



Projet de Fin d'Etudes

Licence Sciences & Techniques

Biotechnologie et Valorisation des Phyto-Ressources

Evaluation des paramètres physiologiques et
biochimiques du matériel de blé dur pour la
tolérance au stress hydrique.

Présenté par : AKAABOUNE Adil

Encadré par :

- Pr. ATMANI Majid (FSTF)
- Dr. KETTANI Rajae (INRA Meknès)

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

- Pr. ATMANI Majid (FSTF)
- Dr. KETTANI Rajae (INRA Meknès)
- Pr. SQALLI Hakima (FSTF)

Année universitaire

2020/2021

DEDICACE

À Ma très chère mère et mon très cher père

Pour votre amour, votre affection et vos efforts, que vous avez fait pour mon éducation ainsi que ma formation, je ne cesse de vous dire toujours merci pour tous vos sacrifices.

Que dieu tout puissant vous garde tous les deux et vous accorde longue vie et bonne santé.

À Tous ceux qui ont une relation de proche ou de loin avec la réalisation du présent rapport

Merci beaucoup

ADIL AKAABOUNE

Remerciements

*Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à **Dr. Kettani Rajae** chercheuse au CRRA de Meknès pour tout le temps qu'elle m'a consacré, ses directives précieuses et ses conseils qui m'ont été bien utiles, notamment pour la rédaction de ce mémoire.*

*Je tiens à remercier **Dr. ATMANI Majid** pour son encadrement irréprochable et généreux, ses compétences scientifiques et ses orientations précieuses qui m'ont aidé à la réalisation de ce travail.*

*Je remercie, aussi, **Mme SQALLI Hakima**, qui m'a fait l'honneur par sa présence à la soutenance de mon projet de fin d'étude et par le temps qu'elle a consacré pour examiner et juger ce travail.*

*Mes remerciements vont également à **Mlle SAGHOURI EL IDRISSE Imane** qui m'a présenté l'aide et le soutien durant le stage que j'ai passé au sein de Institut National de la Recherche Agronomique (**INRA**), ainsi pour les informations et la documentation qu'elle m'a fourni afin d'élaborer ce travail.*

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail de fin d'étude.

Résumé

La sécheresse constitue le premier facteur limitant de la production du blé dur (*Triticum durum*, Desf) au Maroc. L'objectif de ce travail consiste à évaluer les critères physiologiques et biochimiques de la tolérance à la sécheresse de 16 variétés de blé dur.

L'expérimentation s'est déroulée sous serre au Centre Régional de Recherche Agronomique (CRRA) de Meknès. L'effet de différents traitements sur les réponses physiologiques et biochimiques ont été étudiés selon un dispositif expérimental en blocs aléatoires avec trois répétitions.

Les résultats obtenus montrent que les différents traitements de régime hydrique ont eu un effet sur la majorité des paramètres étudiés.

Concernant les paramètres physiologiques, on a pu observer une diminution significative de la teneur relative en eau, de la teneur en chlorophylle, de la surface foliaire et de la conductance stomatique avec une augmentation de la température foliaire.

La deuxième partie de présente a été consacrée à l'étude de l'impact du stress hydrique sur les paramètres biochimiques. On a pu observer une forte accumulation de proline et des sucres solubles chez les différentes lignées étudiées.

L'analyse statistique montre la présence d'une corrélation positive hautement significative entre la teneur relative en eau (TRE) d'une part et la surface foliaire, la teneur en chlorophylle et la conductance stomatique d'autre part. Tandis qu'il y a une corrélation négative hautement significative entre la teneur relative en eau et la température foliaire d'une part et les paramètres biochimiques d'autre part. **Mots clés : Blé dur, stress hydrique, paramètres physiologiques, paramètres biochimiques.**

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Présentation de l’Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).....	2
CHAPITRE I. : CONTEXTE BIBLIOGRAPHIQUE	2
I. Généralités sur le blé dur.....	3
1. Origine géographie du blé.....	3
2. Origine génétique du blé dur.....	3
3. Classification botanique.....	4
4. Le cycle biologique de blé.....	4
4.1. La période végétative.....	4
4.2. La période reproductrice.....	5
5. Les exigences climatiques du blé dur.....	6
II. Importance de la production du blé.....	7
1. Importance du blé à l’échelle mondiale.....	7
2. La production du blé au Maroc.....	8
III. Les contraintes biotiques et abiotiques liées à la culture du blé au Maroc :.....	9
1. Stress biotiques.....	10
2. Stress abiotiques.....	10
IV. Effet du stress hydrique sur le développement des plantes :.....	11
1. Notion du stress hydrique.....	11
2. Effet du stress hydrique sur les paramètres physiologiques.....	12
V. Mécanismes d’adaptation des plantes au stress hydrique.....	12
1. Adaptation phénologique.....	12
2. Adaptation physiologique.....	12
3. Adaptation biochimique.....	13
CHAPITRE II. : MATERIEL ET METHODES.....	15
I. Site d’étude.....	15
1. L’application du stress hydrique.....	16
2. Paramètres mesurés.....	16
2.1. Les paramètres physiologiques.....	16
2.2. Les paramètres biochimique.....	19
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION.....	22
I. Impact du stress hydrique sur les paramètres physiologiques.....	22
1. Analyse de la variance.....	22
2. Conductance stomatique.....	22
3. La surface foliaire.....	24

4.	La teneur en chlorophylle.....	25
5.	La teneur relative en eau	26
6.	La température foliaire	27
II.	Impact du stress hydrique sur les paramètres biochimique	28
1.	Analyse de la variance.....	28
2.	La Teneur en proline	29
3.	La teneur en sucres solubles	30
III.	Corrélation entre les paramètres physiologiques et biochimique mesurés	31
	Conclusion et perspectives	32
	Références bibliographiques	34

Liste des abréviations

FAO	Organisation des Nations Unies Pour L'alimentation Et L'agriculture
MAPM	Ministère de l'agriculture et de pêche maritime
CRRA	Centre Régional de Recherche Agronomique
SF	Surface Foliaire
TRE	Teneur Relative En Eau
Ch	Teneur en chlorophylle
PF	Poids Frais
PT	Poids de Turgescence
PS	Poids Sec
SPAD	Soil Plant Analysis Developement
ANOVA	Analyse de la Variance
T	Témoin
SM	Stress Modéré
SS	Stress Sévère
R5C	la pyrroline 5-carboxylate
Fig.	Figure
Tab.	Tableau

Liste des figures

Figure 1: Cycle de développement du blé	6
Figure 2: les principales régions de la production des céréales au Maroc (Source : MAPMDREF)	9
Figure 3: Répartition de la production par zone agro-climatique (Source : MAPMDREF).....	9
Figure 4: Serre en conductions contrôlées et sa boîte de contrôle (CRRRA-Meknès 2021).	15
Figure 5: Planimètre (LI-3000C) de mesure la surface foliaire.....	17
Figure 6: chlorophylle mètre (SPAD) pour mesurer la teneur en chlorophylle	18
Figure 7: Appareil de mesure de la conductance stomatique	18
Figure 8: Appareil de mesure de la température foliaire	19
Figure 9: les solutions obtenues lors d'un dosage de la proline.....	20
Figure 10: Courbe étalon du dosage de la proline	20
Figure 11: Courbe étalon du dosage des sucres solubles.....	21
Figure 12 : Variation de la conductance stomatique chez les lignées étudiées du blé dur selon le traitement hydrique (T, SM et SS)	22
Figure 13: Variation de la surface foliaire chez les lignées étudiées du blé dur selon le traitement hydrique (T, SM et SS).....	24
Figure 14: Variation de teneur en chlorophylle en fonction des traitements (T, SM et SS) chez les différentes lignées étudiées de blé dur.....	25
Figure 15: Variation de teneur relative en eau en fonction des traitements (T, SM et SS) chez les différentes lignées étudiées de blé dur.....	26
Figure 16: Variation de la température foliaire en fonction des traitements (T, SM et SS) chez les différentes lignées étudiées de blé dur.....	27
Figure 17: Variation de teneur en proline en fonction des traitements (T, SM et SS) chez les différentes lignées étudiées de blé dur.....	29
Figure 18: Variation de teneur en sucres solubles en fonction des traitements (T, SM et SS) chez les différentes lignées étudiées de blé dur.....	30

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification botanique du blé.	4
Tableau 2: le marché mondial du blé	7
Tableau 3: les différentes variétés d'expérimentation.....	16
Tableau 4: Analyse de la variance (ANOVA) pour les paramètres physiologiques évalués sous différents niveaux de traitement (T, SM, SS).....	22
Tableau 5: Analyse de la variance (ANOVA) pour les paramètres biochimiques évalués sous différents niveaux de traitement (T, SM, SS).....	28
Tableau 6: corrélation entre les paramètres physiologiques et biochimiques	31

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur céréalière occupe une place importante dans la structure de production agricole marocaine et est l'une des ressources alimentaires humaines les plus importantes [1]. Outre son importance économique et sociale, c'est aussi la principale source de nutrition dans les pays sous-développés.

Cependant, la culture du blé est affectée par les fluctuations interannuelles des précipitations et les sécheresses de plus en plus fréquentes, qui ont affecté la production de blé. En effet, au cours des 50 dernières années, le Maroc a connu 11 années de sécheresse. Depuis les années 80, les sécheresses sont devenues plus fréquentes. Cette fréquence est passée d'une année sur 5 avant les années 90 à 1 année sur 2 au cours de la dernière décennie [2].

Au Maroc, l'alimentation est essentiellement basée sur la consommation de céréales (farine, pain, pâtes, etc.) La culture des céréales, en particulier la culture du blé, constitue un secteur agricole important dans l'économie nationale de 2014 à 2015, Pic de blé [3]. Cependant, en raison des changements climatiques de ces dernières années (comme la sécheresse), la production a diminué. Cela explique la baisse de qualité de la consommation au cours des 30 dernières années. En 2014, la consommation de céréales par habitant était estimée à 185 kg.

Le stress hydrique est l'un des facteurs limitant la production du blé au Maroc, et pour lutter contre le manque d'eau, les plantes ont développé des stratégies d'adaptation qui varient selon les espèces et les conditions environnementales [4]. Les plantes ont développé des stratégies adaptatives pour répondre à ces changements en ajustant leur système métabolique [5].

La présente étude a pour objectif de présenter une évaluation des paramètres physiologiques et biochimiques de certaines variétés de blé dur pour la tolérance au stress hydrique.

Le présent manuscrit se compose de 3 parties :

- 1ère partie : Etude bibliographie
- 2ème partie : Matériel et méthodes
- 3ème partie : Résultat et discussions

Présentation de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)



- Institut National de la Recherche Agronomique

L'INRA est un établissement public dont les origines remontent à 1914, ayant pour mission d'entreprendre les recherches pour le développement agricole. C'est un institut de recherche producteur de connaissances scientifiques et technologiques au service du bien-public, accompagnant l'innovation économique et sociale dans les domaines de l'alimentation, de l'agriculture et de l'environnement. Ses recherches sont nourries par une double dynamique : faire progresser les connaissances et répondre à des questions de développement. Ses orientations se définissent et évoluent au contact d'une grande diversité d'acteurs par un collectif pluridisciplinaire d'experts INRA et par ses multiples ancrages académiques, économiques, associatifs ou territoriaux. L'INRA opère à travers dix centres régionaux et 23 domaines expérimentaux répartis sur le territoire national et couvrant les divers agrosystèmes du pays lui permettant d'être à l'écoute de son environnement.

- Centre Régional de la Recherche Agronomique de Meknès

C'est une entité régionale opérant dans une zone incluant différentes agrosystèmes, par des recherches, études et actions de recherche-développement visant la promotion d'une agriculture moderne dans la région.

Il est composé 4 unités de recherche (UR) :

- Protection des plantes.
- Agronomie et physiologie végétale.
- Amélioration des plantes et conservation des ressources phytogénétiques.
- Gestion durable des ressources naturelles, d'économie et sociologie rurales

Chapitre I. : Contexte bibliographique

I. Généralités sur le blé dur

1. Origine géographique du blé

Depuis la naissance de l'agriculture, le blé est la base de la nourriture de l'homme [6], c'est une espèce connue depuis la plus haute antiquité, dont il constitue la base alimentaire des populations du globe [7].

La découverte du blé remonte à 15000 ans avant Jésus-Christ dans la région du croissant fertile, vaste territoire comprenant, la vallée du Jourdain et des zones adjacentes de Palestine, de la Jordanie, de l'Iraq, et la bordure Ouest de l'Iran [8]. C'était à une époque où l'homme pratiquait déjà la cueillette et faisait ses débuts comme agriculteur. Cette période coïncidait avec un épisode climatique sec, aboutissant à l'arrêt du mode de vie de 'chasseur-cueilleur', et engendrant la domestication progressive des plantes, associée à la création des premières communautés villageoises [9]

Le blé est l'une des principales ressources alimentaires de l'humanité. La saga du blé accompagne celle de l'homme et de l'agriculture, sa culture précède l'histoire et caractérise l'agriculture néolithique, née en Europe il y a 8000 ans. La plus ancienne culture semble être le blé dur dans le croissant fertile de la Mésopotamie [10].

2. Origine génétique du blé dur

C'est il y a environ 10 000 ans, au Proche-Orient, dans la région du Croissant fertile, que le blé a été domestiqué par hybridation entre trois espèces d'une graminée sauvage, l'épeautre ou engrain sauvage : *Triticumspelta* L., *Triticumboeoticum* et *Aegilops longissima*. Il a gagné l'Europe occidentale par deux grands axes : d'une part la Méditerranée dès 5000 avant notre ère, un blé panifiable était cultivé dans le sud de la France, d'autre part la vallée du Danube deux espèces de blés non panifiables (amidonnier et engrain), vieux de 4000 ans, ont été retrouvées dans la région parisienne, ainsi que du froment en Bretagne et en Normandie. La détermination de l'origine de chacun des génomes du blé est difficile du fait de l'évolution des espèces [11], cité fut le premier à déterminer le nombre exact des chromosomes de diverses espèces de *Triticum* de niveaux de ploïdie différents :

- *Triticumaestivum* : 42 chromosomes, hexaploïde.

- Triticumturgidum : 28 chromosomes, tétraploïde [$2n = 4x = 28$] Génome AABB.
- Triticummonococcum : 14 chromosomes, diploïde

3. Classification botanique

Selon [11] et [10], Le blé dur est une plante herbacée, appartenant au groupe des céréales à paille, qui sont caractérisée par des critères morphologiques particuliers. Le blé dur est une monocotylédone qui obéit à la classification suivante :

Tableau 1 : Classification botanique du blé [11].

Embranchement :	Spermaphytes
S/Embranchement :	Angiospermes
Classe :	Monocotylédones
Super Ordre :	Commeliniflorales
Ordre :	Poales
Famille :	Graminacée
Genre :	Triticum
Espèce :	TriticumdurumDesf

4. Le cycle biologique de blé

4.1. La période végétative

4.1.1. Phase germination-levée

La germination de la graine se caractérise par l'émergence du coléorhize donnant naissance à des racines séminales et de la coléoptile qui protège la sortie de première feuille fonctionnelle. La levée se fait réellement de la sortie des feuilles à la surface du sol. Au sien d'un peuplement, la levée est atteinte lorsque la majorité des tiges de semis sont visibles [13]. Durant la phase semis-levée l'alimentation de la plante dépend uniquement de son système racinaire primaire et des réserves de la graine. La réalisation de cette phase dépend de la chaleur, l'aération et l'humidité [14].

4.1.2. phase levée-tallage

La production de talle commence à l'issue du développement de la troisième feuille, à 45 jours environ après la date du semis [14]. Les talles secondaires peuvent apparaitre et être susceptibles d'émettre des talles tertiaires.

Le nombre de talles produites est fonction de la variété, du climat, de l'alimentation minérale et hydrique de la plante, ainsi que de la densité de semis [15].

4.2. La période reproductrice

4.2.1. La montaison-gonflement

La montaison débute à la fin de tallage. Elle est caractérisée par l'allongement des entre nœuds et la différenciation des pièces florales. A cette phase, un certain nombre de talle herbacée commence à régresser alors que d'autres se trouvent couronnées par des épis. Pendant cette phase de croissance active, les besoins en élément nutritifs notamment en azote sont accrus. La montaison s'achèvera la fin de l'émission de la dernière feuille et les manifestations du gonflement que provoquent les épis dans la graine [16].

4.2.2. L'épiaison- fécondation

Elle est marquée par la méiose pollinique, l'éclatement de la gaine avec l'émergence de l'épi. C'est au cours de cette phase que s'achève la formation des organes floraux (l'anthèse) et s'effectue la fécondation. Cette phase est atteinte quand 50% des épis sont à moitié sortis de la gaine de la dernière feuille [17]. Elle correspond au maximum de la croissance de la plante qui aura élaboré les trois quarts de la matière sèche totale et dépend étroitement de nutrition minérale et de la transpiration qui influencent le nombre final des grains par épi [18].

4.2.3. Maturation du grain

La phase de maturation succède au stade plateaux (45 % d'humidité). Elle correspond à la phase au cours de laquelle le grain va perdre progressivement son humidité en passant par divers stades [12]. On dit que le blé est au stade maturité physiologique.

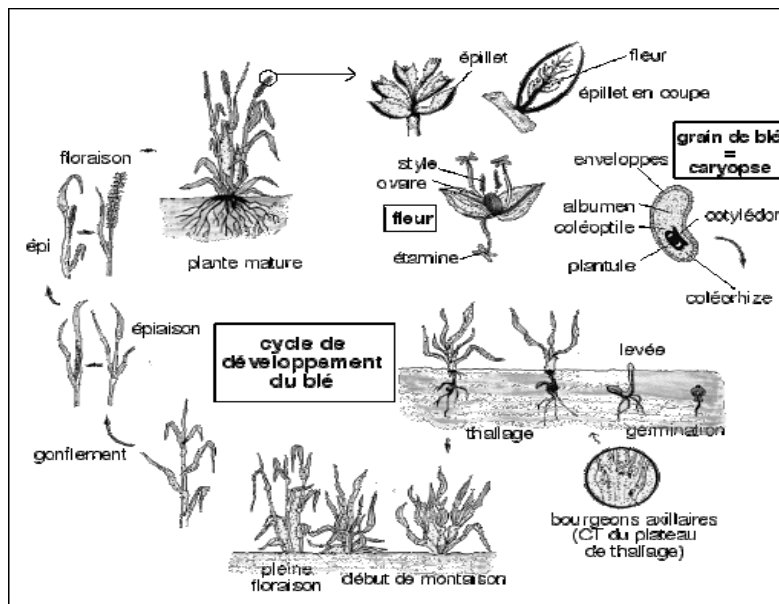


Figure 1: Cycle de développement du blé [19].

5. Les exigences climatiques du blé dur

5.1. L'eau

Le blé exige une humidité permanente durant tout le cycle de développement, l'eau est demandée en quantité variable. Les besoins en eau sont estimés à environ 800 mm [20]. En zone aride, les besoins sont plus importants au vu des conditions climatiques défavorables. C'est de la phase épi 1 cm à la floraison que le besoins en eau sont les plus importants. La période critique en eau se situe 20 jours avant l'épiaison jusqu'à 30 à 35 jours après la floraison [21].

5.2. Température :

À chaque étape du cycle de croissance du blé, la température est toujours un facteur affectant la physiologie du blé. Dans l'azote, la germination est empêchée à 0 ° C, alors qu'une température de 15 à 25 ° C est requise pendant la phase de croissance. Cependant, la température de croissance optimale est située entre 20 ° C et 26 ° C.

5.3. La lumière :

La lumière est le facteur qui agit directement sur le bon fonctionnement de la photosynthèse et le comportement de blé. Un bon tallage est garanti, si le blé est placé dans les conditions optimale d'éclaircements [22].

II. Importance de la production du blé

1. Importance du blé à l'échelle mondiale

Selon la FAO, Les prévisions relatives à la **production** mondiale de céréales en 2020 ont été relevées de 1,7 million de tonnes et s'établissent à présent à 2 767 millions de tonnes, soit 2,1 pour cent de plus que la production de 2019.

Les prévisions concernant l'**utilisation** mondiale de céréales en 2020-2021 ont été relevées de 6,0 millions de tonnes par rapport à avril et s'établissent à présent à 2 783 millions de tonnes, soit une hausse de 2,7 pour cent par rapport à 2019-2020.

Alors que les prévisions relatives aux **stocks** mondiaux de céréales à la clôture des campagnes de 2021 ont été abaissées de 2,8 millions de tonnes et s'établissent à présent à 805 millions de tonnes, soit un recul de 2,3 pour cent par rapport à leurs niveaux d'ouverture. Compte tenu de cette révision à la baisse, ainsi que de la hausse de l'utilisation prévue, le rapport stocks/utilisation devrait s'établir à 28,3 pour cent, contre 29,6 pour cent en 2019-2020, soit son niveau le plus bas depuis sept ans.

La production mondiale, les stocks, l'utilisation, et commerce du blé au niveau mondial sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 2: le marché mondial du blé [23]

Marché mondial du blé						
	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20 estimation	2020/21 prévision	
					précédente (04 mars 2021)	dernière (08 avril 2021)
(. millions de tonnes)						
Production ^{1/}	763.5	761.6	732.0	760.6	774.0	774.3
Disponibilités ^{2/}	1 006.2	1 027.1	1 019.9	1 032.2	1 050.9	1 050.6
Utilisation	736.4	738.0	750.2	750.6	754.5	763.0
Commerce ^{3/}	177.6	178.2	169.1	184.3	186.6	188.0
Stocks de clôture ^{4/}	265.5	287.9	271.6	276.3	292.0	284.0
(. pour cent)						
Rapport stocks mondiaux- utilisation	36.0	38.4	36.2	36.2	37.9	36.7
Rapport stocks des principaux exportateurs- utilisation totale ^{5/}	19.8	20.9	18.0	15.4	15.9	15.9

2. La production du blé au Maroc

Selon les premières prévisions du ministère de l'Agriculture, la production prévisionnelle des trois céréales principales au titre de la campagne 2020-2021 est estimée à 98 millions de quintaux, soit une hausse de 54,8% en comparaison avec la moyenne de cinq ans (63,3 millions de quintaux) et 206% par rapport à la campagne précédente.

Cette production résulte d'une superficie céréalière semée au titre de cette campagne de 4,35 millions d'hectares, dont l'état végétatif est à 75% bon à très bon.

Par espèce, la production céréalière prévisionnelle se présente comme suit :

- ✓ 48,2 millions Qx de blé tendre;
- ✓ 23,4 millions Qx de blé dur;
- ✓ 26 millions Qx d'orge.

Après deux campagnes sèches et le contexte sanitaire lié à la pandémie, le secteur agricole devrait connaître une croissance significative par rapport à 2020 absorbant ainsi les baisses successives de 2019 et 2020 et réalisant une croissance additionnelle. En effet, la valeur ajoutée agricole prévisionnelle pourra atteindre 130 Milliards de DH au titre de l'année 2021 soit une croissance de 18,2% confirmant la résilience du secteur agricole construite le long des dernières années et des efforts et d'investissement consentis pour développer une infrastructure productive solide et durable.

Les céréales sont pratiquées dans les différentes zones agro-climatiques du pays en assolement avec d'autres cultures annuelles représentées essentiellement par les légumineuses, les cultures industrielles et les cultures fourragères.

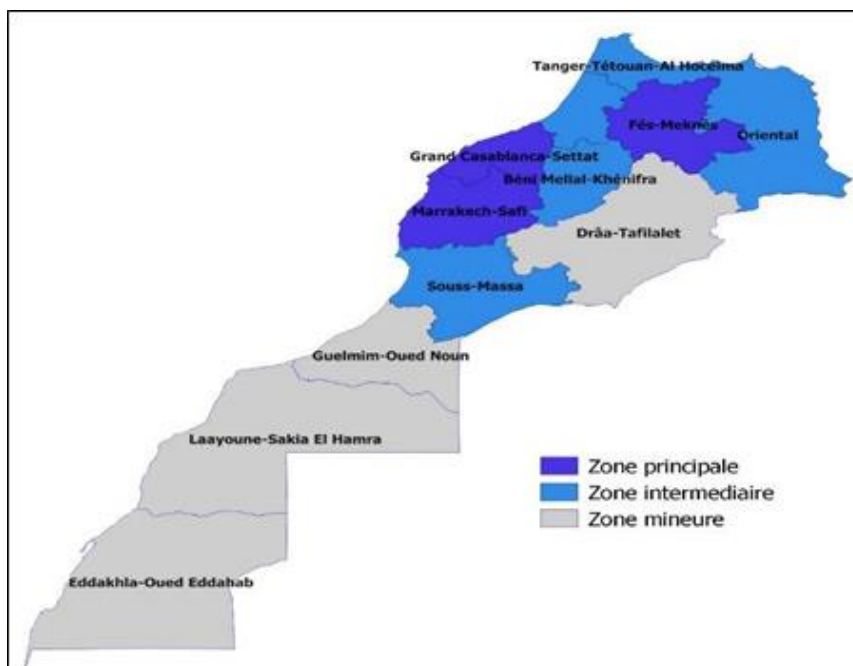


Figure 2: les principales régions de la production des céréales au Maroc (Source : MAPMDREF)

En se basant sur les données du diagramme de la figure3, les zones agro-climatique sont répartit selon la production de blé en quatre zones. Les zones favorables sont des zones à vocation céréalière car elles enregistrent un taux de 43% de la superficie totale des céréales en 2015, suivie des zones intermédiaires avec un taux de 26%, puis des zones défavorables (21%) et enfin les montagnes (10%) [2].

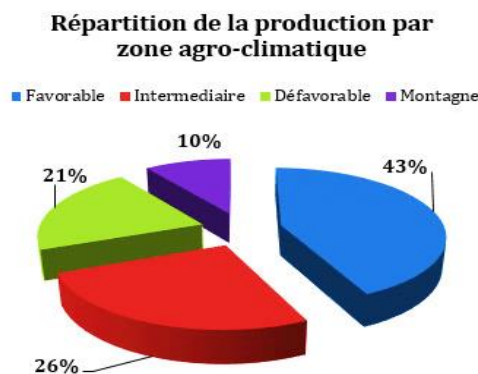


Figure 3: Répartition de la production par zone agro-climatique (Source : MAPMDREF)

III. Les contraintes biotiques et abiotiques liées à la culture du blé au Maroc :

La culture du blé au Maroc est affectée par des stress biotiques et abiotiques tout au long du cycle. Les stress biologiques et abiotiques sont des phénomènes courants et sont à l'origine de la baisse de la qualité et de la productivité des cultures. La propagation de la maladie est

favorisée par la combinaison de deux facteurs de base qui favorisent l'expansion et la propagation, à savoir:

- ✚ La sensibilité de la variété ;
- ✚ Les conditions environnementales

1. Stress biotiques

Les stress biotiques sont ceux causés par des facteurs vivants tels que les insectes ravageurs, les champignons, les bactéries et les virus. D'après le rapport d'activité de l'INRA concernant la protection des céréales et légumineuses en 2008, les maladies cryptogamiques les plus dominantes dans les champs de blé, sont la rouille brune (*Puccinia triticina*), la septoriose (*Mycosphaella graminicola*) et la rouille jaune (*Puccinia striitiformis*).

2. Stress abiotiques

Le déficit hydrique, thermique et minéralogique constitue les facteurs qui influencent le rendement et contribue au développement des maladies du blé au Maroc. En effet les régions arides et semi-arides souffrent d'un déficit hydrique [24] et des problèmes associés au régime de pluviométrie comme la pourriture racinaire et la cécidomyie, Les régions humides souffrent de l'excès d'eau et des problèmes de maladies foliaires qui sont favorisées par l'humidité, [25], et les régions subhumides connaissent des problèmes de sécheresses, de cécidomyie et des maladies foliaires [26]. Quant aux intrants indispensables pour la plante comme l'azote, le phosphore et la potasse, leurs réserves sont sujettes à l'épuisement, et leurs prix vont en augmentation.

➤ Salinité

Dans la région méditerranéenne, avec un climat aride ou semi-aride, l'eau est le principal facteur limitant pour la culture céréalière. Les ressources en eau sont de plus en plus rares à cause d'une mauvaise gestion des eaux d'irrigation, d'où la nécessité d'utilisation de l'eau salée. La salinité du sol est l'un des principaux facteurs qui affectent la production agricole est principalement le blé au niveau des régions côtières, des zones arides, et des périmètres irrigués du pays. La réponse à la salinité chez les plantes se manifeste généralement dans la plupart des cas par une réduction de la croissance et du développement, comme réponse à la déshydratation qui permet à la plante de limiter la perte d'eau par transpiration, ainsi qu'une perturbation de la

photosynthèse. Généralement on trouve que le blé tendre est plus tolérant au sel que le blé dur [27].

➤ Sécheresse

La production du blé reste très dépendante des aléas climatiques de la saison agricole, principalement la répartition des précipitations au cours du cycle de la culture. La sécheresse constitue l'un des facteurs les plus importants intervenant dans la limitation des rendements principalement dans les zones arides et semi-arides. Ainsi, on trouve que la succession de la sécheresse a toujours été présente dans l'histoire du Maroc qui a connu des années de sécheresse ces dernières décennies, caractérisées par une diminution des précipitations et une hausse des températures [28].

La sécheresse chez les plantes se manifeste par une réduction significative de la teneur en eau de la plante qui provoque une réduction du taux de croissance, dû à un déséquilibre au niveau hormonal, ainsi qu'au niveau des processus métaboliques.

Chez les céréales, et en particulier le blé, beaucoup d'efforts ont été réalisés pour améliorer la productivité dans les conditions de sécheresse parmi lesquelles on trouve :

- ✓ La sélection ;
- ✓ La multiplication ;
- ✓ La transformation génétique;
- ✓ L'amélioration des pratiques culturales ;
- ✓ L'amélioration de l'efficacité de l'utilisation des intrants.

IV. Effet du stress hydrique sur le développement des plantes :

1. Notion du stress hydrique

La notion de stress hydrique a toujours été assimilée à la notion de sécheresse. La sécheresse définit l'état des plantes souffrant de pénurie d'eau [30].

Un stress hydrique apparaît lorsque la demande en eau dépasse la quantité disponible pendant une certaine période du cycle végétatif ou reproducteur chez la plante. Le premier impact du stress hydrique s'observe sur la végétation. La plante met en place des mécanismes d'adaptation pour rééquilibrer son statut hydrique [31].

Le stress hydrique se traduit chez la plante par une série de modifications qui touchent les caractères morphologiques, physiologiques et biochimiques, à partir du moment où les besoins en eau de la plante sont supérieurs aux quantités disponibles [31].

2. Effet du stress hydrique sur les paramètres physiologiques

Parmi les changements physiologiques liés au stress hydrique, la régulation du stomate affecte la photosynthèse et la respiration. La baisse du potentiel hydrique de la plante se traduit principalement par une diminution de la pression de turgescence ensuite à une perte de fonctions vitales [32]. Donc un stress hydrique provoque la fermeture des stomates, ralentissant la photosynthèse en même temps que la transpiration. La sécheresse menace la capacité de la plante à maintenir sa photosynthèse. En cas de déficit hydrique, la plante pourra être exposée d'abord à une perte de turgescence [32].

V. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress hydrique

Pour faire face aux pénuries d'eau, les plantes ont développé plusieurs stratégies d'adaptation, qui varient selon les espèces et les conditions environnementales. Par conséquent, la résistance des plantes peut être définie physiologiquement par leur capacité à survivre et à croître, et peut être définie sur le plan agronomique en obtenant des rendements plus élevés que les plantes sensibles.

1. Adaptation phénologique

Les paramètres phénologiques d'adaptation ou paramètres de précocité définissent le calage du cycle vis-à-vis des contraintes environnementales. La précocité constitue donc un important mécanisme d'évitement de la sécheresse de fin de cycle et donc une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau [34]. Pour l'essentiel, cette adaptation permet de valoriser les pluies, améliore l'utilisation de l'eau et permet une production de biomasse aérienne plus importante [53].

2. Adaptation physiologique

a. Réduction de la conductance stomatique

La réduction de la perte en eau par la fermeture stomatique est un moyen d'adaptation des plantes au stress hydrique [36]. La fermeture stomatique permet à la plantes de réduire la

sortie d'eau et elle limite l'entrée de CO₂, Cette diminution de la transpiration peut engendrer une réduction de la photosynthèse.

La régulation de la conductance stomatique reste le mécanisme majeur intervenant à court terme pour limiter les pertes d'eau : le potentiel hydrique foliaire sera maintenu d'autant plus longtemps que la fermeture des stomates est précoce [37].

b. La teneur en chlorophylle

Sous un stress hydrique, une diminution de la teneur en chlorophylle est remarquée chez le blé dur. Le bon indicateur du seuil de tolérance au stress hydrique c'est le rapport chlorophylle (a/b), la chlorophylle constituant la base des systèmes photosynthétiques par le captage de l'énergie solaire [38].

c. La teneur relative en eau

Le stress hydrique entraîne la réduction des métabolites nécessaires à la photoassimilation et à la division cellulaire, ce qui entraîne une réduction de la mitose et de la croissance, ainsi que l'élongation et l'expansion des cellules.

d. Ajustement osmotique

C'est la capacité de l'eau à quitter un compartiment donné. L'eau se déplace spontanément d'un compartiment à faible potentiel en eau vers un compartiment à fort potentiel en eau. Cela dépend de l'humidité du compartiment ou de sa concentration en sel. En fonctionnement normal, l'eau a tendance à se déplacer du compartiment. Se déplacer du sol à la racine (absorption), de la racine à la feuille (conduction), de la feuille à l'atmosphère (transpiration) [39]. On parle d'ajustement osmotique quand les concentrations des solutés (le proline, les sucres solublesetc), à l'intérieur de la cellule augmentent pour maintenir une pression osmotique cellulaire élevée [40].

3. Adaptation biochimique

a. Accumulation de la proline

C'est un acide aminé qui peut s'accumuler sous l'action d'un stress hydrique, salin ou thermique. L'adaptation des blés à la sécheresse s'est caractérisée par une accumulation en proline libre des feuilles. Cette accumulation est beaucoup plus marquée chez les variétés considérées comme tolérantes à la sécheresse [41]. Elle résulterait d'une activité intense du métabolisme de la plante suite à un stress, lequel pourrait avoir lieu à n'importe quel stade. Elle donne lieu à l'accumulation d'autres acides aminés comme l'Asparagine, la Glutamine, la

Serine, la Glycine. La proline serait synthétisée à partir de l'acide glutamique via la pyrroline 5-carboxylate (P5C) mais également de l'arginine et l'ornithine [41].

b. Accumulation des sucres solubles

Pendant d'un déficit hydrique, le métabolisme des hydrates du carbone s'affecte par l'accumulation des sucres solubles dans les tissus des plantes cultivées sous stress notamment chez les feuilles [43]. L'accumulation des sucres solubles reflète le rôle joué par le saccharose et les monosaccharides dans la diminution du potentiel hydrique dans l'ajustement osmotique chez les différentes plantes de blé dur, elle leur confère un certaines aptitude à la tolérance au stress hydrique [44].

L'accumulation des sucres solubles est la cause principale de la baisse du potentiel osmotique. Les sucres contribuent au maintien des réactions de phosphorylation et de production d'énergie, ils protègent les processus de synthèses des enzymes, ce qui impliquerait une meilleure tolérance de la plantes à la sécheresse [45]. En effet les sucres, même s'ils représentent des osmotocums beaucoup moins puissants, participent également au maintien de la balance de la force osmotique pour garder la turgescence et le volume cytosolique aussi élevés que possible. Ils permettent également une préservation de l'intégrité membranaire dans les organes desséchés ainsi qu'une protection des protéines [45].

Chapitre II. : Matériel et méthodes

I. Site d'étude :

Cette étude a été effectuée au Centre Régional de la Recherche Agronomique à Meknès, l'expérimentation a été réalisée en pots sous serre en conditions contrôlées (température, pression, lumière et humidité) de février à Juin 2021 de la même année.



Figure 4: Serre en conductions contrôlées et sa boîte de contrôle (CRRR-Meknès 2021).

II. Matériel végétal

Le présent travail concerne sur 3 variétés témoin, (V14, V15 et V16) et 13 lignées (V1, V2, V3,.....V13) de blé dur (*Triticum durum Desf*) présentées dans le tableau 3 suivant :

Tableau 3: les différentes variétés d'expérimentation.

Variété /Lignée	Le code de la variété /lignée
V1	DYT 1 TAZI
V2	DYT 3 TAZI
V3	DYT 4 TAZI
V4	DYT 5 TAZI
V5	DYT 6 TAZI
V6	DYT 7 TAZI
V7	DYT 9 TAZI
V8	DYT 10 TAZI
V9	DYT 11 TAZI
V10	DYT 12 TAZI
V11	DYT 13 TAZI
V12	DYT 14 TAZI
V13	DXT 15 TAZI
V14	T1 V1-2016 FERRAHI
V15	T2 FARAJ
V16	T3 LOUIZA

III. Plan expérimental

1. Application du stress hydrique

L'étude de l'effet du stress hydrique et les modifications qu'il induit au niveau de la plante a été réalisée à partir de trois traitements hydriques qui ont été appliqués depuis le début de la floraison jusqu'à la fin floraison-début maturité des graines.

- ✓ **T1** : Traitement **témoin** (100 % de la réserve utile en eau).
- ✓ **T2** : Traitement comprend les plantes soumises à un **stress hydrique modéré** (2/3 de la réserve utile en eau).
- ✓ **T3** : Traitement comprend les plantes soumises à un **stress hydrique sévère** (1/3 de la réserve utile en eau).

Le pilotage de l'irrigation se fait par des pesées quotidiennes des pots selon le traitement appliqué.

2. Paramètres mesurés

2.1. Les paramètres physiologiques

✚ Matériel utilisé :

Planimètre (LI-3000C), la chlorophylle mètre SPAD (Soil Plant Analysis Development), poromètre (AP4), thermomètre, Etuve.

2.1.1 La surface foliaire (SF)

La surface foliaire est déterminée par le planimètre (Fig.5), c'est une technique simple et précise qui consiste à placer la feuille sur la plaque de planimètre (LI-3000C) et évaluer la valeur de la surface foliaire.



Figure 5: Planimètre (LI-3000C) pour mesurer la surface foliaire.

2.1.2 Teneur relative en eau

La teneur relative en eau a été déterminée par la méthode décrite par Barrs, (1968) qui consiste à :

- Couper les feuilles à la base du limbe ;
- Peser immédiatement les feuilles pour obtenir leur poids frais (PF) ;
- Mettre les feuilles dans des tubes à essai remplis d'eau distillée à l'obscurité dans un endroit frais ;
- Retirer les feuilles après 24h dans un papier buvard pour absorber l'eau de la surface ;
- Peser de nouveau pour obtenir le poids de turgescence (PT) ;
- Mettre les échantillons dans une étuve réglée à 80°C pendant 48 heures ;
- Retirer les échantillons de l'étuve et peser leur poids sec (PS).

La teneur relative en eau est calculée par la formule suivante (la formule de Clark et Mac-Caig, 1982) :

$$TRE (\%) = \frac{(PF-PS)}{(PT-PS)} \times 100$$

2.1.3 Teneur en chlorophylle

La teneur en chlorophylle a été déterminée sur les feuilles avec la chlorophylle mètre SPAD (Fig. 6). Trois prises de mesure sont effectuées au niveau de la feuille, la moyenne des trois valeurs s'affiche sur l'écran à la fin. Les lectures sont données en unités appelées SPAD (Soil Plant Analysis Development).



Figure 6: chlorophylle mètre (SPAD) pour mesurer la teneur en chlorophylle (CRRRA-Meknès 2021)

2.1.4 Conductance stomatique

La résistance stomatique des feuilles a été mesurée à l'aide d'un poromètre (AP4) (Fig.7). La conductance stomatique est l'inverse de la résistance stomatique et exprimée en $\text{mmol de H}_2\text{O/m}^2.\text{s}$. Sous une température de $25\text{C}\pm 1$ et une humidité relative d'environ $60\%\pm 2$. On réalise trois mesures dans chaque feuille.



Figure 7: Appareil de mesure de la conductance stomatique : Poromètre AP4 (CRRRA-Meknès 2021)

2.1.5 Température foliaire

Les mesures ont été réalisées avec un thermomètre (Fig. 8), La lentille optique de l'appareil capte l'énergie émise, réfléchi et transmise par l'objet. Cette énergie est collectée et concentrée vers un détecteur. L'électronique de l'appareil traduit cette information en une température qui est ensuite affichée sur l'écran de l'appareil.



Figure 8:Appareil de mesure de la température foliaire :
Thermomètre (CRRRA-Meknès 2021)

2.2. Paramètres biochimiques

✚ Matériel utilisé :

Balance analytique, précision 0.0001 g, Bain marie, Tubes à essais de 20 ml,
Spectrophotomètre et cuvettes, micropipettes, Agitateur rotatif.

2.2.1. Dosage de la proline (PROL, μg)

La proline est dosée selon la méthode de Monneveux et Nèmmar (1988). Le principe est la quantification de la réaction proline-ninhydrine par mesure spectrophotométrique. La proline se couple avec la ninhydrine en formant un complexe coloré. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de proline dans l'échantillon.

La méthode consiste à mettre 100 mg de matière fraîche (pour chaque génotype), prélevée à l'épiaison sur le tiers médian de la dernière feuille dans un tube à essai. Un volume de 2 ml de méthanol à 40% est ajouté à l'échantillon et l'ensemble est porté à 85 ° C dans un bain-marie pendant 1 heure.

Après refroidissement, 1 ml de la solution d'extraction est prélevé auquel est ajouté 2 ml d'acide acétique (CH_3COOH), 25 ml de ninhydrine ($\text{H}_9\text{H}_6\text{O}_4$) et 1 ml du mélange : eau distillée (120ml), acide acétique (300ml), acide ortho-phosphorique (80ml). Puis on chauffe l'ensemble à 100°C dans un bain marie pendant 30min. Ensuite on laisse refroidir la solution, et on ajoute 5ml de toluène et on mélange par un vortex afin d'obtenir deux phases séparées, dont la phase supérieure est celle qui contient la proline.

L'étape suivante consiste à laisser reposer la solution quelques minutes, puis on ajoute à la phase supérieure de chaque tube une pincée de Na_2SO_4 anhydre. La mesure de la coloration est effectuée à l'aide d'un spectrophotomètre à 528 nm.

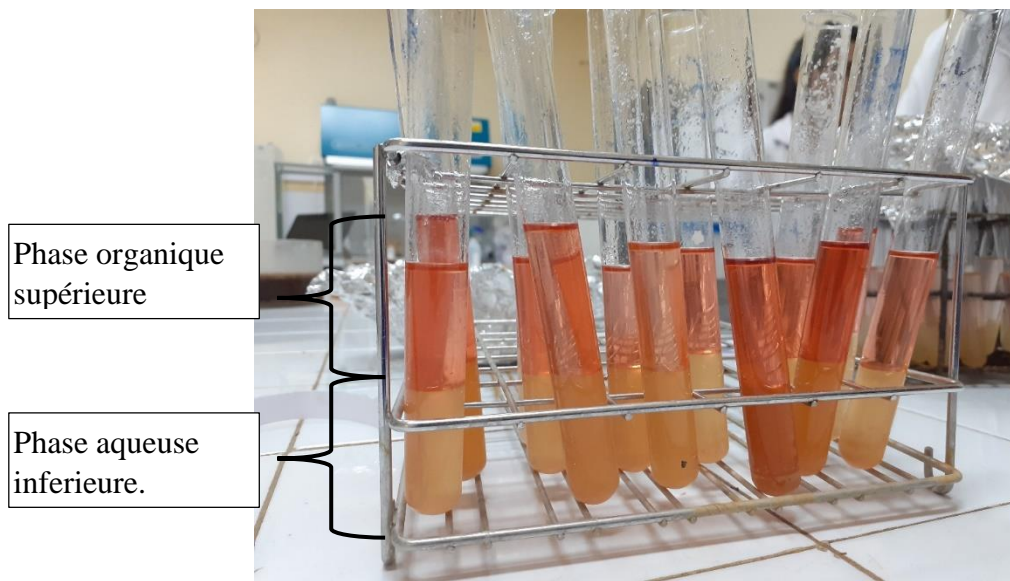


Figure 9 : Solutions obtenues lors d'un dosage de la proline.

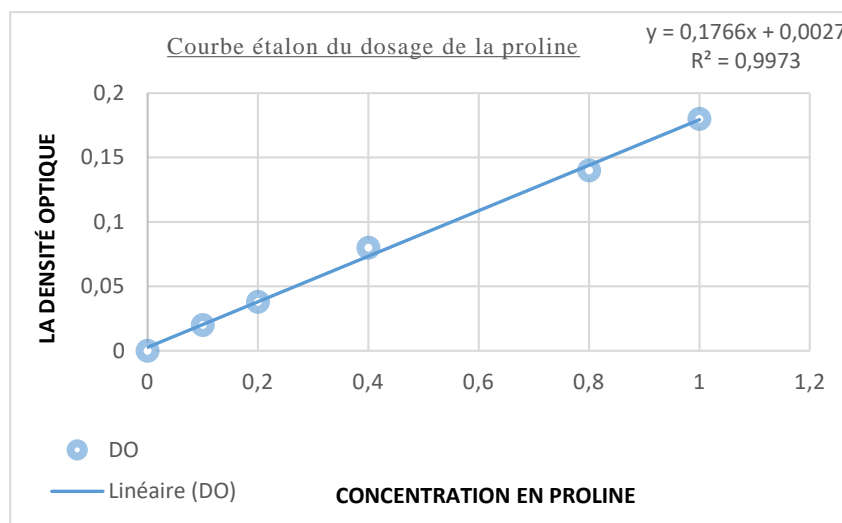


Figure 10 : Courbe étalon du dosage de la proline [46]

Calculs :

- Calculer l'équation de la droite de régression de la courbe d'étalonnage

$$Y = 0,1766X + 0,0027$$

Y : quantité de la proline dans le tube (μg).

X : densité optique.

Calculer Y = la quantité de proline de chaque échantillon (μg).

2.2.2. Dosage des sucres solubles (Suc) « µg/100mg MF »

Les sucres solubles totaux (saccharose, glucose, fructose, leurs dérivés méthyles et les polysaccharides) sont dosés par la méthode au phénol de Dubois et *al*, (1956). Elle consiste à prendre 100 mg de matière végétale, placées dans des tubes à essais, on ajoute 20ml d'eau et 2 ml d'éthanol à 95% pour faire l'extraction des sucres. On met la solution dans un bain marie pendant 15minutes à une température de 95°C.

Au moment du dosage, on prend 1ml de l'extrait et on ajoute 1ml de phénol à 5% (le phénol est dilué dans de l'eau distillée), on ajoute rapidement 5ml d'acide sulfurique concentré 96%. On obtient, une solution jaune orange à la surface, on passe au vortex pour homogénéiser la couleur de la solution. On laisse les tubes pendant 10mn et on les place au bain-marie pendant 5mn à une température de 100°C. On laisse reposer la solution durant 30min dans une température ambiante. Les mesures d'absorbances sont effectuées à une longueur d'ondes de 492 nm.

Les concentrations sont déterminées à partir de courbe étalon (figure 11).

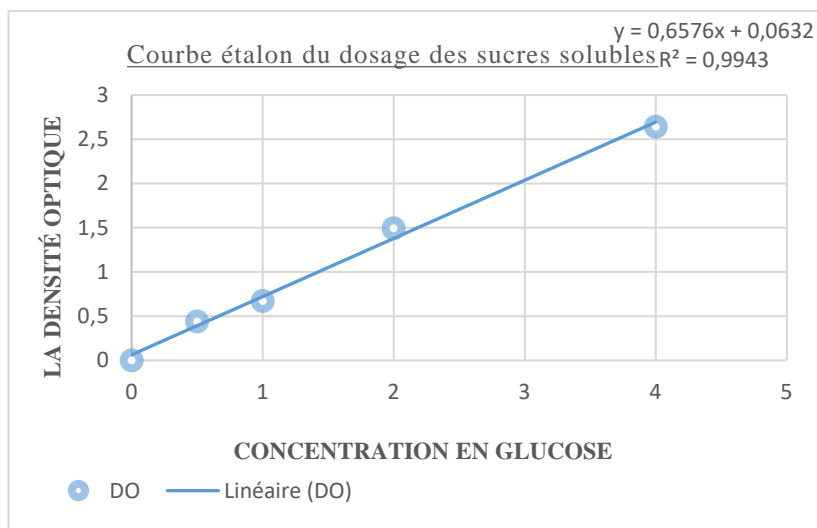


Figure 11: Courbe étalon du dosage des sucres solubles [46].

Chapitre III : Résultats et discussion

I. Impact du stress hydrique sur les paramètres physiologiques

1. Analyse de la variance :

L'analyse de la variance (ANOVA) a montré l'existence des différences hautement significatives entre les lignées de blé dur selon le régime hydrique pour tous les paramètres physiologiques étudiées (la surface foliaire, la conductance stomatique, la teneur en chlorophylle, la température foliaire et la teneur relative en eau)

Tableau 4: Analyse de la variance (ANOVA) pour les paramètres physiologiques évalués sous différents niveaux de traitement (T, SM, SS).

Variable dépendante	Conductance stomatique (CS)	Surface foliaire (SF)	Teneur en chlorophylle (TC)	Teneur relative en eau (TRE)	Température foliaire (TF)
Variété	107,695***	3,668***	10,518***	35,709***	12,884***
Traitement	4009,653***	175,423***	103,791***	2301,980***	203,004***
Variété X Trait	108,297***	21,894***	30,403***	6,754***	41,587***

*** : très hautement significative à $p \leq 0,001$

2. Conductance stomatique

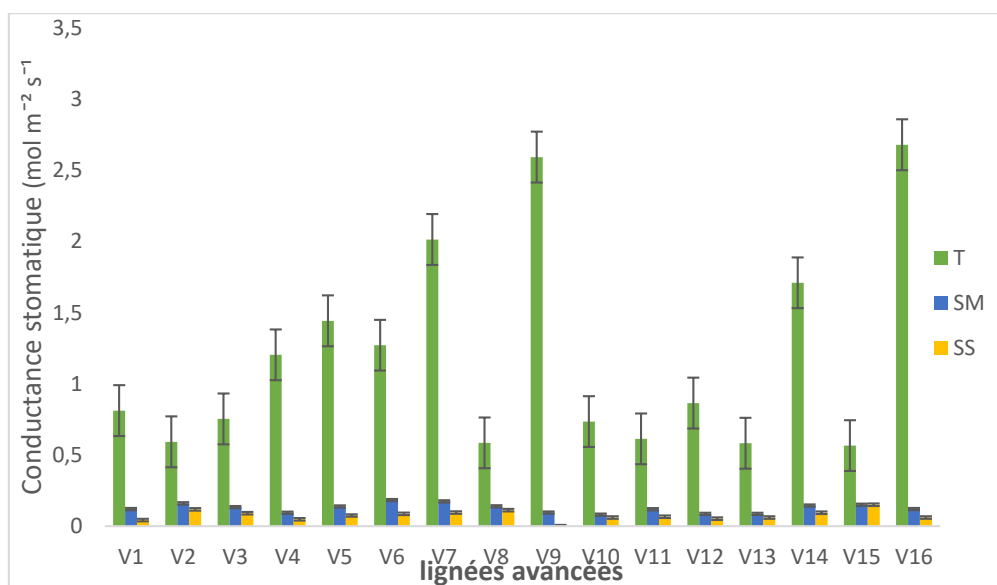


Figure 12 : Variation de la conductance stomatique chez les lignées étudiées du blé dur selon le traitement hydrique (T, SM et SS)

Selon l'analyse de la variance, les résultats de la conductance stomatique enregistrent une différence très hautement significative entre les 16 variétés.

La figure 12 montre des variations comparables en fonction de régime hydrique entre les plantes témoins et les plantes stressées. Les plantes soumises au stress hydrique ont une conductance stomatique largement inférieure à celles des plantes témoins.

Au niveau du régime hydrique, on constate que les témoins V9 et V16 représentent la conductance stomatique la plus grande avec des valeurs de $2,59 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ chez V9 et de $2,67 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ chez V16, Contrairement aux témoins V2, V8, V3, V5 et V15 qui présentent d'une valeur allant de $0,56$ à $0,59 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Sous les conditions de stress sévère, nous avons observé une chute significative de la conductance stomatique chez toutes les lignées étudiées du blé dur, dont la valeur maximale est enregistrée chez V2 avec une conductance stomatique égale $0,118 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, alors que la conductance stomatique la plus faible est de $0,0431 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, enregistré chez V1.

De ce fait, les plantes luttent contre la sécheresse, en réduisant l'ouverture de l'ostiole, ce qui diminue la conductance stomatique. Nos résultats confirment ceux de [47] qui montrèrent que le blé répond au stress hydrique par une diminution de la conductance stomatique et l'application de la contrainte hydrique entraîne une tendance à la diminution de la conductance stomatique chez l'ensemble des variétés à des degrés différents.

Or, la fermeture prolongée des stomates entraîne l'arrêt des processus photosynthétiques et ainsi un faible rendement, alors que la fermeture stomatique rapide est la meilleure adaptation au stress hydrique. Elle permet à la plante d'économiser l'eau disponible et de maintenir une teneur en eau des tissus élevées et aussi une certaine sensibilité à la déshydratation [47].

3. La surface foliaire :

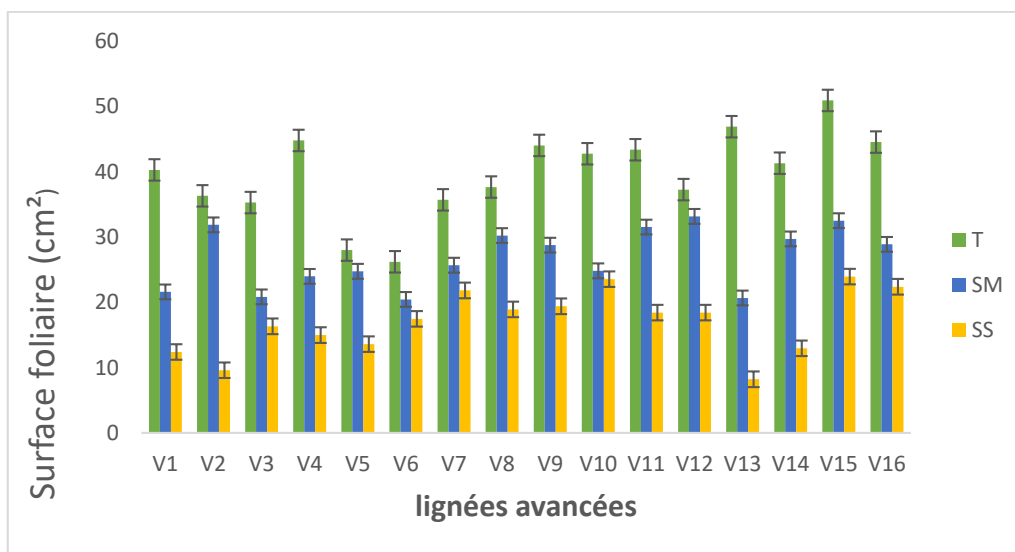


Figure 13: Variation de la surface foliaire chez les lignées étudiées du blé dur selon le traitement hydrique (T, SM et SS)

Selon l'analyse de la variance, les résultats de la surface foliaire enregistrent une différence très hautement significative entre les 16 variétés.

La figure 13 montre une diminution importante de la surface des feuilles des différentes lignées avancées testées en fonction du stress hydrique appliqué. Les valeurs les plus élevées de la surface foliaire sont enregistrées chez les témoins. On remarque qu'il y a une différence significative entre les variétés au niveau des différents traitements (T, SM, et SS), dont les témoins possèdent les valeurs les plus élevées de la surface foliaire par rapport aux autres traitements SM et SS. Pour le traitement témoin, V15 représente la surface foliaire le plus grande avec une valeur maximale de 50,90 cm², et alors qu'une valeur minimale de la surface foliaire 26,2 cm² est obtenue chez V6.

Sous les conditions de stress hydrique modéré, nous avons observé une diminution de la surface foliaire chez les différentes lignées testées, la valeur maximale est notée chez la ligne V12 (33,15 cm²), et la valeur minimale est notée chez la lignée V6 20,44 cm².

Une diminution remarquable a été observée chez les plantes soumises au stress hydrique sévère avec une valeur maximale de 23,94 cm² chez V14 et une valeur minimale de 8,22 cm² chez V13.

Les variétés ont réagi rapidement à l'installation du stress hydrique en diminuant la surface foliaire (cm²) surtout en cas de stress hydrique sévère. Ceci conduit à la mise en place d'un mécanisme adaptatif des plantes, visant à limiter leur transpiration foliaire lorsque les

conditions hydriques deviennent défavorables. Nos résultats s'accordent avec ceux obtenus par [48].

Les résultats montrent une diminution de la surface foliaire sous l'effet du déficit hydrique, cette diminution est une réponse des plantes au déficit hydrique.

La variété ayant une surface foliaire réduite est capable de faire un bon rendement grâce à une meilleure efficacité d'utilisation de l'énergie lumineuse par unité de surface. Selon les résultats au-dessus, les lignées V2, et V13 peuvent être considérées comme tolérantes au stress hydrique, car elles adoptent la stratégie de la réduction de la surface foliaire en cas de déficit hydrique.

4. La teneur en chlorophylle

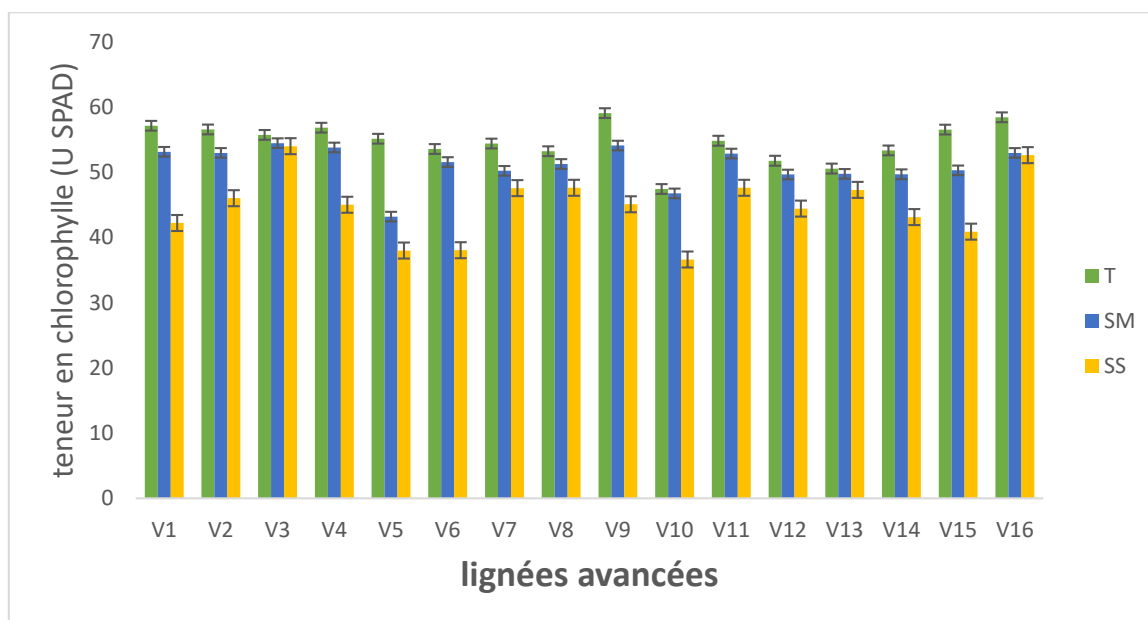


Figure 14: Variation de teneur en chlorophylle en fonction des traitements (T, SM et SS) chez les différentes lignées étudiées de blé dur

Selon l'analyse de la variance, les résultats de la teneur en chlorophylle enregistrent une différence très hautement significative entre les 16 variétés.

Les résultats obtenus (fig. 14) montrent que les valeurs les plus élevées de teneur en chlorophylle sont observées chez les témoins tandis que les faibles teneurs sont enregistrées chez les plantes stressées.

Pour le traitement témoin, la ligne V9 enregistre un taux maximal avec une valeur de (59 U SPAD), et V10 enregistre un taux minimal avec une valeur de (47,4 U SPAD). Le taux de chlorophylle diminue en présence du stress hydrique chez les différentes lignées étudiées.

En appliquant un stress hydrique sévère, V3 enregistre un taux maximal avec une valeur de (53,96 U SPAD), et V10 enregistre un taux minimal avec une valeur de (36,6 U SPAD).

Nos résultats concordent avec ceux de [47] qui ont confirmé que les plantes de blé dur sous stress hydrique réagissent par une baisse de leur teneur en chlorophylle. La chute des teneurs en chlorophylle est la conséquence de la réduction de l'ouverture des stomates visant à limiter les pertes en eau par évapotranspiration et par augmentation de la résistance à l'entrée du CO₂ atmosphérique nécessaire à la photosynthèse [47].

5. La teneur relative en eau

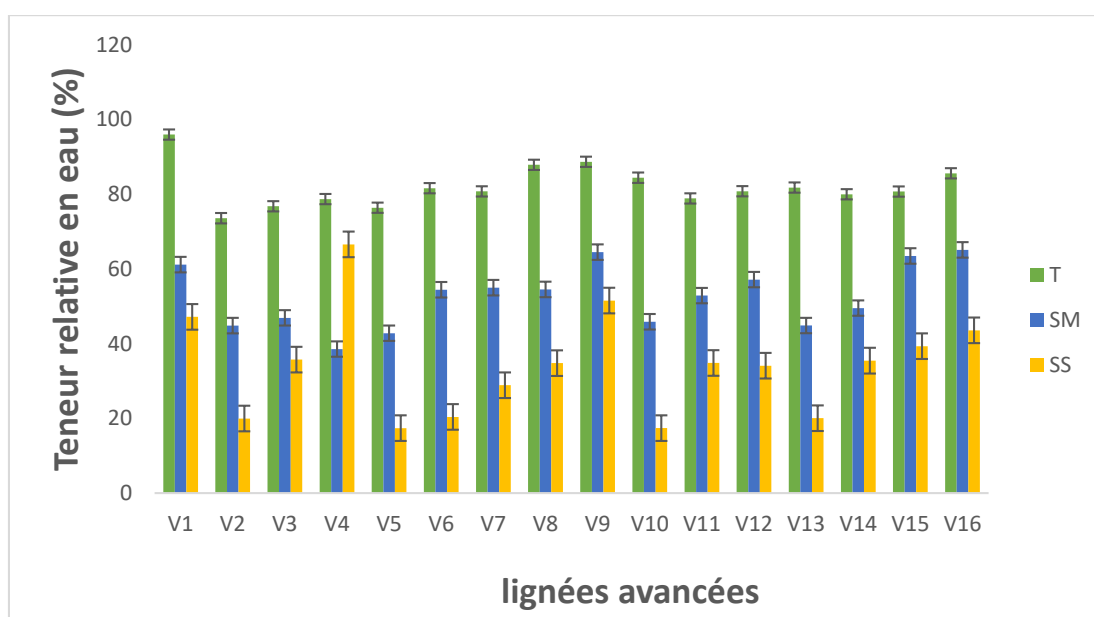


Figure 15: Variation de teneur relative en eau en fonction des traitements (T, SM et SS) chez les différentes lignées étudiées de blé dur

Le comportement des 16 variétés de blé dur étudié vis-à-vis du stress hydrique est analysé par une étude d'état hydrique des feuilles étendard en conditions (T, SM, SS).

Selon l'analyse de la variance, les résultats de la teneur relative en l'eau enregistrent une différence hautement significative entre les 16 variétés.

Les teneurs relatives en eau les plus élevées sont enregistrées chez les témoins, avec une valeur maximale de 59,03% observé chez V1 et une valeur minimale de 47,4% enregistrée chez V2 (Fig. 15).

En revanche, on note une diminution de la TRE chez l'ensemble des lignées étudiées sous conditions de stress modéré et sévère. Pour le traitement stress hydrique modéré, la TRE la plus

élevée est obtenue chez V16 et V9 avec des valeurs de 54,43% et 54,06%, alors que la plus basse est obtenue chez V4 avec une valeur de 43,16%. En ce qui concerne le traitement stress sévère, la valeur maximale est obtenue chez V4 avec 53,96% alors que la valeur minimale est enregistrée chez V5 et V10 avec 36,6%.

La teneur relative en eau est un paramètre physiologique indicateur de la résistance des espèces vis-à-vis d'un stress hydrique. [31] il montre que durant le développement végétatif, le stress hydrique réduit significativement les valeurs de la teneur relative en eau.

Au fait, La teneur relative en eau est un élément déterminant de l'état hydrique de la plante [48]. Sa diminution indique la gravité de la déshydratation, alors que l'ajustement osmotique peut échouer à maintenir la turgescence dans les tissus affectés. On a confirmé nos résultats avec les travaux de [48], qui montrent que les espèces végétales qui maintiennent des teneurs foliaires relatives en eau élevées sont considérées comme étant des espèces résistantes au stress hydrique, ce qui est le cas des lignées V1, V4, V9, V15 et V16. [31] rapportent que la diminution de la TRE est plus rapide chez les variétés sensibles que les variétés résistantes.

6. La température foliaire

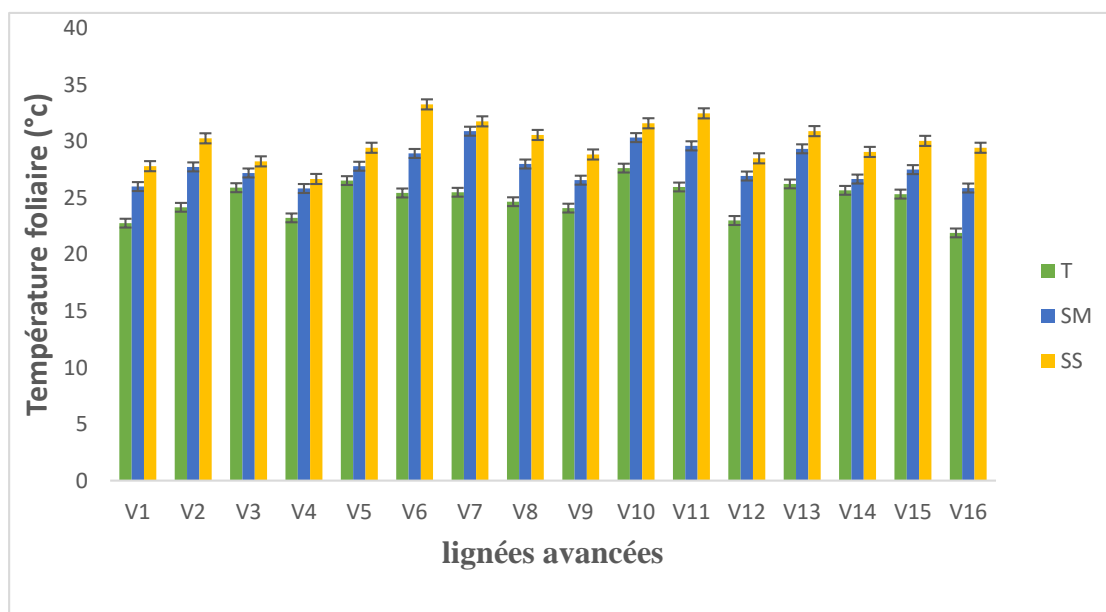


Figure 16: Variation de la température foliaire en fonction des traitements (T, SM et SS) chez les différentes lignées étudiées de blé dur

Le graphe montre que la température foliaire est augmentée chez les plantes stressées, dont la valeur maximale de la température foliaire est enregistrée chez V6 avec 33°C alors que la température foliaire minimale est enregistrée chez V4 avec 26,66°C.

Au niveau des plantes qui sont soumises à un régime hydrique témoin on remarque qu'il y'a une diminution plus faible de la température foliaire par rapport aux plantes stressés, la température la plus élevée est obtenue chez V10 avec 27,63°C, et la plus basse chez V16 avec 21,9°C.

La température foliaire est un indicateur intéressant, compte tenu du rôle central joué par les stomates dans le contrôle de la perte en eau, l'évapotranspiration de l'eau au niveau des feuilles refroidit ces dernières. Quand les stomates se ferment comme réponse à la sécheresse, la transpiration baisse et la température de la feuille augmente [47].

II. Impact du stress hydrique sur les paramètres biochimiques

1. Analyse de la variance

L'analyse de la variance (ANOVA) a montré l'existence des différences hautement significatives entre les lignées de blé dur selon le régime hydrique pour tous les paramètres biochimiques étudiées (la teneur en proline et les sucres solubles)

Tableau 5: Analyse de la variance (ANOVA) pour les paramètres biochimiques évalués sous différents niveaux de traitement (T, SM, SS).

Variable dépendante	Teneur en proline	Teneur en sucres solubles
Variété	227,867 ***	373,094 ***
Traitement	4429,793 ***	11132,649 ***
Variété X Trait	93,047 ***	233,493 ***

*** : très hautement significative à $p \leq 0,001$

2. La Teneur en proline

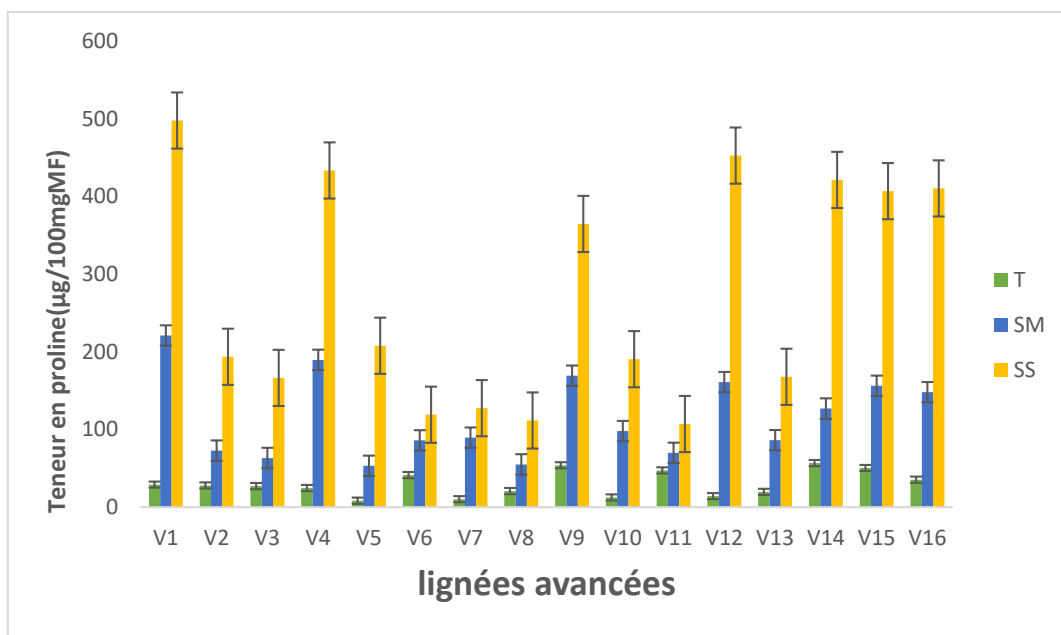


Figure 17: Variation de teneur en proline en fonction des traitements (T, SM et SS) chez les différentes lignées étudiées de blé dur

Selon l'analyse de la variance, les résultats de la teneur en proline enregistrent une différence hautement significative entre les 16 variétés.

Concernant ce paramètre, les résultats montrent plus importants de la teneur en proline chez les plantes stressés, la teneur en proline la plus élevée est enregistrée chez les plantes soumises à un stress hydrique sévère avec une valeur maximale de 497,72 µg/100mgMF chez V1 et une valeur minimale de 106,921 µg/100mgMF chez V11.

Au niveau des plantes qui sont soumises à un régime hydrique témoin on remarque qu'il y'a une plus faible de la teneur en proline par rapport aux plantes stressés. La teneur en proline la plus élevée est obtenue chez V14 avec 56,72 µg/100mgMF et la plus basse chez V7 avec 10,28 µg/100mgMF.

Selon [49], la capacité d'accumuler la proline chez les plantes est un facteur variétal et un signe de tolérance au stress hydrique, tel que le cas de la variété V1. Plusieurs auteurs montrent que l'augmentation de la teneur en proline est reliée directement à l'application du stress hydrique [50].

3. La teneur en sucres solubles

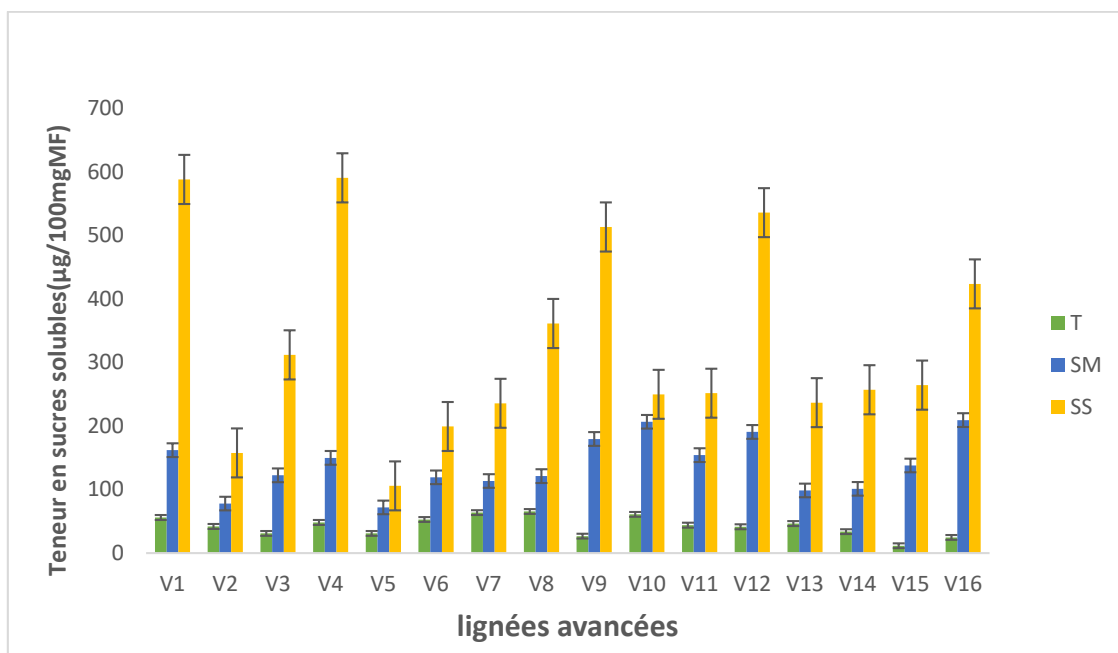


Figure 18: Variation de teneur en sucres solubles en fonction des traitements (T, SM et SS) chez les différentes lignées étudiées de blé dur

Les résultats obtenus pour ce paramètre d'adaptation pour l'ensemble des variétés étudiées marquent la présence d'une grande variabilité.

La teneur en sucres solubles est augmentée chez les plantes stressées, la teneur la plus élevée est enregistrée chez les plantes soumises à un stress hydrique sévère avec une valeur maximale de 590µg/100mgMF chez V4 et une valeur minimale de 105,77 µg/100mgMF chez V5.

Au niveau des plantes qui sont soumises à un régime hydrique témoin on remarque qu'il y'a une faible accumulation de la teneur en sucres solubles par rapport aux plantes stressés. La teneur la plus élevée est obtenue chez V8 avec 65,46 µg/100mgMF et la plus basse chez V15 avec 11,47 µg/100mgMF.

Les sucres solubles sont des indicateurs de niveaux de stress, à cause de son importante augmentation lors du stress hydrique sévère. Les sucres solubles (glucose, galactose, saccharose, et fructose) permettent la résistance aux différents stress [51]. L'accumulation des sucres est un indicateur biochimique d'adaptation au stress qui permet à la plante de maintenir sa turgescence par la diminution et l'ajustement du potentiel hydrique [51].

III. Corrélation entre les paramètres physiologiques et biochimiques mesurés

Tableau 6: Corrélation entre les paramètres physiologiques et biochimiques

	Rs (cm ² /s)	Cs (mol m ⁻² s ⁻¹)	S.foliaire (cm ²)	Ch (Spade)	T. foliaire (°C)	TRE (%)	Sucres (µg/100mg MF)	Proline (µg/100mg MF)
Rs (cm ² /s)	1	-.672**	-.703**	-.225**	.572**	-.763**	.884**	.834**
Cs (mol m ⁻² s ⁻¹)		1	.559**	.223**	-.602**	.676**	-.510**	-.472**
S.foliaire (cm ²)			1	.168*	-.563**	.768**	-.603**	-.577**
Ch (Spade)				1	-.343**	.283**	-.177*	-.157
T. foliaire (°C)					1	-.785**	.419**	.325**
TRE (%)						1	-.567**	-.534**
Sucres (µg/100mg MF)							1	.865**
Proline (µg/100mg MF)								1

La matrice de corrélation (Tab. 6) montre que les paramètres physiologiques sont reliés avec les paramètres biochimiques.

La conductance stomatique et la TRE sont corrélés négativement avec la teneur en proline et les sucres solubles, ces derniers paramètres sont corrélés positivement avec la résistance stomatique et la température foliaire.

La teneur en eau relative (TRE) corrélé négativement avec la résistance stomatique et la température foliaire, et positivement avec la conductance stomatique, la surface foliaire et la teneur en chlorophylle.

Cependant, la conductance stomatique est reliée négativement avec la température foliaire. Le stress hydrique provoque la fermeture des stomates ce qui diminue la transpiration des plantes et par conséquent une augmentation de la température foliaire [52]. Donc l'accumulation des paramètres biochimiques.

Conclusion et perspectives

L'étude de la réponse au stress hydrique chez 16 lignées avancées de blé dur testées révèle l'existence d'une grande variabilité et ce, pour la plupart des paramètres mesurés. L'effet du stress hydrique est bien marqué entre les traitements témoins, modérés et sévère.

À travers les résultats obtenus dans cette étude, on peut constater que les lignées avancées (13 lignées et 3 variétés précédemment mentionnées) de blé dur présentent des différences significatives à hautement significatives entre les traitements témoins, modérés et stressés pour les paramètres physiologiques et biochimiques. Chaque variété utilise une stratégie différente. Sous stress hydrique, les lignées V1, V4, V6, V9, V12 et V16 confirment leur plus haute tolérance aux différents niveaux du facteur susmentionné en montrant les meilleurs TRE, teneurs en chlorophylle, surface foliaire, température foliaire et conductance stomatique. Les lignées V1, V4, V9, V12, V14 et V16 ont de fortes accumulations en proline et en sucres solubles.

A l'issue des résultats obtenus dans ce travail, nos perspectives pour un futur travail de recherche devront s'articuler sur :

- L'étude similaire sur terrain dans différentes zones du Maroc souffrant de stress hydrique.

Références bibliographiques

- [1] Boutigny A. (2007). Etude de l'effet de composés du grain de blé dur sur la régulation de la voie de biosynthèse des trichothécènes B : purification de composés inhibiteurs. Analyse des mécanismes impliqués. Thèse de doctorat en Biologie. Université Bordeaux, France .404p
- [2] MADRPM. (1999), programme de sécurisation de la production céréalière, 1999-2002 (Rapport). Ministère de l'agriculture, du développement rural et des pêches maritimes, Rabat, Maroc.
- [3] Akesbi, N. (2002). Agriculture et développement rural ou quand la politique agricole se réduit à une politique de lutte contre les effets de la sécheresse. Critique économique, (8).
- [4] Salmi, M., (2015) Caractérisation morpho-physiologique et biochimique de quelques générations F2 de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif 1, 124
- [5] OUKARROUM, Abdallah. Vitalité des plantes d'orge ("*Hordeum vulgare*" L.) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence.
- [6] Yves,H et Buyer.J., (2000), l'origine des blés. Pour les sciences hors-série n° 26,60 - 62 pp
- [7] Feldman M., ER. Sears. 1981. The wild gene resources of wheat. *Sci. Am.*244 : 98–109.
- [8] Wadley G., Martin A., (1993). The Origins of Agriculture?A Biological Perspective and New Hypothesis.*Australian Biologist* 6: 96-105.
- [9] Feillet P. (2000). Le grain de blé : composition et utilisation. INRA. Paris.
- [10] Nadjem k., 2012 : Contribution à l'étude des effets du semis direct sur l'efficience d'utilisation de l'eau et le comportement variétal de la culture de blé en région semi aride.Mém.Magister.Univ.Farhatabbas.sétif.12p.
- [11] Prats., (1971). Les céréales. Ed.J.B. Bailliers et Fils, 360p. 42. Combe.

- [12] Naville M. (2005), La biodiversité des espèces cultivées : Analyse dans le cas du blé, Paris: Université Paris XI, Paris, 20p.
- [13] Claire C, Jean F et Hervé L., (2013). Le Blé, une plante modèle pour étudier la biologie végétale.
- [14] Mouellef A., 2010 :Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique. Mém. Magister. Univ. Mantouri. Constantine. 10.29p.
- [15] Masale M.J., (1980). L'élaboration du nombre d'épi chez le blé d'hiver. Influences de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière. Thèse. Doc. Ing. INA, Paris Grignon, 274 p.
- [16] Nadjem K., (2012). Contribution à l'étude des effets du semis direct sur l'efficacité d'utilisation de l'eau et le comportement variétal de la culture de blé en région semi-aride. Thèse de Magister en Production Végétale et Agriculture de Conservation. Université Ferhat Abbas Sétif, 131 pages.
- [17] Gate P., (1995). Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. Ed Lavoisier.
- [18] BOUSALHIH, B. (2015). Déterminisme génétique de l'indice de récolte et de certains caractères morphologiques et agronomiques chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions du haut Chéllif (Doctoral dissertation, ENSA).
- [19] Henry Y., J. Buysen., 2000 : L'origine du blé. Pour la Science 26 :60-62.
- [20] Soltner D., (2000) .Phytotechnie générale : les bases de la production végétales. Tome 1 : le sol et son amélioration. Sciences et techniques agricoles, 22ième édition, 467 p.
- [21] Halilat, M. T., & Dogar, M. A. (1999). Influence de la fertilisation azotée et potassique sur le comportement du blé en zones Sahariennes.
- [22] Bebbi S., 2011 : Essai de comportement de deux variétés de blé dur (*Triticum durum* L. var. Carioca et Vitron) conduite sous palmier dattier au niveau de la région
- [23] FAO. (2020). Site des données statistique de la FAO (Food and agriculture organisation of the United nation).
- [24] Jlibene M. (2009), Amélioration génétique du blé tendre au Maroc à l'aube du 21 éme siècle. Edité par M. Jlibene. Rabat : INRA.

- [25] Jlibene M., Chafai A. (2003), variétés de blé tendre adapté au nord-ouest du Maroc. Bulletin de transfert et technologie. 88 : 1-4.
- [26] Jlibene M. (2005), Amélioration génétique du blé tendre, in : La création variétale à l'INRA méthodologie acquis et perspectives. Edité par : F.A. Andaloussi, A. Chahbar. Rabat : INRA.
- [27] REDAOUI, A. (2017). Contribution à la caractérisation cytogénétique de quelques variétés de blé dur (*triticum durum* Desf.), sous l'effet du stress hydrique (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf, M'sila).
- [28] HOUSSA, A. A., DRISSI, S., ASEHRAOU, A., ASFERS, A., OUBAKI, L., & CHRAIBI, H. (2017). Changements climatiques au Maroc: quels systèmes de culture et quelles biotechnologies pour s'y adapter?. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 5(3).
- [29] Semcheddine, N. (2018). Évaluation de la tolérance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) par l'étude du bilan hydrique et des paramètres phéno-morpho-physiologiques (Doctoral dissertation).
- [30] Morsli L., 2010 : Adaptation du blé dur (*triticum durum* desf) dans les conditions des hautes plaines constantinoises.diplôme de Doctorat.Univ Badji Mokhtar.annaba. 3-18p.
- [31] Kettani R, Khalfi C. D., Chergui D., 2018. Introduction of new binary forage associations. Communication at The 7 international food legumes research conference. Marrakesh, 6-8 may 2018
- [32] Benkolli M. et Bouzeghaia B. (2016). Etude biochimique de dix variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) Sous l'effet d'un stress oxydatif génère par un stress. Mémoire.Université.Mentouri.Constantine.P :1-5-23.
- [33] Hamla C. (2016). Caractérisation des gènes de tolérance à la sécheresse chez le blé dur : étude du rôle des déhydrines et des aquaporines. Thèse. Université Mentouri, Constantine Faculté de biologie.
- [34] Kettani R, Khalfi D, 2017. Valorisation des légumineuses alimentaires à travers la rotation culturale au Sais. *Agriculture du Maghreb*, N°103, avril 2017.
- [35] Mekhlouf Abdelhamid Hamana Bouzerzou Amar Benmahameed Abdelkarim. Hadj Sahraoui .Nadir Harkati, 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf) au climat semi-aride; 17(4):507-13.

- [36] Djekoun A. & planchon C. 1992. Stomatal conductance photosynthesis and acetylene reduction rate in Soybean genotypes. *Can. J.Plant sci.*72: 383 - 390 p. du Développement
- [37] Maury P., Langlade N., Grieu P., Rengel D., Saffari A., Debaeke P. et Vincourt P., 2011. Ecophysiologie et génétique de la tolérance à la sécheresse chez le tournesol. *Innovation agronomique* 14, 123-138.
- [38] Guettouche, R. (1990). Contribution à l'identification des caractères morphophysiologiques d'adaptation à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf). Thèse diplôme d'agronomie approfondie.
- [39] Yokota A., Takahara, K., & Akashi, K., 2006: *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants*. Springer, 15–39.
- [40] Leonardis A. M., Marone D., Mazzucotelli E., Neffar F., Rizza F., Di Fonzo, N., et Mastrangelo A.M 47 .(2010). Durum wheat genes up-regulated in the early phases of cold stress are modulated by drought in a developmental and genotype dependent manner. *Plant science*, 172(5), 1005-1016pp.
- [41] Hireche, Y. (2006) Réponse de la luzerne (*Medicago sativa* L) au stress hydrique et à la profondeur du semis. Thèse de Magister.Univ. EL Hadj Lakhdar. Batna : 83 p.
- [42] Lebon, E., 2006. Effet du stress hydrique de la vigne sur le fonctionnement du couvert, l'élaboration du rendement et la qualité. INERA Sup Agro, UMR, Laboratoire d'Ecophysiologie des plantes sous stress environnementaux.
- [43] Chaib, G., Benlaribi, M., Hamzoune, T. (2015) accumulation d'osmomètre chez le blé dur (*triticum durum* Desf.) sous stress hydrique. *European scientific Journal* Augset, 11 (24) : 378-395.
- [44] Kettani R., 2008. Impact du stress hydrique en période reproductive sur les facteurs contrôlant l'élaboration du rendement chez un ensemble d'écotypes autochtones de *Medicago truncatula* (L.) Gaerten. Thèse de Docteur d'Etat en Sciences Agronomiques. IAV Hassan II. 194 p. Rabat Instituts.
- [45] Zerrad W, Hillali S, Mataoui B, El Antri S, Hmyene A., Mai 2006 : Etude comparative des mécanismes biochimiques et moléculaires de résistance au stress hydrique de deux variétés de blé dur, *Biochimie, Substances naturelles et environnement Congrès international de biochimie*. Agadir, 09-12 361-376.

- [46] Mouellef A., 2010 :Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique.Mém.Magister. Univ. Mantouri. Constantine.10.29p.
- [47] Bousba R., 2012 : Caractérisation de la tolérance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : Analyse de la physiologie et de la capacité en production. Thèse de doctorat Es Science en biologie végétale, option, Bases génétique de la production végétale. Université Constantine. 1226 p.
- [48] Megherbi-Benali Aicha, ZoheirMehdadi, FawziaToumi-Benali, Laid Hamel, Mohamed Benyahia. 2014. Water Supply Efficiency of Brought for Phenological Stages on a Few Morpho-Physiological Parameters of the Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.), Algeria. Agriculture, Forestry and Fisheries. Vol. 3, No. 6, 2014, pp. 439-446. doi: 10.11648/j.aff.20140306.11
- [49] Wilfried C., 2005: Proline as a measure of stress in tomato plants. *Plant Sci*, 168: 241-248. with a simulation model. *Europ. J. Agronomy*. 28. 541-550p.
- [50] Cechin I., Rossi S.C., Oliveira V.C. & Fumis T.F., 2006: Photosynthetic responses and proline content of mature and young leaves of sunflower plants under water deficit. *PHOTOSYNTHETICA* .44 (1): 143-146p.
- [50] Monneveux Ph. and Nemmar M., 1986 : Contribution à l'étude de la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum durum* DesF). Etude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, 6(6),583-590.
- [51] Clarck J.M. et Mac-Caig T.N., 1982: Excised leaf water relation capability as an indicator of drought resistance of triticum genotypes. *Canada Journal P lant science* 62, 571-576.