique au stade juvénile dans des expériences ultérieures.

II.1.3. Effet de l’interaction ‘génotype*stress’

Dans la mesure de faciliter l’interprétation des interactions ‘génotype*stress’ pour la variable pourcentage final de germination, nous nous sommes basé sur l’étude des valeurs prises par les écarts résultant des différences entre les moyennes de chaque génotype aux doses T1 (150 g/l PEG6000) et T2 (300 g/l PEG6000) relativement au témoin non stressé (T0 0 g/l PEG6000). Le degré de tolérance de telle variété est alors jugé par les valeurs des écarts générés ; plus la valeur de l’écart est importante moins le génotype est tolérant et vice versa. A une dose de stress modérée (T1), les écarts obtenus varient de -19.6% pour le génotype nouvellement sélectionné BDbaa 1920/22 (G1) à -97.4 % pour Oued Zenati 368 (G10). L’ordre de tolérance des génotypes ainsi testés est : G1 > G6 > G7 > G3 > G8 > G5 > G2 > G9 > G4 > G10 (Figure 3).

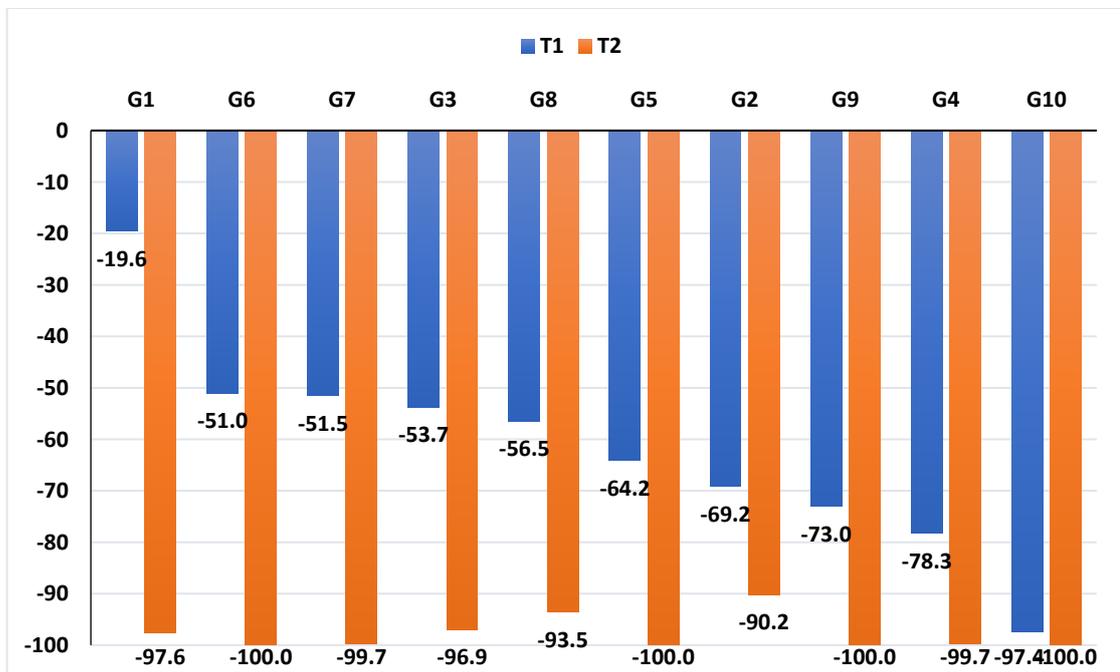


Figure 3 : Réduction du % de germination des traitements T1 et T2 relativement au témoins T0 des génotypes étudiés.

A une dose de stress plus sévère (T2), les écarts obtenus approchent les 100% suggérant l’effet dépressif du stress hydrique et la sensibilité de l’ensemble des génotypes à

cette forte dose de stress osmotique imposé. Ce résultat suggère que 300 g/l de PEG6000 ne se manifeste pas comme étant une bonne dose pour faire la discrimination entre les géotypes testés. Néanmoins, la nouvelle sélection BDbaa 1920/23 (G2) suivie du cultivar local Hedba3 (G8) semblent ceux les plus tolérants par rapport aux autres géotypes (Figure 3).

L'induction de la germination n'est possible qu'au présence de certaines caractéristiques géotypiques ainsi que par des conditions environnementales. La quantité et la qualité de l'eau joue le rôle indispensable (imbibition) et doit être disponible dans le milieu extérieur en quantité suffisante (**Heller et Ensault, 2004**). Le stress hydrique quel que soit le stade pendant lequel, elle survient, affecte tous les processus physiologique, morphologique et biochimique de la plante. Les plantent répondent au déficit hydrique par des modifications morphologiques, physiologiques et métaboliques diverses (**Temagoult, 2009**). L'inhibition de la germination résulte en particulier d'une difficulté d'hydratation des tissus, qui se répercute sur le processus d'élongation de la racine et d'une difficulté de la pénétration de la molécule d'eau dans les graines, ce qui ne favorise pas l'ajustement osmotique (**Ahmad et al., 2018**).

II.2. Paramètres de croissance

L'analyse de la variance met en relief un effet 'géotype' significatif ($p < 0.05$) à très hautement significatif ($p < 0.001$) pour l'ensemble des caractères mesurés pendant la phase post-germination, hormis le nombre de racines et la matière fraîche aérienne pour lesquels aucune différence n'est révélée (Tableau 5). L'effet 'stress' est hautement à très hautement significatif pour tous les caractères et celui de l'interaction 'géotype*stress' est significatif à très hautement significatifs pour la plupart des variables évaluées sauf les matières fraîches racinaires et aériennes (Tableau 5).

Un effet 'géotype' significatif suggère la présence de la variabilité génétique à l'intérieur du matériel végétal étudié, caractéristique fortement recherché dans tous programme de sélection végétale. Un effet 'stress' hautement à très hautement significatif signifie que les différentes concentrations de PEG6000 appliquées dans le milieu de culture des plantules de blé ont des réactions différentes sur les paramètres mesurés et soumis à l'analyse. Une interaction 'géotype*stress' significative à très hautement significative indique que les géotypes étudiés ont des comportements différents vis-à-vis du stress hydrique et leur réponse est variable en fonction de la dose appliquée. Parmi les trois sources de variation suscitées et celle due à l'erreur expérimentale, l'effet 'stress' explique la quasi-

totalité de la variation totale observée comme indiqué par les valeurs prises par le carré moyen de l'analyse de la variance et ce pour l'ensemble des caractères mesurés.

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

SV	ddl	NR	LR	LC	LF	MFR	MFA
Génotype	9	1.5 ^{ns}	20.8 ^{**}	27.9 ^{***}	74.3 ^{***}	275.6 [*]	32140.9 ^{ns}
Stress	2	88.7 ^{***}	408.9 ^{***}	85.1 ^{***}	2007.6 ^{***}	640.3 ^{**}	136033.7 ^{**}
Génotype*Stress	18	3.1 [*]	16.0 ^{**}	6.5 ^{**}	27.8 ^{***}	132.9 ^{ns}	10918.6 ^{ns}
Erreur	90	1.5	7.1	2.6	6.8	116.7	17066.1

SV = Source de variation, NR = Nombre de racines, LR = Longueur des racines, LC = Longueur du coléoptile, LF = Longueur de la 1^{ère} feuille, MFR = Matière fraîche racinaire, MFA = Matière fraîche aérienne. ns, *, ** et *** = Effets non significatifs et significatifs au seuil de probabilité de 5%, 1% et 0.1%, respectivement

L'effet 'génotype' prend la deuxième position avant l'interaction 'génotype*stress' et l'erreur expérimentale qui se classe en dernier (Tableau 5). Nos résultats corroborent avec ceux de **Khakwani et Munir (2011)**, **Almaghrabi (2012)**, **Baloch et al. (2012)** et **Mazandarani et Abdi (2017)**.

II.2.1. Effet moyen 'génotype'

L'analyse du tableau 6 indique que les valeurs moyennes prises par les caractères mesurés sont variables en fonction du caractère lui-même et d'un génotype à un autre. Le nombre des racines varie de 4.6 racines, valeur minimale obtenue chez BDbaa 1920/24 (G3) et Mohamed Ben Bachir (G6) à 5.6 racines, valeur maximale mesurée chez BDbaa 1920/22 (G1) et BDbaa 1920/25 (G4) (Tableau 6). La moyenne générale de l'essai est de 5.1 racines et la plus petite différence significative est de 1.0 racine (Tableau 6).

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

Génotype	NR	LR	LC	LF	MFR	MFA
G1	5.6 ^a	6.8 ^{bcd}	1.7 ^c	8.6 ^e	8.8 ^{cd}	44.3 ^b
G2	5.2 ^{ab}	6.4 ^{cd}	1.6 ^c	7.8 ^e	10.7 ^{bcd}	57.0 ^b
G3	4.6 ^b	5.7 ^d	1.7 ^c	8.4 ^e	9.8 ^{bcd}	42.0 ^b
G4	5.6 ^a	7.5 ^{abcd}	2.1 ^c	9.6 ^{de}	10.1 ^{bcd}	42.8 ^b
G5	5.3 ^{ab}	7.7 ^{abcd}	3.7 ^b	12.2 ^{bc}	11.6 ^{abcd}	197.3 ^a
G6	4.6 ^b	8.9 ^{ab}	4.0 ^b	14.8 ^a	5.1 ^d	42.4 ^b
G7	5.0 ^{ab}	9.1 ^a	6.0 ^a	13.9 ^{ab}	17.8 ^{ab}	75.8 ^b
G8	5.2 ^{ab}	9.5 ^a	4.6 ^b	13.5 ^{ab}	9.6 ^{bcd}	145.1 ^{ab}
G9	5.3 ^{ab}	8.0 ^{abc}	2.0 ^c	11.3 ^{cd}	17.4 ^{abc}	78.1 ^b
G10	4.8 ^{ab}	6.1 ^{cd}	2.1 ^c	10.8 ^{cd}	20.3 ^a	88.3 ^b
Moyenne	5.1	7.6	2.9	11.1	12.1	81.3
Ppds (5%)	1.0	2.2	1.3	2.1	8.8	106.0

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). Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

Ces valeurs reflètent surtout l'effet du stress hydrique mais aussi celui de la qualité de la semence utilisée.

La longueur des racines varie de 5.7 cm, valeur minimale obtenue chez le génotype nouvellement sélectionné BDbaa 1920/24 (G3) à 9.5 cm, valeur maximale mesurée chez la variété locale Hedba3 (G8) (Tableau 6). La moyenne générale de l'essai est de 7.6 cm et la plus petite différence significative est de 2.2 cm (Tableau 6). Pour la longueur du coléoptile, les moyennes observées oscillent entre 1.6 cm, valeur minimale mesurée chez le génotype BDbaa 1920/23 (G2) à 6.0 cm, valeur maximale trouvée chez le cultivar T. Polo x ZB (G7) autour d'une moyenne générale de 2.9 cm et une plus petite différence significative de 1.3 cm (Tableau 6).

La longueur de la 1^{ère} feuille a varié de 7.8 cm pour le nouveau génotype BDbaa 1920/23 (G2) à 14.8 cm pour la variété locale Mohamed Ben Bachir (G6) avec une moyenne générale de cette variable de 11.1 cm et la plus petite différence significative est de 2.1 cm (Tableau 6). Les matières fraîches racinaires et aériennes varient, respectivement, de 5.1 et 42.0 mg pour Mohamed Ben Bachir (G6) et BDbaa 1920/24 (G3) à 20.3 et 197.3 mg pour Oued Zenati 368 (G10) et Djennah Khetifa (G5) avec des moyennes générales de 12.1 et 81.3 mg, dans le même ordre (Tableau 6).

II.2.2. Effet moyen 'stress'

Nous avons précédemment vu que l'analyse de variance a révélé un effet 'stress' hautement à très hautement significatif pour l'ensemble des caractères mesurés et qui explique la partie majeure de la variation totale observée (Tableau 6). Le tableau 7 montre les valeurs moyennes extrêmes minimales et maximales des caractères mesurés en fonction de la dose du stress hydrique appliqué. Les résultats montrent que les deux traitements de PEG6000 appliqués affectent négativement et significativement le comportement des variétés testées (Photo 3). Ainsi, les valeurs de tous les caractères sont réduites à mesure que le degré de stress hydrique augmente en intensité. Le nombre de racine a passé de 6.3 racines en absence de stress (T0) à 3.4 racines en présence de 300 g/l de PEG6000 (T2) autour d'une moyenne générale de 5.1 racines et une plus petite différence significative de 0.5 racines. On note aussi le même effet sur la longueur des racines dont la moyenne des 10 génotypes a diminué de 10.2 cm en T0 à 4.0 cm en T2 avec une moyenne générale de 7.6 cm et une plus petite différence significative de 1.2 cm. La longueur de coléoptile a régressé de 4.2 cm en absence de stress (T0) à 1.3 cm en présence de stress sévère (T2), autour d'une moyenne générale de 2.9 cm et une plus petite différence significative de 0.7 cm.



Photo 3 : Effet du stress hydrique modéré (T1) et sévère (T2) induit par le PEG6000 sur les paramètres de croissance du génotype BDBaa 1920/24 (G3) par rapport au témoin (T0).

De même, la longueur de la 1^{ère} feuilles a diminué de 15.7 cm en T0 à 2.9 cm en T2 avec une moyenne générale de 11.1 cm et une plus petite différence significative de 1.2 cm. Les matières fraîches racinaires et aériennes prennent les mêmes tendances en décroissant quant à elles de 14.9 et 129.3 mg à 7.5 et 16.4 mg, respectivement pour les mêmes traitements avec des moyennes générales de 12.1 et 81.3 mg dans ce même ordre (Tableau 7).

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

Traitement	NR	LR	LC	LF	MFR	MFA
T0	6.3 ^a	10.2 ^a	4.2 ^a	15.7 ^a	14.9 ^a	129.3 ^a
T1	5.6 ^b	8.6 ^b	3.3 ^b	14.6 ^a	13.9 ^a	98.2 ^a
T2	3.4 ^c	4.0 ^c	1.3 ^c	2.9 ^b	7.5 ^b	16.4 ^b
Moyenne	5.1	7.6	2.9	11.1	12.1	81.3
Ppds (5%)	0.5	1.2	0.7	1.2	4.8	58.0

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). Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

L'écart en % des valeurs prises par les six variables mesurées relativement aux valeurs maximales prises par le témoin (T0) indique que l'effet pénalisant de stress induit par le PEG6000 est variable suivant le caractère mesuré et l'intensité du stress appliqué (Figure 4). D'après la figure 4, le stress hydrique a réduit, respectivement, les moyennes de NR, LR, LC, LF, MFR et MFA à -10.8, -15.9, -19.7, -6.6, -6.4 et -24.1% pour la dose modérée (T1 = 150 g/l PEG6000), tous les génotypes inclus. Sous stress sévère (T2 = 300 g/l PEG6000), les régressions sont plus marquées, elles sont estimées à -45.4, -60.6, -68.1, -81.4, -49.4 et -87.3% dans le même ordre (Figure 4). Ces résultats montrent l'effet dépressif important, notamment en forte dose, du PEG6000 sur les différents caractères évalués. Ils sont en accord

avec ceux obtenus par plusieurs auteurs comme **Khan *et al.* (2013)** qui ont montré que le déficit hydrique réduit considérablement les raits de croissance. Cette réduction est due probablement à arrêt de la division et de l'élongation cellulaire au niveau de la racine, conduisant à une sorte de tubérisation qui consiste à une lignification du système racinaire permettant à la plante une << entrée en vie >> ralentie, en attendant que les conditions redeviennent favorables (**Vartanian, 1973**).

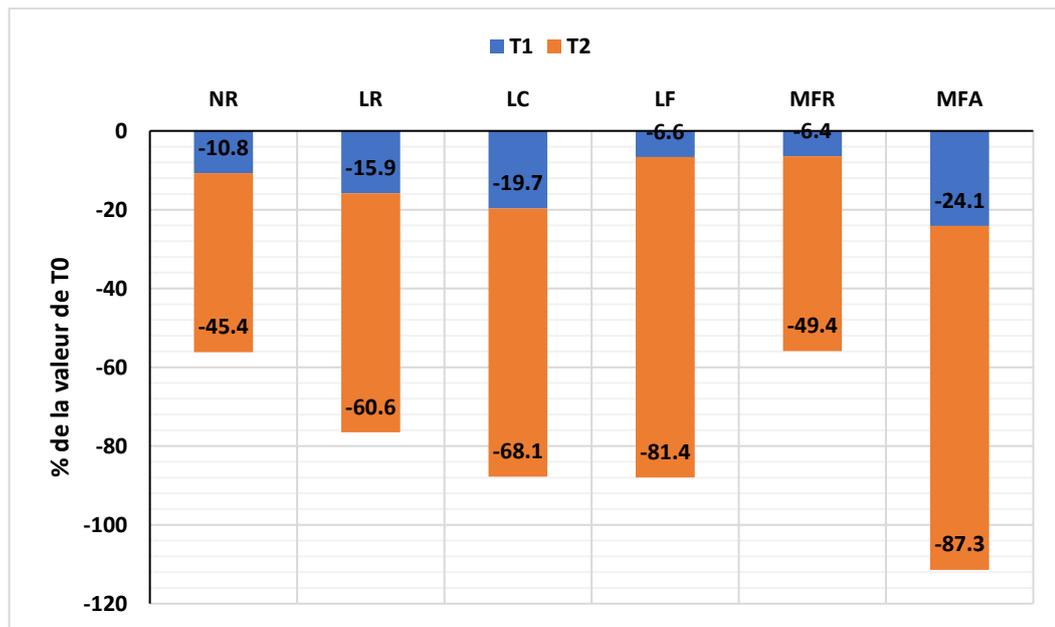


Figure 4 : Réduction (en %) des variables mesurées en T1 et T2 relativement au témoins T0 des génotypes étudiés.

Dans le même contexte, **Lamara *et al.* (2021)** ont mené une expérience visant à apprécier la tolérance, au stage juvénile, de 34 variétés algériennes, anciennes et modernes, de blé tendre au stress hydrique induit par le PEG6000 aux potentiels osmotiques de 0, -0.39 et -0.8 MPa. Leurs résultats montrent que les sensibilités au stress augmentent d'autant plus que le stress devient plus sévère. Sous -0.8 MPa, les régressions ont atteint 63.50, 62.99, 70.27, 71, 61.63 et 80.36%, respectivement, pour le pourcentage de germination, le nombre et la longueur de racines, la longueur du coléoptile et le poids des matières fraîches racinaire et aérienne.

D'après la figure 4, la matière fraîche aérienne semble le caractère le plus affecté par l'effet dépressif du PEG6000, suivie de ses deux composantes longueur de la 1^{ère} feuille et de du coléoptile. Selon **Zhu (2001)** la réduction de croissance des parties aériennes est une capacité adaptative nécessaire à la survie des plantes exposées à un stress abiotique. Par ailleurs. L'arrêt de l'apport en eau entraîne une réduction de la surface foliaire (donc la

biomasse aérienne) des plantes sous stress hydrique (**Parry et al., 2005 ; Lebon et al., 2006**). Cette diminution est une réponse à la déshydratation et contribue à la conservation des ressources en eau, ce qui permet la survie des plantes (**Lebon et al., 2004**). Sous ces 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 et dense, il peut conférer un avantage en augmentant l'apport en eau de la partie aérienne (**Temagault, 2009**). Les résultats de **Jain et al. (2013)**, **Razzaq et al. (2013)** ainsi que **Mujtaba et al. (2016)** démontrent une baisse appréciable de la teneur en chlorophylle des feuilles sous une concentration croissante de polyéthylène glycol 6000 (PEG-6000). De plus, la réduction du niveau de chlorophylle « a » était plus importante que celle de la chlorophylle « b ». La longueur de coléoptile est aussi une caractéristique variétale fortement influencée par les effets de milieu. Le stress hydrique pendant le stade jeune plantule peut inhiber le développement du coléoptile (**Bouhaouel et al., 2021**). La sensibilité de croissance en longueur de coléoptile au déficit hydrique a été évoquée par de nombreux résultats de recherche. Selon **Moud et Maghsoudi (2008)** une faible croissance du coléoptile est associée à une faible aptitude à l'osmorégulation. **Issaad (2003)** ainsi que **Zemour (2014)** ont observé une diminution accentuée de la longueur de coléoptile lorsque le déficit hydrique est d'autant plus élevé. Ces effets s'expriment par des contraintes dans le déroulement de la multiplication de la croissance cellulaires de cet organe.

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

Les résultats de l'analyse de la variance, à deux facteurs (génotype et stress) ont montré un effet d'interaction 'génotype*stress' significatif à très hautement significatif pour la plupart des caractères mesurés, hormis les matières fraîches aériennes et racinaires. La réponse des génotypes évalués est donc variable en fonction du génotype lui-même et du caractère mesuré. **Rana et al. (2017)** ont également observé que le degré de réduction de ces paramètres avec l'augmentation de la dose stress hydrique provoqué par le Polyéthylène glycol 6000 n'était pas similaire pour tous les génotypes de blé évalués. Afin 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 variété aux traitements T1 (150 g/l) et T2 (300 g/l) relativement au témoin non stressé T0 et ce pour chaque caractère. Le degré de tolérance d'un tel génotype est alors jugé en se basant sur les valeurs des écarts ainsi générés ; plus l'écart est important, moins le génotype est tolérant et vice versa. Pour cela nous avons adopté l'échelle proposée par **Fellahi et al. (2019)** qui considèrent un tel génotype

comme tolérant à une dose donnée si la valeur de l'écart généré est supérieure à -20%. Ce génotype est jugé comme sensible lorsque cet écart est inférieur à -40%. On le considère comme intermédiaire ou moyennement tolérant si la valeur de l'écart est comprise entre -20 et -40%.

Le tableau 8 montre les valeurs de réduction des six variables mesurées aux traitements T1 et T2 relativement au témoin T0 pour les 10 génotypes évalués. Les génotypes tolérants à une telle dose pour un tel caractère sont indiqués par un symbole vert (écart supérieure à -20%) ; ceux les plus sensibles (écart inférieure à -40%) sont signalés par un symbole rouge alors que ceux moyennement tolérants (écarts compris entre -20 et -40%) sont marqués par un symbole orange.

Tableau 8 : Réduction du % des paramètres de croissance aux traitements T1 et T2 relativement au témoins T0 des génotypes étudiés.

Génotype	Traitement	NR	LR	LC	LF	MFR	MFA
G1	T1	● -16.1	● -15.5	● -3.1	● -1.8	● 4.3	● -51.3
	T2	● -67.7	● -89.5	● -82.5	● -96.7	● -76.1	● -95.7
G2	T1	● -19.2	● -26.2	● -15.8	● -23.2	● 1.7	● -24.3
	T2	● -42.3	● -75.6	● -78.9	● -94.5	● -84.7	● -75.1
G3	T1	● -29.6	● -32.6	● -6.9	● -25.5	● -47.9	● -5.5
	T2	● -66.7	● -88.3	● -91.1	● -98.4	● -90.4	● -96.1
G4	T1	● -7.4	● -41.6	● -13.5	● -17.9	● -21.3	● -1.2
	T2	● -44.4	● -69.0	● -60.4	● -92.7	● -80.3	● -89.4
G5	T1	● -36.7	● -5.9	● -8.5	● -6.9	● 5.7	● -7.3
	T2	● -53.3	● -84.1	● -80.2	● -82.1	● -43.4	● -95.5
G6	T1	● -9.5	● -3.8	● -22.5	● -16.1	● -47.1	● -4.2
	T2	● -28.6	● -3.3	● -22.5	● -16.6	● -73.5	● -82.8
G7	T1	● -13.0	● -33.4	● -58.3	● -13.3	● -7.3	● -12.9
	T2	● -26.1	● -57.0	● -72.2	● -83.2	● 142.9	● -83.9
G8	T1	● 0.0	● -9.5	● -18.0	● -14.4	● -37.3	● -64.8
	T2	● -18.2	● -50.8	● -74.8	● -84.9	● -67.8	● -91.9
G9	T1	● -4.0	● -41.3	● -16.3	● -7.3	● -18.1	● -11.5
	T2	● -44.0	● -48.9	● -55.8	● -85.8	● -59.6	● -84.8
G10	T1	● 8.7	● -0.3	● -10.3	● -6.5	● -20.9	● -19.8
	T2	● -56.5	● -46.0	● -79.5	● -93.8	● -57.3	● -61.9

NR = Nombre de racines, LR = Longueur des racines, LC = Longueur du coléoptile, LF = Longueur de la 1^{ère} feuille, MFR = Matière fraîche racinaire, MFA = Matière fraîche aérienne.

Pour le nombre des racines (NR), les résultats montrent que tous les génotypes de blé dur étudiés sont tolérants au stress modéré (T1 = 150 g/l PEG6000), à l'exception de BDdm 1920/03 (G3) et Oued Zenati 368 (G5) qui sont moyennement tolérants. Sous stress sévère (T2 = 300 g/l PEG6000), nos résultats permettent de qualifier Hedba3 (G8) comme un

génotype tolérant, Mohamed Ben Bachir (G6) et T. Polo x ZB (G7) comme des cultivars moyennement tolérants. Les génotypes restants sont considérés comme sensibles (Tableau 8).

Concernant la longueur des racines (LR), cinq génotypes sont considérés comme tolérants au stress sous une dose de 150 g/l de PEG6000 (T1). Ces génotypes sont BDbaa 1920/22 (G1), Djennah Khetifa (G5), Mohamed Ben Bachir (G6), Hedba3 (G8) et Oued Zenati 368 (G10). Les génotype BDbaa 1920/23 (G2), BDbaa 1920/24 (G3) et T. Polo x ZB (G7) sont moyennement sensibles alors que BDbaa 1920/25 (G4) et Bidi 17 (G9) sont hautement sensibles sous cette dose. Les résultats obtenus montrent aussi que tous les génotypes sont sensibles au stress hydrique sous forte dose (T2), à l'exception du cultivar local Mohamed Ben Bachir (G6) qui demeure tolérant (Tableau 8).

L'écart (%) des valeurs prises par le caractère longueur de coléoptile (LC) montre qu'à l'exception de Mohamed Ben Bachir (G6), moyennement sensible et T. Polo x ZB (G7), sensible au stress hydrique modéré (T1), tous les autres génotypes sont tolérants. Sous forte dose de stress (T2), tous les génotypes sont devenus sensibles mis à part la variété locale Mohamed Ben Bachir (G6) qui demeure moyennement sensible (Tableau 8).

Les résultats pris par les écarts associés au caractère longueur de la 1^{ère} feuille (LF) marquent les deux nouvelles obtentions BDbaa 1920/23 (G2) et BDbaa 1920/24 (G3) comme moyennement sensibles et les huit génotypes restants comme tolérants au stress modéré (T1) à 150 g/l de PEG6000. Sous stress sévère (T2) à 300 g/l de PEG6000, seulement la variété Mohamed Ben Bachir (G6) présente une bonne tolérance, les autres génotypes sont tous sensibles (Tableau 8).

En ce qui concerne la matière fraîche racinaire (MFR), sous le traitement modéré (T1), les génotypes tolérants sont BDbaa 1920/22 (G1), BDbaa 1920/23 (G2), Djennah Khetifa (G5) T. Polo x ZB (G7) et Bidi 17 (G9). Sous la même dose, BDbaa 1920/25 (G4), Hedba3 (G8) et Oued Zenati 368 (G10) sont moyennement sensibles alors que BDbaa 1920/24 (G3) et Mohamed Ben Bachir (G6) sont fortement sensibles. Sous le traitement sévère (T2), seul le cultivar local T. Polo x ZB (G7) est tolérant, les autres génotypes sont tous sensibles (Tableau 8).

Deux génotypes à savoir BDbaa 1920/22 (G1) et Hedba3 (G8) sont sensibles au stress hydrique à la dose modérée (T1) concernant le caractère matière fraîche aérienne (MFA). BDbaa 1920/23 (G2) est moyennement sensible par contre tous les autres génotypes sont

tolérants. Sous la concentration sévère (T2), tout le matériel végétal a montré sa sensibilité au stress (Tableau 8).

Globalement, nos résultats montrent clairement que lorsque la dose de stress augmente, une diminution appréciable des caractères mesurés est observée. Toutefois cette réduction reste dépendante du génotype testé et du caractère évalué (Tableau 8). Dans la mesure de bien juger le comportement des génotypes testés et identifier ceux sensibles et ceux tolérants ayant la capacité à accumuler plus de matières fraîches dans leurs les feuilles et racines sur tous les traitements de PEG6000, nous avons effectué un classement des génotypes, en se basant sur les valeurs prises par les écarts précédemment discutés par caractère et par traitement. Plus l'écart est important, moins le génotype est tolérant de par le caractère et à la dose considérés ; il se positionne alors en bas de la liste des génotypes. La somme des rangs est par la suite calculée par génotype en additionnant les valeurs des classements obtenues. Cette caractéristique est utilisée comme un critère de distinction entre les génotypes testés, moins la somme des rangs est réduite plus le génotype est tolérant et vice versa (Prakash *et al.*, 2015 ; Dodig *et al.*, 2015 ; Bentouati *et al.*, 2021 ; Lamara *et al.*, 2021).

L'ordre de classement et la somme des rangs obtenus sont résumés dans le tableau 9. Les résultats indiquent que le classement des génotypes varie en fonction du caractère et de la dose de stress appliquée.

Tableau 9 : Classement des génotypes étudiés en fonction du caractère et de l'intensité de stress appliqué.

Génotype	NR		LR		LC		LF		MFR		MFA		Somme des rangs
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
G1	7	10	5	10	1	9	1	9	2	7	9	9	79
G2	8	4	6	7	6	6	9	8	3	9	8	2	76
G3	9	9	7	9	2	10	10	10	10	10	3	10	99
G4	4	6	10	6	5	3	8	6	7	8	1	6	70
G5	10	7	3	8	3	8	3	2	1	2	4	8	59
G6	5	3	2	1	9	1	7	1	9	6	2	3	49
G7	6	2	8	5	10	4	5	3	4	1	6	4	58
G8	2	1	4	4	8	5	6	4	8	5	10	8	65
G9	3	5	9	3	7	2	4	5	5	4	5	3	55
G10	1	8	1	2	4	7	2	7	6	3	7	4	52

NR = Nombre de racines, LR = Longueur des racines, LC = Longueur du coléoptile, LF = Longueur de la 1^{ère} feuille, MFR = Matière fraîche racinaire, MFA = Matière fraîche aérienne.

Les valeurs de la somme des rangs varient de 49, valeur minimale prise par Mohamed Ben Bachir (G6), à 99, valeur maximale notée chez BDbaa 1920/24 (G3). Mohamed Ben Bachir (G6) est, donc, le cultivar le plus tolérant parmi tous les génotypes de blé dur testés alors que BDbaa 1920/24 (G3) est celui le plus sensible en prenant la première et la dernière position, respectivement. La réponse différente des cultivars à ces traitements de stress osmotique suggère une grande variation génétique parmi les cultivars qui pourraient être utilisées pour développer de nouveaux cultivars de blé adaptés aux régions arides et semi-arides. **Prakash *et al.* (2015)** ont conclu que la mesure du degré de tolérance au stress par le biais des indices varie avec la sévérité du stress et fournit une plate-forme efficace pour le criblage rapide des génotypes tolérants et puissant au stade jeune plantule. Dans ce contexte, **Boudiar *et al.* (2019)** ont mené une recherche dont le but d'identifier les traits et les génotypes d'importance majeur dans la tolérance au stress hydrique au stade précoce. D'après leurs résultats, les variétés algériennes locales (landraces) de blé dur, cultivées depuis longtemps dans la région, pourraient être introduites dans les programmes de sélection pour la tolérance à la sécheresse de par leur bonne tolérance au stress induit par le PEG6000 comparativement à certaines variétés modernes largement cultivées (Waha, Vitron et Wahbi) et qui sont répertoriées parmi les génotypes les plus sensibles dans cette étude.

II.3. Corrélations inter-caractères

Le coefficient de corrélation mesure le degré de la relation entre deux variables qui varient de façon concomitante, avec des effets qui se renforcent mutuellement. Le tableau 10 montre les coefficients de corrélation phénotypique entre les variables mesurées chez les génotypes de blé dur testés. Les résultats indiquent que la plupart des caractères exhibent des associations positives et significatives les uns des autres, suggérant que la variation d'un tel caractère induit des changements de l'ensembles des autres variables qui se traduisent ensemble par une augmentation ou une diminution de la biomasse totale (racinaire et aérienne) accumulée. Ceci offre au sélectionneur la possibilité d'utiliser l'ensemble des caractères évalués comme des critères de sélection dans les programmes d'amélioration de la tolérance au stress hydrique au stade de développement précoce. Les résultats de la présente étude corroborent les conclusions de plusieurs auteurs dont **Khan *et al.* (2013)**, **Španić *et al.* (2017)**, **Thabet *et al.* (2018)**, **Ahmed *et al.* (2019)**, **Shirazi *et al.* (2019)**, **Cai *et al.* (2021)** et **Othmani *et al.* (2021)** qui rapportent des liaisons fortes entre les différents paramètres mesurés au stade juvénile en étudiant l'effet du stress hydrique induit par le Polyéthylène glycol sur plusieurs espèces céréalières dont les blés dur et tendre, l'orge, le riz et le maïs.

Tableau 10 : Coefficients de corrélation phénotypique (en dessus de la diagonale) et leurs probabilités respectives (en dessous de la diagonale) estimées entre les caractères mesurés.

Variables	%G	MGT	GI	MDG	NR	LR	LC	LF	MFR	MFA
%G		0.3981	0.9685	1.0000	0.7682	0.8018	0.5619	0.7283	0.3167	0.5116
MGT	0.0293		0.2542	0.3981	0.4686	0.2846	0.1560	0.4319	0.1683	0.2832
GI	< 0.0001	0.1753		0.9685	0.7012	0.7736	0.6225	0.6874	0.2610	0.5214
MDG	< 0.0001	0.0293	< 0.0001		0.7682	0.8018	0.5619	0.7283	0.3167	0.5116
NR	< 0.0001	0.0090	< 0.0001	< 0.0001		0.7731	0.4194	0.7476	0.5125	0.4844
LR	< 0.0001	0.1274	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001		0.7653	0.8908	0.3809	0.6173
LC	0.0012	0.4104	0.0002	0.0012	0.0210	< 0.0001		0.7744	0.1956	0.6069
LF	< 0.0001	0.0171	< 0.0001		0.4146	0.6618				
MFR	0.0882	0.3739	0.1636	0.0882	0.0038	0.0378	0.3003	0.0227		0.3423
MFA	0.0039	0.1294	0.0031	0.0039	0.0067	0.0003	0.0004	< 0.0001	0.0641	

%G = pourcentage final de germination, MGT = Temps moyen de germination, GI = Indice de germination, MDG = Germination moyenne journalière, NR = Nombre de racines, LR = Longueur des racines, LC = Longueur du coléoptile, LF = Longueur de la 1^{ère} feuille, MFR = Matière fraîche racinaire, MFA = Matière fraîche aérienne. Les valeurs en gras sont statistiquement significative au seuil de probabilité de 5%.

Conclusión

Conclusion

L'amélioration génétique du blé dur des zones sèches reste basée sur la recherche d'une meilleure tolérance aux stress abiotiques, pour adapter la plante, à la variabilité du milieu de production. Cependant, l'impact de ce stress abiotique sur la productivité des céréales en générale et le blé dur en particulier, est tributaire de son intensité et le temps de sa persévérance. Les travaux effectués dans cette étude ont porté sur l'évaluation de la tolérance au stress hydrique, induit par le polyéthylène glycol 6000 (PEG6000), de dix génotypes de blé dur (locaux et introduits), soumis à différents niveaux de stress (0%, 15% et 30%) appliqués au stade germinatif des graines et le développement des jeunes plantules.

Les résultats indiquent la présence d'une variabilité génétique à l'intérieur du matériel génétique évalué pour l'ensemble des caractères mesurés. Ces derniers subissent des modifications majeures sous l'effet des différentes concentrations de stress hydrique appliqué. Le pourcentage final de germination a diminué de 94.6% en absence de stress (T0) à 2.2 % en présence de 300 g/l de PEG6000 (T2) en passant par 37.8% sous stress modéré (T1 = 150 g/l de PEG6000) soit des régressions de l'ordre de -60.1 et -97.7%, respectivement pour T1 et T2. On note aussi le même effet sur les autres paramètres de germination dont les réductions/augmentations enregistrées sont estimées à +33.0, -72.8 et -60.1% pour T1 et -53.2, -98.6, -97.7% pour T2, respectivement pour le temp moyenne de germination, l'indice de germination et la germination moyenne journalière.

La même tendance est marquée pour l'ensemble des paramètres de croissance étudiés, toutefois cette réduction reste dépendante du génotype testé et du type d'organes mesuré telle qu'il est indiqué par l'interaction génotype*stress de l'analyse de la variance. Le classement des génotypes est alors variable en fonction du caractère et de la dose de stress appliquée. Mohammed Ben Bachir (G6) est le génotype le plus tolérant parmi tous les génotypes de blé dur testés alors que BDbaa 1920/24 (G3) est celui le plus sensible.

Les résultats indiquent aussi que la plupart des caractères exhibent des associations positives et significatives les uns des autres, suggérant que la variation d'un tel caractère induit des changements de l'ensembles des autres variables qui se traduisent ensemble par une augmentation ou une diminution de la biomasse totale (racinaire et aérienne) accumulée. Ceci offre au sélectionneur la possibilité d'utiliser l'ensemble des caractères évalués comme des critères de sélection dans les programmes d'amélioration de la tolérance au stress hydrique au stade de développement précoce.

Conclusion

En termes de perspectives, il serait souhaitable d'élargir l'étude sur plusieurs stades du cycle de développement de la plante, faire une étude génétique sur le mode de transmission et de l'héritabilité des caractères repérés, et d'incorporer les outils de la biotechnologie par la recherche de marqueurs moléculaires comme bons indicateurs de la tolérance au stress hydrique. Ceux-ci réduiraient grandement les effets de l'interaction géotypes × environnement et offrent l'avantage d'une sélection efficace, rapide et précoce.

*Références
Bibliographiques*

Références bibliographiques

- Abdoli, M., & Saeidi, M. (2012).** Effects of water deficiency stress during seed growth on yield and its components, germination and seedling growth parameters of some wheat cultivars. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(15): 1110-1118.
- Abeledo, L. G., Savin, R., & Slafer, G. A. (2008).** Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *European Journal of Agronomy*, 28(4): 541-550.
- Adjel F., Bouzerzour H., & Benmahammed A. (2013).** Salt stress effects on seed germination and seedling growth of barley (*Hordeum Vulgare* L.) Genotypes. *Journal of Agriculture and Sustainability*, 3(2): 223-237.
- Ahmad, N. S., Kareem, S. H., Mustafa, K. M., & Ahmad, D. A. (2017).** Early screening of some Kurdistan wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under drought stress. *Journal of Agricultural Science*, 9(2): 88-103.
- Ahmad, Z., Waraich, E. A., Akhtar, S., Anjum, S., Ahmad, T., Mahboob, W., Hafeez, O., Tapera, T., Labuschagne, M., & Rizwan, M. (2018).** Physiological responses of wheat to drought stress and its mitigation approaches. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(4): 1-13.
- Ahmed, H. G. M. D., Sajjad, M., Li, M., Azmat, M. A., Rizwan, M., Maqsood, R. H., & Khan, S. H. (2019).** Selection criteria for drought-tolerant bread wheat genotypes at seedling stage. *Sustainability*, 11(9): 2584.
- Alaei, M., Zaefizadeh, M., Khayatnezhad, M., Alaei, Z., & Alaei, Y. (2010).** Evaluation of germination properties of different durum wheat genotypes under osmotic stress. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 6(6): 642-646.
- 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.
- Almaghrabi, O. A. (2012).** Impact of drought stress on germination and seedling growth parameters of some wheat cultivars. *Life Science Journal*, 9(1): 590-598.
- Badr, A., El-Shazly, H. H., Tarawneh, R. A., & Börner, A. (2020).** Screening for drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) germplasm using germination and seedling traits under simulated drought conditions. *Plants*, 9(5): 565.
- Baloch, M. J., Dunwell, J., Khakwani, A. A., Dennett, M., Jatoi, W. A., & Channa, S. A. (2012).** Assessment of wheat cultivars for drought tolerance via osmotic stress imposed at early seedling growth stages. *Journal of Agricultural Research*, 50(3): 299-310.

Références bibliographiques

- Benjelloun M., Rais C., Wahid N., El Ghadraoui L., & Mhamdi M. A. (2013).** Evaluation de la tolérance de *Myrtus communis* L. au stress hydrique au stade germinatif. Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Vie, 35: 19-26.
- Benmahammed, A., Nouar, H., Haddad, L., Laala, Z., Abdelmalek, O., & Bouzerzour, H. (2010).** Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 14(1): 177-186.
- Bentouati, I., Fellahi, Z., & Safsaf, H. (2021).** *In vitro* screening of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes against salt stress at early growth stage. 1^{er} Séminaire National en Sciences Agronomiques (Webinaire) : Recherches à Vision Economique en Sciences Agronomiques. 15 & 16 Juin, 2021, M'Sila, Algérie.
- 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.
- Bouhaouel, I., Nasraoui, S., Boudabbous, K., Ayed-Slama, O., & Amara, H. S. (2021).** Response of Durum Wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*) to Root Exudate Autotoxicity and Osmotic Stress Depends on Variety Combination. Asian Journal of Research in Biosciences, 3(2): 6-13.
- Cai, K., Chen, X., Han, Z., Wu, X., Zhang, S., Li, Q., Nazir, M. M., Zhang, G., & Zeng, F. (2020).** Screening of worldwide barley collection for drought tolerance: The assessment of various physiological measures as the selection criteria. Frontiers in Plant Science, 11: 1159.
- CEIC. (2021).** Algeria's Durum Wheat production from 1975 to 2017. Retrieved from <https://www.ceicdata.com/en/algeria/agricultural-production/agriculture-productionvegetable--cereals-durum-wheat>
- 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, J. P., Huard, F., & Aïdaoui, A. (2016).** Climate change in Algeria and its impact on durum wheat. Regional Environmental Change, 16(6): 1623-1634.
- Côme, D. (1970).** Les obstacles à la germination. Masson & Cie, Paris, 135 p.

Références bibliographiques

- Dodig, D., Zoric, M., Jovic, M., Kandic, V., Stanisavljevic, R., & Surlan-Momirovic, G. (2015).** Wheat seedlings growth response to water deficiency and how it correlates with adult plant tolerance to drought. *The Journal of Agricultural Science*, 153(3): 466-480.
- Ellis, R. H., & Roberts, E. H. (1981).** The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. *Seed Science and Technology*, 9: 373-409
- Fellahi, Z., Hannachi, A., & Bouzerzour, H. (2018).** Analysis of direct and indirect selection and indices in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) segregating progeny. *International Journal of Agronomy*, vol. 2018, Article ID 8312857, 11 pages.
- Fellahi, Z., Zaghdoudi, H., Bensaadi, H., Boutalbi, W., & Hannachi, A. (2019).** Assessment of salt stress effect on wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars at seedling stage. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 84(4): 347-355.
- Fleury, D., Jefferies, S., Kuchel, H., & Langridge, P. (2010).** Genetic and genomic tools to improve drought tolerance in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 61(12): 3211-3222.
- Fukai, S., & Cooper, M. (1995).** Development of drought-resistant cultivars using physiological traits in rice. *Field Crops Research*, 40(2): 67-86.
- Fuller, M. P., & Hamza, J. H. (2013).** Effect of osmotic potential of activator solution and temperature on viability and vigour of wheat seed. *African Journal of Agricultural Research*, 8(22): 2786-2792.
- Haddad, L., Bachir, A., Ykhelef, N. 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., & Boutekrabt, 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.
- Heller, R., & Ensault, R. (2004).** *Physiologie végétale II, développement*. Ed., Dunod, paris. 64-240 p.
- Hernández, V. A. G., Cruz, E. L., Onofre, L. E. M., Varela, A. S., Espinosa, M. A. G., & García, F. Z. (2021).** Maize (*Zea mays* L.) landraces classified by drought stress tolerance at the seedling stage. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 33(1): 29-36.
- Issaad, G., (2013).** Statut nutritionnel et plasticité de réponses aux stress chez un modèle végétale: *Triticum durum* Desf. These de Doctorat, Univ Badji Mokhtar-Annaba, 140 p.

Références bibliographiques

- Jain, M., Mittal, M. & Gadre, R. (2013).** Effect of PEG-6000 imposed water deficit on chlorophyll metabolism in maize leaves. *Journal of stress Physiology & biochemistry*, 9(3): 262-271.
- Kaydan, D., & Yagmur, M. (2008).** Germination, seedling growth and relative water content of shoot in different seed sizes of triticale under osmotic stress of water and NaCl. *African Journal of Biotechnology*, 7(16): 2862-2868.
- Khakwani, A. A., Dennett, M. D., & Munir, M. (2011).** Early growth response of six wheat varieties under artificial osmotic stress condition. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 48: 121-126.
- Khan, M. I., Shabbir, G., Akram, Z., Shah, M. K. N., Ansar, M., & Cheema, N. M. (2013).** Character association studies of seedling traits in different wheat genotypes under moisture stress conditions. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 45(3): 458-467.
- Laaboudi, A., & Mouhouche, B. (2012).** Water requirement modelling for wheat under arid climatic conditions. *Hydrology: Current Research*, 3(4): 130.
- Lamara, A., Benguedoudj, S. & Fellahi, Z. (2021).** Etude comparative de la qualité technologique de 34 variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) cultivées en Algérie. *International Seminar on Biodiversity, Valorization and Conservation of Urban and Forest Ecosystems: (In support of sustainable development)*, 28-29 April 2021, M'Sila, Algeria.
- Lebon, E., Pellegrino, A., Tardieu, F., & Lecoeur, J. (2004).** Shoot development in grapevine (*Vitis vinifera*) is affected by the modular branching pattern of the stem and intra-and inter-shoot trophic competition. *Annals of Botany*, 93(3): 263-274.
- Lebon, E., Pellegrino, A., Louarn, G., & Lecoeur, J. (2006).** Branch development controls leaf area dynamics in grapevine (*Vitis vinifera*) growing in drying soil. *Annals of Botany*, 98(1), 175-185.
- Marcińska, I., Czyczyło-Mysza, I., Skrzypek, E., Filek, M., Grzesiak, S., Grzesiak, M. T., Janowiak, F., Hura, T., Dziurka, M., Dziurka, K., Nowakowska, A., & Quarrie, S. A. (2013).** Impact of osmotic stress on physiological and biochemical characteristics in drought-susceptible and drought-resistant wheat genotypes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(2): 451-461.
- Mazandarani, M. T. & Abdi, H. (2017).** Study of the Tolerance to Drought Stress Levels of (PEG 6000) in Different Genotypes of Wheat Germination Stage. *International Journal of Life-Sciences Scientific Research*, 3(1): 760-765.
- Mazliak, P. (1982).** *Physiologie végétale. Nutrition et métabolisme*, 530 p.

Références bibliographiques

- Mekaoussi, R., Rabti, A., Fellahi, Z., Hannachi, A., Benmahammed, A., & Bouzerzour, H. (2021).** Assessment of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes based on their agro-physiological characteristics and stress tolerance indices. *Acta agriculturae Slovenica*, 117(2): 1-16
- Metwali, E. M., Eid, M. H., & Bayoumi, T. Y. (2011).** Agronomical traits and biochemical genetics markers associated with salt tolerance in wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(5): 174-183.
- Moud, A., & 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.
- Mujtaba, S. M., Faisal, S., Khan, M. A., Mumtaz, S., & Khanzada, B. (2016).** Physiological studies on six wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought stress tolerance at seedling stage. *Agricultural Research and Technology: Open Access Journal*, 1(2): 1-6.
- Nijenstein, H., Don, R., & Nydam, J. (2008).** Comparison of oven moisture tests at 130°C vs. 103 °C. *Seed Testing International*, 135: 28-33.
- 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: 823-832.
- Parry, M. A. J., Flexas, J., & Medrano, H. (2005).** Prospects for crop production under drought: research priorities and future directions. *Annals of Applied Biology*, 147(3): 211-226.
- 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 Stress Management*, 6: 602-609.
- Qayyum, A., Razzaq, A., Ahmad, M., & Jenks, M. A. (2011).** Water stress causes differential effects on germination indices, total soluble sugar and proline content in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *African Journal of Biotechnology*, 10(64): 14038-14045.
- Rana, M. S., Hasan, M. A., Bahadur, M. M., & Islam, M. R. (2017).** Effect of polyethylene glycol induced water stress on germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum*). *The Agriculturists*, 15(1): 81-91.
- Ranal, M. A., & Santana, D. G. D. (2006).** How and why to measure the germination process?. *Brazilian Journal of Botany*, 29, 1-11.

Références bibliographiques

- Razzaq, A., Ali, Q., Qayyum, A., Mahmood, I., Ahmad, M., & Rasheed, M. (2013).** Physiological responses and drought resistance index of nine wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under different moisture conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 45(S1): 151-155.
- Scott, S. J., Jones, R. A., & Williams, W. (1984).** Review of data analysis methods for seed germination 1. *Crop Science*, 24(6): 1192-1199.
- Shiferaw, B., & Baker. A. A. (1999).** An evaluation of drought screening techniques for *Eragrostis tef*. In: Proc. New Genetical Approaches to crop improvement II. Ed. Naqvi, S.S.M. pp. 469-496.
- Shirazi, M., Khan, M., & Arif, M. (2019).** Effects of peg induced water stress on growth and physiological responses of rice genotypes at seedling stage. *Pakistan Journal of Botany*, 51(6): 2013-2021.
- Španić, V., Ižaković, M., & Marček, T. (2017).** Wheat germination and seedlings under PEG-induced conditions. *Agronomski glasnik: Glasilo Hrvatskog agronomskog društva*, 79(3): 99-109.
- Sultan, M. A. R. F., Hui, L., Yang, L. J., & Xian, Z. H. (2012).** Assessment of drought tolerance of some *Triticum* L. species through physiological indices. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 48(4): 178-184.
- Tamiru, S., & Ashagree, H. (2014).** *In vivo* evaluation of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars for moisture stress. *International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology*, 4(2): 55-60.
- Temagoult, M. (2009).** Analyse de la variabilité de la réponse au stress hydrique chez des lignes recombinantes de tournesol (*Helianthus annuus* L.). Mémoire de Magister, Univ Mentouri, Constantine, 106 p.
- Thabet, S. G., Moursi, Y. S., Karam, M. A., Graner, A., & Alqudah, A. M. (2018).** Genetic basis of drought tolerance during seed germination in barley. *PloS one*, 13(11): e0206682.
- Vartanian, N. (1973).** Particularité adaptative de la moutarde blanche (*Sinapsis alba* L.) à la sécheresse. In: Réponses des plantes aux facteurs climatique (eds) actes Coll Uppsala.Unesco.
- Zemour, K. (2014).** Etude des effets du déficit hydrique sur le processus de germination chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). Mémoire de Magister, Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 59 p.
- Zhu, J. K. (2001).** Plant salt tolerance. *Trends in plant science*, 6(2): 66-71.

Résumé

La phase de germination constitue l'une des étapes les plus sensibles aux effets engendrés par le stress hydrique. Ce travail a été conduit au laboratoire régional du Centre National de Contrôle et de Certification des semences et plantes (CNCC) de Sétif au cours de l'année 2021 avec comme objectif d'évaluer l'impact du déficit hydrique provoqué par le Polyéthylène Glycol 6000 aux doses T1 (150 g/l) et T2 (300 g/l) en comparaison avec un témoin T0 (eau distillée) sur la germination des graines et la croissance des plantules de dix génotypes de blé dur locaux et introduits. Les résultats indiquent la présence d'une large variabilité génétique à l'intérieur du matériel végétal étudié. Les valeurs extrêmes minimum et maximum sont variables en fonction du caractère mesuré, de la dose de stress appliqué et du génotype évalué, aucun génotype ne présente les valeurs désirées pour tous les caractères simultanément. Les valeurs de tous les caractères sont réduites à mesure que le degré de stress hydrique augmente en intensité. L'ordre de classement des génotypes montre que le cultivar Mohammed Ben Bachir (G6) est le plus tolérant parmi tous les génotypes testés. Il porte les gènes favorables impliqués dans la tolérance au stress appliqué. Les coefficients de corrélation phénotypique montrent la possibilité d'utiliser l'ensemble des caractères évalués comme des critères de sélection dans les programmes d'amélioration de blé pour la tolérance au stress hydrique au stade de développement précoce.

Mots clé : blé dur, stress hydrique, germination, PEG6000.

Abstract

Seed germination is one of the most sensitive growth stages under water stress effects. This work was carried out at the National Center for seeds and plants Control and Certification (CNCC), regional laboratory of Setif during the 2021 year with the aim of evaluating the impact of the water deficit caused by Polyethylene Glycol 6000 at T1 (150 g/l) and T2 (300 g/l) concentration levels in comparison with a control T0 (distilled water) on seeds germination and early seedlings growth of ten local and introduced durum wheat genotypes. The results indicate the presence of wide genetic variability within the plant material studied. The extreme minimum and maximum values are variable depending on the trait measured, the level of stress applied and the genotype evaluated, no genotype exhibited the desired values for all the traits simultaneously. All traits estimates were reduced with the increase of water stress intensity. The order of classification of the genotypes showed that Mohammed Ben Bachir (G6) was the most tolerant cultivar among all the genotypes tested. It carries the favorable genes involved in stress tolerance expression. The phenotypic correlation coefficients showed the possibility of using all the traits evaluated as selection criteria in wheat breeding programs targeting the improvement of water stress tolerance at early growth stage.

Keywords: durum wheat, water stress, germination, PEG6000.

ملخص

تعد مرحلة الإنبات من أكثر مراحل النمو حساسية لتأثيرات الإجهاد المائي. تم إجراء هذه الدراسة على مستوى المخبر الجهوي للمركز الوطني لمراقبة البذور والشتلات و المصادقة عليها (CNCC) بسطيف خلال العام 2021 بهدف تقييم تأثير العجز المائي الناجم عن البولي إيثيلين جليكول 6000 عند الجرعات T1 (150 غ/ل) و T2 (300 غ/ل) بالمقارنة مع الشاهد T0 (ماء مقطر) على إنبات البذور و نمو نباتات عشر أنماط وراثية محلية و محسنة من القمح الصلب. تشير النتائج إلى وجود تنوع وراثي واسع داخل المادة النباتية المدروسة. تتغير القيم القصوى و الدنيا بحسب الصفة المقاسة، شدة الإجهاد المطبق و النمط الوراثي المقيّم، لا يظهر أي نمط وراثي قيما مرغوبة لجميع الصفات في نفس الوقت. تدنت قيم جميع الصفات المقاسة مع زيادة شدة الإجهاد المائي. يوضح ترتيب تصنيف الأنماط الوراثية أن الصنف محمد بن بشير (G6) هو الأكثر تحملاً من بين جميع الأنماط التي تم اختبارها. يحمل هذا الصنف الجينات المواتية التي تساهم في تحمل الإجهاد المطبق. تظهر معاملات الارتباط المظهرية إمكانية استخدام جميع الصفات التي تم تقييمها كمعايير انتخاب في برامج تحسين القمح لتحمل الإجهاد المائي في مرحلة النمو المبكرة.

كلمات مفتاحية: قمح صلب، إجهاد مائي، إنبات، PEG6000.