الـجمهورية الـجزائرية الـديمقراطية الـشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعـة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج
Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A
كلية علـوم الطبيعة والحياة وعلـوم الأرض والكون
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers
قسم العلـوم 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 de plantes

Intitulé :

Variabilité de la croissance entre des variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*) sous déficit hydrique au début de cycle

Présenté par :

DJOUDI Khaoula & KHENNOUF Khaoula

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

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
Président :	Mme KELALECHE Hizia	MCA	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A
Encadrant :	M. SEBBANE Mahieddine	MCB	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A
Examinateur :	M. FELLAHI Zine El Abidine	MCA	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A

Année universitaire : 2024/2025

Dédicaces

À ma chère Mounoune, Ton amour est mon havre de paix, ta tendresse ma plus grande force. Merci d'illuminer mon chemin de ta présence bienveillante.

À mon père Lounis, Tu es le pilier de ma vie, l'orgueil de mon cœur. Tes renoncements et ta clairvoyance ont bâti l'édifice de mon existence.

À mon frère Hicham Ayoub Islam, Mon allié fidèle, mon soutien indéfectible. Ta présence transforme chaque difficulté en défi surmontable.

À ma sœur Asma, Ton âme généreuse et ta compagnie sont des trésors inestimables. Bien plus qu'une sœur, tu es l'amie que la vie m'a donnée.

À Houssam, le fils de ma sœur, Rayon de soleil de notre foyer, puisse ton chemin être pavé de joies et couronné de succès.

À mes tantes Noura et Rachida, Votre affection est un présent inestimable. Vos soins attentifs et votre gaieté embellissent nos jours.

À ma très chère grand-mère, Tes récits, tes invocations et tes bras accueillants constituent notre patrimoine le plus noble. Merci d'être tout à la fois notre ancrage et notre guide

Khaoula Djoudi

Dédicaces

Mes remerciements vont tout d'abord à mon DIEU

À mon père Mostafa , mon épaule sur laquelle je peux m'appuyer dans cette vie, je le remercie pour son soutien, ses sacrifices et son amour.

À ma mère, qui m'a enseigné la persévérance et l'espoir et qui a éclairé mon chemin de ses prières, à la plus grande personne au monde, ma mère, Nabila.

À ma chère sœur Sara, mon soutien et mon guide dans cette vie.

À mon cher frère Youssef ,la bénédiction que Dieu m'a donnée.

A mon frère et ami Badreddine

À mes petits soldats, Aya, Aridje et Djouri .

A ma partenaire et compagne ***Khaoula,*** *qui a été à mes côtés dans les moments les plus difficiles.*

A mes collègues de ***promo*** *et a tous ceux qui ont contribué de prés et de loin pour ce que ce travail soit possible.*

Khaoula KHENNOUF

Remerciements

En premier lieu, nous remercions ALLAH le Tout Puissant de nous avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à notre encadrant. Dr. **SEBBANE Mahieddine**, de nous diriger pour la préparation de ce mémoire. Il a toujours fait tout son possible pour nous aider. Qu'il trouve ici l'expression de notre très vive reconnaissance, de notre profond respect et de notre infinie gratitude pour tous les efforts déployés ainsi que pour ses précieux conseils pour la réalisation de ce travail, On avoue qu'il a toujours été présent, compétent et surtout efficace dans sa supervision. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance la plus dévouée pour toutes les informations, références bibliographiques, réflexion, correction….

Nous tenons à remercier les membres de jury ;

Dr. **KELALECHE Hizia** pour avoir bien voulu présider le jury

Dr. **FELLAHI Zine El Abidine** pour avoir bien voulu examiner notre travail, c'est un honneur pour nous pour juger

Nous aimerons remercier tous nous enseignants durant tout notre parcours d'étude.

Nous exprimons notre sincère gratitude à tout les ingénieurs des laboratoires de l'université Mohamed El Bachir El Ibrahimi – BBA

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

Table des matières

Liste des tableaux.....I

Liste des figures.....II

Liste des abréviations.....III

I. Introduction.....1

II. Matériels et méthodes.....4

1. Matériel végétal.....4

2. Installation de l'essai.....4

3. Conduite de l'essai.....5

3.1. Eclaircissage et irrigation.....5

3.2. fertilisation:.....5

4. Mesures.....6

4.1. Mesure morphologiques.....6

4.2. Mesures physiologiques.....7

4.3. Indice de tolérance au stress.....8

5. Analyse des données.....8

III. Résultats.....9

1. Mesures au stade première feuille.....9

2. Mesures au stade troisième feuille.....12

3. Indice de tolérance au stress.....14

4. Analyses des corrélations.....15

4.1. Corrélations au stade première feuille.....15

4.2. Corrélations au stade troisième feuille.....16

IV. Discussion.....19

1. Mesures de biomasses.....19

2. Mesures morphologiques.....21

3. Mesures physiologiques.....22

V. Conclusion.....24

VI. Références bibliographiques.....25

Résumé.....

ملخص.....

Liste des tableaux

Tableau 1: Resultats de l'analyse de la variance des mesures au stade premiere feuille 9

Tableau 2 : Moyennes Des mesures au stade premiere feuille des differents traitements.....11

Tableau 3: Analyse de la variance des mesures effectuees au stade troisieme feuille 12

Tableau 4: Moyennes des mesures au stade troisieme feuille des differents traitements.....13

Tableau 5 : Indice de tolerance au stress (ysi) des genotypes etudies 15

Tableau 6: Matrice des correlations (pearson) entre les differentes mesures effectuees au stade de la premiere feuille pour les traitements irrigue (temoin) et stresse 16

Tableau 7 : Correlations (Pearson) Entre les differents parametres mesures au stade de troisieme feuille pour les traitements irrigue (temoin) et stresse.....18

Liste des figures

Figure 2: Installation de l'essai en pot.....5
Figure 3: Photos de la recolte et de quelque mesures au stade premiere feuille.....7

Liste des abréviations

G : Génotype

G × S : Interaction Génotype × Stress

IF : Indice foliaire (surface des 3 premières feuilles)

LC : Longueur du coléoptile

LR : Longueur des racines

LSD: Least Significant differene

PFA : Poids frais de la partie aérienne

PFR : Poids frais des racines

PFT : Poids frais total

Pr > F : p-value associée à F

PR/PA ou PSR/PSA : Rapport poids sec racinaire / poids sec aérien

PS : Poids spécifique des feuilles

PSA : Poids sec de la partie aérienne

PSR : Poids sec des racine

PST : Poids sec total

PT : Poids de pleine turgescence

S : Stress

SF : Surface foliaire

SM : Stabilité membranaire

SPAD : Teneur en chlorophylle

TRE : Teneur relative en eau

YSI : Indice de tolérance au stress YSI = YS /YF (Bouslama et Schapaugh, 1984).

I. Introduction

Le blé est l'une des principales sources de nutriments pour l'alimentation humaine, assurant environ 20 % des besoins énergétiques mondiaux (Shewry, 2021). Le blé dur (*Triticum durum Desf.)* est la deuxième espèce de blé la plus cultivée, représentant environ 5 % des surfaces mondiales consacrées à cette culture (Kirouani *et al.*, 2019).

Originaire du Croissant fertile, le blé dur est une plante annuelle issue d'un croisement interspécifique entre *Triticum urartu* et *Aegilops speltoides* (Ceoloni & Jauhar, 2006). Sa propagation dans le bassin méditerranéen a favorisé, sous l'effet de la sélection naturelle et anthropique, le développement de populations locales adaptées aux conditions agroécologiques. Ces variétés ancestrales ont constitué la base de l'alimentation régionale jusqu'à la Révolution verte (Ortiz *et al.*, 2007), avant d'être remplacées par des variétés améliorées, caractérisées par une stature réduite, une précocité accrue et un haut rendement.

Le blé dur présente une forte capacité d'adaptation à des environnements agroécologiques variés (Bassi et Sanchez-Garcia, 2017). Cultivé mondialement sur environ 16 millions d'hectares, sa production annuelle est estimée entre 35 et 40 millions de tonnes (Beres *et al.*, 2020). Son grain se distingue par une teneur élevée en protéines et en pigments jaunes, ainsi que par une texture très dure, adaptée à la production de semoule. Ces propriétés confèrent à la pâte une fermeté et une stabilité idéales pour la production de pâtes alimentaires de haute qualité et d'autres produits dérivés (Amamou *et al.,* 2017). Il est également largement utilisé dans la préparation de plats traditionnels tels que le couscous, le frik ou le bourghol, notamment dans les pays méditerranéens.

En Algérie, le blé dur représente la principale culture céréalière, occupant environ 46 % des superficies céréalières, soit près de 1,6 million d'hectares concentrés principalement dans les hauts plateaux et les zones semi-arides (Daoudi et Bouzid, 2020). La production annuelle varie actuellement entre 1,3 et 3,1 millions de tonnes, en fonction des conditions climatiques (Daoudi et Bouzid, 2020). L'augmentation de la production résulte principalement de l'amélioration des rendements, qui ont progressé en moyenne de 0,03 tonne par hectare pour atteindre un pic de 1,91 t/ha entre 1997 et 2018. Toutefois, ces performances restent nettement inférieures aux rendements potentiels estimés et à la moyenne mondiale de 2,9 t/ha (FAOSTAT, 2018).

Cette production demeure insuffisante pour satisfaire la demande intérieure, estimée à environ 202 kg de blé par habitant et par an, pour une population de 44 millions d'habitants (Brahim, 2020). En conséquence, l'Algérie demeure fortement dépendante des importations, qui peuvent représenter jusqu'à 50 % du commerce mondial de blé dur (Daoudi et Bouzid, 2020). Face à cette situation, les autorités algériennes ont engagé des efforts visant l'autosuffisance en blé dur à l'horizon 2025, reposant sur l'extension des surfaces cultivées, l'amélioration génétique des semences et la modernisation des pratiques agricoles (Gana, 2020).

La culture du blé dur en Algérie est principalement conduite en régime pluvial. Cette dépendance vis-à-vis des précipitations se traduit par des rendements faibles, irréguliers et globalement limités. Le climat méditerranéen, prédominant dans les zones de culture, est particulièrement vulnérable au changement climatique. Celui-ci se manifeste par une hausse des températures supérieure à la moyenne mondiale et une augmentation de l'irrégularité des précipitations, menaçant ainsi la production agricole et la sécurité alimentaire (Baralla *et al.*, 2014; Ceglar *et al.,* 2021). Cette situation intensifier le stress hydrique, déjà présent, et ses effets graves sur la plante de blé dur, affectant sa croissance, sa physiologie et par conséquence les rendements de la culture. Des études prévoit que les terre favorable à la clôture de blé dur en méditerranée et en nord-américain, vont être réduites par 20% d'ici 2050 (Ceglar *et al.*, 2021).

Le stress hydrique affecte sévèrement la croissance et la productivité végétale (Wang *et al.*, 2003). Il induit une réduction de la teneur en eau des feuilles, de la conductance stomatique et de l'activité photosynthétique, entraînant un affaiblissement général de la plante (Flexas *et al.*, 2004). Ces altérations physiologiques réduisent la capacité de la plante à capter et utiliser efficacement la lumière, compromettant ainsi sa croissance et par conséquence sa productivité.

Chez le blé, le déficit hydrique impacte directement les trois composantes majeures du rendement : le nombre d'épis par unité de surface, le nombre de grains par épi et le poids de mille grains (Assem *et al.*, 2006). L'ampleur de cet impact dépend du stade phénologique auquel le stress survient, avec des effets particulièrement prononcés durant les phases critiques de floraison et de remplissage des grains (Debaeke *et al.*, 1996).

Pour faire face à ces défis, plusieurs stratégies sont envisagées, notamment l'optimisation de la gestion de l'eau, l'ajustement des dates de semis et la sélection de génotypes tolérants à la sécheresse, capables de maintenir des rendements acceptables sous contraintes hydriques (Ahmad *et al.*, 2022). Bien que la phase de remplissage des grains soit reconnue pour sa sensibilité à la sécheresse, des déficits hydriques sévères peuvent désormais survenir à tout moment du cycle cultural, comme observé dans la région de Bordj Bou Arréridj (Algérie) lors de la campagne 2024/2025. Les précipitations enregistrées y ont été particulièrement déficitaires : 16 mm en janvier, 15 mm en mars et seulement 4 mm en avril (Tutiempo.net), exposant les cultures à des stress hydriques sévères dès les premiers stades de développement, parfois avant même la levée selon la date de semis.

Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer la croissance de 14 génotypes de blé dur soumis ou non à un déficit hydrique induit précocement, depuis la levée jusqu'aux stades de la première et de la troisième feuille. L'analyse portera sur des caractères morphologiques (biomasse aérienne, surface des feuilles, …) et physiologiques (teneur relative en eau, indice de chlorophylle) afin de caractériser les réponses précoces au stress hydrique.

Cette approche permettra d'identifier les mécanismes impliqués dans la tolérance au déficit hydrique dès les stades initiaux de développement, dans l'objectif de contribuer à la sélection variétale adaptée aux conditions climatiques méditerranéennes.

II. Matériels et méthodes

L'étude a été réalisée au niveau de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers de Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj (BBA).

1. Matériel végétal

Cette étude évalue quatorze (14) génotypes de blé dur, répartis comme suit :

- six (06) variétés locales ancestrales (G1 à G6) : Mohamed bebachir, Oued Zenati, Bidi17, Heba, Guemgoum, et Djenah Khotifa
- quatre (04) génotypes améliorés actuellement cultivés en Algérie (G7 à G10) : Boutaleb, Simeto, Gtadur et Vitron
- quatre (04) génotypes non inscrits au catalogue officiel algérien (G11 à G14).

2. Installation de l'essai

L'essai vise à évaluer la croissance de 14 génotypes de blé dur soumis à un déficit hydrique au début de leur cycle de développement.

Stérilisation et pré germinations des graines : Les graines des génotypes étudiés ont été stérilisées avec une solution de chlorure de sodium (05 %) pendant 15 minutes, puis rincées à l'eau distillée 3 fois . Les graines ont été germées dans des boîtes sur du papier absorbant humide, à une température de 27 °C.

Semis : les graines pré-germées ont ensuite été semées dans des pots en plastique, 15*15*15 cm, remplis de sol tamisé (de diamètre 03 mm), utilisé comme substrat.

L'essai a été conduit sous un abri de pluie et les pots ont été répartie selon un dispositif complètement aléatoire (figure 2).

A : Semis B : Vue de l'essai en pot sous un abris de pluie

Figure 1: Installation de l'essai en pot

3. Conduite de l'essai

3.1. Eclaircissage et irrigation

À la levée, huit (8) plants ont été conservés dans chacun des 28 pots, destinés aux mesures au stade première feuille (ligule visible), soit 14 génotypes × 2 conditions (irriguée et stressée). Pour les mesures au stade troisième feuille, quatre (04) plants ont été conservés par pot, dans les 84 pots de l'essai (14 génotypes x 2 régimes d'irrigations× 3 répétitions).
L'irrigation des plantes a été effectuée régulièrement trois fois par semaine jusqu'à la récolte. La quantité d'eau disponible pour les plantes, à partir du stade levée, a été contrôlée et suivie par pesée.. Après la détermination de poids sec du sol et le poids au niveau de capacité au champ, la teneur en eau a été maintenue comme suit:

- 80 % à 90 % de la capacité au champ pour le traitement irrigué, et
- 40 % à 45 % de la levée à la récolte, pour le traitement sous stress hydrique.

3.2. fertilisation:

Pour couvrir les besoins nutritifs des plants, une fertilisation a été assurée chaque semaine par l'apport de 50 ml d'une solution nutritive à chacun des pots, jusqu'à la récolte. La solution a été préparée en dissolvant, dans 15 litres d'eau, trois engrais hydrosolubles :

– 5.5 g d'urée (46-0-0)
– 10.5 g de nitrate de potassium (13-0-44)
– 21 g de l'engrais Farmer (20-20-20 + microéléments)

4. Mesures

les mesures listés ci-dessous ont été effectuées a deux stades : F1 (première feuille, 11 sur l'échelle de zadok) et F3 (troisième feuille, 13 sur l'échelle de zadok).

4.1. Mesure morphologiques

Sur 6 plants collectés par traitement au stade F1 et 4 plants par traitement au stade F3 les mesures suivantes a été effectuées:

- **Poids frais de la partie aérienne**: a été mesuré immédiatement après la récolte des plantes à l'aide d' une balance de précision .
- **poids frais du système racinaire** : les pesées ont été effectuées par un balance de précision et les racines ont été soigneusement lavées puis débarrassées de l'excès d'eau par un papier absorbant.
- **poids sec du système aérien** : Le poids sec de la partie aérienne a été mesuré après séchage dans une étuve pendant 48 h à 60 C.
- **poids sec du système racinaire** : le poids sec de la racine a été mesuré après avoir séché les racines pendant 48 h dans une étuve à 60 C.
- **Ration PSA/ PSR** : en devisant le poids sec du système racinaire sur la poids sec de la partie aérienne.
- **Surface foliaire (index foliaire)**- calculée à partir de photos de la première feuille au stade F1, et de trois (03) feuilles au stade F3, en utilisant le seuil de coloration avec le logiciel « *ImageJ 1.52 »* (Schneider *et al.*, 2012).
- **Longueur des racines**: mesurée, à l'aide du logiciel I *ImageJ 1.52,* sur des photos desracines.

- **Longueur du coléoptile** : mesurée sur des image dans plants au stade F1, à l'aide du logiciel I *ImageJ 1.52.*

A

B

C

D

E

A : Plant au stade première feuille, B : plants récoltés, C : Partie aérienne des plant, D : Système racinaire, E : pesé des poids frais

Figure 2: Photos de la récolte et de quelque mesures au stade première feuille

4.2. Mesures physiologiques

- **Teneur relative en eau** (TRE) : La TRE des feuilles a été déterminée selon la méthode de Barrs (1968), aux stades F1 et F3. Le **poids frais (PF)** a été obtenu par pesée immédiate des

limbes après prélèvement. Les feuilles ont ensuite été placées dans des tubes à essai contenant de l'eau distillée, conservés à l'obscurité dans un endroit frais pendant 24 heures. Après saturation, les feuilles ont été essuyées, puis pesées afin d'obtenir le poids à turgescence **(PT)**. Enfin, elles ont été placées dans une étuve à 85 °C pendant 24 heures, puis pesées pour déterminer le **poids sec (PS)**. La teneur relative en eau a été calculée à l'aide de la formule suivante : **TRE (%) = [(PF − PS) / (PT − PS)] × 100**

En plus de la TRE, au stade troisième feuille les mesures suivante ont été réalisées :

- **Teneur en chlorophylle** : L'indice de chlorophylle a été déterminé sur les feuilles à l'aide du chlorophyllomètre **SPAD-502**. Les mesures sont exprimées en unités SPAD (Soil Plant Analysis Development).
- **Stabilité membranaire (SM %)** : Le test de stabilité membranaire a été réalisé selon la méthode décrite par Bajji *et al.* (2001). Dix segments de feuilles de 1 cm de long ont été placés dans des tubes à essai. Après un rinçage soigneux, 10 mL d'eau distillée ont été ajoutés dans chaque tube. À l'aide d'un conductimètre, une première mesure de la conductivité électrique (CE1) a été effectuée après 24 heures à température ambiante (T = 25 °C). Une seconde mesure (CE2) a été prise après incubation des échantillons dans un bain-marie à 100 °C pendant 60 minutes.

Le pourcentage de cellules saines (SM%) a été estimé à partir de l'augmentation de la conductivité selon la formule suivante : SM (%) = (1 - (CE1 / CE2)) × 100.

4.3. Indice de tolérance au stress

Pour évaluer la sensibilité des génotypes au stress hydrique, l'indice de tolérance au stress (YSI) proposé par Bouslama et Schapaugh (1984) a été utilisé. La valeur de cet indice est le résultat du le rapport entre le rendement en matière sèche produit en conditions de stress (YS) et le rendement en conditions non stressantes (YF) : YSI= YS/YF

5. Analyse des données

À l'aide du logiciel XLSTAT (2019), une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée afin de vérifier la signification des effets principaux et des interactions. Cette analyse a été complétée par le test LSD (Least Significant Difference) pour la comparaison de moyennes deux à deux.

Des analyses de corrélations linéaires (Pearson) ont été menées afin d'examiner les liaisons entre les moyennes des variables mesurées

III. Résultats

1. Mesures au stade première feuille

L'analyse de la variance (Tableau 1) a montré que les effets principaux des deux facteurs étudiés, à savoir les génotypes et le stress hydrique, étaient significatifs pour l'ensemble des paramètres mesurés au stade première feuille. L'interaction entre ces deux facteurs a également eu une influence significative sur ces mesures.

Tableau 1: résultats de l'analyse de la variance des mesures au stade première feuille

	PFA	PFR	PSA	PSR	PR/PA	LR	LC	SF	PS	TRE
R^2	0,92	0,81	0,92	0,89	0,96	0,79	0,85	0,86	0,88	0,66
F	60,04	21,58	60,81	40,74	139,12	19,37	28,65	32,63	37,63	10,22
Pr > F	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
G	28,14	17,11	62,71	30,91	80,05	16,18	42,41	51,17	68,57	5,49
	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
S	921,58	176,27	453,80	291,04	2284,76	97,11	7,83	30,77	12,77	141,62
	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001
G*S	25,67	14,16	28,69	31,32	33,14	16,58	16,49	14,23	8,61	4,84
	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

PFA : Poids frais de la partie aérienne, PFR : poids frais des racines, PSA : poids sec de la partie aérienne, PSR : poids sec des racines, PR/RA : PSR/PSA, LR longueur des racines, LC : Longueur du coléoptile, SF : surface foliaire, PS : Poids spécifique des feuilles, TRE : Teneur relative en eau. R^2 : Coefficient de détermination, F : Statistique F de Fisher, Pr > F : p-value associée à F, G : Génotype, S : Stress, G × S : Interaction Génotype × Stress.

Les résultats obtenus (tableau 2) montre que les poids frais de la partie aérienne (PFA) ont varié entre 88 mg, enregistré par le traitement G6 × stressé, et 234 mg, enregistré par G12×irrigué. Parmi les génotypes, G11 a présenté la moyenne la plus élevée (198 mg), tandis que G6 a affiché la moyenne la plus faible (124 mg).

Concernant le poids frais des racines (PFR), le traitement G11 × irrigué a également présenté la moyenne la plus élevée (268 mg), tandis que G1 × stressé et G3 × stressé ont enregistré les valeurs les plus faibles (132,33 mg). Parmi les génotypes, G2 a affiché la moyenne la plus élevée (224 mg), en association avec les génotypes G4, G11 et G13, selon le test LSD. À l'opposé, G6 a présenté le PFR moyen le plus faible.

En plus du PFA, le génotype G11 a également enregistré les moyennes les plus élevées pour plusieurs autres paramètres : le poids sec de la partie aérienne (PSA) (29,58 mg), le poids spécifique des feuilles (PS) (5,95 mg/cm²) et la teneur relative en eau (TRE) (96 %), en association avec les génotypes G4, G8, G10, G9 et G6, selon le test LSD.

Le génotype G13 s'est distingué par les valeurs les plus élevées de la longueur des racines (LR) (20,57 cm) et de la longueur du coléoptile (LC) (1,98 cm). À l'inverse, le génotype G3 a affiché la longueur racinaire moyenne la plus faible (15,71 cm), tandis que G9 a enregistré la longueur moyenne du coléoptile la plus faible (1,41 cm).

Enfin, les génotype G6 a surpassé les autres pour le rapport PSR/PSA (1,61) et G10 les a surpassé pour la surface de la première feuille (3,63 cm^2).

L'effet du déficit hydrique sur les paramètres mesurés s'est révélé globalement négatif. il a causé des réductions moyennes de 32 % pour le poids frais de la partie aérienne (PFA), 21 % pour le poids frais des racines (PFR), 19 % pour le poids sec de la partie aérienne (PSA), 9 % pour la longueur des racines (LR), 2 % pour la longueur du coléoptile (LC), 5 % pour la surface foliaire (SF), 6 % pour le poids spécifique des feuilles (PS) et 4 % pour la teneur relative en eau (TRE). En revanche, l'exposition au stress a entraîné une augmentation de 24 % du poids sec des racines (PSR) et de 55 % du rapport PSR/PSA pour l'ensemble des génotypes étudiés.

Cependant, cet effet du déficit hydrique n'a pas affecté l'ensemble des génotypes de manière uniforme. Par exemple, les réductions ont dépassé 50 % pour le PFA et 44 % pour le PFR chez les génotypes G12 et G3. À l'opposé, les génotypes G11 et G13 ont enregistré des réductions limitées à environ 3 % pour le PFR, tandis que des augmentations de PFR comprises entre 3 % et 17 % ont été observées chez les génotypes G14, G11, G6 et G10, dans cet ordre croissant.

De manière similaire, les réductions du poids sec de la partie aérienne (PSA) les plus marquées ont été observées chez les génotypes G5, G6 et G12, avec des diminutions dépassant 39 %. À l'inverse, des augmentations modérées ont été enregistrées chez G11 et G13, avec respectivement 4 % et 8 %.

Le poids sec des racines (PSR) a également été impacté de manières différentes par le déficit hydrique, ou des augmentations notables chez G14 (92 %) et G10 (72 %) ont été enregistrées alors que la diminution chez le génotype G12 a atteint 25%.

Pour le rapport PSR/PSA, l'exposition au stress hydrique a provoqué une augmentation de 55 % en moyenne. Cette hausse a été particulièrement marquée chez les génotypes G14 (134 %) et G10 (100 %), tandis que des augmentations plus modestes ont été notées chez G3 (17 %) et G8 (20 %).

Tableau 2 : Moyennes des mesures au stade première feuille des différents traitements.

	PFA(mg)	PFR (mg)	PSA (mg)	PSR (mg)	PR/PA	LR (cm)	LC (cm)	SF (cm²)	PS (mg/cm²)	TRE (%)
G1*I	180,83 defg	219,33 defg	20,67 gh	22,17 lmn	1,07 ij	19,95 abc	1,62 abc	2,71 abc	2,52 abc	0,95 abc
G1*S	107,17 mn	132,33 o	15,17 l	25,17 hijk	1,66 d	12,47 j	1,87 j	2,23 j	2,93 j	0,90 j
G10*I	194,33 bcd	184,33 ijk	25,17 c	22,67 klmn	0,90 l	17,67 fgh	1,66 fgh	3,97 fgh	2,24 fgh	0,96 fgh
G10*S	157,00 ij	215,17 defgh	21,67 fgh	39,00 a	1,80 b	18,26 efgh	1,75 efgh	3,30 efgh	2,05 efgh	0,95 efgh
G11*I	201,17 b	207,83 efghi	28,50 b	22,50 lmn	0,79 m	17,76 fgh	1,88 fgh	2,44 fgh	6,41 fgh	0,96 fgh
G11*S	196,00 bc	219,17 defg	30,67 a	36,67 ab	1,19 gh	18,57 def	1,79 def	2,44 def	5,49 def	0,95 def
G12*I	234,83 a	268,50 a	27,50 b	33,33 c	1,21 gh	19,93 abc	1,65 abc	3,16 abc	2,29 abc	0,94 abc
G12*S	113,00 mn	147,83 lmno	16,67 kl	25,17 hijk	1,52 f	18,04 efgh	1,70 efgh	2,99 efgh	2,65 efgh	0,91 efgh
G13*I	167,83 ghi	228,00 cde	22,83 def	23,67 klm	1,04 jk	21,03 a	2,10 a	2,85 a	3,82 a	0,95 a
G13*S	163,00 ij	196,00 ghi	23,67 cde	34,67 bc	1,47 f	20,11 ab	1,86 ab	2,67 ab	3,76 ab	0,91 ab
G14*I	171,17 fghi	158,00 lmn	20,67 gh	14,83 q	0,72 mn	18,78 cdef	1,79 cdef	2,77 cdef	3,60 cdef	0,94 cdef
G14*S	107,83 mn	163,33 klm	17,00 k	28,50 defg	1,68 cd	19,07 bcde	1,68 bcde	2,95 bcde	3,00 bcde	0,91 bcde
G2*I	184,50 cdef	257,17 ab	21,67 fgh	24,67 ijkl	1,14 hi	17,65 fgh	1,72 fgh	2,95 fgh	3,55 fgh	0,96 fgh
G2*S	116,50 m	192,67 hij	19,00 ij	33,32 c	1,75 bc	15,07 i	1,88 i	2,75 i	3,26 i	0,92 i
G3*I	202,17 b	235,83 bcd	24,00 cd	30,33 d	1,27 g	18,52 defg	1,99 defg	2,32 defg	4,54 defg	0,97 defg
G3*S	91,00 o	132,33 o	20,17 hi	29,83 de	1,48 f	12,91 j	1,72 j	3,04 j	2,87 j	0,86 j
G4*I	177,67 efgh	249,67 abc	21,00 gh	19,33 op	0,92 l	17,15 h	1,73 h	2,97 h	3,25 h	0,98 h
G4*S	133,00 l	194,67 hi	18,17 jk	29,50 def	1,63 de	18,02 efgh	1,66 efgh	2,35 efgh	3,81 efgh	0,94 efgh
G5*I	153,17 jk	170,33 jkl	31,17 a	20,17 nop	0,65 n	17,30 gh	1,83 gh	2,63 gh	3,75 gh	0,95 gh
G5*S	142,50 kl	137,17 no	19,00 ij	18,67 p	0,98 kl	17,55 fgh	1,68 fgh	2,23 fgh	4,84 fgh	0,93 fgh
G6*I	160,33 ij	139,83 mno	22,67 def	28,50 defg	1,26 g	19,10 bcde	1,73 bcde	2,68 bcde	2,88 bcde	0,97 bcde
G6*S	88,33 o	153,00 lmno	13,50 m	26,50 ghij	1,97 a	15,14 i	1,62 i	2,57 i	2,39 i	0,93 i
G7*I	164,00 hij	202,83 fghi	22,17 efg	24,17 jkl	1,09 ij	19,62 bcd	1,75 bcd	2,56 bcd	3,78 bcd	0,97 bcd
G7*S	100,67 no	144,83 mno	17,50 jk	27,00 fghi	1,55 ef	17,18 h	1,96 h	2,52 h	3,16 h	0,91 h
G8*I	185,83 cde	224,00 def	21,83 fg	27,67 efgh	1,27 g	17,24 h	1,83 h	2,33 h	3,97 h	0,97 h
G8*S	136,00 l	148,83 lmno	22,00 fg	33,50 c	1,52 f	17,88 efgh	1,70 efgh	2,20 efgh	3,85 efgh	0,94 efgh
G9*I	201,50 b	202,50 fghi	23,83 cd	21,50 mno	0,90 l	17,88 efgh	1,41 efgh	2,75 efgh	2,66 efgh	0,96 efgh
G9*S	105,50 mn	162,50 klm	16,67 kl	29,83 de	1,79 b	15,86 i	1,41 i	2,90 i	2,08 i	0,94 i

PFA : Poids frais de la partie aérienne, PFR : poids frais des racines, PSA : poids sec de la partie aérienne, PSR : poids sec des racines, PR/RA : PSR/PSA, LR longueur des racines, LC : Longueur du coléoptile, SF : surface foliaire, PS : Poids spécifique des feuilles, TRE : Teneur relative en eau. Moyennes avec mêmes lettres : différences non significatives (test LSD)

Concernant la longueur des racines, les génotypes G1 (−38 %) et G3 (−30 %) ont été les plus affectés par le déficit hydrique, alors que G11 (5 %) et G4 ont montré une légère amélioration de cette caractéristique.

Pour la longueur du coléoptile (LC), des réductions ont été notées chez G13 (12 %) et G3 (13 %), tandis qu'une légère augmentation a été observée chez G1 et G7 (15 %).

L'effet du déficit hydrique sur la surface foliaire (SF) s'est traduit par une baisse notable chez la majorité des génotypes, notamment G4 (21 %) et G1 (18 %).

L'évaluation de l'impact du stress sur le poids spécifique de la première feuille PS a révélé des réductions significatives, en particulier chez G3 (37 %). Toutefois, certains génotypes comme G5 (29 %) et G1 (16 %) ont montré une capacité à augmenter leur PS malgré les conditions de stress.

Enfin, l'analyse de la teneur relative en eau (TRE) a mis en évidence une tendance générale à la baisse sous stress hydrique, avec des diminutions marquées chez G3 (12 %). En

revanche, certains génotypes comme G10 (0 %) et G11 (2 %) ont pu maintenir. malgré le déficit hydrique.

2. Mesures au stade troisième feuille

L'analyse de la variance (tableau 3) a révélé que les effets principaux des deux facteurs étudiés, à savoir les génotypes et le stress, étaient significatifs pour l'ensemble des paramètres mesurés. L'interaction entre ces deux facteurs a également exercé une influence significative sur les différentes mesures.

Tableau 3: Analyse de la variance des mesures effectuées au stade troisième feuille

	PFA	PSA	PFR	PSR	PR/PA	SF	IF	PS	SPAD	TRE	SM
R²	0,90	0,91	0,92	0,87	0,69	0,89	0,89	0,84	0,83	0,77	0,70
F	27,42	30,91	35,92	21,12	6,79	24,09	24,09	15,82	15,28	10,17	7,22
Pr > F	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
G	12,40	22,04	22,40	26,54	6,00	22,76	22,76	18,99	4,86	3,88	7,67
	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
S	431,91	375,63	502,23	65,64	46,57	177,43	177,43	83,20	207,92	171,88	39,50
	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
G*S	11,33	13,26	13,57	12,27	4,52	13,62	13,62	7,47	10,88	4,02	4,28
	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

PFA : Poids frais de la partie aérienne, PFR : poids frais des racines, PSA : poids sec de la partie aérienne, PSR : poids sec des racines, PR/RA : PSR/PSA, LR longueur des racines, LC : Longueur du coléoptile, SF : surface foliaire, PS : Poids spécifique des feuilles, IF : index foliraire (Surface des 3 premières feuilles), TRE : Teneur relative en eau, SPAD : Teneur en chlorophylle, SM : stabilité membranaire R² : Coefficient de détermination, F : Statistique F de Fisher, Pr > F : p-value associée à F, G : Génotype, S : Stress, G × S : Interaction Génotype × Stress.

Parmi l'ensemble des génotypes évalués (tableau 4), le génotype G11 a présenté les valeurs moyennes les plus élevées pour le poids frais de la partie aérienne (PFA) avec 536,57 mg, le poids sec de la partie aérienne (PSA) avec 84,76 mg, ainsi que le poids sec des racines (PSR) avec 72,46 mg.

Le poids frais des racines (PFR) le plus important a été enregistré chez le génotype G5, avec une valeur moyenne de 491,01 mg, en association avec les génotypes G10 et G11, qui ont également montré des performances élevées pour ce paramètre. De même, les valeurs les plus élevées du PSR ont été observées chez G11, en association avec G5 et G10.

À l'opposé, les valeurs les plus faibles ont été enregistrées chez G6 pour le PSA, et chez G14 pour le PFR, le PSR, ainsi que pour le rapport PSR/PSA, dont la moyenne la plus basse a été observée à 0,72, en association avec le génotype G13.

En ce qui concerne la surface foliaire des trois premières feuilles, le génotype G11 s'est distingué en affichant la valeur la plus élevée avec 12,32 cm², accompagnée du poids spécifique des feuilles le plus important, soit 5,68 mg/cm², ainsi que de la teneur en chlorophylle la plus élevée, atteignant 47,22 SPAD.

Concernant la teneur relative en eau (TRE), la valeur maximale a été enregistrée chez le génotype G5, tandis que la stabilité membranaire (SM) la plus élevée a été observée chez le génotype G6.

Tableau 4: Moyennes des mesures au stade troisième feuille des différents traitements

	PFA (mg)	PSA (mg)	PFR (mg)	PSR (mg)	PR/PA	SF(cm²)	IF(cm²)	PS (mg/cm²)	SPAD	TRE (%)	SM %
G1*I	670,89 a	89,42 b	572,13 b	64,44 cdef	0,72 jk	4,05 b	12,16 b	3,84 hijk	51,16 a	0,97 ab	0,88 abc
G1*S	334,20 o	53,39 n	268,53 l	47,95 kl	0,89 bcde	2,18 m	6,55 m	3,26 jklm	33,36 o	0,90 ijk	0,84 defghi
G2*I	510,07 defg	75,79 gh	429,44 efg	58,83 fgh	0,78 hij	3,39 efg	10,18 efg	3,77 hijkl	51,21 a	0,96 abcd	0,84 cdefghi
G2*S	360,18 no	59,95 lm	298,02 l	54,83 hij	0,92 abc	2,33 lm	7,00 lm	2,41 mn	36,59 n	0,87 l	0,77 j
G3*I	574,25 bc	84,30 bcde	412,13 fgh	60,42 efgh	0,72 jk	3,29 efghi	9,87 efghi	4,18 efghi	48,36 abcde	0,96 abcde	0,86 abcdef
G3*S	417,59 jklm	71,76 hij	348,31 ijk	65,99 bcde	0,92 abc	2,98 ij	8,95 ij	3,67 ijkl	38,79 lmn	0,90 jkl	0,80 ij
G4*I	534,04 cde	78,76 efg	490,88 cd	60,42 efgh	0,77 hij	3,64 cde	10,92 cde	4,97 cde	43,24 ghij	0,98 a	0,82 fghi
G4*S	494,41 defgh	76,27 fgh	392,79 ghi	66,87 bcd	0,88 bcdefg	3,82 bc	11,45 bc	4,88 cdef	39,29 lmn	0,92 fghij	0,88 abc
G5*I	564,54 bc	84,93 bcd	626,94 a	81,32 a	0,96 ab	3,80 bc	11,41 bc	4,58 defgh	48,58 abcd	0,98 ab	0,88 abcd
G5*S	432,51 ijkl	71,00 hij	355,08 ij	56,47 ghi	0,80 ghij	3,37 efg	10,11 efg	3,10 klmn	41,13 ijkl	0,95 bcdefg	0,85 abcdefgh
G6*I	477,82 fghi	66,49 jk	426,25 efg	57,60 ghi	0,87 cdefg	3,43 def	10,28 def	2,33 n	44,33 ghi	0,96 abcd	0,88 abcd
G6*S	352,79 no	59,07 mn	305,75 jkl	51,55 ijk	0,87 cdefg	2,53 klm	7,58 klm	2,95 lmn	42,83 hijk	0,90 ijk	0,86 abcdef
G7*I	538,67 bcd	81,78 cdef	464,40 cde	65,75 bcde	0,81 fghij	3,34 efgh	10,03 efgh	6,36 b	49,76 ab	0,96 abcd	0,89 ab
G7*S	476,25 fghi	69,39 jk	387,85 ghi	68,65 bc	0,99 a	3,55 cdef	10,64 cdef	4,09 fghij	42,78 hijk	0,96 abcde	0,85 cdefgh
G8*I	483,82 efghi	75,42 ghi	412,60 fgh	58,98 fgh	0,78 hij	3,25 fghi	9,76 fghi	4,85 cdef	47,86 bcdef	0,98 a	0,88 abc
G8*S	389,85 klmn	71,15 hij	303,31 kl	58,58 fgh	0,82 defghi	2,77 jk	8,30 jk	3,99 ghij	44,56 gh	0,87 l	0,83 fghi
G9*I	545,00 bcd	80,89 defg	497,39 c	66,59 bcd	0,82 defghi	3,31 efghi	9,93 efghi	4,97 cde	46,43 cdefg	0,97 ab	0,87 abcde
G9*S	369,23 mno	58,12 mn	316,98 jkl	49,04 jkl	0,84 cdefgh	2,44 klm	7,31 klm	3,48 ijkl	37,50 mn	0,92 ghij	0,86 abcdefgh
G10*I	591,22 b	87,35 bc	574,60 b	70,83 b	0,81 efghi	3,77 bcd	11,32 bcd	5,03 cd	45,32 efgh	0,99 a	0,86 abcdefg
G10*S	459,15 ghij	75,32 ghi	383,64 ghi	68,18 bc	0,90 abcd	4,01 b	12,04 b	5,47 c	40,46 jklm	0,93 defghi	0,80 ij
G11*I	708,54 a	102,79 a	621,14 ab	85,44 a	0,83 defghi	5,01 a	15,03 a	7,67 a	49,48 abc	0,98 a	0,84 defghi
G11*S	364,60 mno	66,73 jk	310,34 jkl	59,48 fgh	0,89 bcde	3,20 fghi	9,60 fghi	3,70 ijkl	44,95 fgh	0,91 hijk	0,85 bcdefgh
G12*I	521,54 cdef	75,69 ghi	447,25 def	61,98 defg	0,82 defghi	3,22 fghi	9,65 fghi	3,96 ghij	44,55 gh	0,97 ab	0,83 efghi
G12*S	331,23 o	58,16 mn	282,44 l	51,60 ijk	0,89 bcdef	2,42 klm	7,27 klm	2,38 n	39,95 klm	0,89 kl	0,70 k
G13*I	454,42 hij	70,00 ijk	368,19 hi	47,47 kl	0,68 k	3,50 cdef	10,49 cdef	3,43 ijkl	44,98 fgh	0,97 abc	0,90 a
G13*S	382,06 lmno	64,92 kl	295,61 l	49,91 jkl	0,77 hij	3,01 hij	9,03 hij	2,96 lmn	43,34 ghij	0,95 abcdef	0,83 efghi
G14*I	439,29 ijk	68,32 jk	288,25 l	46,36 kl	0,68 k	3,06 ghij	9,18 ghij	4,77 cdefg	43,53 ghij	0,94 cdefgh	0,82 ghi
G14*S	343,58 no	58,07 mn	278,30 l	44,09 l	0,76 ijk	2,61 kl	7,83 kl	3,83 hijk	46,20 defg	0,93 efghij	0,82 hi

PFA : Poids frais de la partie aérienne, PFR : poids frais des racines, PSA : poids sec de la partie aérienne, PSR : poids sec des racines, PR/RA : PSR/PSA, LR longueur des racines, LC : Longueur du coléoptile, SF : surface foliaire, PS : Poids spécifique des feuilles, IF : index foliraire (Surface des 3 premières feuilles), TRE : Teneur relative en eau, SPAD : Teneur en chlorophylle, SM : stabilité membranaire. Moyennes avec mêmes lettres : différences non significatives (test LSD)

Le deuxième facteur étudié, à savoir le déficit hydrique, a entraîné une réduction des moyennes de plusieurs paramètres mesurés. Les diminutions observées ont été de 28 % pour le poids frais de la partie aérienne (PFA), 19 % pour le poids sec de la partie aérienne (PSA), 32 % pour le poids frais des racines (PFR), 11 % pour le poids sec des racines (PSR), 18 % pour la surface foliaire (SF), 22 % pour l'indice foliaire (IF), 13 % pour le poids spécifique (PS), 6 % pour la teneur en chlorophylle (SPAD), et 4 % pour la stabilité membranaire (SM).

En parallèle, le rapport PSR/PSA a connu une augmentation moyenne de 10 % sous l'effet du stress hydrique.

Cette réponse au stress hydrique a varié considérablement selon les génotypes. Par exemple, le génotype G1 a enregistré des réductions supérieure à 50 % du PFA et du PFR. À l'inverse, les génotypes G4 et G14 ont montré une meilleure tolérance, avec des diminutions limitées à 7 % pour le PFA chez G4, et 3 % pour le PFR chez G14. Concernant les poids secs, une diminution de 40 % du PSA a été observée chez le génotype G1, tandis que le PSR a diminué de 31 % chez G5. Toutefois, chez le génotype G4, la diminution du PSA a été limitée à 3 %, alors que le PSR a paradoxalement augmenté de 11 %.Enfin, l'analyse du rapport PSR/PSA révèle qu'à l'exception d'une réduction de 17 % enregistrée chez G5, tous les autres génotypes ont présenté des augmentations de ce rapport, variant de 1 % chez G6 à 28 % chez G3.

La réduction de l'indice foliaire (IF) a été particulièrement marquée chez les génotypes G1 et G11, avec des diminutions respectives de 41 % et 36 %. À l'inverse, une augmentation de l'indice foliaire a été observée chez les génotypes G4, G7 et G10, avec des hausses comprises entre 5 % et 9 %.

Le poids spécifique des feuilles (PS) a présenté une diminution notable chez les génotypes G11 et G12, qui ont enregistré des baisses respectives de 52 % et 40 %. En revanche, des augmentations ont été observées chez G10 et G6, avec des hausses respectives de 9 % et 27%.

Les résultats relatifs à la teneur en chlorophylle (SPAD) ont révélé des diminutions variables selon les génotypes. Une baisse importante de 35 % a été enregistrée chez G1, tandis que G3 a montré une diminution plus modérée de 3 %. À l'inverse, une augmentation de 6 % a été observée chez G14.

Concernant la teneur relative en eau (TRE), des réductions supérieures à 10 % ont été relevées chez les génotypes G8 et G2. À l'opposé, les réductions chez G14, G13 et G7 sont restées modérées, de l'ordre de 1 %.Enfin, la stabilité membranaire (SM) a diminué de 16 % chez le génotype G12. En revanche, les génotypes G4 et G11 ont présenté des augmentations de cette stabilité, respectivement de 7 % et 2 %.

3. Indice de tolérance au stress

Les résultats de l'indice de tolérance au stress (YSI) (Tableau 5) montrent que les génotypes G10 et G14 présentent une réduction de biomasse sèche totale inférieure à 20 % à cause de déficit hydrique, ce qui les classe parmi les génotypes les plus tolérants selon cet

indice. Cependant, cet ordre de tolérance évolue au stade de la troisième feuille, où les génotypes G4, G13, G7, G3 et G10 affichent les meilleures tolérances, avec des réductions de biomasse inférieures à 10 %.

Tableau 5 : Indice de tolérance au stress (YSI) des génotypes étudiés

Génotype	**YSI_1**	**Classement**	**YSI_3**	**Classement**
G1	0,59	9	0,66	14
G2	0,72	5	0,85	9
G3	0,55	11	0,95	4
G4	0,73	4	1,03	1
G5	0,36	14	0,77	11
G6	0,52	12	0,89	7
G7	0,58	10	0,94	5
G8	0,68	7	0,97	3
G9	0,66	8	0,73	12
G10	0,82	1	0,91	6
G11	0,72	6	0,67	13
G12	0,41	13	0,80	10
G13	0,75	3	0,98	2
G14	0,80	2	0,89	8

YSI_1: YSI au stade première feuille, YSI_3: YSI au stade troisième feuille

4. Analyses des corrélations

L'analyse des corrélations de Pearson a été réalisée entre les paramètres mesurés aux stades de la première feuille (F1) et de la troisième feuille (F3), sur des plantes soumises au stress et des plantes témoins (non stressées).

4.1. Corrélations au stade première feuille

L'analyse des corrélations (Tableau 6) révèle qu'en conditions hydriques optimales, le poids frais de la partie aérienne (PFA) présente une corrélation positive avec le poids frais racinaire (PFR) (r = 0,59). Ces deux paramètres montrent des associations fortes avec le poids frais total (PFT), avec des coefficients de r = 0,82 entre PFA et PFT, et r = 0,94 entre PFR et PFT. Le poids sec total (PST) est étroitement lié au poids sec racinaire (PSR) (r = 0,86), tandis que le ratio poids sec racinaire/aérien (PR/PA) est corrélé au PSR (r = 0,84). On observe également une corrélation négative entre le poids spécifique foliaire (PS) et la surface foliaire (SF) (r = -0,62), ainsi qu'une relation positive entre le PS et la longueur du coléoptile (LC) (r = 0,62).

Sous déficit hydrique, le profil des corrélations se modifie considérablement. Le poids frais aérien (PFA) développe des liens renforcés avec le poids sec aérien (PSA) (r = 0,87) et le poids frais total (PFT) (r = 0,93). Le poids frais racinaire (PFR) montre des corrélations

élevées avec le poids sec racinaire (PSR) (r = 0,78) et le PFT (r = 0,93). Le poids sec total (PST) est fortement associé au PSA (r = 0,89), au PSR (r = 0,93), au PFA (r = 0,75) et au PFR (r = 0,79). La longueur des racines (LR) présente des corrélations positives avec le PFA (r = 0,63), le PSR (r = 0,53) et le PFT (r = 0,63). Parmi les paramètres physiologiques, le poids spécifique (PS) est positivement corrélé au PFA (r = 0,67) et au PSA (r = 0,67), mais négativement corrélé avec le ratio PR/PA (r = -0,83) et la SF (r = -0,64). La teneur relative en eau (TRE) est quant à elle positivement associée au PFA, PFR, PFT et LR. En plus du PS, le ratio PR/PA présente aussi une corrélation négative avec le PSA (r = -0,55).

Concernant l'indice de tolérance (YSI), il est négativement corrélé au PST (r = -0,66) en conditions optimales. Alors que sous stress hydrique, il développe des relations positives avec le PFR (r = 0,72), le PSR (r = 0,81) et le PST (r = 0,69).

Tableau 6: Matrice des corrélations (Pearson) entre les différentes mesures effectuées au stade de la première feuille pour les traitements irrigué (témoin) et stressé

Variables	**PFA**	**PFR**	**PSA**	**PSR**	**PR/PA**	**PFT**	**PST**	**LR**	**LC**	**SF**	**PS**	**TRE**	**IT**	
PFA	**1**	**0,73**	**0,87**	0,53	-0,53	**0,93**	**0,75**	**0,63**	0,20	-0,17	**0,67**	**0,57**	0,37	
PFR	**0,59**	**1**	**0,63**	**0,78**	0,08	**0,93**	**0,79**	**0,53**	0,11	0,23	0,22	**0,61**	**0,72**	
PSA	0,22	-0,09	**1**	**0,65**	**-0,55**	**0,81**	**0,89**	0,46	0,26	-0,06	**0,67**	0,28	0,39	
PSR	0,51	0,41	0,16	**1**	0,26	**0,71**	**0,93**	0,30	0,16	0,36	-0,02	0,33	**0,81**	
PR/PA	0,28	0,41	-0,38	**0,84**	**1**	-0,24	-0,11	-0,29	-0,20	0,41	**-0,83**	0,05	0,38	
PFT	**0,82**	**0,94**	0,02	0,49	0,40	**1**	**0,83**	**0,63**	0,17	0,03	0,48	**0,63**	**0,59**	**S t r e s s é**
PST	0,51	0,27	**0,65**	**0,86**	0,45	0,39	**1**	0,40	0,22	0,19	0,32	0,34	**0,69**	
L R	-0,01	0,07	-0,21	0,26	0,32	0,05	0,09	**1**	0,01	0,05	0,36	**0,53**	0,34	
LC	-0,27	0,07	0,09	0,11	0,07	-0,06	0,13	0,23	**1**	-0,19	0,28	-0,29	0,12	
SF	0,22	0,03	0,05	-0,10	-0,17	0,11	-0,05	-0,02	-0,34	**1**	**-0,64**	-0,14	0,26	
PS	-0,07	0,02	0,26	-0,08	-0,19	-0,01	0,08	-0,21	**0,62**	**-0,62**	**1**	0,19	-0,06	
TRE	-0,13	0,05	-0,11	0,21	0,32	-0,02	0,10	-0,48	0,07	-0,35	0,31	**1**	0,31	
IT	-0,03	0,01	-0,52	-0,50	-0,21	-0,01	**-0,66**	-0,16	0,07	0,31	0,14	-0,03	**1**	
T é m o i n														

PFA : Poids frais de la partie aérienne, PFR : poids frais des racines, PSA : poids sec de la partie aérienne, PSR : poids sec des racines, PR/RA : PSR/PSA, PFT : Poids frais total, PST : Poids sec total, LR longueur des racines, LC : Longueur du coléoptile, SF : surface foliaire, PS : Poids spécifique des feuilles, TRE : Teneur relative en eau, Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05

4.2. Corrélations au stade troisième feuille

En absence de stress hydrique, l'analyse révèle un réseau de relations morpho-physiologiques structuré : le poids frais aérien (PFA) présente des corrélations significatives avec le poids sec aérien (PSA) (r = 0,96) et le poids frais total (PFT) (r = 0,95), tandis que le poids frais racinaire (PFR) est étroitement lié au poids sec racinaire (PSR) (r = 0,89) et au PFT (r = 0,96). Le ratio racinaire/aérien (PR/PA) montre une association marquée avec le

PSR (r = 0,76). L'index foliaire (IF) entretient des liens positifs avec l'ensemble des paramètres de biomasse :le PFA (r = 0,83), le PSA (r = 0,83), le PFR (r = 0,76), le PSR (r = 0,73), le PFT (r = 0,83) et le PST (r = 0,81). Le poids spécifique foliaire (PS) est corrélé au PSA (r = 0,71) et au PST (r = 0,67), et la teneur en chlorophylle (SPAD) au PFA (r = 0,56) et PSA (r = 0,56). La teneur relative en eau (TRE) est associée au PFR (r = 0,73) et PFT (r = 0,65), tandis qu'une relation inverse émerge entre la stabilité membranaire (SM) et la longueur racinaire (LR) (r = -0,54).

Sous déficit hydrique, la structure des interactions entre variables physiologiques et morphologiques évolue nettement. Le poids frais aérien (PFA) présente des corrélations significatives avec le poids frais des racines (PFR, r = 0,97), le poids frais total (PFT, r = 0,99), la longueur racinaire (LR, r = 0,71) et le poids spécifique foliaire (PS, r = 0,71). Le poids sec aérien (PSA), quant à lui, renforce ses liens avec le poids sec total (PST, r = 0,97) et l'indice foliaire (IF, r = 0,91), tout en établissant une nouvelle corrélation avec le PS (r = 0,71).

Le PS montre une cohérence fonctionnelle marquée en affichant des corrélations significatives avec l'ensemble des paramètres de biomasse (PFA, PSA, PFR, PSR, PFT, PST) ainsi qu'avec l'IF. La longueur racinaire est également significativement liée à plusieurs indicateurs de croissance, notamment le PFR (r = 0,72), le PSR (r = 0,65), le PFT et le PST.

Concernant les paramètres physiologiques, la stabilité membranaire (SM) n'a pas montré de corrélation significative avec la teneur relative en eau (TRE) (r = 0,48). En revanche, la TRE est positivement corrélée à l'IF (r = 0,58), à la LR, à la SM (r = 0,63) et au PSR (r = 0,58). Des corrélations négatives ont également été observées entre la TRE et le ratio PR/PA (r = –0,59), ainsi qu'avec la teneur en chlorophylle mesurée par SPAD (r = –0,54), suggérant des compromis physiologiques sous stress.

l'indice YSI présente des corrélations négatives avec l'ensemble des autres paramètres de biomasse : le PFA (r = -0,66), le PSA (r = -0,57), le PFR (-0,59), le PSR (r = -0,59), le PFT (r = -0,65) et le PST (r= -0,60), ainsi qu'avec l'IF (r= -0,65) enregistrés en absence de stress. Sous stress hydrique, ce profil s'inverse : l'indice YSI montre des associations positives avec les paramètres de biomasse : PFA , PSA, PFR, PSR, PFT et PST ainsi que la LR et l'IF, malgré que sauf les corrélation PFA (r=0,55) et le PSA (r= 57) ont atteint le seuil de signification.

Tableau 7 : Corrélations (Pearson) entre les différents paramètres mesurés au stade de troisième feuille pour les traitements irrigué (témoin) et stressé

Variables	PFA	PSA	PFR	PSR	PR/PA	PFT	PST	LR	IF	PS	SPAD	TRE	SM	IT
PFA	**1**	**0,88**	**0,97**	**0,85**	0,31	**0,99**	**0,90**	**0,71**	**0,90**	**0,71**	0,06	0,51	0,40	**0,55**
PSA	**0,96**	**1**	**0,84**	**0,86**	0,15	**0,87**	**0,96**	0,52	**0,89**	**0,69**	0,27	0,28	0,27	**0,57**
PFR	**0,83**	**0,82**	**1**	**0,88**	0,41	**0,99**	**0,89**	**0,72**	**0,89**	**0,69**	0,03	0,48	0,37	0,44
PSR	**0,79**	**0,85**	**0,92**	**1**	**0,62**	**0,87**	**0,97**	**0,65**	**0,80**	**0,64**	0,03	0,15	0,14	0,44
PR/PA	0,23	0,26	**0,64**	**0,73**	**1**	0,36	0,41	0,46	0,18	0,16	-0,39	-0,19	-0,15	-0,04
PFT	**0,95**	**0,92**	**0,97**	**0,90**	0,48	**1**	**0,90**	**0,72**	**0,90**	**0,71**	0,05	0,50	0,39	0,51
PST	**0,90**	**0,96**	**0,91**	**0,97**	0,53	**0,95**	**1**	**0,61**	**0,87**	**0,69**	0,15	0,22	0,21	0,52
LR	0,17	0,21	0,12	0,24	0,13	0,15	0,24	**1**	0,51	0,33	-0,12	0,26	-0,18	0,47
IF	**0,83**	**0,83**	**0,76**	**0,73**	0,26	**0,83**	**0,81**	0,29	**1**	**0,77**	0,29	**0,58**	0,35	0,44
PS	0,52	**0,71**	0,42	**0,60**	0,14	0,48	**0,67**	0,34	**0,54**	**1**	0,18	0,34	0,41	0,38
SPAD	**0,56**	**0,56**	0,42	0,45	0,12	0,50	0,52	-0,11	0,37	0,27	**1**	0,25	0,16	0,33
TRE	0,48	0,51	**0,73**	**0,61**	0,47	**0,65**	**0,58**	0,01	0,48	0,27	0,10	**1**	0,48	0,13
SM	-0,02	-0,04	0,12	0,03	0,13	0,06	0,00	**-0,54**	-0,06	-0,21	0,32	0,21	**1**	0,05
IT	**-0,66**	**-0,57**	**-0,59**	**-0,59**	-0,34	**-0,65**	**-0,60**	-0,13	**-0,56**	-0,22	-0,47	-0,17	0,03	**1**

Sous Stress

Sans Stress

PFA : Poids frais de la partie aérienne, PFR : poids frais des racines, PSA : poids sec de la partie aérienne, PSR : poids sec des racines, PR/RA : PSR/PSA, *PFT : Poids frais total, PST : Poids sec total*, LR longueur des racines, LC : Longueur du coléoptile, SF : surface foliaire, PS : Poids spécifique des feuilles, IF : index foliraire (Surface des 3 premières feuilles), TRE : Teneur relative en eau, SPAD : Teneur en chlorophylle, SM : stabilité membranaire. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05

IV. Discussion

Cette étude évalue la réponse de 14 génotypes de blé dur soumis à un déficit hydrique appliqué dès la levée, aux stades première feuille (F1) et troisième feuille (F3), en comparant leur réponse morpho-physiologique en conditions de stress et en conditions témoins.

L'analyse de la variance a révélé une variabilité hautement significative ($P < 0,001$) entre les génotypes aux deux stades F1 et F3 pour la majorité des caractères, indiquant une diversité génétique importante. L'effet du stress hydrique est également significatif, confirmant son impact sur la croissance des plantules ainsi que la sensibilité des paramètres mesurés, ce qui valide leur pertinence en tant qu'indicateurs de tolérance. L'interaction génotype × stress (G × S), significative pour l'ensemble des caractères, révèle que les génotypes réagissent différemment selon les caractères étudiés, traduisant une plasticité phénotypique variable face au stress hydrique.

1. Mesures de biomasses

La croissance des plantes se manifeste par une accumulation de biomasse, variable selon les conditions. Nos résultats montrent une grande variabilité entre génotypes pour les différentes formes de biomasse (fraîche, sèche, aérienne, racinaire) ainsi que pour le rapport PSR/PSA. Par exemple, au stade F1, le génotype G11 présente les valeurs les plus élevées de PFA et PSA, tandis que G6 affiche les plus faibles. Cette diversité traduit la capacité intrinsèque de certains génotypes à mieux s'adapter au stress hydrique (Idrissi *et al.*, 2023 ; Sairam *et al.*, 2001).

Le stress hydrique affecte significativement la biomasse, et ses effets s'accentuent avec la durée du stress : le poids sec total (PST) diminue de 3 % à F1 contre 15 % à F3, illustrant l'aggravation progressive du déficit hydrique. En moyenne, le poids frais (PFA) et sec (PSA) de la partie aérienne baissent respectivement de 32 % et 19 % à F1, et de 28 % et 19 % à F3. Cette diminution résulte probablement d'un ralentissement de la division cellulaire et de la croissance, deux processus sensibles à la contrainte hydrique (Sairam *et al.*, 2001 ; Talebi *et al.*, 2011). Certains génotypes montrent une meilleure résistance, comme G11 à F1 et G4 à F3, avec des pertes plus limitées, probablement grâce à une régulation stomatique plus efficace ou une meilleure utilisation de l'eau (Idrissi *et al.*, 2023).

Par ailleurs, plusieurs génotypes réallouent leur biomasse vers les racines en réponse au stress. Bien que le poids frais racinaire (PFR) ait diminué en moyenne de 21 %, G10 (+17 %), G11 (+5 %) et G14 (+3 %) montrent une stabilité, voire une amélioration. Les réponses sont

encore plus marquées pour le poids sec racinaire (PSR), avec des hausses respectives de 72 % (G10), 63 % (G11) et 92 % (G14). Le rapport PSR/PSA a augmenté de 55 % à F1 et de 10 % à F3, avec des hausses notables chez G14 (+134 %) et G10 (+100 %) à F1, et chez G7, G1 et G3 (+23–24 %) à F3. Ces changements traduisent une stratégie adaptative visant à favoriser la croissance racinaire pour améliorer l'absorption de l'eau (Ahmadi *et al.,* 2018 ; Bacher *et al.*, 2021 ; Liu *et al.*, 2015).

L'analyse des corrélations montre une bonne coordination entre les différents paramètres. À F1, le PFA est fortement corrélé au PFT (r = 0,82 à 0,94), tandis que le PST (PSA + PSR) est étroitement lié au PSR (r = 0,86). Au stade F3, en absence de stress, le PFA est presque parfaitement corrélé au PSA (r = 0,96), et le PFR au PSR (r = 0,89). Sous stress, ces relations se renforcent (ex. : PFA et PFT, r = 0,99), soulignant l'importance d'une allocation cohérente des ressources entre partie aérienne et système racinaire pour favoriser la tolérance au déficit hydrique (Sairam *et al.*, 2001 ; Talebi *et al.*, 2011).

L'indice de tolérance (YSI), défini comme le rapport de la biomasse sèche sous stress à celle en conditions optimales, évalue la capacité adaptative des génotypes. Sous stress, cet indice est positivement corrélé au PFR (r = 0,72), au PSR (r = 0,81) et au PFT (r = 0,69), indiquant que le maintien de la biomasse, notamment racinaire, est un trait clé de la tolérance. En revanche, en conditions optimales, l'YSI est corrélé négativement au PFA (r = –0,66), ce qui montre une limite à prendre en considération de cet indice, car il tend à favoriser les génotypes à faible rendement au détriment de ceux à fort rendement en conditions optimales.

En conclusion, ces résultats révèlent une variabilité génotypique marquée, un fort impact du stress hydrique surtout au stade F3, et des corrélations fortes entre biomasse et indice de tolérance. La biomasse constitue un bon indicateur de performance sous stress, car elle reflète l'efficacité d'utilisation des ressources (Allahverdiyev et Huseynova, 2017). Son maintien et sa réallocation vers les racines sont essentiels à la survie en conditions de déficit hydrique. Ces critères pourraient orienter la sélection de variétés de blé dur adaptées aux zones arides, notamment dans le contexte méditerranéen et face au changement climatique.

2. Mesures morphologiques

Les résultats révèlent une forte variabilité morphologique entre génotypes pour la surface foliaire (SF), l'indice foliaire (IF), la longueur des racines (LR) et celle du coléoptile (LC), traduisant des capacités d'adaptation différentes au déficit hydrique (Idrissi *et al.*, 2023).

Au stade F1, G11 présente la plus grande SF et un IF élevé, tandis que G6 affiche les plus faibles valeurs. Sous stress hydrique, la SF moyenne diminue de 5 % au stade F1, et de 18 % pour les trois premières feuilles au stade F3. Cette réduction, liée au ralentissement de la croissance et de la division cellulaire (Sairam *et al.*, 2001 ; Talebi *et al.*, 2011), reflète une stratégie d'économie d'eau, mais limite la capacité photosynthétique (Chaves *et al.*, 2003 ; Gharbi *et al.*, 2019 ; Björn *et al.*, 2009). Certains génotypes, comme G3, G11 et G14 (F1), ainsi que G4, G7 et G10 (F3), maintiennent ou augmentent légèrement leur SF malgré le stress, suggérant une meilleure efficacité métabolique (Senge *et al.*, 2014).

Concernant les racines, la longueur racinaire (LR) diminue globalement de 9 % et 8 % aux stades F1 et F3, respectivement. Toutefois, certains génotypes (G11, G4, G5, G8, G10 et G14) maintiennent, voire augmentent cette longueur au stade F1. Au stade F3, les augmentations observées chez G7 et G10 atteignent 19 %, ce qui indique une stratégie adaptative visant à améliorer l'accès à l'eau en profondeur (Ahmadi *et al.*, 2018 ; Bacher *et al.*, 2021 ; Zhang *et al.*, 2020).

La longueur du coléoptile (LC) varie selon les génotypes et les conditions de stress. En déficit hydrique, elle est positivement corrélée à la vigueur des plantules de blé dur (Boudiar *et al.*, 2019). Nos résultats montrent qu'au stade F1, en absence de stress, la LC est également corrélée au poids spécifique, indicateur de productivité. Bien qu'en général réduite sous stress, la LC reste stable chez certains génotypes, favorisant une meilleure émergence et un enracinement précoce, atouts en conditions sèches (Rebetzke *et al.*, 2007 ; Yang *et al.*, 2015).

En absence de stress , le poids spécifique est négativement corrélé avec l'expansion de la première feuille. Tandis que sous stress au stade F1, les corrélations entre la LR et les biomasses fraîches (PFA, PFR, PFT) deviennent significatives, suggérant que la croissance racinaire contribue à l'hydratation des plantules en facilitant un meilleur accès à l'eau limitée. Ces résultats concordent avec ceux de Danakumara *et al.* (2021), illustrant une coordination fonctionnelle entre les traits aériens et racinaires.

Au stade F3, l'indice foliaire (IF), qui exprime la surface cumulée des trois premières feuilles, est positivement corrélé à la biomasse racinaire, et surtout à la biomasse aérienne, puisque les feuilles en constituent la majeure partie. Cela confirme que l'IF est un indicateur fiable de la croissance à ce stade, d'autant plus que ces corrélations se renforcent sous déficit hydrique. La longueur racinaire, comme au stade F1, présente également des corrélations positives avec la biomasse produite, suggérant son double rôle d'indicateur de croissance et de facteur d'adaptation au stress (Sairam *et al.*, 2001).

En conditions favorables, l'IF, en tant qu'indicateur de croissance, présente une corrélation négative avec l'indice de tolérance (YSI), tout comme les biomasses. De plus, bien que non significatives, les corrélations positives entre IF, LR et YSI laissent entrevoir un lien positif potentiel.

Ces traits morphologiques apparaissent donc comme de bons indicateurs, complémentaires a ceux de biomasses, pour évaluer la performance en conditions de déficit hydrique, . Leur maintien ou amélioration permet un meilleur équilibre entre la capture de lumière et l'absorption d'eau, favorisant ainsi la tolérance au stress (Allahverdiyev et Huseynova, 2017).

3. Mesures physiologiques

Parmi les paramètres physiologiques évalués pour caractériser la réponse au déficit hydrique, la teneur relative en eau (TRE), le poids spécifique foliaire (PS), la teneur en chlorophylle (SPAD) et la stabilité membranaire (SM) se sont révélés particulièrement pertinents.

La tension relative à l'eau (TRE) des feuilles reflète la disponibilité en eau du sol, l'efficacité de l'absorption racinaire ainsi que la régulation des pertes hydriques par transpiration (Idrissi *et al.*, 2023 ; Liu *et al.*, 2015). Elle s'est révélée particulièrement sensible au stress hydrique dès le stade de la première feuille (F1), où les génotypes G10 et G11 se distinguent par des valeurs élevées et une faible diminution, traduisant une bonne capacité d'adaptation. Au stade F3, cette tendance se confirme : G10 et G11 appartiennent au groupe homogène supérieur selon le test LSD, tandis que G7 et G13 présentent également une TRE stable, avec une réduction limitée à seulement 1 %.

Le poids spécifique foliaire (PS), qui mesure la densité ou l'épaisseur des feuilles, est souvent associé à la productivité et à la résistance au stress (Belkharchouche *et al.*, 2009). En moyenne, il a diminué de 6 % sous déficit hydrique, bien que cette réponse varie selon les génotypes. G11 se distingue par un PS élevé au stade F1, accompagné d'une forte biomasse racinaire en condition de stress. Au stade F3, le PS reste corrélé à la biomasse sèche en conditions favorables, et ces corrélations se renforcent sous stress, notamment avec les

biomasses fraîches (PFA, PFR, PFT). Ces résultats confirment la pertinence du PS comme critère physiologique lié à la productivité.

La TRE, quant à elle, présente des corrélations positives avec les poids frais (PFA, PFR, PFT) et la longueur racinaire (LR) au stade F1 sous stress, ce qui renforce son rôle en tant qu'indicateur du niveau d'hydratation tissulaire. Au stade F3, elle reste significativement liée à la biomasse racinaire et à la biomasse totale en absence de stress, et montre des tendances similaires sous stress, bien que certaines corrélations n'aient pas atteint le seuil de signification.

Le SPAD, mesuré au stade F3, fournit un indice indirect de l'activité photosynthétique (Senge *et al.*, 2014 ; Björn *et al.*, 2009). Les génotypes G11 et G14 conservent une teneur élevée en chlorophylle malgré le stress, suggérant une meilleure performance photosynthétique. Cette préservation peut être attribuée soit à une efficacité accrue de la photosynthèse, soit à un retard de la sénescence foliaire, deux mécanismes favorables à la tolérance (Guendouz *et al.*, 2012).

Enfin, la stabilité membranaire (SM), également mesurée au stade F3, présente une variabilité intergénotypique importante. Bien qu'une majorité de génotypes montrent une baisse sous stress, G4, G5, G6 et G9 conservent une stabilité élevée. Le maintien de l'intégrité membranaire se fait probablement grâce à l'activation de mécanismes de défense tels que l'accumulation de solutés ou l'activation d'enzymes antioxydantes (Sairam *et al.*, 2001 ; Farooq *et al.*, 2009).

V. Conclusion

Le présent travail avait pour objectif d'évaluer la croissance de 14 génotypes de blé dur, d'origines variées, soumis ou non à un déficit hydrique en début de cycle. Le stress hydrique a été appliqué selon la méthode gravimétrique au stade de la levée. La croissance a été évaluée à deux stades de développement, première feuille et troisième feuille, en s'appuyant sur une série de paramètres morphologiques et physiologiques.

Outre l'effet du stress hydrique, l'analyse de la variance a révélé des différences significatives entre les génotypes pour l'ensemble des mesures, mettant en évidence une variabilité génétique importante. Elle a également montré une réponse différenciée des génotypes au déficit hydrique, traduisant des comportements contrastés en condition de stress.

Certains génotypes ont démontré un potentiel de tolérance en maintenant, ou en limitant la réduction de la biomasse fraîche et sèche, aussi bien des racines que de la partie aérienne. Ces paramètres ont été positivement associés, avec des corrélations renforcées en condition de stress hydrique. Les résultats ont également mis en évidence, sous stress, une réallocation des ressources vers les racines, observée à travers la biomasse racinaire, la longueur des racines, et le rapport racines/partie aérienne, comme stratégie adaptative visant à améliorer l'accès aux ressources du sol. La stabilité de la teneur relative en eau (TRE) et le poids spécifique se sont révélés être de bons indicateurs de tolérance, du fait de leur corrélation positive avec les mesures de biomasse.

L'indice de tolérance YSI a confirmé ces observations, tout en soulignant la complexité de la sélection variétale. En effet, des corrélations inversées, négatives en conditions optimales mais positives sous stress, ont été observées, en particulier avec les biomasses fraîches. L'utilisation combinée de cet indice avec d'autres indicateurs spécifiques, notamment le rendement en biomasse, est donc recommandée pour mieux différencier les mécanismes adaptatifs.

Ces résultats mettent en lumière l'importance de la diversité génétique dans l'amélioration de la tolérance à la sécheresse. Les mécanismes adaptatifs identifiés, ainsi que les génotypes les exprimant, représentent des candidats prometteurs pour les programmes de sélection variétale. Des études complémentaires, notamment en conditions de terrain et à des stades de développement plus avancés, permettront de valider ces comportements et d'identifier les bases physiologiques et génétiques de cette tolérance.

VI. Références bibliographiques

1. **Addinsoft. (2024).** XLSTAT statistical and data analysis solution. https://www.xlstat.com
2. **Ahmad, A., Aslam, Z., Javed, T., Hussain, S., Raza, A., Shabbir, R., ... & Tauseef, M. (2022**). Screening of wheat (Triticum aestivum L.) genotypes for drought tolerance through agronomic and physiological response. *Agronomy*, 12(2), 287.
3. **Ahmadi, J., Pour-Aboughadareh, A., Fabriki-Ourang, S., Mehrabi, A., & Siddique, K. (2018).** Screening wheat germplasm for seedling root architectural traits under contrasting water regimes: potential sources of variability for drought adaptation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64, 1351-1365.
4. **Allahverdiyev, T., & Huseynova, I. (2017).** Influence of water deficit on photosynthetic activity, dry matter partitioning and grain yield of different durum and bread wheat genotypes. *Cereal Research Communications*, 45, 432-441.
5. **Amamou, A., Ramchoun, M., Nsarellah, N., Essarioui, A., & Taghouti, M. (2017).** Etude de la variabilité génétique agro morphologique et technologique des populations Méditerranéennes du blé dur. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 5, 359-369.
6. **Assem, N., El Hafid, L., Haloui, B., & El Atmani, K. (2006).** Effets du stress hydrique appliqué au stade trois feuilles sur le rendement en grains de dix variétés de blé cultivées au Maroc oriental. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 17(4), 499-505.
7. **Bacher, H., Sharaby, Y., Walia, H., & Peleg, Z. (2022**). Modifying root-to-shoot ratio improves root water influxes in wheat under drought stress. *Journal of Experimental Botany*, 73(5), 1643-1654.
8. **Bajji, M., Lutts, S., & Kinet, J. M. (2001).** Water deficit effects on solute contribution to osmotic adjustment as a function of leaf ageing in three durum wheat (Triticum durum Desf.) cultivars performing differently in arid conditions. *Plant Science*, 160(4), 669-681.
9. **Baralla S. (2014).** Climate change effects on *Durum wheat* (*Triticum durum* L.) in Mediterranean area. *Thèse de doctorat, Università degli Studi di Sassari*, Italie.
10. **Barrs, H. D. (1968).** Determination of water deficits in plant tissues. In T. T. Kozlowski (Ed.), Water deficits and plant growth, 1, 235-368. *Academic Press*.
11. **Bassi, F. M., & Sanchez-Garcia, M. (2017).** Adaptation and Stability Analysis of ICARDA Durum Wheat Elites across 18 Countries. *Crop Science*, 57, 2419-2430.
12. **Belkharchouche, H., Fellah, S., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., & Chellal, N. (2014)**. Vigueur De Croissance, Translocation Et Rendement En Grains Du Ble Dur (Triticum Durum Desf) Sous Conditions Semi Arides. *Courrier du Savoir scientifique et technique*, 9(9), 17-24.
13. **Beres, B., Rahmani, E., Clarke, J., Grassini, P., Pozniak, C., Geddes, C., Porker, K., May, W., & Ransom, J. (2020)**. A Systematic Review of Durum Wheat: Enhancing Production Systems by

Exploring Genotype, Environment, and Management (G × E × M) Synergies. *Frontiers in Plant Science*, 11.

14. **Björn, L. O., Papageorgiou, G. C., Blankenship, R. E., & Govindjee. (2009).** A viewpoint: Why chlorophyll a?. *Photosynthesis Research*, 99, 85-98.
15. **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.
16. **Bouslama, M., & Schapaugh, W. T. (1984)**. Stress tolerance in soybean. Part 1: evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*, 24, 933–937.
17. **Ceglar, A., Toreti, A., Zampieri, M., & Royo, C. (2021)**. Global loss of climatically suitable areas for durum wheat growth in the future. *Environmental Research Letters*, 16(10), 104049.
18. **Ceoloni, C., & Jauhar, P. P. (2006).** Chromosome engineering of the durum wheat genome: strategies and applications of potential breeding value. In R. J. Singh & P. P. Jauhar (Eds.), Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement: Vol 2: *Cereals* (pp. 27-59). CRC Press.
19. **Danakumara, T., Kumari, J., Singh, A. K., Sinha, S. K., Pradhan, A. K., Sharma, S., ... & Prasad, P. V. (2021**). Genetic dissection of seedling root system architectural traits in a diverse panel of hexaploid wheat through multi-locus genome-wide association mapping for improving drought tolerance. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13), 7188.
20. **Daoudi, A., & Bouzid, A. (2020)**. La sécurité alimentaire de l'Algérie à l'épreuve de la pandémie de la COVID-19. *Les cahiers du CREAD*, 36(3), 185-207.
21. **FAOSTAT. (2018)**. Production and yield statistics for cereals. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. FAOSTAT. *(Base de données)*
22. **Farooq, M., Aziz, T., Wahid, A., Lee, D. J., & Siddique, K. H. (2009)**. Chilling tolerance in maize: agronomic and physiological approaches. *Crop and Pasture Science*, 60(6), 501-516.
23. **Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., & Sharkey, T. D. (2004).** Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. Plant Biology, 6(3), 269–279.
24. **Gana, B. (2020).** COVID-19 et évolution des importations des produits alimentaires en Algérie: Impacts et perspectives. *Les cahiers du CREAD*, 36(3), 209-225.
25. **Gharbi, F., Guizani, A., Zribi, L., Ahmed, H. B., & Mouillot, F. (2019).** Differential response to water deficit stress and shade of two wheat (Triticum durum desf.) cultivars: growth, water relations, osmolyte accumulation and photosynthetic pigments. *Pak. J. Bot*, 51(4), 1179-1184.

26. **Guendouz, A., Maamari, K., & Guessoum, S. (2012)**. Flag leaf senescence, chlorophyll content and its relationships with yield components under drought in durum wheat (Triticum durum desf). *Int. J. Innov. Bio-Sci*, 2, 186-192.
27. **Idrissi, I., Kettani, R., Ferrahi, M., Nabloussi, A., Ziri, R., & Brhadda, N. (2023)**. Assessment of drought tolerance in wheat using biomass and morpho-physiological traits. *Journal of Plant Sciences*, 58(2), 150–160.
28. **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.
29. **Liu, H., Searle, I. R., Mather, D. E., Able, A. J., & Able, J. A. (2015)**. Morphological, physiological and yield responses of durum wheat to pre-anthesis water-deficit stress are genotype-dependent. *Crop and Pasture Science*, 66, 1024-1038.
30. **Ortiz, R., Trethowan, R., Ferrara, G. O., Iwanaga, M., Dodds, J. H., Crouch, J. H., Crossa, J., & Braun, H. J. (2007)**. High yield potential, shuttle breeding, genetic diversity, and a new international wheat improvement strategy. *Euphytica*, 157, 365-384.
31. **Sairam, R. K., Tyagi, A., & Sinclair, T. R. (2001).** Genotypic variation for drought tolerance and water use efficiency in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 52(367), 2111–2119.
32. **Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012).** NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671-675.
33. **Senge, M. O., Ryan, A. A., Letchford, K. A., MacGowan, S. A., & Mielke, T. (2014)**. Chlorophylls, symmetry, chirality, and photosynthesis. *Symmetry*, 6(3), 781-843.
34. **Shewry, P. R. (2021, November 20)**. The contribution of wheat to human nutrition and health. A Year on the Field. https://ayearonthefield.com/the-contribution-of-wheat-to-human-nutrition-and-health/
35. **Talebi F., Fayaz F., Naji A. M. & Moghaddam M. (2011).** Effects of water deficit on growth and physiological parameters in wheat genotypes. *Agricultural Water Management*, 105(4), 403–410.
36. **Zhang, X. X., Whalley, P. A., Ashton, R. W., Evans, J., Hawkesford, M. J., Griffiths, S., ... & Whalley, W. R. (2020)**. A comparison between water uptake and root length density in winter wheat: effects of root density and rhizosphere properties. *Plant and Soil*, 451, 345-356.

Résumé

Cette étude explore la réponse de 14 génotypes de blé dur à un déficit hydrique appliqué précocement au stade de la levée, selon une méthode gravimétrique. L'objectif est d'évaluer la croissance à deux stades: première et troisième feuille, en utilisant des critères morphologiques et physiologiques. Les résultats obtenus ont révélé une variabilité génétique importante entre les génotypes, traduisant des réactions différenciées face au stress hydrique. Certains génotypes ont démontré une tolérance importante, visible par le maintien ou une diminution limitée des biomasses fraîches et sèches des racines et de la partie aérienne. Une redistribution des ressources vers les racines a été constatée sous stress, ce qui suggère un mécanisme adaptatif visant à améliorer l'absorption hydrique. De plus, la teneur relative en eau (TRE) et le poids spécifique des feuilles se sont avérés de bons indicateurs de tolérance. L'utilisation de l'indice de stabilité du rendement (YSI), combinée avec le rendement en biomasse, est pertinent pour identifier les génotypes les performants et résiliants. Ces résultats confirment l'intérêt de la diversité génétique comme levier d'amélioration de la tolérance à la sécheresse. Enfin, des essais complémentaires en conditions de terrain sont nécessaires pour valider les observations issues de cette expérimentation contrôlée.

Mots-clés Blé dur (*Triticum durum* Desf.), déficit hydrique, variabilité génétique, tolérance au stress.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم استجابة نمو 14 نمطًا وراثيًا من القمح الصلب لنقص مائي مطبق مع بداية مرحلة الإنبات، باستخدام طريقة قياس الوزنية. تم إجراء القياسات في مرحلتين: الورقة الأولى والثالثة، اعتمادًا على معايير مورفولوجية وفسيولوجية. أظهرت النتائج وجود تباين وراثي كبير بين الأنماط الوراثية، بالإضافة الى سلوكً مختلفًا تجاه الإجهاد المائي. بعض الأنماط أظهرت قدرة تحمل جيدة من خلال الحفاظ أو نقصان طفيف في الكتلة الحيوية الطازجة والجافة للجذور والأجزاء الهوائية. كما لوحظت إعادة توجيه للموارد نحو الجذور، مما يشير إلى آلية تكيفية لتحسين امتصاص المياه من التربة. وقد ثبت أن المحتوى النسبي للماء والوزن النوعي للأوراق مؤشرات جيدة على القدرة على التحمل. استخدام مؤشر ثبات المردود (YSI) بالاقتران مع قياس المردود في الكتلة الحيوية يكون فعال في تحديد الأنماط الوراثية المنتجة والمقاومة. تؤكد هذه النتائج أهمية استغلال التنوع الوراثي لتحسين مقاومة الجفاف. وتوصى بإجراء دراسات ميدانية إضافية لتأكيد هذه النتائج.

كلمات مفتاحية: القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.)، عجز مائي، تنوع جيني، تحمل الجفاف.