



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 Mohammed El Bachir El Ibrahim B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم الفلاحية

Département des Sciences Agronomiques



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Amélioration des plantes

Intitulé :

Analyse de l'efficacité des indices de la tolérance aux stress abiotiques comme des critères de sélection précoce chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.)

Présenté par :

CHEKKAL Sara & DARRACHI Halima

Soutenu le 03 / 07/ 2022, Devant le Jury :

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
Président :	M. BAHLOULI Fayçal	Pr.	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. MAAMRI Khelifa	MCB	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.
Invité :	M. BOUTALBI Walid	Ing.	CNCC, Sétif

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement

Louange à Allah qui guide sur le droit chemin tout au long de ce travail, nous a inspiré les bons pas et les justes réflexes et nous a donné la volonté et le courage. Sous sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti : « El Hamd Wa Choker li Allah »

*Nous adressons l'expression de nos vives gratitudee et respects à notre encadreur **Dr. FELLAHI Zine El Abidine** pour sa patience, son aide, ses conseils et encouragement, pour le temps qui il nous a consacré pour réaliser ce travail.*

Nous tenons à remercier les membres de jury :

***Pr. BAHLOULI Fayçal** pour avoir bien voulu présider le jury.*

***Dr. MAAMRI Khelifa** pour avoir bien voulu examiner notre travail.*

*Nous adressons également nos remerciements à l'ensemble des cadres du CNCC de Sétif pour leur appui et leur collaboration, en particulier **Mr. BOUTALBI Walid**.*

*Nous remercions également **Dr. HANNACHI Abderrahmane** de l'INRAA de Sétif et **Melle LAMARA Asma** pour leurs aides lors de la réalisation de ce travail.*





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*À l'homme de ma vie, celui qui s'est toujours sacrifié
pour me voir réussir. A qui je porte fièrement*

*Son non à la mémoire de mon Père décédé trop tôt qui
Dieu te garde dans son vaste paradis.*

À toi mon père

*À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon
cœur,*

*Ma vie et mon bonheur, **Maman**, qui m'a soutenu et encouragé durant
ces années d'étude.*

*À mes chers frères : **Idir, Ilyas** et **Adem** pour leur appui et leur
encouragement.*

*À ma chère sœur **Rekaïa** et son mari et son fils **Yaser** pour leur
encouragement permanent, et leur soutien moral.*

*À la mémoire de mon **Grand père**, à ma deuxième famille mes oncles
Saïd, Abd el malek, Houari et **Mebarek** et leurs femmes*

***Hadjira, Fatiha, Abla, Fatma** et leurs enfants.*

Merci à vous et que dieu vous donne une longue et joyeuse vie.

*A mon binôme **Halima**.*

*À mes amies : **Halima, Fatma, Siham** et **Loubna** pour leurs aides et
supports dans le moment difficile.*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du
secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

SARA .





Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

A ma très chère mère Farida qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père Lakhder, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'eut trouvé le déroulement des études.

A mes chers frères : Layachi et Abdelhak.

Ames chères sœurs : Noura, Saàdia, Meriem,

Karima et Nadia.

A mon binôme : Sara

A mes très chères amies : Sara, Loubna et Siham.

A mes collègues et amis de la promotion 2021-2022

Halima

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. Conditions expérimentales	3
I.2.1. Préparation des solutions de PEG-6000	4
I.2.2. Essai de germination	4
I.2.2. Essai de comportement	5
I.3. Paramètres étudiés	6
I.3.1. Essai de germination	6
I.3.1.1. Pourcentage final de germination (%G, %)	6
I.3.1.2. Temps moyen de germination (MGT, jours)	6
I.3.1.3. Indice de germination (GI)	6
I.3.1.4. Germination moyenne journalière (MDG, %)	6
I.3.2. Essai de comportement	6
I.3.2.1. Longueur maximale des racines (LR, cm)	6
I.3.2.2. Nombre de racines (NR, No)	6
I.3.2.3. Longueur du coléoptile (LC, cm)	7
I.3.2.3. Longueur de la 1 ^{ère} feuille (LF, cm)	7
I.3.2.4. Matières fraîches racinaire (MFR, mg) et aérienne (MFA, mg)	7
I.4. Analyse des données	7
Chapitre II : Résultats et discussion	
II.1. Essai de germination	9
II.1.1. Analyse de la variance	9
II.1.2. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'génotype'	9
II.1.3. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress'	11
II.1.4. Effet de l'interaction 'génotype*stress'	14
II.2. Essai de comportement	15
II.2.1. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'génotype'	17
II.2.2. Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress'	18
II.2.3. Effet de l'interaction 'génotype*stress'	20
II.3. Indices de stress	23

II.3.1. Analyse de la variance et valeurs moyennes	23
II.3.2. Corrélations des indices de stress	25
II.3.3. Classification des géotypes de blé étudiés sur la base des indices de stress utilisés	27
Conclusion	29
Références bibliographiques	31

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Code, nom et origine des génotypes de blé dur étudiés.....	3
Tableau 2 :	Indices de tolérances au stress calculés.....	8
Tableau 3 :	Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères mesurés.....	9
Tableau 4 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'génotype' des caractères mesurés ...	10
Tableau 5 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'stress' des caractères mesurés.....	11
Tableau 6 :	Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères mesurés.....	16
Tableau 7 :	Valeurs moyennes de l'effet moyen 'génotype' des caractères mesurés ...	17
Tableau 8 :	Valeurs moyennes de l'effet stress des caractères mesurés	18
Tableau 9 :	Réduction/augmentation (en %) des paramètres de croissance aux traitements T1 et T2 relativement au témoins T0 des génotypes étudiés ...	22
Tableau 10 :	Carrés moyens de l'analyse de la variance des indices de stress utilisés ...	23
Tableau 11 :	Valeurs moyennes des indices de stress utilisés.....	24
Tableau 12 :	Classement des génotypes étudiés en fonction des indices de stress utilisés	24
Tableau 13 :	Coefficients de corrélation phénotypique de Pearson (en dessus de la diagonale) et leurs probabilités respectives (en dessous de la diagonale) estimées entre les indices de stress utilisés.....	25
Tableau 14 :	Valeurs moyennes caractéristiques des indices de stress pour les trois groupes de génotypes identifiés.....	28

Liste des figures et photos

Figure 1 : Réduction/augmentation (en %) des variables mesurées en T1 et T2 relativement au 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 au témoins T0 des géotypes étudiés	14
Figure 4 : Réduction (en %) des variables mesurées en T1 et T2 relativement au témoins T0 des géotypes étudiés	19
Figure 5 : Répartition des géotypes suivant la classification de Fernandez	26
Figure 6 : Classification des géotypes de blé étudiés sur la base des indices de stress utilisés	27
Photo 1 : Mise en place des graines de blé dans les boites de pétri et dénombrement des graines germées	4
Photo 2 : Transplantation des graines germées vers les tubes à essai.....	5

Liste des abréviations

%G : Pourcentage final de germination.

ANOVA : Analyse de la variance.

BFT : Biomasse fraîche totale.

CIC : Conseil Internationale des Céréales.

CIMMYT: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.

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

CVG : Coefficient de Vitesse de Germination.

GI : Germination Index.

GMP : Geometric Mean Productivity.

HM : Harmonic Mean.

ICARDA: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas

LC : Longueur du Coléoptile.

LF : Longueur de la 1^{ère} Feuille.

LR : Longueur des Racines.

MDG : Germination moyenne journalière.

MFA : Matière Fraîche Aérienne.

MFR : Matière Fraîche Racinaire.

MGT : Mean Germination Time.

MP : Mean Productivity.

NR : Nombre des Racines.

PEG-6000 : Polyéthylène glycol 6000.

PNAB : Programme National pour l'Amélioration du Blé

Ppds : Plus petite différence significative.

RSI : Relative Stress Index.

STI : Stress Tolerance Index.

YI : Yield Index.

YSI : Yield Stability Index.

Introduction

Introduction

Le blé est l'une des céréales connues depuis l'antiquité, sa culture remonte au mésolithique vers 7000 avant Jésus-Christ (**Ruel, 2006**). Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une plante annuelle de la classe des monocotylédones de la famille des *Poaceae*, de la tribu des *Triticées* et du genre *Triticum* (**Feillet, 2000**). En termes de production commerciale et l'alimentation humaine, cette espèce est la deuxième plus importante du genre *Triticum* après le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et constitue la base de l'alimentation sous diverses formes notamment semoule et pâtes en Algérie (**Hannachi, 2017**).

La culture du blé dur se localise surtout dans les pays du pourtour méditerranéen, elle occupe 5% du total de terres réservées aux blés dans le monde (**Kirouani et al., 2019**). Selon le conseil international des céréales (**CIC, 2021**), en mois d'octobre 2021 les prévisions de production mondiale de blé dur étaient de l'ordre de 32.14 millions de tonnes. En Algérie le blé prend une place très importante dans la structure spatiale de l'activité agricole. Il occupe 45% de la sole réservée aux céréales, soit 1.6 millions d'hectares (**ONFAA, 2017**), ce qui offre une production de 2.5 millions de tonnes (**CIC, 2016 in : www.world-grain.com**).

Selon les statistiques du conseil internationale des céréales, la production de blé en Algérie est inférieure à la consommation (**CIC, 2016**) et le rendement varie, d'une année à l'autre et d'un lieu à autre. Cette variation a pour origine la sensibilité du matériel végétal à l'effet combiné des basses température hivernales, du gel printanier, du stress hydrique et des hautes températures de fin de cycle de la culture, qui peuvent être raccourcis dans le mot stress abiotiques (**Bahlouli et al., 2005 ; Chennafi et al., 2006**).

Le stress abiotique est donc considéré comme le principal responsable des pertes associées aux cultures. La sécheresse et la salinité sont responsables de 17 et 20% des pertes, respectivement. Les hautes et les basses températures sont responsables de 40 et 15% des pertes, respectivement. Les 8% de pertes restantes sont liées à d'autres facteurs (**Athar et Ashraf, 2009**). En Algérie, la plus grande partie des surfaces en céréales est située en zone semi-aride. La pluviométrie y est faible et irrégulière, fluctuant d'une année à une autre. A cela s'ajoute souvent des sols peu fertiles et à faible réserve hydrique (**Belaid, 2015**). Le stress hydrique est donc le principale facteur limitant la production des céréales en particulier le blé. Le développement et l'obtention de variétés tolérantes à la sécheresse, donnant une bonne production sous une large gamme de conditions environnementales constituent un objectif

majeur de sélection (**Papathanasiou et al., 2015**). La recherche vise à sélectionner des génotypes à haut potentiel de rendement et à production plus régulière, peu sensibles aux variations climatiques (**Madic et al., 2012**). A ce titre, plusieurs indices de tolérance des stress, sont proposés par les chercheurs pour sélectionner de tels génotypes. Parmi les indices de tolérance au stress les plus utilisés dans les programmes d'amélioration, on peut citer l'indice de la tolérance (TOL) et l'indice de la productivité moyenne (MP) développés par **Rosielle et Hambling (1981)**, la productivité moyenne géométrique (GMP) et l'indice de tolérance au stress (STI) proposés par **Fernandez (1992)**, l'indice de moyenne harmonique (HM) de **Bidinger et al. (1987)**, l'indice de rendement (YI) créé par **Gavuzzi et al. (1997)**, l'indice de stabilité du rendement (YSI) de **Bousslama et Schapaugh (1984)**, l'indice de la sensibilité au stress (SSI) formulé par **Fischer et Maurer (1978)** et l'indice de stress relatif (RSI) de **Fischer et Wood (1979)**.

Les indices de tolérance aux stress ne sont que des dérivations mathématiques des mêmes données basées sur les rendements obtenus sous des conditions des cultures stressées et non stressées. Ces indices sont basés sur la perte de rendement sous déficit hydrique en comparaison avec les conditions normales (**Ahmadi et al., 2008**). En effet, ces indices permettent de classer les génotypes évalués selon leur degré de tolérance au stress, exprimé en termes de performance de rendement grain, sous stress (Y_s) et en absence de stress (Y_p) (**Amir et al., 2008 ; Subhani et al., 2015**). C'est dans ce contexte que s'insère cette étude qui a pour objectif d'analyser la capacité de différents indices de tolérance à identifier, parmi douze génotypes de blé dur, ceux qui sont performants, tolérants au stress hydrique induit par le polyéthylène glycol 6000 (PEG-6000) au stade de germination-plantule sous conditions hydroponiques.

Chapitre I :
Matériel et méthodes

I. Matériel et méthodes

I.1. Matériel végétal

Le présent travail à porter sur 12 génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) dont des variétés populations locales (G7, G8, G9, G10, G11, G12), des variétés améliorées (G5, G6) et des lignées avancées (G1, G2, G3, G4) en phase finale de sélection au sein du Programme National pour l'Amélioration du Blé (PNAB). Le nom et l'origine des génotypes étudiés dans la présente étude sont indiqués dans le tableau 1. Les semences de ces génotypes ont été fournies par la station de l'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie du Khroub.

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

Code	Nom	Origine
G1	BDbaa1920/26	ICARDA
G2	BDdm1920/02	CIMMYT
G3	BDbaa 1920/21	CIMMYT
G4	BDbaa 1920/25	ICARDA
G5	Beni Mestina	Locale
G6	Simeto	Italie
G7	Djennah Khetifa	Locale
G8	T. Polo x ZB	Locale
G9	Bidi17	Locale
G10	Oued Zenati368	Locale
G11	Rahouia	Locale
G12	Guemgoum Rkhem	Locale

ICARDA = Centre international de recherche agricole dans les zones arides, CIMMYT = Centre international d'amélioration du maïs et du blé.

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) de Sétif situé à 4 Km sud du chef-lieu de la Wilaya au cours de l'année universitaire 2021/2022. Elle consiste en deux parties, la première vise à étudier l'effet du déficit hydrique induit par le polyéthylène glycol (PEG-6000) à différentes concentrations sur la germination des graines des génotypes de blé dur décrits au tableau 1. La deuxième partie porte sur l'évaluation de l'effet du déficit hydrique provoqué par le PEG-6000 aux mêmes concentrations utilisées dans la première partie sur les paramètres de croissance des jeunes plantules de blé. L'expérimentation est

conduite en chambre de culture sous conditions semi-contrôlées à une température de 22°C et une humidité 85% avec une photopériode de 16h de lumière et 8h d'obscurité.

1.2.1. Préparation des solutions de PEG-6000

Le polyéthylène glycol (PEG-6000) est un polymère non ionique hydrosoluble non perméable pour les cellules. Il est utilisé pour induire un déficit hydrique car il réduit la disponibilité en eau sans causer de dommage physique aux plantes (**Meneses *et al.*, 2011**). La solution de PEG-6000, à un potentiel osmotique donné, est préparée en faisant dissoudre la quantité de PEG-6000 dans l'eau distillée aux concentrations 10% (T1 = 100 g/l PEG-6000), et 20% (T2 = 200 g/l PEG-6000). L'eau distillée est utilisée comme témoin (T0 = 0 g/l PEG-6000).

1.2.2. Essai de germination

Des graines saines, de la même taille et forme ont été lavées à l'eau courante et rincées à l'eau distillée puis soumises à la germination dans des boîtes de Petri contenant trois couches de papier filtre sous les trois intensités de stress hydrique. L'unité expérimentale est matérialisée par la boîte de pétri, portant 100 graines. Les différents traitements sont répétés trois fois. Le nombre de graines germées a été noté quotidiennement du 1^{er} jusqu'au 7^{ème} jour après semis. La germination est repérée par la sortie de la radicule dont la longueur est d'au moins de 2 mm (Photo 1).

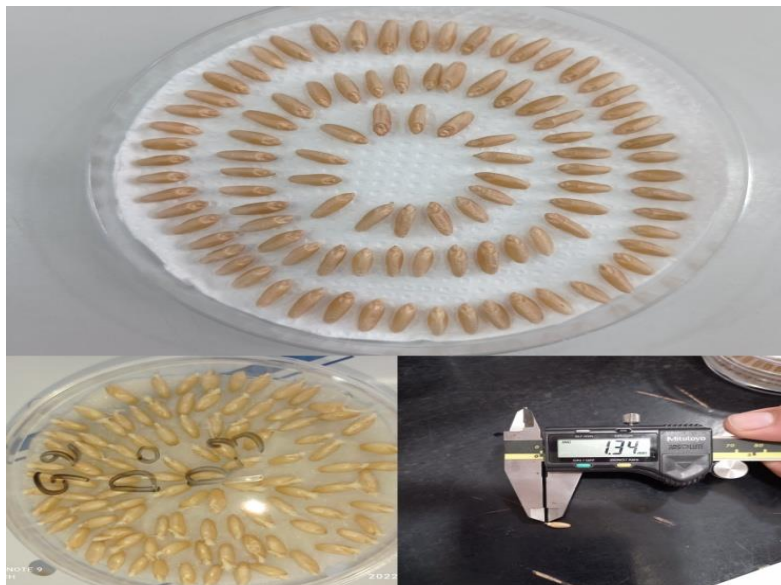


Photo 1 : Mise en place des graines de blé dans les boîtes de pétri et dénombrement des graines germées.

I.2.3. Essai de comportement

L'essai de comportement des plantules sous stress hydrique est conduit avec les mêmes génotypes qui ont servi de matériel végétal pour l'essai de germination et sous les mêmes intensités de stress. Les différents génotypes sont semés dans des boîtes de pétri contenant trois couches de papier filtre à raison de 30 graines pour chaque génotype. Les boîtes ensemencées sont arrosées avec de l'eau distillée pour assurer la germination des graines de blé (Photo 2A). Après 48 heures, quatre graines germées par génotypes sont transférées dans des tubes à essai contenant 25 ml des solutions aux même intensités de stress hydrique utilisées pour le test de germination à savoir 0, 10 et 20% PEG-6000 (Photo 2B). Des morceaux ronds d'éponge sont utilisées comme un support des graines à l'intérieur des tubes et sur lesquels les graines sont déposées. L'unité expérimentale est matérialisée par le tube à essai, portant une graine germée. Les différents traitements sont répétés quatre fois. L'expérimentation a duré 10 jours après la transplantation (Photo 2C).

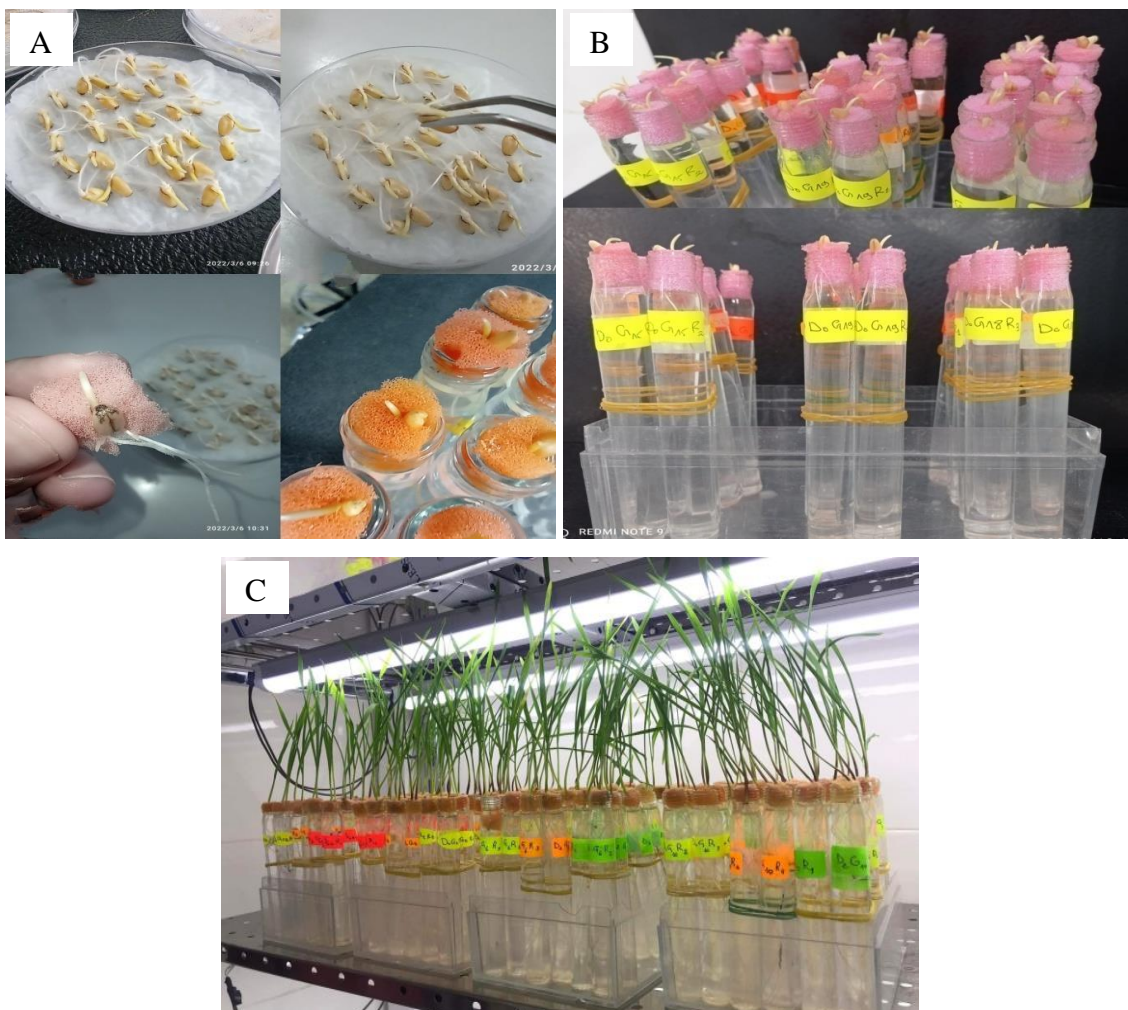


Photo 2 : Transplantation des graines de blé germées vers les tubes à essai.

I.3. Paramètres étudiés

I.3.1. Essai de germination

I.3.1.1. Pourcentage final de germination (%G, %) : il est déterminé selon la formule de Shirefaw et Baker (1996) par :

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

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.

I.3.1.2. Temps moyen de germination (MGT, jours) : il est calculé selon l'équation suivante de Ellis et Roberts (1981) comme suit :

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

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

I.3.1.3. Indice de germination (GI) : c'est une estimation du temps (en jours) nécessaire pour qu'un certain pourcentage de germination se produise. Il est calculé à l'aide de l'expression décrite par Ranal et Santana (2006) par :

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

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.

I.3.1.4. Germination moyenne journalière (MDG, %) : elle est obtenue suivant Scott *et al.* (1984) en divisant le pourcentage cumulé de germination par le nombre de jours écoulés depuis le semis.

I.3.2. Essai de comportement

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

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

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

I.3.2.4. Longueur de la 1^{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 obtenues ont été traitées par l'analyse de la variance, à deux facteurs étudiés (génotype et stress) suivant un dispositif expérimental factoriel complètement randomisé à trois répétitions pour l'essai de germination et à quatre répétitions pour l'essai de comportement. La comparaison des moyennes des traitements est faite sur la base du calcul de la plus petite différence significative au seuil de probabilité de 5% (Ppds_{5%}). Les indices de tolérance aux stress hydrique sont calculés par génotype sur la base de la biomasse fraîche totale [BFT (mg) = MFR (mg) + (MFA (mg))] mesurée en absence (Y_p) et en présence de stress (Y_s) à la concentration 20% PEG-6000 (Tableau 2). Les liaisons entre les indices de stress ont été analysées en calculant les coefficients de corrélations phénotypiques de Pearson.

Tableau 2 : Indices de tolérance au stress calculés.

Indices	Equations	Références
Productivité moyenne	$MP = (Y_p + Y_s)/2$	Rosielle et Hamblin (1981)
Productivité moyenne géométrique	$GMP = \sqrt{Y_s \times Y_p}$	Fernandez (1992)
Moyenne harmonique	$HM = 2(Y_s \times Y_p)/(Y_s + Y_p)$	Bidinger et al. (1987)
Indice de tolérance au stress	$STI = (Y_s \times Y_p)/(\bar{Y}_p)^2$	Fernandez (1992)
Indice de rendement	$YI = Y_s/\bar{Y}_s$	Gavuzzi et al. (1997)
Indice de stabilité du rendement	$YSI = Y_s/Y_p$	Bousslama et Schapaugh (1984)
Indice de stress relatif	$RSI = (Y_s/Y_p)/(\bar{Y}_s/\bar{Y}_p)$	Fischer et Wood (1979)

Y_p: Performance génotypique en absence de stress, Y_s: Performance génotypique en présence de stress, \bar{Y}_p : Performance moyenne des génotypes en absence de stress, \bar{Y}_s : Performance moyenne des génotypes en présence de stress.

Toutes les analyses statistiques sont menées en utilisant le logiciel CoStat (version 6.4. CoHort Software, Monterey, CA, USA) et le programme XLSTAT.

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 (ANOVA) révèle des effets 'génotype', 'stress' et une interaction 'génotype*stress' très hautement significatifs ($p < 0.001$) pour l'ensemble des variables mesurées (Tableau 3). Ces résultats montrent la présence de la variabilité génotypique au sein du matériel végétal étudié et les caractères mesurés subissent des modifications importantes sous l'effet des différentes concentrations de stress hydrique appliqué. L'interaction 'génotype*stress' suggère que les génotypes testés réagissent différemment vis-à-vis du stress induit par le polyéthylène glycol (PEG-6000). Les valeurs du coefficient de variation (CV) sont faibles variant de 5.90% pour le temps moyenne de germination et le coefficient de vélocité de germination à 8.60% pour l'indice de germination (Tableau 3). Ces résultats reflètent le peu d'erreur et la bonne précision lors de la manipulation de l'expérience.

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

SV	ddl	%G	MGT	CVG	GI	MDG
Génotype	11	641.43***	0.22***	30.01***	100.71***	13.09***
Stress	2	6772.11***	27.98***	2070.07***	4275.59***	138.21***
Génotype*Stress	22	592.88***	0.30***	26.53***	50.01***	12.10***
Erreur	72	50.02	0.04	3.36	6.69	1.02
CV (%)		7.73	5.90	5.90	8.60	7.73

SV = Source de variation, %G = pourcentage final de germination, MGT = Temps moyen de germination, CVG = Coefficient de vélocité de germination, GI = Indice de germination, MDG = Germination moyenne journalière, CV = Coefficient de variation. *** = Effet significatif au seuil de probabilité de 0.1%.

L'effet 'génotype' explique 18.94% du total de la variation observée au niveau du pourcentage final de germination tel qu'il est indiqué par les carrés moyens de l'ANOVA. La deuxième source de variation 'stress' apporte 36.36% d'explication tandis que l'interaction contribue avec 35.02%, le reste est dû à l'erreur. Des résultats similaires sont rapportés dans la littérature par **Parakash et al. (2015)**.

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

Les résultats rapportés dans le tableau 4 indiquent que les valeurs moyennes extrêmes minimale et maximale sont variables d'un caractère à une autre, d'un génotype à une autre et

de niveau de stress appliqué. Ainsi, le pourcentage final de germination (%G) varie de 73.33%, valeur minimale obtenue chez la variété italienne Simeto (G6) à 100%, valeur maximale exprimée par le cultivar Djennah Khetifa (G7) autour d’une moyenne générale de 91.44% et une plus petite différence significative de 6.65%.

Les valeurs de temps moyen de germination (MGT) oscillent entre une valeur minimale de 3.05 jours observée chez la variété locale Guemgoum Rkhem (G12), et une valeur maximale de 3.60 jours observés chez Simeto (G6), avec une moyenne générale de 3.40 jours et plus petite différence significative de 0.19 jours (Tableau 4).

Tableau 4 : Valeurs moyennes de l’effet moyen ‘génotype’ des caractères mesurés.

Génotype	%G	MGT	CVG	GI	MDG
G1	94.22 ^{ab}	3.38 ^{bcd}	30.44 ^{cdef}	30.06 ^{cd}	13.46 ^{ab}
G2	78.22 ^{cd}	3.39 ^{bcd}	30.69 ^{bcde}	26.52 ^{ef}	11.17 ^{cd}
G3	92.22 ^b	3.53 ^{abc}	29.80 ^{def}	28.93 ^{de}	13.17 ^b
G4	93.44 ^{ab}	3.46 ^{abc}	30.70 ^{bcde}	30.21 ^{cd}	13.35 ^{ab}
G5	83.89 ^c	3.56 ^{ab}	28.85 ^f	26.11 ^f	11.98 ^c
G6	73.33 ^d	3.60 ^a	29.30 ^{ef}	24.35 ^f	10.48 ^d
G7	100.00 ^a	3.27 ^d	32.36 ^b	33.28 ^b	14.29 ^a
G8	93.89 ^{ab}	3.37 ^{cd}	30.95 ^{bcde}	30.49 ^{cd}	13.41 ^{ab}
G9	97.22 ^{ab}	3.53 ^{abc}	30.71 ^{bcde}	30.97 ^{bcd}	13.89 ^{ab}
G10	95.22 ^{ab}	3.26 ^d	31.76 ^{bc}	31.71 ^{bc}	13.60 ^{ab}
G11	96.56 ^{ab}	3.35 ^{cd}	31.04 ^{bcd}	31.25 ^{bcd}	13.79 ^{ab}
G12	99.11 ^a	3.05 ^e	35.97 ^a	36.82 ^a	14.16 ^a
Moyenne	91.44	3.40	31.05	30.06	13.06
Ppds (5%)	6.65	0.19	0.09	2.43	0.95

%G = pourcentage final de germination (%), MGT = Temps moyen de germination (jours), CVG = Coefficient de vélocité de germination (%), 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%.

Les valeurs prises par la variable coefficient de vélocité de germination varient d’un minimum de 28.85% obtenu chez la variété améliorée Beni Mestina (G5), et un maximum de 35.97% observé chez Guemgoum Rkhem (G12), auteur d’une moyenne générale de 31.05% et une plus petite différence significative de 0.09% (Tableau 4).

Les deux génotypes Simeto (G6) et Guemgoum Rkhem (G12) présentent respectivement les valeurs moyennes maximales et minimales pour l’indice de germination (24.35 et 36.82) et la germination moyenne journalière (10.48 et 14.16%) avec des moyennes générales respectives de 30.06 et 13.06% et des valeurs de la plus petite différence significative de 2.43 et 0.95% dans le même ordre (Tableau 4).

D'après Côme (1970), la capacité germinative des graines dépend majoritairement des conditions dans lesquelles on les place (conditions de conservation et conditions de germination) mais aussi du patrimoine héréditaire. 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 préalablement rapportées dans la littérature par plusieurs auteurs dont Boudiar *et al.* (2019) et Abro *et al.* (2021).

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

Le tableau 5 montre les valeurs moyennes de l'effet moyen stress des caractères mesurés. Les moyennes minimales et maximales sont variables suivant le niveau de stress appliqué. Les résultats montrent que les valeurs de tous les caractères sont réduites à mesure que le stress hydrique augmente en intensité mise part le temps moyen de germination pour lequel la valeur maximale (4.37 jours) est noté sous stress sévère de 20% PEG-6000 et celle minimale (2.64 jours) est observée sous stress hydrique léger.

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

Stress	%G	MGT	CVG	GI	MDG
T0	99.67 ^a	2.64 ^c	38.23 ^a	39.48 ^a	14.24 ^a
T1	99.06 ^a	3.18 ^b	31.80 ^b	32.56 ^b	14.15 ^a
T2	75.61 ^b	4.37 ^a	23.12 ^c	18.13 ^c	10.80 ^b
Moyenne	91.44	3.40	31.05	30.06	13.06
Ppds (5%)	3.32	0.09	0.86	1.22	0.47

%G = Pourcentage final de germination (%), MGT = Temps moyen de germination (jours), CVG = Coefficient de vélocité de germination (%), 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 diminué de 99.67% (tous génotypes inclus) en absence de stress (T0 = 0% PEG-6000) à 75.61% en présence de stress sévère (T2 = 20% PEG-6000) avec une plus petite différence significative de 3.32%. Le coefficient de vélocité de germination a décliné d'une valeur maximale de 38.23% en conditions normales à 23.12% sous niveau élevé de stress autour d'une plus petite différence significative de 0.86%. La moyenne prise par l'indice de germination a diminué de 39.84 en T0 à 18.13 en T2 avec une plus petite différence significative de 1.22. La même tendance est marquée pour la germination moyenne journalière qui a régressé sous les mêmes traitements de 14.24% à 10.80% autour d'une plus petite différence significative de 0.47%.

Globalement le potentiel osmotique a altéré le pourcentage final de germination et toutes les variables qui lui sont lié. Ce changement demeure plus notable à mesure que le stress devient plus accentué en allongeant ainsi la durée nécessaire pour que le processus de germination se procure. D'après la figure 1 qui représente la réduction / augmentation des valeurs moyennes prises par les variables mesurées en T1 et T2 relativement au témoin T0 des génotypes de blé dur testés, les changements sont plus marqués pour le temps moyen de germination (+20.2%), le coefficient de vélocité de germination (-16.8%) et l'indice de germination (-17.5%) en T1 alors qu'en T2 tous les caractères enregistrent des modifications conséquentes allant de pour +65.2% à -54.1%, respectivement pour MGT et CVG. Nos résultats corroborent à ceux obtenus par *Alam et al. (2020)* et *Othmani et al. (2021)* qui ont également observé la relation inversée entre la sévérité du stress hydrique induit par le PEG-6000 et le temps moyen de germination.

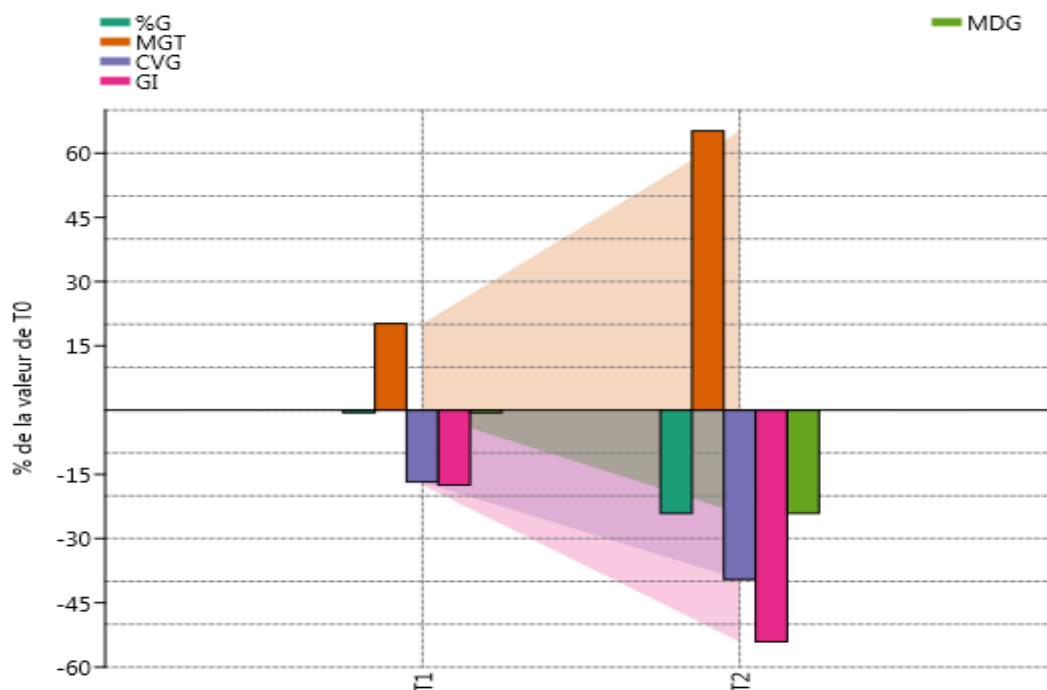


Figure 1 : Réduction / augmentation (en %) des variables mesurées en T1 et T2 relativement au témoins T0 des génotypes étudiés

La figure 2 représente la cinétique de germination des douze variétés de blé dur en fonction de l'intensité du stress appliqué pendant sept jours. Cette figure montre une variation différentielle de la cinétique de germination par rapport aux trois traitements 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 durant les 24 heures qui

suivent la mise en germination, pendant laquelle le pourcentage de germination reste nul en T2, et très faible de l'ordre de 3% en T1 et faible avec seulement 14% en T0. Une phase exponentielle entre le 1^{er} et le 5^{ème} jour pour T0 et T1 et entre 1^{er} et le 6^{ème} jour pour T2, durant laquelle les pourcentages de germination connaissent une augmentation forte chez T0 et T1 et moyenne chez T2. La troisième phase stationnaire correspond à un palier où les pourcentages cumulés de germination cessent (cas de T0) ou augmentent lentement (cas de T1) 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 six jours de l'essai (Figure 2).

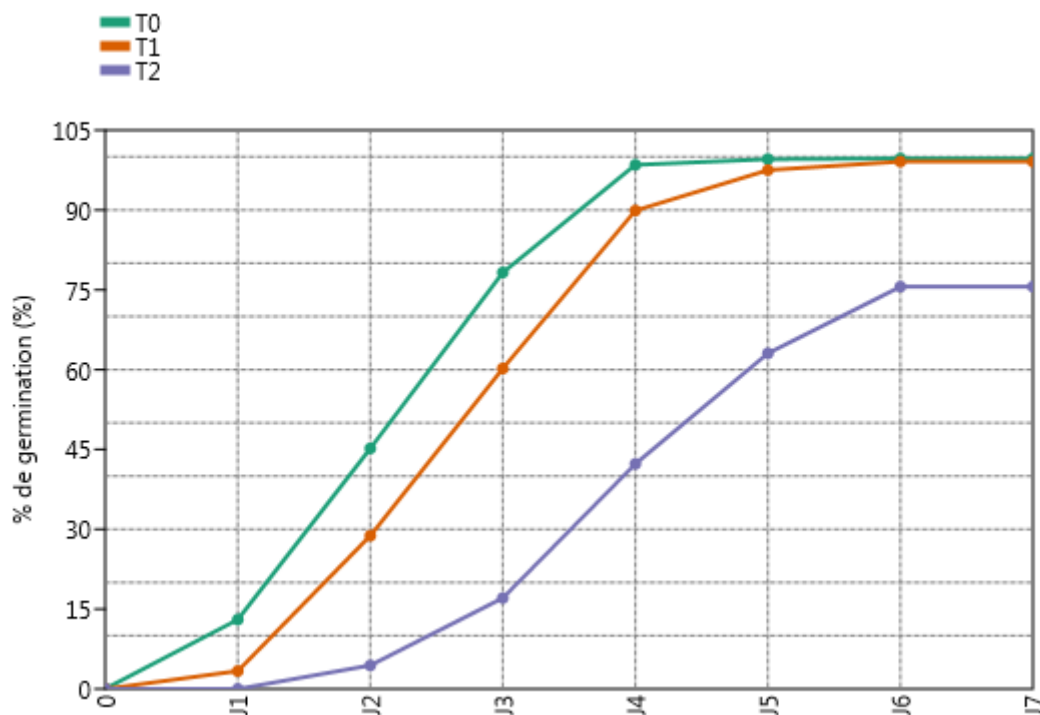


Figure 2 : Cinétique de germination des grains de blé dur en fonction de l'intensité du stress.

Il paraît clair que la germination des graines de blé dur a été sévèrement affectée par le PEG-6000 appliqué. Les différences observées au niveau de la germination des graines peuvent s'expliquer par le fait que le PEG-6000 est à l'origine de l'augmentation du milieu d'imbibition, d'où une diminution de la pénétration de l'eau vers les graines. Nous pouvons déduire que le stress hydrique sévère induit une phase de latence longue, due aux difficultés d'imbibition qui induit une faible dégradation des réserves de la graine. Donc plus la concentration de PEG-6000 est élevée plus la capacité germinative chez le blé est diminuée. Ces résultats s'accordent avec les résultats de plusieurs chercheurs dont **Jatoi *et al.* (2014)** et

Španić *et al.* (2017) qui montrent que la germination des graines est fortement influencée par une contrainte hydrique provoquée par le polyéthylène glycol.

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

Les résultats de l'analyse de variance, à deux facteurs (génotype et stress) ont montré un effet d'interaction 'génotype*stress' très hautement significative pour l'ensemble des caractères mesurés indiquant que les génotypes réagissent différemment aux niveaux de potentiel osmotique appliqué (Tableau 3). La figure 3 représente la réduction génotype par génotype du pourcentage de germination des traitements T1 (10% PEG-6000) et T2 (20% PEG-6000) relativement aux témoins T0 (0% PEG-6000). Le degré de tolérance de telle génotype est alors jugé par les valeurs des écarts générés exprimés en % de T0, plus la valeur de l'écart est importante moins le génotype est tolérant et vice versa. En présence de stress léger (T1 = 10% PEG-6000), les réductions du pourcentage de germination varient de 0 à -3.05%. Celles les plus faibles (0%) sont notées chez les génotypes BDBaa 1920/21 (G3), Djennah Khetifa (G7), Bidi17 (G9), Oued Zenati368 (G10) et Guemgoum Rkhem (G12). Ces génotypes sont donc plus tolérants à ce niveau de stress. Cependant la réduction la plus élevée (-3.05%) est notée chez la variété Beni Mestina (G5).

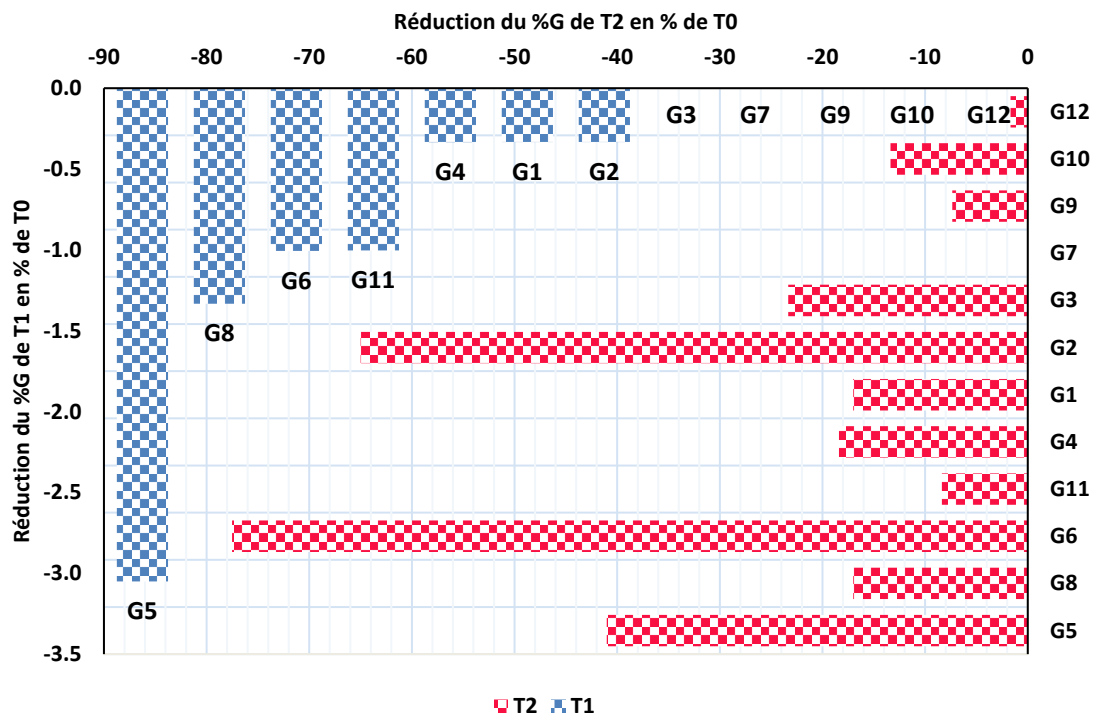


Figure 3 : Réduction du % de germination des traitements T1 et T2 relativement au témoins T0 des génotypes de blé dur étudiés.

Sous stress sévère (T2 = 20% PEG-6000), les réductions du pourcentage de germination varient de 0, valeur minimale observée chez Djennah Khetifa (G7), à -77.52%, valeur maximale notée chez Simeto (G6). La lignées BDdm1920/02 (G2) et la variété Beni Mestina (G5) enregistrent aussi des régressions appréciable 65.0 et 41.02%, respectivement. En tenant compte des résultats explorés ci-dessus, il s'avère que le stress hydrique appliqué, quel que soit son niveau, ne semble pas avoir d'effet pénalisant du pourcentage de germination des graines de la variété locale Djennah Khetifa (G7).

Bien qu'il ne reflète pas intégralement le comportement des plantes dans leurs conditions naturelles, le taux de germination en conditions de stress hydrique, donne toujours une idée plus ou moins précise du comportement des variétés étudiées. L'augmentation de la concentration du PEG-6000 a provoqué chez les graines un allongement de la période de germination. Ce retard s'expliquerait par le temps nécessaire aux graines pour déclencher les mécanismes leur permettant d'ajuster leur pression osmotique (Miled *et al.*, 1986). En plus de la réduction du taux de germination, cette réduction pourrait être due à l'altération des enzymes et des hormones qui se trouvent 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 (Nonami, 1989). Le PEG-6000 ralentie 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. Ce phénomène entraîne la diminution de la capacité d'imbibition et un ralentissement de la vitesse de germination (Bousba *et al.*, 2021).

II.2. Essai de comportement

L'analyse de la variance à deux facteurs révèle un effet 'génotype' très hautement significatif ($p < 0.001$) pour tous les caractères mesurés pendant la phase post-germination (Tableau 6). Ces résultats indiquent la présence d'une variabilité importante entre les génotypes étudiés, l'origine de cette variation est la diversité des gènes au sein des génotypes de blé dur étudiés. L'effet 'stress' est significatif ($p < 0.05$) à très hautement significatif ($p < 0.001$) pour l'ensemble des caractères, suggérant que les différentes concentrations de polyéthylène glycol appliquées dans le milieu de culture des plantules de blé ont des réactions différentes sur les paramètres mesurés.

Tableau 6 : Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères mesurés.

SV	ddl	NR	LR	LC	LF	MFR	MFA
Génotype	11	3.93***	26.30***	5.17***	129.56***	1258.63***	2629.42***
Stress	2	3.69***	235.03***	0.43*	174.86***	690.05*	34112.31***
Génotype*Stress	22	0.53 ^{ns}	16.95**	0.15 ^{ns}	28.53***	386.00***	697.25 ^{ns}
Erreur	108	0.42	7.01	0.11	7.96	143.56	491.39
CV (%)		11.58	18.47	8.95	14.32	26.59	15.65

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

En outre, l'effet de l'interaction 'génotype*stress' est non significatif pour le nombre de racines, la longueur du coléoptile et la matière fraîche aérienne accumulée. Cependant, cet effet est hautement ($p < 0.01$) à très hautement significatif ($p < 0.001$) pour les autres caractères à savoir la longueur des racines, la longueur de la 1^{ère} feuille et la matière fraîche racinaire, suggérant que les génotypes testés réagissent différemment pour certains caractères et de la même façon pour certains d'autres vis-à-vis des différentes concentrations de PEG-6000 employées (Tableau 6). Hormis MFR pour laquelle le coefficient de variation est juste moyen, les faibles du CV pour les autres caractères mesurés suggèrent très peu d'erreurs et une bonne précision de la manipulation des tests conduits.

Les sources de variation 'génotype', 'stress' et 'génotype x stress' expliquent, respectivement, 45.83, 43.07 et 6.15% du total de la variation observée au niveau du nombre de racines/plante comme indiqué par les résultats de l'ANOVA (Tableau 6). Ces trois sources contribuent avec 15.31, 24.88 et 19.73% à la variation de la longueur des racines. L'effet 'génotype' explique la quasi-totalité (77.84%) de variation totale observée pour la longueur du coléoptile, le reste est partagé entre les autres sources de variation. Pour la longueur de la feuille, 43.68% est expliqué par la source de variation 'génotype', 10.72% par le 'stress' et 19.24% par leur interaction. De même pour la variables matière fraîche racinaire dont le 'génotype' contribue avec 35.30% suivi de l'interaction 'génotype x stress' avec 21.65% et en fin de l'effet 'stress' avec seulement 3.52% to total observé. Ce dernier apporte plus d'explication (41.21%) quant au caractère matière fraîche aérienne, suivi de l'effet 'génotype' (17.47%) et leur interaction en dernière position (9.27%).

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

L'analyse du tableau 7 indique que les valeurs moyennes prises par les caractères mesurés sont variées en fonction du caractère lui-même et d'un génotype à un autre. La moyenne générale de nombre de racines est de 5.62 racines/plante avec une plus petite différence significative de 0.53 racines. La lignée BDdm1920/02 (G2) présente le nombre de racines le plus élevé (6.58 racines) alors que le nombre le plus réduit est exprimé par la variété italienne Simeto (G6). La moyenne générale de la longueur des racines est de 14.33 cm avec une plus petite différence significative de 2.14 cm. La plus courte racine est observée chez le génotype BDbaa 1920/25 (G4) avec 11.88 cm et celle la plus longue est notée chez la variété Beni Mestina (G5) avec 16.60 cm. Les variétés Simeto (G6) et Oued Zenati368 (G10) expriment, respectivement, les valeurs moyennes les plus faibles (2.80 et 14.73 cm) et les plus élevées (4.75 et 23.51 cm) des caractères longueur du coléoptile et longueur de la 1^{ère} feuille avec des moyennes de 3.73 et 19.70 cm et des valeurs de la plus petite différence significative de 0.27 et 2.28 cm dans le même ordre.

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

Génotype	NR	LR	LC	LF	MFR	MFA
G1	6.50 ^a	14.88 ^{ab}	3.27 ^e	18.90 ^{def}	58.42 ^a	171.25 ^a
G2	6.58 ^a	15.07 ^{ab}	3.25 ^e	17.41 ^{efg}	37.75 ^{cd}	143.75 ^{bcd}
G3	5.83 ^{bc}	14.65 ^{ab}	3.14 ^e	15.78 ^{gh}	47.00 ^{bc}	115.50 ^f
G4	6.25 ^{ab}	11.88 ^d	3.33 ^e	17.23 ^{fg}	57.25 ^a	148.42 ^{bc}
G5	5.67 ^{cd}	16.60 ^a	3.19 ^e	18.14 ^{ef}	30.17 ^d	126.42 ^{ef}
G6	5.00 ^f	12.24 ^{cd}	2.80 ^f	14.73 ^h	37.75 ^{cd}	132.31 ^{dcef}
G7	5.08 ^{ef}	14.18 ^{bc}	4.07 ^c	23.10 ^{ab}	42.75 ^{bc}	145.75 ^{bcd}
G8	5.08 ^{ef}	15.42 ^{ab}	4.62 ^a	25.36 ^a	31.17 ^d	154.83 ^{ab}
G9	5.17 ^{def}	13.61 ^{bcd}	4.28 ^{bc}	20.51 ^{cd}	45.58 ^{bc}	139.83 ^{bcd}
G10	5.58 ^{cde}	13.53 ^{bcd}	4.75 ^a	23.51 ^{ab}	51.08 ^{ab}	152.08 ^b
G11	5.58 ^{cde}	16.45 ^a	3.72 ^d	22.05 ^{bc}	60.67 ^a	140.83 ^{bcd}
G12	5.08 ^{ef}	13.44 ^{bcd}	4.34 ^b	19.65 ^{de}	41.08 ^c	128.33 ^{def}
Moyenne	5.62	14.33	3.73	19.70	45.06	141.61
Ppds (5%)	0.53	2.14	0.27	2.28	9.70	17.94

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%.

La moyenne générale de la matière fraîche racinaire est de 45.06 mg avec une plus petite différence significative de 9.70 mg. La lignée BDdm1920/02 (G2) présente le poids frais de la matière fraîche racinaire le plus réduit (37.75 mg) alors que la variété Rahouia (G11) présente le poids frais de la matière fraîche racinaire le plus élevé (60.67 mg). Selon **El**

Fakhri et al. (2010) un system racinaire bien développée constitue un caractère important pour l'amélioration de l'absorption des ressources hydrique de sol donc une meilleure la tolérance au stress hydrique. La matière fraiche aérienne varie de 126.42 mg, valeur minimale trouvée chez la variété Beni Mestina (G5) à 171.25 mg, valeur maximale observée chez la lignée BDbaa 1920/26 (G1) autour d'une moyenne générale de 141.61 mg, avec une plus petite différence significative de 17.94 mg.

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

L'effet du stress hydrique peut se traduit selon la stratégie d'adaptation de chaque variété, par des modifications morphologiques, ces derniers affectent à la fois la partie aérienne et racinaire du végétal (**Turner, 1989**). Le tableau 8 montre les valeurs moyennes extrêmes minimales et maximales des caractères mesurés en fonction de l'intensité du stress hydrique appliqué. Les valeurs moyennes les plus élevées sont exprimées par le traitement T1 avec un stress léger (10% PEG-6000). Celles les plus faibles sont notées chez le témoin (0% PEG-6000) pour le nombre de racines et la longueur de la 1^{ère} feuille, et sous stress sévère (20% PEG-6000) pour le reste des caractères. Ainsi, le nombre de racines a varié de 5.31 à 5.69 racines, avec une plus petite différence significative de 0.26 racines, la longueur des racines a changé de 13.02 à 16.88 cm, autour d'une Ppds_{5%} de 0.26 cm. De même, la longueur de la coléoptile a varié entre 3.64 cm à 3.83 cm avec une Ppds_{5%} de 0.14 cm. L'amplitude observé pour la longueur de la 1^{ère} feuille est de 18.27 à 21.86 cm avec une Ppds_{5%} de 1.14 cm. Les matières fraîches racinaire et aérienne ont varié, respectivement, entre 40.75 et 121.70 mg en T2 à 47.90 et 171.90 mg en T1, autour des valeurs de la Ppds_{5%} de 4.85 et 8.97 mg.

Tableau 8 : Valeurs moyennes de l'effet stress des caractères mesurés.

Stress	NR	LR	LC	LF	MFR	MFA
T0	5.31 ^b	13.08 ^b	3.73 ^{ab}	18.27 ^b	46.52 ^a	131.23 ^b
T1	5.69 ^a	16.88 ^a	3.83 ^a	21.86 ^a	47.90 ^a	171.90 ^a
T2	5.85 ^a	13.02 ^b	3.64 ^b	18.96 ^b	40.75 ^b	121.70 ^c
<i>Moyenne</i>	5.62	14.33	3.73	19.70	45.06	141.61
<i>Ppds (5%)</i>	0.26	1.07	0.14	1.14	4.85	8.97

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 fraiche racinaire (mg), MFA = Matière fraiche 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 variables mesurées relativement à la valeur prise par le témoin T0 (0% PEG-6000) indique que l'effet du PEG-6000 est variable suivant le caractère mesuré et de l'intensité du stress appliqué (Figure 4).

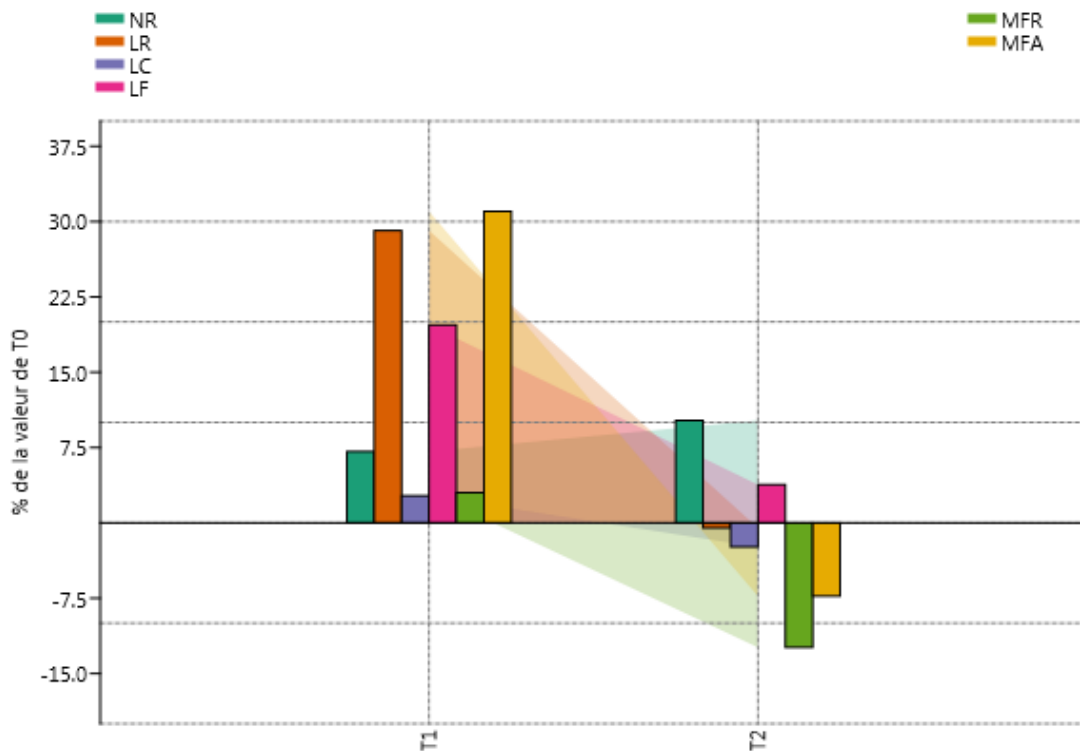


Figure 4 : Réduction (en %) des variables mesurées en T1 et T2 relativement au témoins T0 des génotypes étudiés

D'après cette figure, un stress hydrique léger a induit une augmentation de l'ordre de 7.1, 29.1, 2.7, 19.7, 3.0 et 31.0% des valeurs prises par les variables NR, LR, LC, LF, MFR et MFA. Sous stress hydrique plus intense, on enregistre par contre, des augmentations estimées à 10.2 et 3.8% des valeurs prises par les variables NR et LF, et des réductions des valeurs moyennes de LR, LC, MFR et MFA estimées à -0.5, -2.4, -12.4, -7.3%, respectivement.

Le polyéthylène glycol (PEG-6000) joue un rôle d'indicateur de stress hydrique, les plantules de blé dur s'adaptent à un milieu fluctuant et contraignant en modifiant leurs caractéristiques morphologiques, phénologiques et physiologiques en réponse au déficit hydrique, suivant l'intensité de ce déficit.

Une meilleure croissance des racines permet aux plantes d'absorber l'eau de la couche de sol plus profonde dans des conditions de déficit en eau (Arai-Sano *et al.*, 2014). 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 (Ioio *et al.*, 2007). D'autre part, les cytokinines sont nécessaires à la

croissance des tiges et leur réduction entraîne une croissance réduite de ces derniers afin d'économiser les ressources en eau limitées et permettra leur réaffectation à la croissance des racines (Werner *et al.*, 2008). Dans une étude menée par Bayoumi *et al.* (2008) sur le blé, la réduction induite par le PEG de la biomasse des tiges et des racines et de la longueur des coléoptiles était plus prononcée chez les génotypes sensibles à la sécheresse que chez les génotypes tolérants. Nos résultats corroborent avec ceux de Vuković *et al.* (2022) qui ont constaté que le traitement avec 10% de PEG a induit une augmentation de la biomasse racinaire, allant de 36 à 90%, tandis qu'un traitement sous 20% de PEG a augmenté la biomasse racinaire allant de 32 à 74%.

Selon Koch (2018), le développement et l'activité du système racinaire pour prospecter des horizons de sol plus profonds et en extraire l'eau sont des stratégies de tolérance plus importante. Turner (1981) voit que la croissance racinaire en condition de stress hydrique peut être maintenue par l'ajustement osmotique qui limite la baisse du potentiel de turgescence. Selon Morgan (1984), la plante après quelques heures à quelques jours de stress hydrique en peut maintenir la turgescence dans ses tissus. Le maintien de la turgescence au cours du déficit hydrique contribue à limiter les effets négatifs du stress hydrique sur la conductance stomatique et la photosynthèse.

Selon Debaeke *et al.* (1996), 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. Cette réduction peut être conséquente à un arrêt de la division et de l'élongation cellulaire au niveau des racines. La longueur du coléoptile est aussi une caractéristique variétale fortement influencée par les effets du milieu. Le stress hydrique pendant le stade jeune plantule peut inhiber le développement de cette variable. Selon Moud et Maghsoudi (2008), un faible taux de croissance du coléoptile est associé à une faible aptitude à l'osmorégulation. Zhu (2001) rapporte que la réduction de croissance des parties aériennes est une capacité adaptative nécessaire à la survie des plantes exposées à un stress abiotique.

*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 que la réponse des génotypes étudiés est fonction du caractère mesuré, le niveau de stress

appliqué et le génotype testé. 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 génotype aux traitements T1 (10% PEG-6000) et T2 (20% PEG-6000) relativement au témoin non stressé T0 (0% PEG-6000) et ce pour chaque caractère. Le degré de tolérance de tel génotype 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. On considère un tel génotype comme tolérant à une dose donnée si la valeur de l'écart généré est supérieure à -10%. Ce génotype est jugé comme sensible lorsque cet écart est inférieur à -20%. On le considère comme intermédiaire ou moyennement tolérant si la valeur de l'écart est comprise entre -10 et -20%.

Le tableau 9 montre les valeurs de réduction/augmentation des six variables mesurées aux traitements T1 et T2 relativement au témoin T0 pour les 12 génotypes de blé dur évalués. Les génotypes tolérants à une telle dose pour un tel caractère sont indiqués par un symbole vert (écart supérieure à -10%) ; ceux les plus sensibles (écart inférieure à -20%) sont signalés par un symbole rouge alors que ceux intermédiaire (écarts compris entre -10 et -20%) sont marqués par un symbole orange.

Pour le nombre des racines (NR), les résultats montrent que tous les génotypes de blé dur étudiés sont tolérants aux deux niveaux de stress. Concernant la longueur des racines (LR), les génotypes BDbaa 1920/21 (G3), Simeto (G6), Bidi17 (G9) et Guemgoum Rkhem (G12) sont considérés moyennement sensibles au stress sous une dose de 20% de PEG-6000 (T1). Les génotype T. Polo x ZB (G8) est hautement sensible aux deux niveaux de stress appliqué. Les génotypes restants sont tolérants quel que soit le niveau de stress. L'écart (%) des valeurs prises par le caractère longueur du coléoptile (LC) montre qu'à l'exception de BDbaa 1920/21 (G3), Rahouia (G11) et Guemgoum Rkhem (G12) qui sont moyennement sensibles sous forte dose de stress (T2 = 20% PEG-6000), tous les autres génotypes sont tolérants quel que soit niveau de stress. Les résultats pris par les écarts associés au caractère longueur de la 1^{ère} feuille (LF) montrent que la variété Simeto (G6) est moyennement sensible au stress léger (T1 = 10% PEG-6000) alors que Guemgoum Rkhem (G12) est fortement sensible au stress sévère (T2 = 20% PEG-6000). La variété locale Rahouia (G11) est sensible aux de doses et les autres génotypes présentent une bonne tolérance quelle que soit le niveau de stress. En ce qui concerne la matière fraîche racinaire (MFR), BDbaa 1920/26 (G1), BDDm1920/02 (G2), BDbaa 1920/25 (G4) et Djennah Khetifa (G7) sont des génotypes tolérants alors que Beni Mestina (G5), T. Polo x ZB (G8) et Oued Zenati368 (G10) sont

fortement sensibles quelle que soit la dose de stress appliquée. En plus de ces résultats, Simeto (G6) est moyennement sensible en conditions de stress léger (T1) et Guemgoum Rkhem (G12) l'est aussi sous forte dose de stress (T2). Sous ce dernier traitement, BDbaa 1920/21 (G3), Bidi17 (G9) et Rahouia (G11) exhibent une forte sensibilité au stress hydrique appliqué. Pour la matière fraîche aérienne, les variétés locales Djennah Khetifa (G7), Bidi17 (G9), Rahouia (G11) et Guemgoum Rkhem (G12) montrent une sensibilité légère au stress sévère causé par le traitement 20% de PEG-6000. BDbaa 1920/21 (G3) et Simeto (G6) sont ceux les plus sensibles et affectés par ce traitement alors que les autres génotypes n'ont pas subi des réduction majeurs supérieures à 20% quant à cette variable mesurée.

Tableau 9 : Réduction / augmentation (en %) 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	4.0	52.7	2.4	20.7	54.5	50.2
	T2	8.0	38.1	8.7	10.4	43.8	14.2
G2	T1	0.0	40.0	-7.3	14.1	53.2	61.2
	T2	29.2	-3.9	-8.0	6.3	62.4	10.6
G3	T1	14.3	38.5	0.0	16.2	32.8	30.0
	T2	19.0	-11.7	-14.4	-9.7	-24.6	-28.7
G4	T1	13.0	35.2	7.9	27.2	1.0	43.2
	T2	13.0	34.2	8.7	15.1	39.1	13.0
G5	T1	20.0	17.6	3.2	29.4	-29.0	28.3
	T2	20.0	-1.0	3.2	20.1	-37.4	4.4
G6	T1	0.0	53.8	-4.3	4.5	-11.6	14.0
	T2	0.0	-11.4	-8.8	-19.9	-38.1	-39.3
G7	T1	0.0	92.3	10.2	23.8	22.6	26.4
	T2	5.0	42.7	0.6	9.7	-9.8	-12.4
G8	T1	10.5	-25.2	1.1	27.5	-40.8	24.9
	T2	10.5	-35.8	0.0	23.9	-44.3	-1.2
G9	T1	5.0	12.8	13.7	45.9	-6.8	21.2
	T2	5.0	-10.4	5.6	19.8	-26.3	-13.9
G10	T1	0.0	34.2	6.0	53.6	-32.2	23.9
	T2	-8.7	6.1	3.8	48.3	-38.2	4.3
G11	T1	14.3	33.0	-6.3	-20.3	14.9	19.7
	T2	4.8	5.0	-15.0	-25.6	-21.4	-16.3
G12	T1	5.3	17.4	2.8	12.5	7.7	35.3
	T2	15.8	-16.4	-11.7	-36.1	-16.0	-19.1

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.

Globalement, les résultats obtenus montrent que lorsque la dose de stress augmente, les caractères mesurés subissent des changements de comportement mais ceci demeure dépendant du caractère étudié et génotype testé.

II.3. Indices de stress

II.3.1. Analyse de la variance et valeurs moyennes

L'analyse de la variance (ANOVA) montre l'effet de génotype significatif ($p < 0.05$) à très hautement significatif ($p < 0.001$) pour l'ensemble des indices de stress évaluée (Tableau 10).

Tableau 10 : Carrés moyens de l'analyse de la variance des indices de stress utilisés

SV	ddl	MP	GMP	HM	STI	YI	YSI	RSI
Rep	3	210.57	219.83	267.69	0.03	0.01	0.11	0.14
Génotype	11	1819.09**	1936.98**	2062.70*	0.23**	0.17***	0.25*	0.30*
Erreur	33	546.77	642.44	748.92	0.07	0.04	0.12	0.14

SV = Source de variation, MP = Indice de la productivité moyenne, GMP = Productivité moyenne géométrique, HM = Indice de moyenne harmonique, STI = Indice de tolérance au stress, YI = Indice de rendement, YSI = Indice de stabilité du rendement, RSI = Indice de stress relatif. *, ** et *** = Effets significatifs au seuil de probabilité de 5%, 1% et 0.1%, respectivement.

Les valeurs moyennes de la matière fraîche totale accumulée obtenue en absence et en présence de stress hydrique des différents génotypes évalués ainsi que les valeurs prises par les indices de stress utilisés sont données dans le tableau 11. En absence de stress, la matière fraîche totale la plus importante (205.75 mg) est exprimée par la variété Oued Zenati368 (G10) alors que celle la plus faible (143.25 mg) est matérialisée par la lignée BDdm1920/02 (G2). En présence de 20% de polyéthylène glycol 6000 (T2), les matières fraîches totales les plus élevées (224.25 mg) et les plus faibles (115.68 mg) ont été élaborées par BDbaa 1920/26 (G1) et Simeto (G6), respectivement.

La lignée BDbaa 1920/26 (G1) se distingue par les valeurs les plus élevées des indices de stress évalués. La lignée BDbaa 1920/21 (G3) se caractérise par les plus faibles valeurs de MP, GMP, HM et STI alors que la variété Simeto (G6) présente les plus faibles valeurs de YI, YSI et RSI. Les valeurs élevées des indices de tolérance au stress hydrique suggèrent que le lignée BDbaa 1920/26 (G1) est le plus tolérant alors que les faibles valeurs de ces indices suggèrent que la lignée BDbaa 1920/21 (G3) et la variété Simeto (G6) sont celles les plus sensibles au stress de début de cycle.

Tableau 11 : Valeurs moyennes des indices de stress utilisés.

Génotype	Y _p	Y _s	MP	GMP	HM	STI	YI	YSI	RSI
G1	185.00	224.25	204.63	203.68	202.74	1.31	1.38	1.21	1.33
G2	143.25	172.50	157.88	157.20	156.52	0.78	1.06	1.20	1.32
G3	160.75	116.50	138.63	136.85	135.09	0.59	0.72	0.72	0.79
G4	175.50	211.50	193.50	192.66	191.83	1.17	1.30	1.21	1.32
G5	152.75	143.25	148.00	147.92	147.85	0.69	0.88	0.94	1.03
G6	189.75	115.68	152.72	148.16	143.73	0.69	0.71	0.61	0.67
G7	180.25	159.00	169.63	169.29	168.96	0.91	0.98	0.88	0.97
G8	187.00	166.00	176.50	176.19	175.88	0.98	1.02	0.89	0.97
G9	187.75	155.25	171.50	170.73	169.96	0.92	0.96	0.83	0.90
G10	205.75	186.25	196.00	195.76	195.51	1.21	1.15	0.91	0.99
G11	201.25	165.25	183.25	182.36	181.48	1.05	1.02	0.82	0.90
G12	164.00	134.00	149.00	148.24	147.49	0.70	0.82	0.82	0.89

SV = Source de variation, Y_p = Matière fraîche totale produite en absence stress (mg), Y_s = Matière fraîche totale produite en présent stress (mg), MP = Indice de la productivité moyenne, GMP = Productivité moyenne géométrique, HM = Indice de moyenne harmonique, STI = Indice de tolérance au stress, YI = Indice de rendement, YSI = Indice de stabilité du rendement, RSI = Indice de stress relatif.

L'ordre de classement des génotypes étudiés en fonction des indices de stress utilisés sont résumés dans le tableau 12.

Tableau 12 : Classement des génotypes étudiés en fonction des indices de stress utilisés.

Génotype	Y _p	Y _s	MP	GMP	HM	STI	YI	YSI	RSI	SR	Classement moyen
G1	6	1	1	1	1	1	1	1	1	14	1
G2	12	4	8	8	8	8	4	3	3	58	6
G3	10	11	12	12	12	12	11	11	11	102	12
G4	8	2	3	3	3	3	2	2	2	28	3
G5	11	9	11	11	9	11	9	4	4	79	9
G6	3	12	9	10	11	10	12	12	12	91	11
G7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	63	8
G8	5	5	5	5	5	5	5	6	6	47	4
G9	4	8	6	6	6	6	8	8	8	60	7
G10	1	3	2	2	2	2	3	5	5	25	2
G11	2	6	4	4	4	4	6	9	9	48	5
G12	9	10	10	9	10	9	10	10	10	87	10

SV = Source de variation, Y_p = Matière fraîche totale produite en absence stress (mg), Y_s = Matière fraîche totale produite en présent stress (mg), MP = Indice de la productivité moyenne, GMP = Productivité moyenne géométrique, HM = Indice de moyenne harmonique, STI = Indice de tolérance au stress, YI = Indice de rendement, YSI = Indice de stabilité du rendement, RSI = Indice de stress relatif, SR = Somme des rangs.

Les résultats indiquent le classement des génotypes varie en fonction de l'indice de stress utilisé. Les valeurs de la somme des rangs varient de 14, valeur minimale prise par

BDbaa 1920/26 (G1) à 102, valeur maximale notée chez BDbaa 1920/21 (G3). Des ordres de classement des génotypes similaires pour certains indices (cas de GMP avec STI et YSI et RSI) suggèrent que ces indices sont comparables pour la sélection des génotypes.

II.3.2. Corrélations des indices de stress

Les résultats de l’analyse de corrélation phénotypique entre les différents indices de tolérance au stress ainsi que les matières fraîches produites en absence et en présence de stress sont résumés dans le tableau 13. Les biomasses totales produites en absence (Y_p) et en présence de stress (Y_s) ne sont pas corrélées entre elles, ceci suggère qu’une biomasse élevée produite par un tel génotype en absence de stress hydrique ne conduit pas nécessairement à une biomasse aussi importante en conditions de stress hydrique. Autrement, un génotype performant en absence de stress ne l’est pas forcément en présence de stress et vice versa. Ceci est le cas de la variété Simeto (G6) qui a réussi à matérialiser la biomasse la plus élevée en conditions non stressées parmi les douze génotypes évalués, mais n’a pas réussi à produire une bonne biomasse dans un environnement stressé. Ces résultats sont en accord avec ceux de **Singh et al. (2015)** sur blé tendre.

Tableau 13 : Coefficients de corrélation phénotypique de Pearson (en dessus de la diagonale) et leurs probabilités respectives (en dessous de la diagonale) estimées entre les indices de stress utilisés.

Indices	Y_p	Y_s	MP	GMP	HM	STI	YI	YSI	RSI
Yp		0.2496	0.6453	0.6477	0.6451	0.6305	0.2496	-0.2683	-0.2683
Ys	0.4341		0.9008	0.8938	0.8822	0.9054	1.0000	0.8146	0.8146
MP	0.0235	< 0.0001		0.9955	0.9852	0.9970	0.9008	0.5223	0.5223
GMP	0.0228	< 0.0001	< 0.0001		0.9970	0.9949	0.8938	0.4917	0.4917
HM	0.0235	0.0001	< 0.0001	< 0.0001		0.9869	0.8822	0.4629	0.4629
STI	0.0279	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001		0.9054	0.5261	0.5261
YI	0.4341	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0001	< 0.0001		0.8146	0.8146
YSI	0.3992	0.0013	0.0815	0.1044	0.1297	0.0789	0.0013		1.0000
RSI	0.3992	0.0013	0.0815	0.1044	0.1297	0.0789	0.0013	< 0.0001	

Y_p = Matière fraîche totale produite en absence stress, Y_s = Matière fraîche totale produite en présent stress, MP = Indice de la productivité moyenne, GMP = Productivité moyenne géométrique, HM = Indice de moyenne harmonique, STI = Indice de tolérance au stress, YI = Indice de rendement, YSI = Indice de stabilité du rendement, RSI = Indice de stress relatif. Les valeurs en gras sont statistiquement significative au seuil de probabilité de 5%.

Les indices MP, GMP, HM et STI sont fortement corrélés entre eux et corrélés également aux matières fraîches totales accumulées en absence (Y_p) et en présence de stress (Y_s). Ceci suggère que ces indices sont de bons prédicteurs d'une meilleure performance génotypique en conditions optimales et stressantes. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions de **Fernandez (1992)** et **Singh et al. (2015)**. D'autre part, les indices YI, YSI et RSI sont corrélés entre eux et présentent des associations positives et significatives avec la biomasse fraîche totale en présence de stress (Y_s) induit par le PEG-6000 à 20% de concentration. Leurs corrélations la biomasse fraîche totale en absence de stress (Y_p) ne sont pas significatives. Ces indices pourraient servir donc des critères de criblage du matériel végétal en conditions de stress seulement.

Fernandez (1992) a classé les génotypes selon leur performance en conditions de non-stress et de stress en quatre groupes : génotypes à haut potentiel dans les deux conditions (Groupe A), génotypes potentiels uniquement en absence de stress (Groupe B), génotypes potentiels seulement en conditions de stress (Groupe C) et génotypes à faible potentiel productif dans les deux conditions (Groupe D). D'après cette méthode, les douze génotypes testés dans la présente étude sont classés (Figure 5).

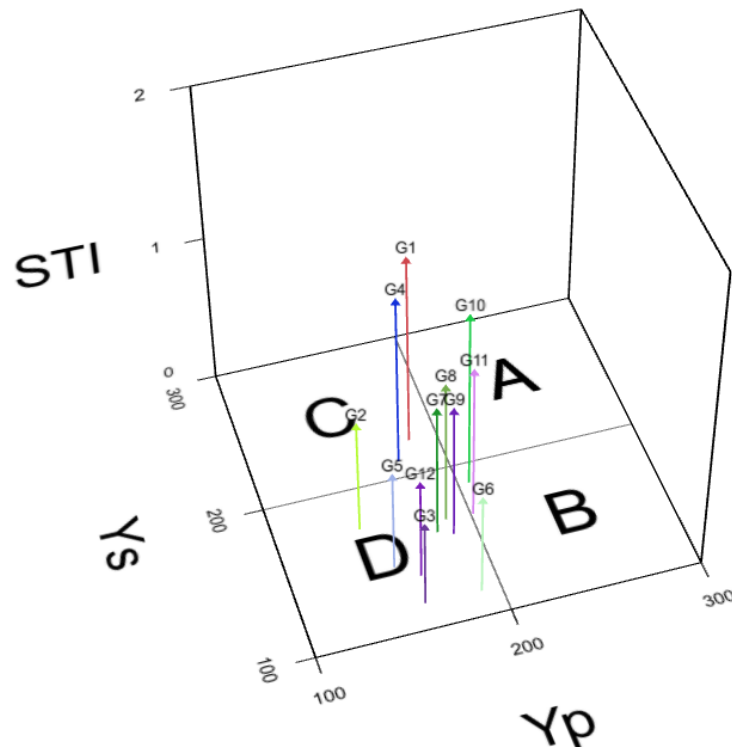


Figure 5 : Répartition des génotypes suivant la classification de Fernandez.

Y_p = Matière fraîche totale produite en absence stress, Y_s = Matière fraîche totale produite en présent stress, STI = Indice de tolérance au stress.

Le graphique à 3D de Fernandez suggère que les variétés locales Oued Zenati368 (G10) et Rahouia (G11) se comportent mieux sous conditions optimales (Groupe B) alors que les nouvelles lignées BDbaa1920/26 (G1) et BDbaa 1920/25 (G4) s'adaptent bien sous conditions de stress précoce en début de cycle (Groupe C). Les autres génotypes ne sont pas performants quel que soit l'environnement. Aucun cultivar n'appartient au groupe A des génotypes performants sous les deux conditions de croissance. **Sio-Se Mardeh et al. (2006)** dans une étude menée pour évaluer la tolérance des génotypes de blé au stress hydrique dans différentes conditions environnementales, ont conclu qu'en présence de stress hydrique léger, MP, GMP et STI étaient plus efficaces pour identifier les génotypes du groupe A. Par contre, sous conditions de stress hydrique sévère, aucun des indices appliqués n'a pu identifier les génotypes du groupe A (**Sio-Se Mardeh et al., 2006**).

II.3.3. Classification des génotypes de blé étudiés sur la base des indices de stress utilisés

La classification hiérarchique multivariée sur la base des indices de stress utilisés, montre que les génotypes évalués se répartissent en trois groupes distincts (Figure 6).

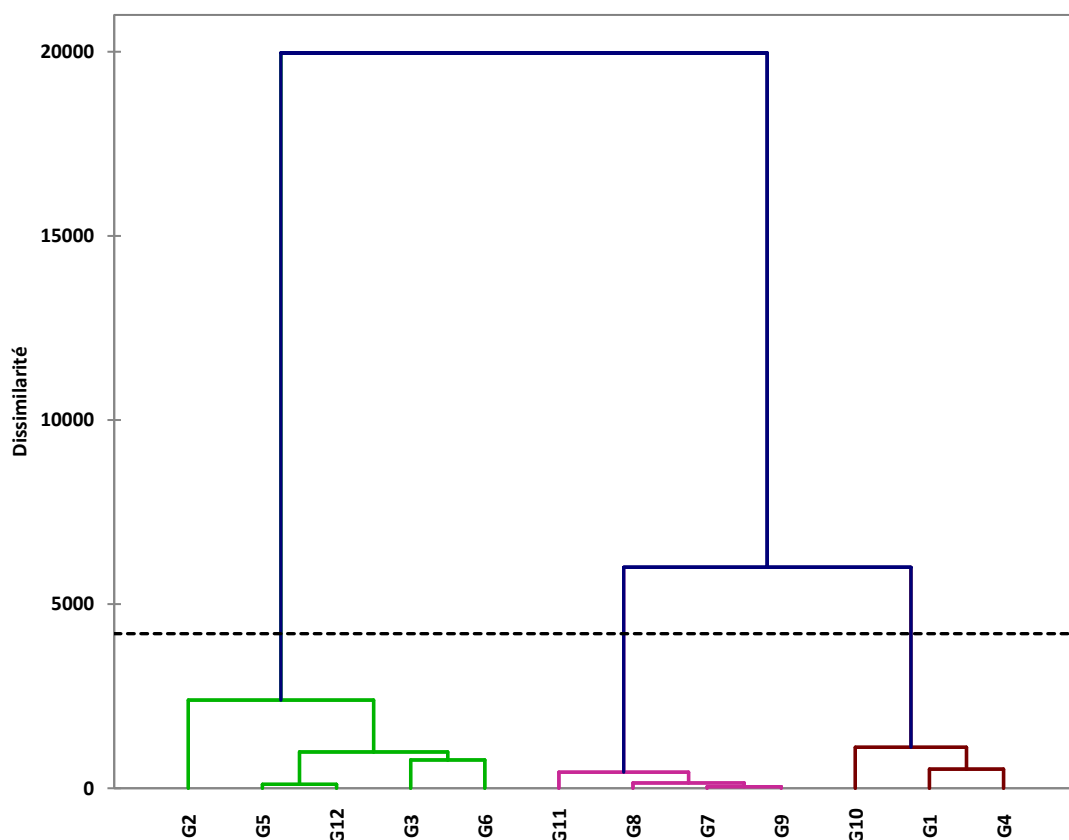


Figure 6 : Classification des génotypes de blé étudiés sur la base des indices de stress utilisés.

Le premier cluster (C1) est formé par trois génotypes dont deux lignées améliorées BDbaa 1920/26 (G1), BDbaa 1920/25 (G4) du même origine (ICARDA) et la variété locale Oued Zenati368 (G10). Le second cluster (C2) est constitué cinq génotypes à savoir deux nouvelles lignées BDdm1920/02 (G2) et BDbaa 1920/21 (G3) de la même provenance (CIMMYT), une variété améliorée nommée Beni Mestina (G5) et une variété locale ancienne Guemgoum Rkhem (G12) et la variété italienne Simeto (G6). Le dernier groupe (C3) contient les quatre variétés locales Djennah Khetifa (G7), Polo x ZB (G8), Bidi17 (G9) et Rahouia (G11).

Les caractéristiques de chaque cluster sont données en tableau 14. Le cluster C1 est caractérisé par les valeurs les plus élevées de tous les indices de stress utilisés, c'est le groupe des génotypes les plus tolérants au stress. D'autre part, le cluster C2 se distingue par les valeurs les plus faibles de ces indices de stress, c'est le groupe des génotypes les plus sensibles au stress. Le cluster C3 est formé des génotypes intermédiaires en termes de tolérance au stress. La distance génétique entre C1 et C2 est de 114.27 et celle entre C1 et C3 est de 59.17. La distance entre C2 et C3 est de 60.75.

Tableau 14 : Valeurs moyennes caractéristiques des indices de stress pour les trois groupes de génotypes identifiés.

Groupe	Y_p	Y_s	MP	GMP	HM	STI	YI	YSI	RSI
C1	188.75	207.33	198.04	195.51	193.15	1.24	1.28	1.22	1.33
C2	162.10	136.39	149.24	146.10	143.25	0.69	0.84	0.87	0.96
C3	189.06	161.38	175.22	174.07	172.95	0.97	0.99	0.86	0.94

Y_p = Matière fraîche totale produite en absence stress, Y_s = Matière fraîche totale produite en présent stress, MP = Indice de la productivité moyenne, GMP = Productivité moyenne géométrique, HM = Indice de moyenne harmonique, STI = Indice de tolérance au stress, YI = Indice de rendement, YSI = Indice de stabilité du rendement, RSI = Indice de stress relatif.

Globalement, la somme des rangs de tous ces indices de sensibilité au stress, la classification hiérarchique basée sur ces indices et le graphique en trois dimensions ont identifié BDbaa 1920/26 (G1), BDbaa 1920/25 (G4) et Oued Zenati368 (G10) comme les génotypes les tolérants au stress hydrique au stade précoce.

Conclusión

Conclusion

Le stress hydrique est l'une des principales contraintes qui entraîne une irrégularité des rendements du blé dur. L'amélioration génétique de cette espèce reste basée sur la recherche des géotypes capables de tolérer ce stress, pour adapter la plante à la variabilité du milieu de production. Ce travail avait pour objectif d'analyser la capacité de différents indices de tolérance à identifier, parmi douze géotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf), ceux qui sont performants, tolérants au stress hydrique induit par le polyéthylène glycol 6000 (PEG-6000) à trois niveaux de stress (T0 = 0%, T1 = 10% et T2 = 20% PEG-6000) au stade de plantule. Les résultats montrent la présence d'une variation importante entre les géotypes évalués, les niveaux de stress appliqué et leur interaction. Cette variation est à d'origine de diversité des gènes qui représente une caractéristique fortement recherchée par les améliorateurs.

Au stade germinatif, les résultats montrent des comportements variés des géotypes testés vis-à-vis du stress hydrique imposé. Les moyennes de tous les paramètres de germination sont réduites à mesure que la concentration du PEG-6000 augmente et chaque dose est classée dans un groupe statistique distinct, à l'exception du temps moyen de germination à T1 et T2 qui surpasse le témoin. Le pourcentage final de germination diminue de 99.67% en absence de stress (T0) à 75.61% en présence de stress T2 à la dose 20% de PEG-6000.

Le comportement des plantules de blé dur envers les différentes concentrations de PEG-6000 appliqué peut se traduire selon le degré de tolérance de chaque géotype. En moyenne de tous les géotypes, on a constaté une légère augmentation des valeurs prises par les paramètres de la croissance des plantules sous stress hydrique léger T1 (10% de PEG-6000), mais les effets négatifs du PEG-6000 ont été observés sous stress sévère (20% de PEG-6000) qui se sont traduits par des réductions nettes des valeurs moyennes de ces paramètres.

Les résultats obtenus après l'évaluation des indices de sensibilité aux stress indiquent l'absence de corrélation entre biomasses totales produites en absence (Y_p) et en présence de stress (Y_s) indiquant que les géotypes productifs sous stress hydrique ne les sont pas forcément sous conditions normales.

De par leurs corrélations positives et significatives entre eux et avec Y_p et Y_s , les indices MP, GMP, HM, STI constituent des outils de sélection fiables pour l'amélioration de blé sous différents environnements. La somme des rangs générée par classement des géotypes sur la base des valeurs prises par les indices de stress, la classification hiérarchique des géotypes

basée sur les moyennes des indices de stress et le graphique en trois dimensions de Fernandez ont identifié les lignées BDbaa 1920/26 (G1), BDbaa 1920/25 (G4) et la variété locale Oued Zenati368 (G10) comme des sources précieuses de tolérance au stress hydrique précoce. Ces génotypes pourraient faire l'objet d'une étude d'adaptabilité et de stabilité plus approfondie et peuvent également être utilisés en tant que géniteurs porteurs des gènes désirables dans les programmes d'amélioration de blé.

*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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- CIC (2016).** Conseil International des Céréales. <https://www.igc.int/fr/>
- CIC (2021).** Conseil International des Céréales. <https://www.igc.int/fr/>
- Côme, D. (1970).** Les obstacles à la germination. Masson & Cie, Paris, 135 p.
- 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.
- 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.
- Feillet, P. (2000).** Le grain de blé : composition et utilisation. *INRA*. Paris.
- Fellahi, Z. E. A., 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.

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 pages.

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.

Kirouani, A., Kiar, R. O., Boukhalfoun, L., & Fellahi, Z. E. A. (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 pages.

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.

ONFAA (2017). Pré-Bilan de la campagne céréalière 2016/2017. N°2.

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., C. Dordas, F. Gekas, C. Pankou, E. Ninou, I. Mylonas, K. Tsantarmas, I. Sistanis, E. Sinapidou, A. Lithourgidis and J.K. Petrevska.

Papathanasiou, F., Dordas, C., Gekas, F., Pankou, C., Ninou, E., Mylonas, I., ... & 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.

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.

Ranal, M. A., & Santana, D. G. D. (2006). How and why to measure the germination process?.

Brazilian Journal of Botany, **29**, 1-11.

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.

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 conditions. *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., & Schmölling, 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.

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

Résumé

Cette étude est menée au Centre National de Contrôle et de Certification des semences et des plants (CNCC-Sétif) au cours de l'année 2021/22 avec comme objectif d'analyser la capacité de quelques indices de stress à identifier des géotypes tolérants de blé dur au stress hydrique induit par le polyéthylène glycol 6000 (PEG-6000) à différents niveaux de stress (0, 10 et 20%) au stade plantule. Les résultats montrent des comportements variés des géotypes testés suivant le niveau stress hydrique appliqué et l'indice de sensibilité au stress employé. Les biomasses fraîches totales produites en absence de stress (Y_p) et celle en sa présence (Y_s) ne sont pas corrélées entre elles, suggérant que les géotypes productifs sous stress hydrique ne les sont pas nécessairement dans des conditions non stressantes. Les indices MP, GMP, HM et STI sont hautement corrélés entre eux et à Y_p et Y_s . Ces indices semblent donc de bons prédicteurs de la performance génotypique en présence et en absence de stress. La somme des rangs de tous les indices de stress utilisés, la classification hiérarchique basée sur les moyennes de ces indices et le graphique en 3D de Fernandez ont identifié les lignées BDbaa 1920/26 (G1) et BDbaa 1920/25 (G4), et la variété locale Oued Zenati368 (G10) comme les géotypes les plus tolérants au stress hydrique précoce. Ces géotypes pourraient être utilisés en tant que géniteurs porteurs des gènes désirables dans les programmes futurs d'amélioration de blé dur.

Mots clé : *Triticum durum*, PEG-6000, germination, comportement, indices de stress, tolérance.

Abstract

This study was carried out at the National Center for seeds and plants Control and Certification (CNCC-Setif), during the 2021/22 year with the aim of analyzing the ability of some stress indices to identify drought tolerant durum wheat genotypes using the polyethylene glycol 6000 (PEG-6000) at different stress levels (0, 10 and 20%) at the seedling stage. The results showed varied behaviors of the genotypes tested depending the level of water stress applied and the stress tolerance index used. The total fresh biomasses produced in the absence of stress (Y_p) and that in its presence (Y_s) were not correlated to each other, suggesting that the performant genotypes under stress were not necessarily so under non-stressful conditions. The MP, GMP, HM and STI indices are highly correlated to each other and to Y_p and Y_s . Therefore, these indices seem to be good predictors of genotypic performance in the presence and absence of stress. The sum of the ranks of all the stress indices used, the hierarchical classification based on the means of these indices and the 3D plot of Fernandez identified the lines BDbaa 1920/26 (G1) and BDbaa 1920/25 (G4), and the local variety Oued Zenati368 (G10) as the most tolerant genotypes to early water stress. These genotypes could be used as progenitors carrying desirable genes in future durum wheat breeding programs.

Keywords: *Triticum durum*, PEG-6000, germination, behavior, stress indices, tolerance.

ملخص

أجريت هذه الدراسة على مستوى المركز الوطني لمراقبة البذور والشتلات والمصادقة عليها (CNCC-Sétif) خلال العام 2021/22 بهدف تحليل قدرة بعض مؤشرات الاجهاد على تحديد الأنماط الوراثية الأكثر تحملاً للإجهاد المائي الناجم عن البولي إيثيلين جليكول 6000 (PEG-6000) عند مستويات إجهاد مختلفة (0، 10 و 20%) في مرحلة النمو الأولى. أظهرت النتائج سلوكيات متنوعة للأنماط الوراثية المختبرة حسب مستوى الإجهاد المائي المطبق ومؤشر حساسية الإجهاد المستخدم. عدم ارتباط الكتل الحيوية الطازجة المنتجة في غياب الإجهاد (Y_p) وفي وجوده (Y_s) ببعضها البعض يشير إلى أن الأنماط الجينية ذات الكفاءة العالية تحت الإجهاد المائي ليست بالضرورة كذلك في ظل ظروف غير مجهدة. ارتبطت المؤشرات MP، GMP، HM و STI ارتباطاً وثيقاً ببعضها البعض ومع Y_p و Y_s . لذلك يبدو أن هذه المؤشرات ذات تنبؤات جيدة لكفاءة الأنماط الوراثية في وجود الإجهاد وغيابه. حدد متوسط مجموع الرتب لجميع مؤشرات الإجهاد المستخدمة، التصنيف الهرمي على أساس القيم المتوسطة لهذه المؤشرات ومخطط فرنانديز ثلاثي الأبعاد السلالتين BDbaa 1920/26 (G1) و BDbaa 1920/25 (G4)، والصنف المحلي Oued Zenati368 (G10) على أنهما أكثر الأنماط الوراثية تحملاً للإجهاد المائي المبكر. يمكن استخدام هذه الأخيرة كأسلاف تحمل الجينات المرغوبة في برامج تربية القمح الصلب المستقبلية.

كلمات مفتاحية: *Triticum durum*، PEG-6000، إنتاش، سلوك، مؤشرات الإجهاد، مقاومة.