

Présenté par : République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biotechnologie

Réf :.....

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de

Master Académique

Filière : Biotechnologie

Spécialité : Biotechnologie et Valorisation des Plantes

Thème

**Etude de la sensibilité de quelques facteurs physiologiques du blé dur
(*Triticum Durum* Desf) face à un stress hydrique qui survient au stade jeune**

Présenté par :

Yahiaoui Sarah

Soutenu le : 07/07/2025

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mme BENHAMICHE-HANIFI Samira	M.C.A	Encadrante
Mr BENKHENNOUCHE Nordine	M.A.A	Président
Mr HAMLAT Mourad	M.C.B	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Dédicace

Ce travail est dédié à :

À ma mère, cette merveilleuse créature, source inépuisable de tendresse, de patience et de générosité. **À mon père**, dont la force silencieuse et les sacrifices invisibles m'ont offert les meilleures chances dans la vie. Votre sagesse, votre soutien et vos prières m'ont portée dans les heures les plus sombres, vous avez été mon refuge quand je vacillais, ma lumière quand tout semblait incertain, et mon inspiration pour toujours avancer.

À mes frères, merci pour votre force silencieuse, vos encouragements discrets mais puissants, et votre loyauté sans faille, ce mémoire est aussi le vôtre, car vous en êtes partie intégrante, à chaque instant de motivation et de persévérance.

À mes oncles, tantes, cousins et cousines merci pour votre bienveillance, votre présence constante et vos encouragements sincères, ce travail porte aussi l'empreinte de votre soutien indéfectible.

À la mémoire de ma chère grand-mère, ton absence est grande, mais ton amour m'accompagne toujours.

À ma précieuse amie Nadjat, plus qu'une amie, une confidente, un précieux trésor dans les instants clairs comme dans les tempêtes, merci d'avoir cru en moi quand le doute m'assaillait, pour ta présence rassurante, ton écoute attentive, tes paroles justes et ton affection sincère.

À mes amis, merci pour vos encouragements, vos sourires et votre soutien inestimable dans les jours lumineux comme dans les épreuves.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Madame HANIFI épouse BENHAMICHE, mon encadrante, pour la confiance qu'elle m'a accordée, pour sa rigueur, sa sincérité et sa grande générosité. Son accompagnement tout au long de ce travail a été pour moi un véritable appui, et je lui en suis profondément reconnaissante.



Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu, le Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé, la force et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier Madame HANIFI épouse BENHAMICHE., pour son accompagnement, ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et sa disponibilité tout au long de ce travail. Son encadrement bienveillant a grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

Je n'oublie pas de remercier chaleureusement les membres du jury : Mr BENKHENNOUCHE Nordine ,Mr HAMLAT Mourad qui ont accepté d'évaluer ce travail, en leur exprimant tout mon respect et ma gratitude pour le temps qu'ils y consacrent.

Je tiens aussi à remercier les techniciens et les professeurs de laboratoire : Madame Djaafri-Bouallag L, Madame Ourari M, monsieur Hamlat Mourad et monsieur Bakouri Yacine pour leurs conseils et leurs aides.

Je remercie toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire, par un mot d'encouragement, un sourire ou un geste de confiance.



SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction	1
I Généralités sur le blé dur.....	3
I.1 Origine de blé dur	3
I.1.1 Origine géographique	3
I.1.2 Origine génétique	3
I.2 Classification botanique	5
I.3 La différence entre le blé dur et le blé tendre	5
I.4 Morphologie du blé dur.....	6
I.4.1 L'appareil végétatif	6
I.4.2 Appareil reproducteur.....	9
I.4.3 Les graines de blé dur.....	9
I.5 Cycle de vie de blé dur.....	10
I.5.1 Période végétative	10
I.5.2 La période reproductrice	11
I.5.3 Formation et maturation de la graine	12
I.6 Les exigences de la culture du blé	14
I.6.1 Température	14
I.6.2 L'eau.....	14
I.6.3 L'éclairement	14
I.6.4 Le sol	15
I.7 Importance de blé dur	16
I.7.1 Importance de blé dur dans le monde.....	16
I.7.2 Importance de blé dur en Algérie.....	17
II Le stress hydrique	18
II.1 Notion de stress.....	18
II.2 Le stress hydrique	18
II.3 Effet de stress hydrique sur le rendement	19
II.4 Effet de stress hydrique sur la germination	19
II.5 Effet de stress hydrique sur la plante	20
II.5.1 Effet de stress hydrique sur la morphologie	20

II.5.2	Effet de stress hydrique Sur la physiologie	21
II.6	Mécanisme d'adaptation des plantes au stress hydrique	21
II.6.1	L'adaptation phénologique	22
II.6.2	Adaptations morphologiques	22
II.6.3	Adaptation physiologique	23
III	Matériels et Méthodes.....	25
III.1	Objectif du travail	25
III.2	Matériel biologique.....	25
III.3	Protocole expérimental.....	26
III.3.1	Préparation des graines	26
III.3.2	Germination des graines	26
III.3.3	Mise en culture.....	27
III.4	Dispositif expérimental	28
III.5	Traitement hydrique.....	29
III.6	La solution nutritive	30
III.7	Paramètres mesurés.....	31
III.7.1	Paramètre morphologique.....	31
III.7.2	Paramètres physiologiques	31
III.8	Analyse statistique	33
IV	Résultats et discussions	34
IV.1	Paramètres morphologiques	34
IV.1.1	La surface foliaire.....	34
IV.2	Paramètres physiologiques	36
IV.2.1	Teneur relative en eau.....	36
IV.2.2	La teneur en chlorophylle	38
IV.2.3	La teneur en Proline	41
	Conclusion générale	44
	Perspectives	46
	Références bibliographiques.....	47
	Annexe	
	Résumé	
	Abstract	

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure 1	Phylogénie de blé dur	04
Figure2	Le système racinaire de blé	08
Figure 3	Morphologie du blé dur	09
Figure4	Culture de céréale au stade de tallage	11
Figure 5	Cycle de développement du blé dur	13
Figure 6	Production de blé et d'orge	16
Figure 7	Graines de blé dur utilisés dans l'expérimentation (Waha, Vitron)	26
Figure 8	Grains de blé dur mise à germer en boîte pétrie.	27
Figure 9	Préparation des pots	28
Figure 10	Dispositif expérimental de l'essai	29
Figure 11	Variation de la surface foliaire (cm ²) de deux génotypes de blé dur (Waha et Vitron) en conditions hydriques SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).	35
Figure 12	Variation de la teneur relative en eau (%) de deux génotypes de blé dur (Waha et Vitron) en conditions hydriques SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).	37
Figure 13	Variation du taux de chlorophylle brute (µg/g MF) de deux génotypes de blé dur (Waha et Vitron) en conditions hydriques SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).	39
Figure 14	Variation de la teneur en proline (µg/100mg MF) de deux génotypes de blé dur (Waha et Vitron) en conditions hydriques SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).	42

Listes des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau 1	classification botanique de blé dur	05
Tableau 2	La différence entre le blé dur et tendre	06
Tableau 3	Origine des deux variétés de blé dur (Waha et Vitron)	25
Tableau 4	Composition de la solution nutritive de HOAGLAND (1938)	30
Tableau 5	Surface foliaire (cm ²) de deux variétés de blé dur sous deux régimes hydriques (ADH et SDH)	34
Tableau 6	Teneur relative en eau (%) des variétés de blé dur (Waha et Vitron) en conditions SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).	36
Tableau 7	Teneur en chlorophylle brute (µg/g MF) de deux variétés de blé dur étudiées (Waha et Vitron) en conditions SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique)	39
Tableau 8	Teneur en proline (µg/100mg MF) des variétés de blé dur étudiées (Waha et Vitron) en conditions SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).	41

Liste des abréviations

%: pourcentage

°C : Degré Celsius

ADH : avec déficit hydrique

APG III: Angiosperm Phylogeny Group III

Chlo : chlorophylle

CIMMYT: Centre international d'amélioration du maïs et du blé

cm : centimètre

cm² : centimètre carré

d : densité

DO : la densité optique

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

Fig: figure

ICARDA: Centre international de recherche agricole dans les zones arides

ITGC : Institut Technique des Grandes Cultures

Kg.an⁻¹ : kilogramme par an

mg : milligramme

ml : millilitre

MT : mégatonnes

nm : nanomètre

PF : Poids frais

PFTH : Poids frais a turgescence hydrique

PS : Poids sec

SAU : Surface Agricole Utile

SDH : sans déficit hydrique

t = tonne

TRE : La teneur relative en eau.

µg/100 mg MF: Microgrammes de substance pour 100 milligrammes de matière fraîche

µg/g MF :Microgrammes par gramme de matière fraîche

Introduction

Introduction

Les céréales occupent à l'échelle mondiale une place importante dans le système agricole, elles sont considérées comme une principale source de la nutrition humaine et animale (Slama *et al.*, 2005) ; selon FAO (2007), leur production arrive jusqu'à 2001.5 Mt par an.

Parmi ces céréales, le blé occupe la première place pour la production mondiale, il assure 15% de ses besoins énergétiques (Mouellef, 2010). Le blé dur n'est pas seulement destiné à l'alimentation humaine (pâtes, semoule...), mais se retrouve parfois en alimentation animale.

De nombreux stress biotiques et abiotiques affectent le développement du blé dans les principales zones de production. La sécheresse est parmi les contraintes environnementales qui causent le plus de dommage aux productions agricoles. Chaque année un milliard d'hectares sont menacés dans le monde dont 3,2 millions en Algérie à cause du stress hydrique (Toumi *et al.*, 2014).

Le stress hydrique se définit comme le rapport entre les besoins en eau d'une plante pour sa croissance et la quantité d'eau réellement disponible dans son environnement. La réserve d'eau utilisable par la plante correspond à l'eau présente dans le sol et accessible par son système racinaire. La demande en eau de la plante dépend de son niveau de transpiration, englobant ainsi les pertes d'eau au niveau des feuilles et du sol (Laberche, 2004).

La sécheresse est l'un des tout premiers facteurs intervenant dans la limitation des rendements ; elle affecte fortement la production des zones arides et semi-arides, caractérisées par des pluies rares et irrégulières et par des températures souvent élevées. Chez les céréales, l'amélioration des techniques culturales, en particulier l'introduction de l'irrigation, permet de réduire les effets des déficits hydriques. En l'absence d'irrigation, l'amélioration génétique reste sans doute le moyen le plus efficace pour disposer d'un matériel végétal susceptible d'assurer une production satisfaisante (Monneveux, Nemmar 1986).

Pour faire face à de telles situations, les plantes ont développé des stratégies en mettant en place des mécanismes de réponse leur permettant d'ajuster leur système métabolique. La tolérance est un phénomène complexe, faisant intervenir de nombreux éléments. Ces derniers interagissent entre eux et agissent en synergie afin d'aboutir à une réponse coordonnée et efficace (Oukkaroum, 2007).

Cette étude vise à l'identification de quelques paramètres sensibles au stress hydrique et susceptibles d'être retenus dans des croisements inter variétales, en milieux semi-arides ; ceci améliorerait l'adaptation des plantes à l'environnement et permettra l'augmentation des rendements.

A cet effet, notre travail consiste à une analyse du comportement de deux variétés de blé dur : Waha et Vitron soumises à un stress hydrique. L'étude a mis en exergue quelques paramètres morphologiques et physiologiques telles que la surface foliaire, la teneur relative en eau, la teneur en proline et la teneur en chlorophylle brute.

Le mémoire est présenté en trois parties :

Partie 1 : Etude bibliographique

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur le blé dur, le stress hydrique et les mécanismes morphologiques et physiologiques de la tolérance des plantes au manque d'eau.

Partie 2 : Matériels et méthodes

Cette partie décrit le matériel végétal utilisé dans l'étude (variétés), les conditions de culture (mise en place de l'essai ou dispositif expérimental), ainsi que les différents paramètres mesurés pour évaluer la réponse des plantes face au stress appliqué.

Partie 3 : Analyse des résultats et discussions

Cette partie est consacré à l'ensemble des différents résultats obtenus et discussions relatifs aux paramètres étudiés.

Le travail s'achève par une conclusion mettant en lumière les principaux résultats et ouvrant sur des perspectives de recherche, suivie de la liste des références bibliographiques citées.

Etude bibliographique

I Généralités sur le blé dur

La céréale la plus consommée dans le monde et en Algérie est le blé ; elle tient une place incontestable dans les marchés internationaux. Son importance est liée à son utilisation dans l'alimentation humaine (pains galettes, pâtes, couscous, biscuits ...) et animale (Zanasni *et* belhadj ,2006).

I.1 Origine de blé dur

I.1.1 Origine géographique

La domestication du blé, liée à la naissance de l'agriculture, survient au Proche-Orient, dans la région du croissant fertile « l'ouest de l'Iran, l'est de l'Irak, et le sud et l'est de la Turquie », il y a environ 10000 ans (Naville, 2005). Selon Cook *et al.*, (1991), le Moyen-Orient est le centre géographique d'origine à partir duquel l'espèce *Triticum durum* Desf s'est différenciée. Puis trois centres secondaires se sont identifiés ; on cite le bassin occidental de la Méditerranée, le sud de la Russie et le Proche-Orient.

I.1.2 Origine génétique

Le blé dur (*Triticum durum* Desf) est une espèce allotétraploïde ($2n = 4x = 28$) possédant sept paires de chromosomes homologues associées à deux génomes différents A et B. Le génome A vient du blé sauvage (*Triticum urartu* Tum), plus connu sous le nom Einkorn (*Triticum monococcum*) de constitution génomique diploïde AA. Par contre le génome B vient de l'espèce sauvage diploïde elle aussi (*Aegilops speltoides* Tausch) (Schuhwerk *et al.*, 2010) (Fig.1).

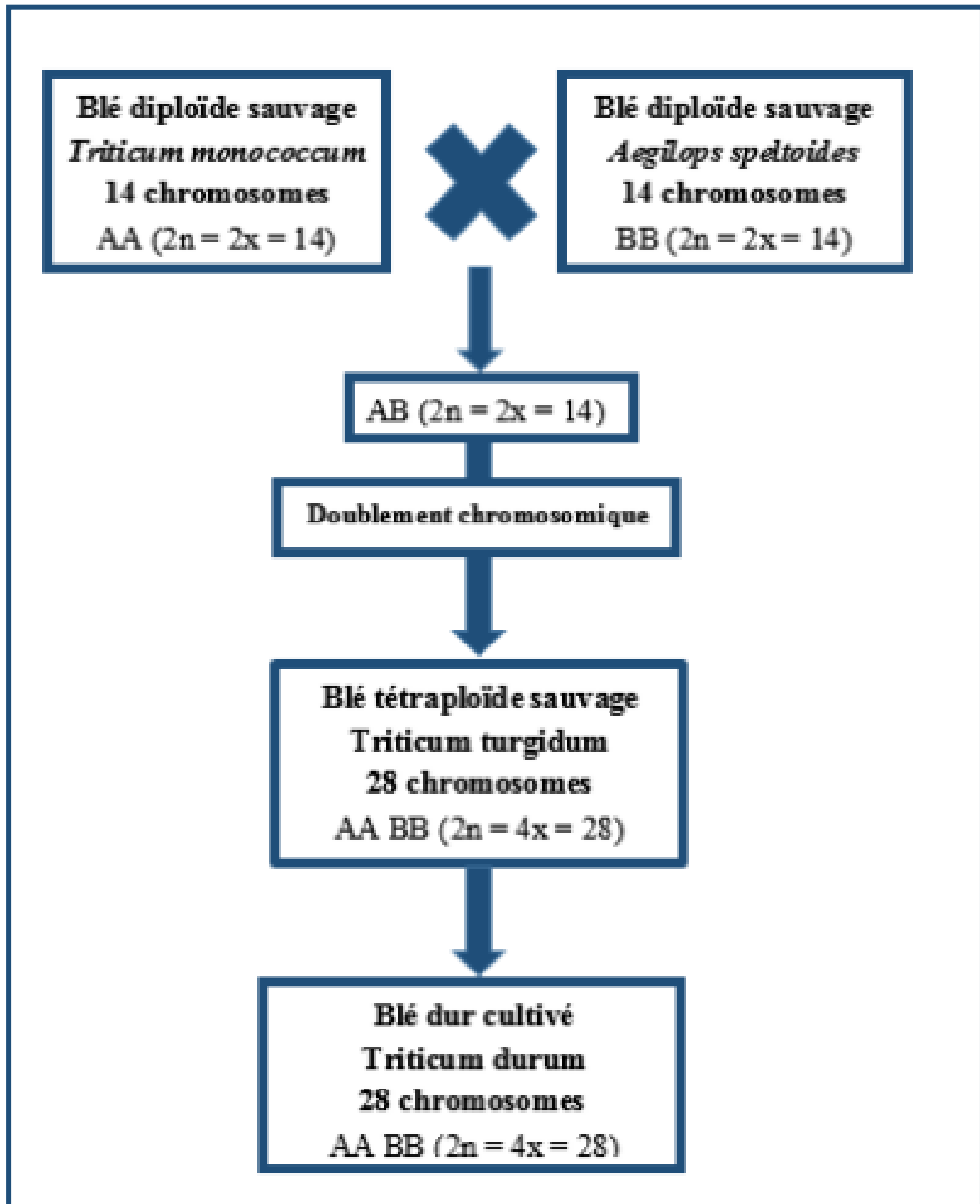


Figure 1 : Phylogénie de blé dur (Debtio ,2010)

I.2 Classification botanique

Le blé dur est une plante herbacée, il appartient au groupe des céréales à paille, de la famille des Poacées ou graminées. Cette famille comprend 600 genres et plus de 5000 espèces (Feillet, 2000). La classification adopté ici est celle de APG III ;2009 (Tab.1).

Tableau 1 :classification botanique de blé dur (*Triticum durum* Desf) (APG III ,2009)

Règne	Plantae
Sous règne	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta(Angiosperme)
classe	Liliopsida (Monocotylédone)
Sous classe	Commelinidae
Ordre	Cyperales
Famille	Poaceae
Sous famille	Pooideae
Tribu	Triticeae
Genre	Triticum
Espèce et sous-espèce	<i>Triticum turgidum subsp.durum</i> desf.ou <i>Triticum durum</i>

I.3 La différence entre le blé dur et le blé tendre

Les deux espèces de céréales les plus cultivés sont le blé dur (*Triticum durum* Desf) : AABB (2n=4X=28) qui sont tétraploïde et le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) : AABBDD (2n=6X=42) qui sont hexaploïde (Fig.1).

La différence entre les deux types de blé concerne plusieurs caractères, dont l'aspect génétique, qualité nutritionnelle, aspect de la plante, texture et utilisation (Tab.2).

Tableau 2: La différence entre le blé dur et tendre (Feillet, 2000)

Caractères	Blé dur	Blé tendre
Aspect génétique	Tétraploïde (A,B)	Hexaploïdes (A ,B ,C)
Prédominance	Protéine	Amidon
Aspect de plante	Feuille large Maturation très longue Moissons tardives Exige des conditions pédologique et climatique	Feuille étroite Maturation rapide
Texture	Texture vitreuse	Texture opaque structure de l'amande farineuse
Utilisation	Obtenir de la semoule pour la fabrication de la galette, couscous, pâtes alimentaires.	Obtention de la farine pour la fabrication du pain et des biscuit.

I.4 Morphologique du blé dur

Les blés sont des plantes herbacées annuelles, monocotylédones, à feuilles alternes, formées d'un chaume portant un épi constitué de deux rangées d'épillets sessiles et aplatis. Les fleurs sont nombreuses, petites et peu visibles. Elles sont groupées en épis situés à l'extrémité des chaumes (Omari *et* Tahri.2021).

La morphologie du blé dur est relative à l'aspect organisant et structurel de ses composants, qui permettent au blé dur de s'adapter à des conditions environnementales et de culture spécifique.

I.4.1 L'appareil végétatif

I.4.1.1 Le système aérien

La tige

La tige, appelée chaume est cylindrique, elle est rigide (droite) et creuse ; elle varie généralement entre 60 et 120 cm, La hauteur de la tige dépend de la variété cultivée, de la fertilité

du sol et des conditions climatiques. Elle est formée d'articles ou entre-nœuds séparés par des nœuds. L'activité des nœuds permet l'allongement et la différenciation des feuilles. Chaque nœud est donc le point d'attache d'une feuille (Moule, 1971). Généralement les entre-nœuds sont pleins chez les blés durs (Belaid, 1996).

La tige elle-même ou chaume s'allonge considérablement à la montaison et porte 7 ou 8 feuilles rubanées et engainantes. Elles prennent naissance sur le nœud situé en dessous de celui au niveau duquel elles se détachent de la tige (Prats *et* Clement, 1971) (Fig.3).

Les Feuilles

Les feuilles du blé dur sont longues, étroites et linéaires à nervures parallèles et une nervure centrale bien marquée. Elles sont vertes et disposées de manière alternée le long de la tige.

Chaque feuille comprend deux parties :

- Une portion inférieure enveloppant l'entre-nœud correspondant à la gaine ; les gaines attachées au niveau des nœuds sont emboîtées les unes dans les autres et forment un tube cylindrique entourant la tige qui se déboîte au fur et à mesure de la croissance des entre-nœuds (Moule, 1971).

- Une portion supérieure, le limbe à nervures parallèles est nettement plus long que large, ses dimensions variant notablement d'une espèce à l'autre (Moule, 1971) (Fig.3).

Au cours du cycle végétatif du blé, les feuilles prennent un aspect vert jaunâtre, vert foncé ou vert franc.

I.4.1.2 Appareil racinaire

Les céréales ont une structure racinaire complexe comprenant plusieurs types de racines. Ainsi, Au cœur du développement, deux systèmes racinaires apparaissent successivement :

- Un système primaire (racines séminales), issu de la semence, qui se développe de la germination des graines jusqu'au stade tallage (3-4 feuilles) ; il est ensuite remplacé par un système de racines adventives. Ces racines qui apparaissent au niveau de la tige assurent la nutrition et le développement de la plante (Belaid, 1987).

Lors de la germination, la racine primaire émerge à travers la coléorhize, suivie par l'émergence de quatre ou cinq racines séminales (Golan *et al.*, 2018 ; Kirby, 2002). Ces racines jouent un rôle essentiel dans l'établissement de la plante, elles permettent à la jeune plantule

d'explorer le sol à la recherche d'eau et de nutriments, jusqu'à ce qu'elle atteigne la capacité photosynthétique (Kirby, 2002) (Fig. 2).

- Un système secondaire (racine coronaire), ce sont des racines adventives post-embryonnaires, appelées « racines de la couronne ». Elles apparaissent au niveau des nœuds basaux de la pousse principale et des talles (ramification de la plante) (Gregory *et al*, 1978).

A maturité, le système racinaire du blé s'étend à une profondeur de 1 à 2 m ou plus selon les conditions du sol.

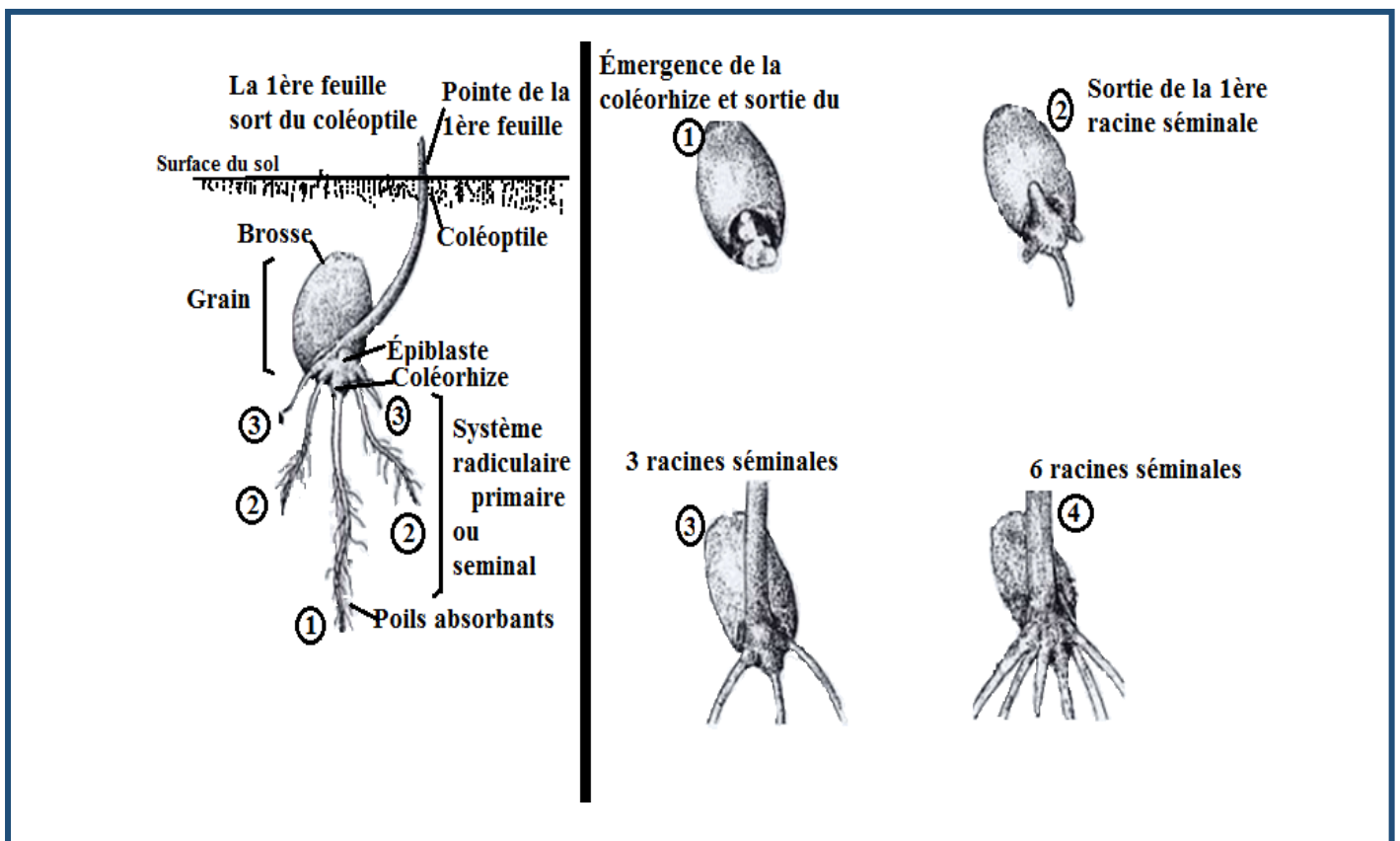


Figure 2 : le système racinaire de blé (Boyeldieu 1997 modifié)

I.4.2 Appareil reproducteur

Les fleurs sont groupées en inflorescences de type épi qui est composé d'épillets ; ce dernier est une petite grappe d'une à cinq fleurs enveloppées chacune par deux glumelles (Moule, 1971). L'épi est constitué d'un axe appelé le rachis sur lequel sont fixés les épillets (Belaid, 1996). Le blé est une plante monoïque à fleurs qui se reproduit par voie sexuée et par l'autofécondation (espèce autogame) (Soltner, 1999) (Fig.3).

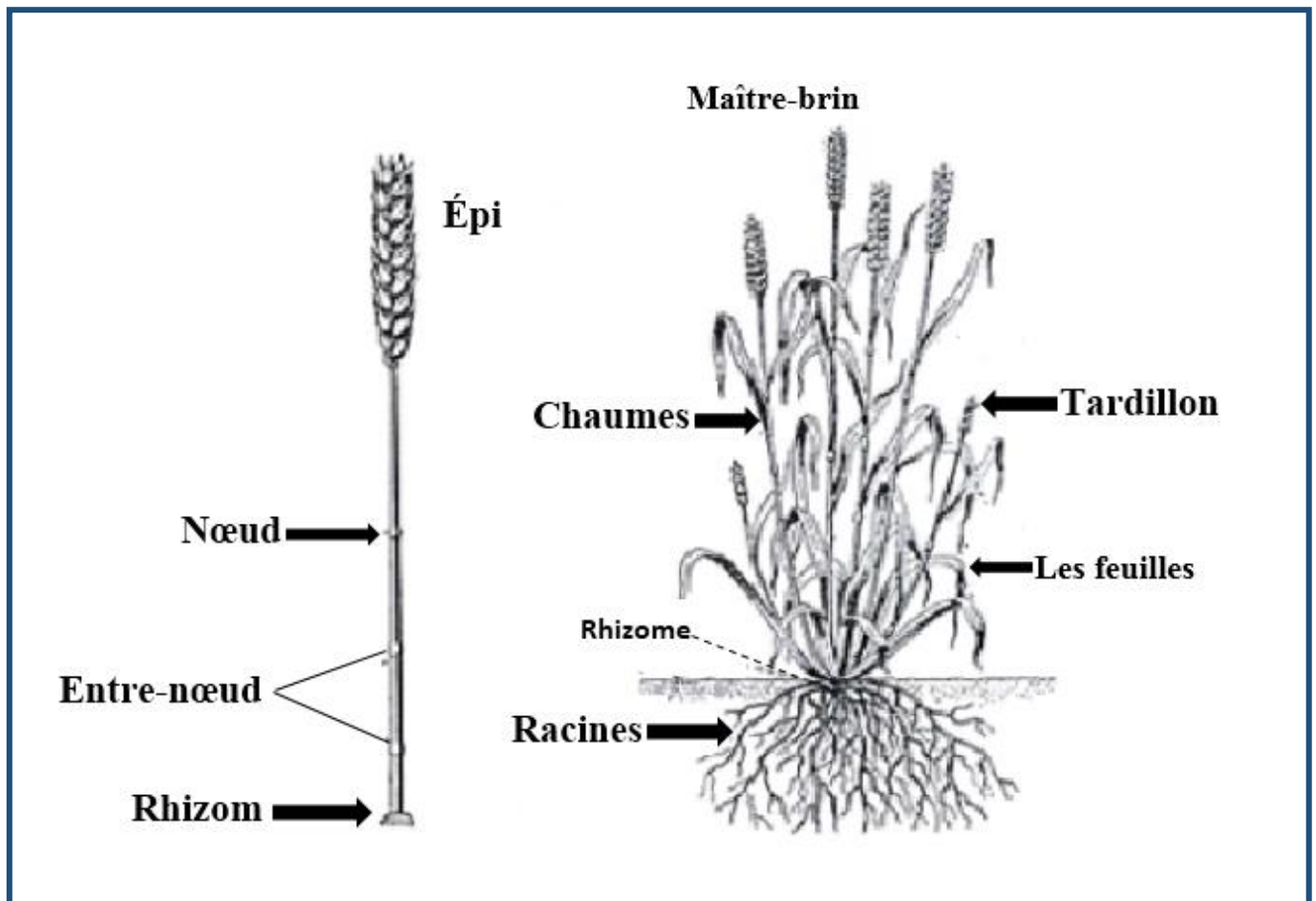


Figure 3 : Morphologie du blé dur (Aainb,2003 modifié).

I.4.3 Les graines de blé dur

Les graines de blé, également appelés caryopses, sont des fruits de forme ovoïde. Ils présentent sur l'une de leurs faces une cavité longitudinale appelée sillon, tandis qu'à l'extrémité opposée de l'embryon, se trouvent des touffes de poils formant la brosse (Ait kaki *et al.*,2008) (Fig.3).

I.5 Cycle de vie de blé dur

Le cycle de développement de blé comprend trois grandes périodes :

- La période végétative.
- La période reproductrice.
- La période de maturation.

I.5.1 Période végétative

Cette phase débute à la germination et se poursuit jusqu'à l'apparition de l'ébauche de l'épi. La période végétative dure, selon les conditions de la culture, de 60 à 110 jours (Ben Mbarek, 2017) ; elle comprend trois stades principaux :

I.5.1.1 Phase semis-levé

La germination est le passage de la semence de l'état de vie lente à l'état de vie active (Chabi *et al.*, 1992).

La germination débute lorsque le grain a absorbé environ 25 % de son poids en eau. Les téguments se fissurent, laissant émerger la racine principale, protégée par une enveloppe appelée coléorhize. Ensuite, la première feuille apparaît, entourée d'une gaine nommée coléoptile. Une fois à la surface du sol, d'autres racines et feuilles se développent progressivement. La durée de cette phase varie en fonction de la température et s'étend de 8 à 15 jours (Clement-Grandcourt *et* Prat, 1970).

La germination du blé à lieu à des températures allant de 4 à 37°C, la coléoptile apparaît 4 à 6 jours après la germination, et a pour rôle de protéger la première feuille (Karou *et al.*, 1998) (Fig.4).

La levée est notée quand 50 % des plants sont sorties de la terre ; pendant cette phase les jeunes plantes sont sensibles au manque d'eau qui provoque une perte des plants et au froid qui provoque un déchaussage (Karou *et al.*, 1998).

I.5.1.2 Phase levée - tallage

Cette phase se distingue par la formation de tallage de blé et l'émissions de ramifications latéraux depuis la base de la céréale .la formation des talles se fait à partir des bourgeons axillaires de la base de brin maitre. Les talles primaires émettent des talles secondaires, lesquels à leur tour émettent des talles terminales qui produiront chacun un épi (Grand court et part 1970 ; Gâte 1995).

La fin de tallage correspondant à la fin de la période végétative ; elle marque le début de la phase reproductive. Elle est conditionnée par la photopériode et la vernalisation qui autorisent l'élongation des entre-nœuds (Gate ,1995) (Fig.4).

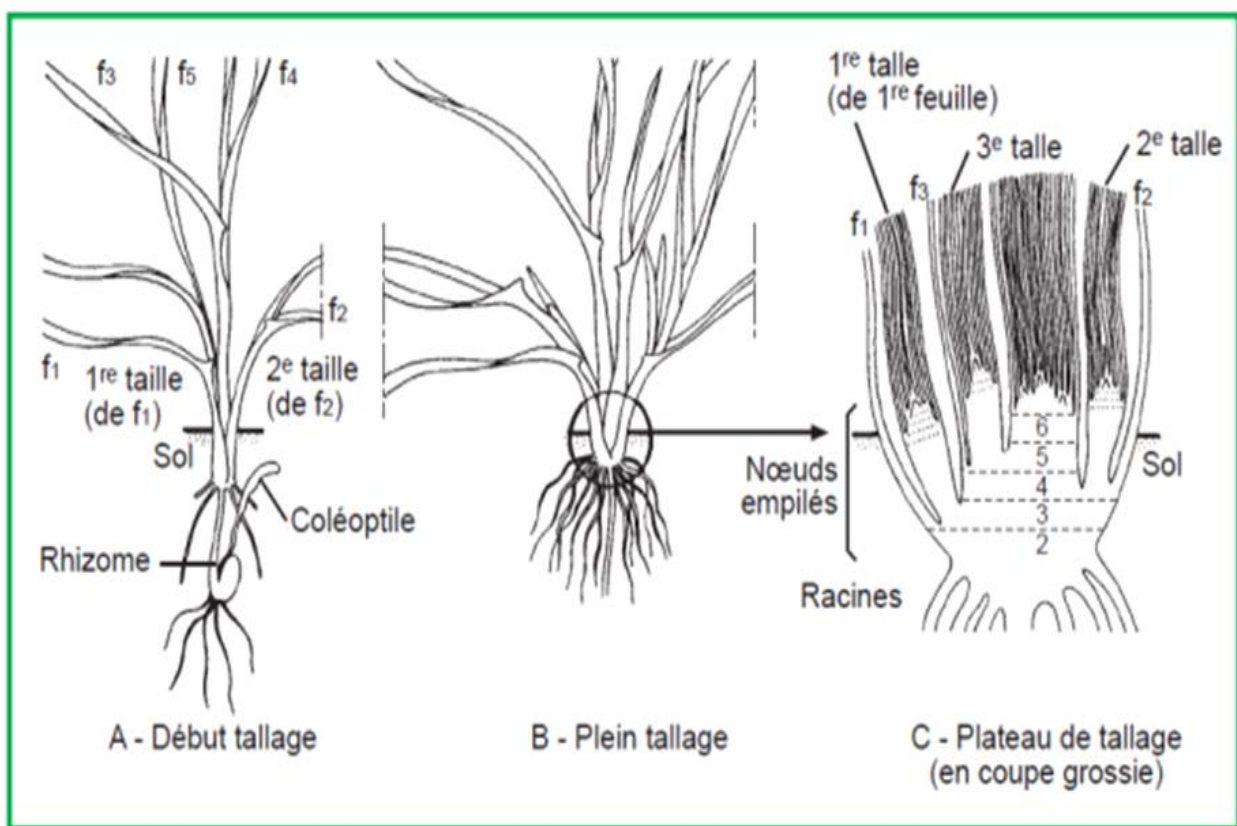


Figure 4 : Culture de céréale au stade de tallage (Boyeldieu ,1999).

I.5.2 La période reproductrice

Elle dure de 123 à 167 jours. Elle est traduite par la transformation du bourgeon végétatif en un bourgeon reproducteur (Ben Mbarek, 2017) (Fig.5).

I.5.2.1 La phase Montaison

Elle commence lorsque les nœuds secondaires de la tige principale se séparent du plateau de tallage, ce qui correspond à l'apparition du jeune épi à l'intérieur de la tige (Belaid, 1987). Ce stade est atteint quand la durée de jour est au moins de 11 heures et lorsque la culture a reçu au moins 60°C (Fig.5).

I.5.2.2 La phase épiaison

L'épiaison se détermine par l'apparition de l'épi hors de sa gaine foliaire et se conclut une fois que l'épi est entièrement dégagé (Maume et Dulac, 1936). La durée de cette phase varie entre 7 à 10 jours, en fonction des variétés et des conditions environnementales (Martin-Prével, 1984) ; c'est la phase où la culture atteint son maximum de croissance. Néanmoins, les basses températures au cours de ce stade réduisent fortement la fertilité des épis (Abbassene *et all* ,1998) (Fig.5).

I.5.2.3 La phase floraison-fécondation

Elle est déterminée par la sortie des étamines hors des épillets, la fécondation est accomplie lorsque les anthères sortent des glumelles. Le nombre de fleurs fécondées dépend de la nutrition azotée et d'une évapotranspiration pas trop élevée (Soltner., 1988) (Fig.5).

I.5.3 Formation et maturation du la graine

Cette période concerne les stades de grossissement et de maturation des grains (Fig.5).

I.5.3.1 Grossissement du grain

Cette phase marque la modification du fonctionnement de la plante qui sera alors orientée vers le remplissage des grains à partir de la biomasse produite. Au début, le grain s'organise, les cellules se multiplient. Les besoins des grains sont inférieurs à ce que fournissent les parties aériennes (plus de 3/4 de la matière sèche sont stockés au niveau des tiges et des feuilles). Par la suite, les besoins augmentent et le poids des grains dans l'épi s'élève, alors que la matière sèche des parties aériennes diminue progressivement. Seulement 10 % à 15 % de l'amidon du grain peut provenir de réserves antérieures à la floraison (Boulelouah, 2002).

I.5.3.2 Maturation du grain

La phase de maturation succède au stade pâteux (45 % d'humidité). Elle correspond à la phase au cours de laquelle le grain va perdre progressivement son humidité en passant par divers stades (Gate, 1995). Elle débute à la fin du palier hydrique marqué par la stabilité de la teneur en eau du grain pendant 10 à 15 jours (Fig.5).

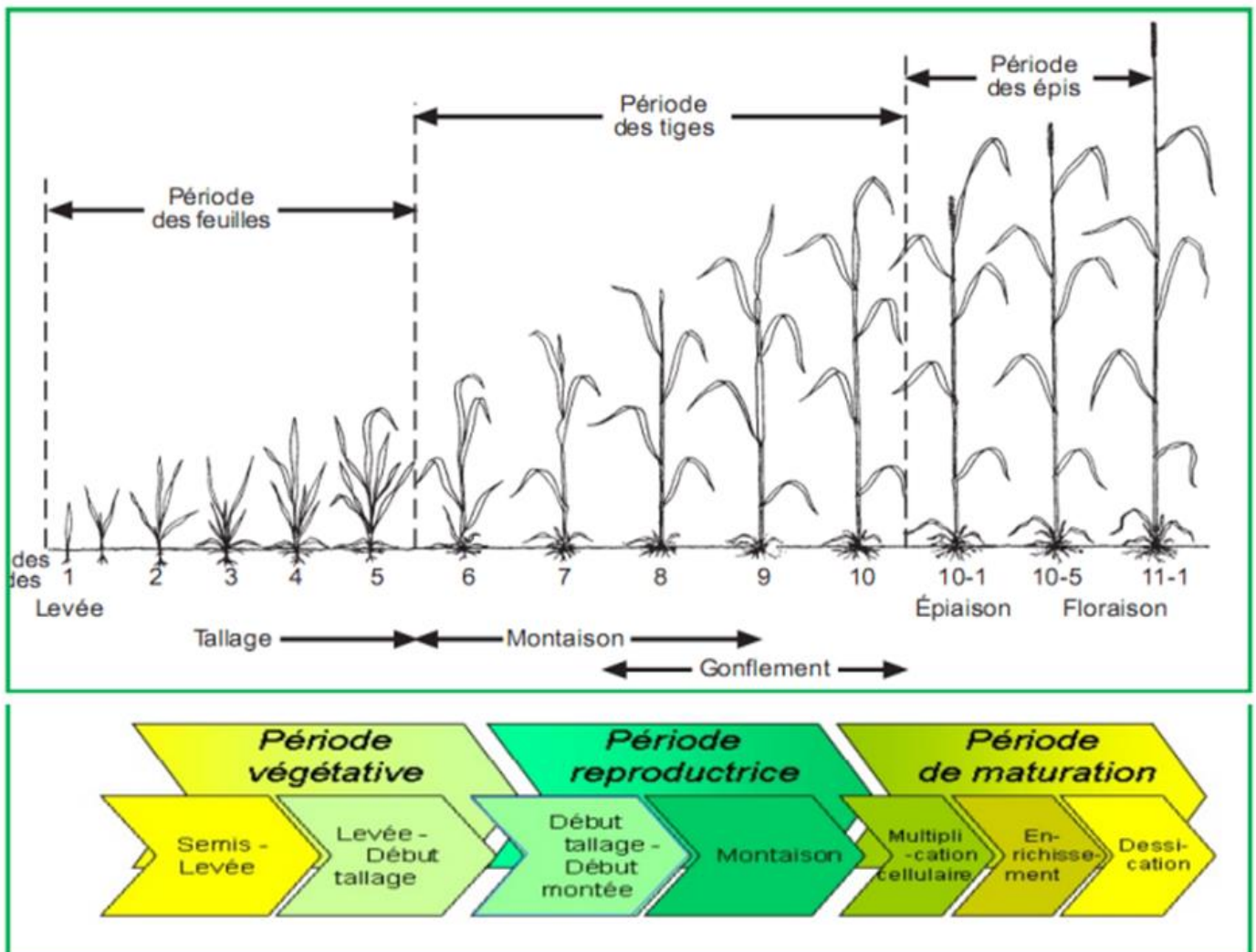


Figure 5 : Cycle de développement du blé dur (Zodaks *et al.* ,1974)

I.6 Les exigences de la culture du blé

I.6.1 Température

La température est un facteur essentiel influençant la croissance et l'activité végétative. Elle conditionne l'absorption des éléments nutritifs, l'activité photosynthétique, l'accumulation de la matière sèche et le passage d'un stade végétatif à un autre (Mekhlouf *et al.*, 2006).

La germination et la végétation débutent dès 0° C, mais les conditions optimales se situent entre 20 et 22°C. Entre ces deux extrêmes, une température élevée sera favorable au développement et à la croissance (Codaccioni *et al.*, 1989).

I.6.2 L'eau

Pour assurer un rendement intéressant, une céréale a besoin d'une quantité importante d'eau ; en effet, l'eau joue un rôle essentiel dans la croissance et le développement des plantes cultivées (Slama *et al.*, 2005). Les besoins en eau sont estimés à environ 800 mm (Soltner, 2000).

Le grain absorbe environ 25 % de son propre poids en eau durant la phase de la germination (Sousa, 2020). Jusqu'à la fin du tallage les besoins en eau sont relativement faibles. Par contre, au cours de la phase de montaison et jusqu'à la floraison, les besoins en eau de la culture peuvent s'évaluer à 180 mm entre mars et mai (Moule, 1971). Aussi la demande en eau augmente durant la période d'enrichissement du grain en matière sèche correspondante à la maturation. Un déficit en eau lié à des fortes températures est responsable de l'échaudage des graines (Codaccioni *et al.*, 1989).

La sensibilité à la sécheresse peut concerner tout le cycle de la plante, du semis au stade maturité. La période végétative est moins sensible que la période reproductrice. C'est à partir de la fin montaison que la plante commence à souffrir de la rigueur du climat (Chadouli *et Djane-hamed.*, 2015).

I.6.3 L'éclairement

La lumière est la source d'énergie qui permet à la plante de décomposer le CO₂ atmosphérique pour en assimiler le carbone et réaliser la photosynthèse des glucides. La lumière est donc un facteur climatique essentiel et nécessaire pour la photosynthèse (Diehl, 1975). Néanmoins, elle peut devenir une source de stress par son intensité ; l'éclairement trop faible ou trop élevé, conduit à des phénomènes de photosensibilisation dangereux pour la plante

(Leclerc,1988). Sous les conditions de cultures des hautes plaines, c'est plutôt l'excès de l'éclairement qui est un stress, conduisant à la photo inhibition des centres réducteurs des photosystèmes (Ykhlef, 2001).

I.6.4 Le sol

Les caractéristiques physiques et chimiques de sol jouent un rôle important dans la nutrition de la plante, La texture du sol peut influencer la hauteur des plantes, la surface foliaire, la biomasse végétale, ainsi que le nombre et les caractéristiques des grains (Nasr *et* Ahmed, 2020).

Le blé peut se cultiver dans des sols de textures différentes. Cependant, les sols de texture moyenne sont considérés comme les plus adéquats, alors que les sols tourbeux avec de fortes teneurs en minéraux (sodium, fer et magnésium) sont à éviter (Mojid *et al.*, 2020).

Les sols à texture argileux-calcaires, argileux-limoneux, argileux-sableux sont convenables ; ils influent sur l'aération du sol, l'activité microbologique, la pénétration des racines, la résistance à l'érosion. Ils jouent aussi un rôle important dans la fertilité de sol qui assure une bonne nutrition de blé nécessaire et permettra de bons rendements (Mathieu, Audoye,et Chossat, 2007).

Selon Bendif, (2017), il est préférable de cultiver le blé dans un sol à pH neutre qui va favoriser l'assimilation de l'azote. Un pH très bas, réduit l'assimilation et impacte la croissance et en particulier celle des racines.

Le blé est sensible au calcaire et à la salinité ; les sols à fertilité réduite et à forte salinité peuvent impacter négativement le rendement. La salinité constitue un problème fréquent dans les champs irrigués. Un excès de sel dans le sol peut diminuer le taux de survie des jeunes plants de blé, réduire le nombre de talles primaires et secondaires, limiter la formation des feuilles et des épillets, et restreindre l'accès à l'eau (Acevedo, Silva, *et* Silva 2009). En Effet, les niveaux de salinité dépassant 100 mM de NaCl réduisent significativement la qualité des grains (Farooq *et* Azam, 2005).

I.7 Importance de blé dur

I.7.1 Importance de blé dur dans le monde

Le blé dur est riche en protéines. Il est connu pour sa couleur dorée distinctive et sa texture dense. Sa dureté le rend idéal pour produire de la semoule qui est une farine grossière souvent utilisée dans les pâtes, le couscous et d'autres plats traditionnels.

Le blé dur est polyvalent en cuisine et constitue un aliment riche sur le plan nutritionnel ; il contient en moyenne 12 à 14 % de protéines, un taux plus élevé que la plupart des autres espèces de blé.

Selon MADR (2017), les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. Durant les deux périodes 2000-2009 et 2010-2017, la superficie des céréales occupe en moyenne annuelle 40 % de la superficie agricole utile (SAU). Cette superficie Elle est consacrée surtout pour le blé dur.

Concrètement, durant la période 2010-2017, il a été rapporté que le blé dur et l'orge représentaient respectivement 51% et 29% de la production totale des céréales (FAO.2020) (Fig. 6).

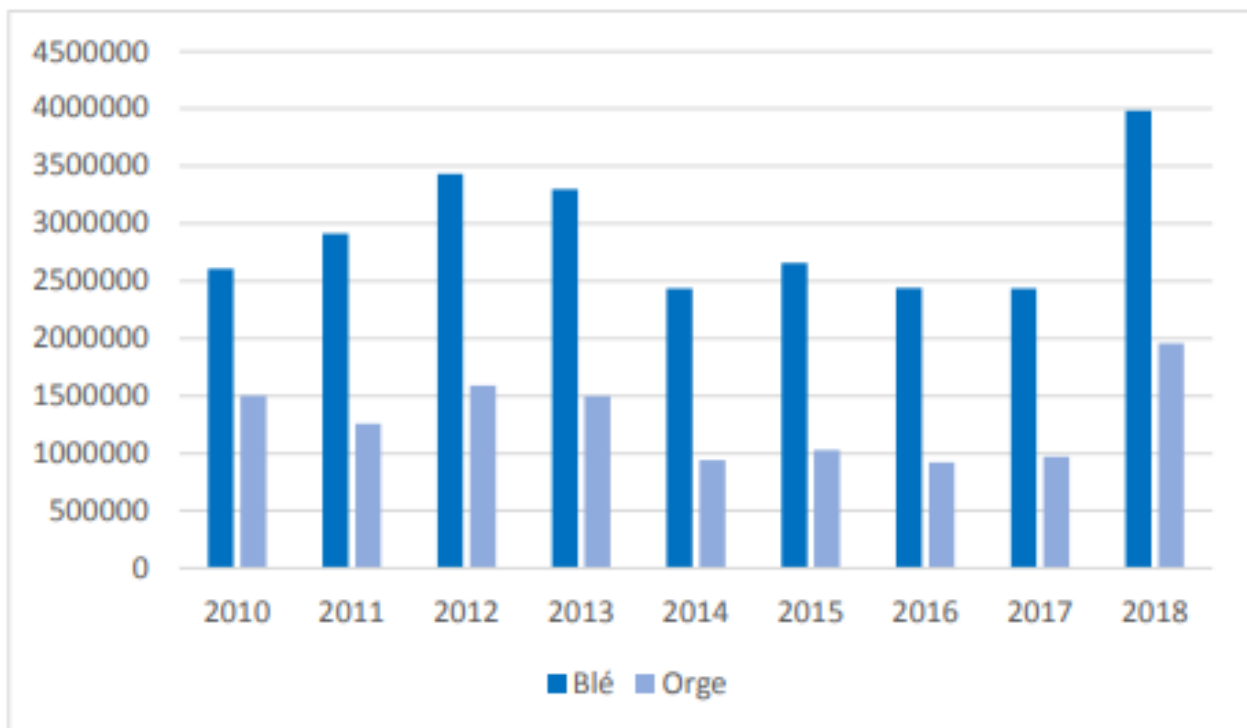


Figure 6 : Production de blé et d'orge (2010-2018) en détail (FAO,2020)

Les prévisions préliminaires de la FAO au sujet de la production mondiale de blé en 2025, indiquent une modeste hausse ; la production mondiale devait atteindre 796 millions de tonnes, soit une augmentation de près de 1 % par rapport à l'année précédente. Cette croissance s'explique en grande partie par les gains de production attendus dans l'Union européenne. Après un recul en 2024, les estimations laissent présager une augmentation des ensemencements.

I.7.2 Importance de blé dur en Algérie

La surface agricole en Algérie représente 3 % de sa superficie qui est de 238 millions d'hectares. 191 millions d'hectares sont des zones arides du Sahara. La surface agricole utile (SAU) est de 7,14 millions d'hectares. Les cultures herbacées occupent 3,8 millions d'hectares. La céréaliculture est la principale activité en zones arides et semi arides.

Les grandes cultures, en particulier les céréales constituent la base de la consommation humaine et animale. Ainsi, on estime la consommation des céréales à 219 kg par habitant et par an (Chehat., 2007 ; Mesrane.,2018). Ce chiffre est légèrement plus élevé que ceux enregistrés en Tunisie et au Maroc avec respectivement 205 kg.an⁻¹ et 209 kg.an⁻¹ (Boulal *et al*,2007).

Cependant, la production de céréales en Algérie est très instable. L'irrégularité interannuelle est conditionnée par le manque de pluviométrie d'où un déficit hydrique assez marqué (Belagrouz et chennafi, 2016).

Selon les auteurs cités ci-dessus, la production totale des céréales en Algérie est loin de satisfaire la demande qui est évaluée à 6,5 millions de tonnes. Ainsi, pour compléter la marge de production national, l'Algérie a souvent recourt à des importateurs.

L'Algérie est le troisième pays importateur de blé dans le monde, après l'Egypte et l'Indonésie avec 8 MT en 2017. D'après Bessaoud (2018), les principaux fournisseurs de blé pour l'Algérie sont le Canada et le Mexique. Ainsi, en 2015 l'importation relative pour ces deux pays a été respectivement de 770230 t et de 58443 t.

II Le stress hydrique

II.1 Notion de stress

Un stress désigne à la fois l'action d'un agent agresseur et les réactions qu'il entraîne dans l'organisme agressé. Le stress perturbe les structures normales et la coordination des processus variés au niveau moléculaire, cellulaire, et au niveau de l'organisme entier (Larcher, 2001).

Selon Hopkins, (2003), on appelle un stress toute pression dominante exercée par un paramètre, perturbant le fonctionnement habituel de la plante. Par ailleurs, la réponse du végétal dépend fortement des paramètres environnementaux (le type de contrainte, son intensité et sa durée) et génétiques (espèce et variété).

On distingue deux grandes catégories de stress :

- Stress biotique qui est imposé par les autres organismes (insectes, herbivores...).
- Stress abiotique, définit comme tous les facteurs environnementaux (sécheresse, la température extrême, la salinité...).

II.2 Le stress hydrique

Lorsqu'on parle de l'alimentation hydrique d'une plante, trois termes « déficit, contrainte et stress » sont souvent utilisés sans distinction pour caractériser les relations au sein du continuum sol- plante- atmosphère (Lecoeur, 2007).

On parle de déficit hydrique chez les plantes lorsque l'approvisionnement en eau des racines devient faible et/ou si le taux de transpiration devient intense par rapport à la quantité d'eau absorbée (Seyed *et al.*, 2012).

Donc le stress hydrique est un stress abiotique et l'un des principaux facteurs limitant la croissance et la production (Cornic et Massacci, 1996). La sécheresse représente le stress abiotique le plus sévère.

D'autres auteurs limitent la définition du stress aux seules conditions correspondant à une hydratation sous-optimale des tissus (Lamaze *et al.* 1994).

D'un point de vue physique, le stress hydrique résulte d'un abaissement du potentiel hydrique dans l'air et/ou dans le sol en dessous d'une certaine valeur, dépendant du génotype, du phénotype et des caractéristiques du milieu (type de sol, température, vent, etc.). Dans le cas d'une forte salinité du sol et aussi dans d'autres conditions (inondation, gel, fortes températures), l'eau existe dans la solution du sol mais les plantes ne sont pas capables de l'absorber, on parle de sécheresse physiologique (Djebbar, 2012).

II.3 Effet de stress hydrique sur le rendement

Chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.), la sécheresse est une des causes principales des pertes de rendement, qui varient de 10 à 80 % en région méditerranéenne (Nachit *et al.*, 1998).

Selon le stade de développement et la durée au cours de laquelle le stress survient, l'influence sur la production finale et les composantes du rendement est plus ou moins importante (Mogensen, 1991).

Le manque d'eau après la floraison, combiné à des températures élevées, provoque une altération de la vitesse et de la durée de remplissage des grains, ce qui impacte le poids de 1 000 grains et entraîne une réduction du rendement (Triboï, 1990). Face à cette contrainte la plante développe des mécanismes d'adaptation qui lui permettent de résister et de supporter la sécheresse en restant en équilibre avec le milieu extérieur (Amour *et al.*, 2005).

II.4 Effet de stress hydrique sur la germination

L'impact du stress hydrique sur la plante dépend de son intensité, de sa durée et de son stade de développement, ainsi que du génotype et de son interaction avec l'environnement (Yokota *et al.*, 2006 ; Radhouabe, 2014).

Le stress affecte la germination des espèces cultivées et réduit leur survie au cours des premiers stades de développement. En l'absence d'une humidité suffisante, même si la graine est correctement placée dans le sol, elle ne germe pas, ce qui retarde la levée. En cas de sécheresse persistante, cela peut conduire à une absence totale de germination (Feliachi *et al.*, 2001).

II.5 Effet de stress hydrique sur la plante

Le stress hydrique agit de manière significative sur les caractéristiques physiologiques morphologiques des plantes, affectant ainsi leur développement global.

II.5.1 Effet de stress hydrique sur la morphologie

II.5.1.1 Partie aérienne

Le développement végétatif d'une plante cultivée sous conditions hydriques limitantes est fortement perturbé (Chaves *et al.*, 2002 ; Lebon *et al.*, 2006). La croissance cellulaire est le processus le plus sensible au stress hydrique. En effet, la réduction de croissance est l'une des premières manifestations du déficit hydrique (Kramer et Boyer, 1995 ; Saab et Sharp, 2004). On note principalement une diminution importante de la taille, de la longueur des entre nœuds, du nombre de feuilles voire de la surface foliaire (Lebon et al., 2006).

La réduction de la disponibilité en eau entraîne une baisse de la turgescence cellulaire, ce qui se traduit par un ralentissement de l'élongation cellulaire et donc une diminution de la croissance en hauteur de la tige (Taiz et Zeiger, 2010).

Néanmoins, la limitation de la croissance foliaire est un mécanisme adaptatif qui permet de réduire la transpiration.

II.5.1.2 Partie racinaire

Le système racinaire est l'interface entre la plante et le sol. Il remplit des fonctions essentielles telle que l'ancrage de la plante et l'acquisition d'eau et de minéraux.

Le stress hydrique a un impact significatif sur la croissance et le fonctionnement des racines. En condition de manque d'eau, les plantes modifient leur architecture racinaire pour maximiser l'exploration du sol. En général, on observe une réduction de la croissance latérale et un allongement des racines principales, permettant un accès plus profond à l'eau souterraine. Cette adaptation permet une meilleure absorption de l'eau en période de sécheresse, mais se fait souvent au détriment de la croissance globale de la plante (Kelaleche, 2020).

II.5.2 Effet de stress hydrique Sur la physiologie

Parmi les modifications physiologiques liés au stress hydrique, l'effet de manque d'eau impacte automatiquement les mouvements des stomates et l'effet sur la photosynthèse et la respiration est immédiate. Plusieurs travaux se sont intéressés à l'effet de la sécheresse sur les différents organes végétaux. La baisse du potentiel hydrique de la plante se traduit principalement par une diminution de la pression de turgescence ; ce qui provoque la fermeture des stomates, d'où un ralentissement de la photosynthèse et de la transpiration (Teulat et al., 1997).

Sur le plan énergétique, la baisse de la photosynthèse limite la production d'ATP, ce qui perturbe l'ensemble du métabolisme cellulaire.

Le stress hydrique entraîne des altérations importantes au niveau des membranes cellulaires. Ces dernières deviennent très poreuses, ce qui provoque des lésions membranaires et la formation de canaux remplis d'eau. Lors de la réhydratation, ces canaux favorisent une fuite massive de solutés vers l'espace extracellulaire ou entre les compartiments cellulaires, traduisant une perte de la sélectivité membranaire. (Kelaleche, 2020).

Par ailleurs, le déficit hydrique induit un déficit de nutrition azotée qui provient principalement des réductions du flux d'azote au niveau des racines et de la réduction des échanges entre les parties aériennes et racinaires du fait de la chute de la transpiration (Digo, 2002).

À un stade avancé de stress hydrique, la production excessive de ROS dépasse les capacités anti oxydantes de la plante, provoquant des dommages oxydatifs aux membranes cellulaires et aux macromolécules. Cette accumulation déséquilibrée perturbe les fonctions physiologiques essentielles. Une réponse adaptative est cependant possible grâce à l'activation des défenses enzymatiques (Mittler, 2002).

II.6 Mécanisme d'adaptation des plantes au stress hydrique

Sur le plan physiologique, la résistance d'une plante au stress hydrique se définit par sa capacité à survivre et à poursuivre son développement malgré le manque d'eau. Cependant, du point de vue agronomique, elle se traduit par l'obtention de rendements plus élevés chez les plantes sensibles (Madhava Rao *et al.*, 2006). Pour lutter contre la pénurie d'eau, les plantes développent plusieurs stratégies d'adaptation qui varient selon les espèces et les conditions environnementales (Turner, 1986).

II.6.1 L'adaptation phénologique

Pour éviter les périodes difficiles de croissance et de développement, certaines variétés achèvent leur cycle de développement avant les pénuries d'eau. La précocité est donc un mécanisme important pour éviter le stress hydrique en fin de cycle (Ben Naceur *et al.*, 1999).

L'adaptation phénologique permet aux plantes de modifier la durée de certaines phases du cycle de vie (le tallage, la floraison ou la maturation), afin d'échapper aux périodes de sécheresse. Par exemple, certaines espèces avancent leur floraison ou raccourcissent leur cycle pour compléter leur développement avant l'installation du stress hydrique (Tardieu, 2011).

II.6.2 Adaptations morphologiques

Les effets du stress hydrique conduisent à des changements morphologiques pour augmenter l'absorption d'eau et réduire la transpiration et la compétition pour les assimilats entre les organes. Ces modifications affectent les sections aériennes et/ou souterraines (Bajji, 1999).

Au niveau de la tige, le déficit hydrique réduit considérablement l'élongation cellulaire, entraînant une diminution de la hauteur de la plante (Royo *et al.*, 2000). Cette réduction de la croissance verticale est souvent corrélée à une baisse de la capacité de transport des assimilats vers les organes reproducteurs, affectant ainsi le remplissage des grains (Plaut *et al.*, 2004). La biomasse de la tige est également réduite, ce qui limite les réserves mobilisables durant la phase de remplissage du grain (Ehdaie *et al.*, 2006).

Par ailleurs, un système racinaire capable d'extraire l'eau du sol ou en d'autres termes peut explorer un volume de terre important serait un caractère essentiel pour l'adaptation à la sécheresse. Cette caractéristique revêt une importance particulière pour les cultures qui subissent régulièrement des déficits hydriques durant le cycle de croissance (El Fakhri *et al.*, 2010). Pour assurer à la plante la meilleure exploitation possible des réserves en eau, la colonisation racinaire doit pouvoir s'adresser à toutes les couches du sol (Zoghmar, 2007). Les racines doivent être distribuées d'une manière homogène. (Callot, 1984).

II.6.3 Adaptation physiologique

II.6.3.1 Accumulation des osmolytes

Face à la sécheresse les plantes réagissent et tentent de se protéger et se mettre en équilibre en régulant leur physiologie. Elles synthétisent certaines molécules qui interviennent pour ajuster leur niveau hydrique par voie de l'osmose (Farooq *et al.*, 2009). Ces molécules sont accumulées majoritairement dans le cytoplasme, leur principal rôle est de maintenir la turgescence des cellules par l'augmentation de la pression osmotique ; ceci permet d'assurer la stabilisation des protéines, la prévention de l'intégrité membranaire ainsi que l'élimination des radicaux libres, tout en évitant la déshydratation cellulaire (Tuteja, 2007). Parmi ces substances osmorégulatrices, on cite :

- **Accumulation de la proline**

L'accumulation de la proline constitue un mécanisme de tolérance à la sécheresse (Bensalem *et al.*, 2005). Les teneurs en acides aminés libres augmentent significativement, chez de nombreuses espèces monocotylédones et Eudicotylédones, soumises à un stress hydrique (Dubos., 2001). La proline semble jouer un rôle particulièrement important. On lui attribue un rôle d'osmoticum au niveau cytosolique et vacuolaire, mais aussi, un rôle dans la régulation du potentiel redox. En plus, de protéger les membranes et les enzymes contre les perturbations conformationnelles causées par les ions (Cherian *et al.*, 2005 ; Anjum *et al.*, 2011).

II.6.3.2 La teneur en Chlorophylle

Sous un stress hydrique, une diminution de la teneur en chlorophylle est remarquée chez le blé dur (Bousba *et al.*, 2009). Le maintien de la teneur en chlorophylle constitue un mécanisme important d'adaptation du blé dur face au stress hydrique. Certaines variétés arrivent à conserver un bon niveau de chlorophylle même en conditions de sécheresse, ce qui leur permet de continuer la photosynthèse de façon plus efficace. Ainsi, mesurer la chlorophylle permet non seulement de détecter l'effet du stress, mais aussi de différencier les variétés les plus tolérantes à la sécheresse (Araus *et al.*, 2002).

II.6.3.3 Régulation stomatique

Les stomates sont constitués de deux cellules affrontées qui peuvent ainsi se déformer sous l'effet de variations de leur pression hydraulique interne et ouvrir plus ou moins l'ostiole à travers lequel s'échappe l'eau transpirée (Durand, 2007). 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 (Grieu *et al.*, 2008).

L'augmentation du nombre de stomates par unité de surface pourrait être un des facteurs de résistance au déficit hydrique chez les céréales si elle est accompagnée par une bonne activité physiologique. L'accroissement de la densité stomatique peut augmenter l'assimilation nette du CO₂ et diminuer la perte en eau. En effet, un nombre élevé de stomates peut engendrer des stomates de petite taille et à fermeture rapide (Slama *et al.*, 2005).

Matériels et méthodes

III Matériels et Méthodes

III.1 Objectif du travail

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet du stress hydrique sur la croissance, la morphologie et la physiologie de deux variétés (Vitron et Waha) de blé dur (*Triticum durum Desf.*). Ces variétés présentent des niveaux de tolérance différents à la sécheresse, et cette expérimentation vise à comparer leur comportement en conditions de déficit hydrique.

III.2 Matériel biologique

Nous avons utilisé comme matériel végétal des graines de deux variétés de blé dur :

- Waha : originaire d'ICARDA (Syrie), cette variété est caractérisée par un cycle végétative semi précoce ; elle a une grande résistance à la sécheresse (Tab.3).
- Vitron : originaire d'Espagne, cette variété est caractérisée par un cycle végétative semi précoce ; elle est très sensible à la sécheresse (Tab.3).

Tableau 3: Origine des deux variétés de blé dur (Waha et Vitron)

Source : Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie, 2006.

Variétés		
Données	Waha	Vitron
Origine	CIMMYT-ICARDA Syrie	Espagne
Demandeur	ITGC	ITGC
Année d'inscription	1998	1998

III.3 Protocole expérimental

III.3.1 Préparation des graines

Les graines de deux variétés Waha et Vitron sont sélectionnées selon leur tailles et leurs formes afin de choisir des graines saines et homogènes, puis elles sont rincées à l'eau distillée après une stérilisation avec une solution d'hypochlorite de sodium à faible concentration (Fig.7).



Figure 7 :Graines de blé dur utilisés dans l'expérimentation (Waha, Vitron).

III.3.2 Germination des graines

Les graines sont disposées dans des boîtes de pétries en plastique tapissées de papier absorbant et imbibé d'eau distillée (30 graines par boîte). Elles sont ensuite mises à l'obscurité et à température ambiante de laboratoire (22°C -25°C) pendant 3 jours (Fig.8).



Figure 8: Grains de blé dur mise à germer en boîte pétrie.

III.3.3 Mise en culture

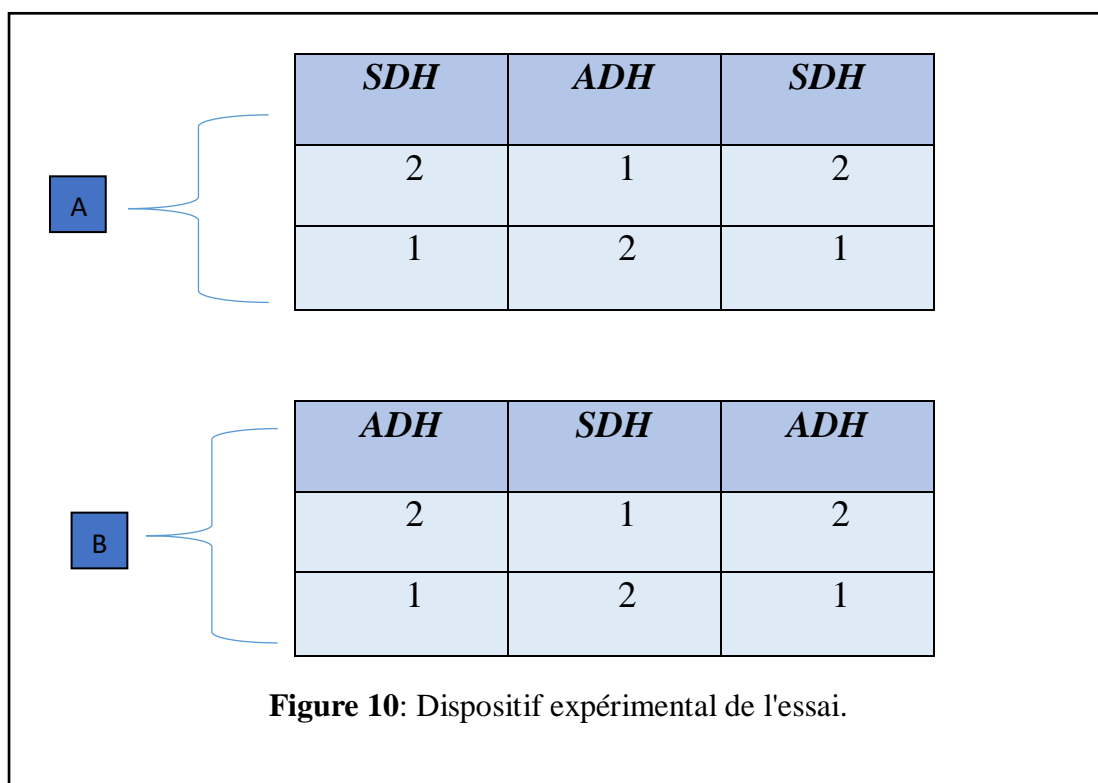
Après la germination des graines (émergence de la racicule), les plantules sont repiquées dans des pots en polyéthylène, avec des dimensions de 8*8*8 cm. Chaque pot contient 380 g de substrat constitué par un mélange de terre (argilo-limoneuse), de sable et de matière organique à des proportions 1,5 / 7 / 1,5 (Fig.9). L'expérience est menée à une température allant de 25°C à 28°C.



Figure 9 : Préparation des pots.

III.4 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental comprenant trois bloc est subdivisé en deux sous-blocs (A et B) relatifs aux traitements avec stress hydrique (ADH) et sans stress hydrique (SDH) ; chaque sous-bloc comprend deux géotypes de blé dur dont V1 (Waha) et V2 (Vitron) (Fig.10).



ADH : avec déficit hydrique

SDH : sans déficit hydrique (témoin)

A : sous-boc A

B : sous-bloc B

1 : Variété « Waha »

2 : Variété « Vitron »

III.5 Traitement hydrique

L'arrosage des pots se fait deux fois par semaine à la hauteur de 1/3 de la capacité au champ, soit 33 ml par pot, ce type d'arrosage est maintenu jusqu'à la phase « trois feuilles » qui correspond au stade 13 de l'échelle de zodaks. Lorsque la 3^{ème} feuille est bien développée, le système d'arrosage change en fonction du traitement ; on distingue alors :

- Le sous bloc (traitement) avec déficit hydrique (ADH) : les plantes sont soumises à un stress hydrique sévère marqué par un arrêt complet de l'arrosage pendant 15 jours.
- Le sous bloc (traitement) sans déficit hydrique (SDH) (témoin) : les plantes continuent à recevoir un arrosage normal.

III.6 La solution nutritive

La solution nutritive utilisée pour l'arrosage au courant de l'expérimentation a été préparée à partir de celle de HOAGLAND (1938), elle est apporté trois fois par semaine. Elle se compose d'un ensemble de macroéléments et de microéléments comme le montre le tableau 4.

Tableau 4 : Composition de la solution nutritive de HOAGLAND (1938).

Composition	Formulation	Poids (g /l)
Nitrate de potassium	KNO ₃	191.90
Nitrate de calcium	(NO ₃) ₂ Ca, 4H ₂ O	129.80
Nitrate d'Ammonium	NO ₃ NH ₄	210.00
Sulfate de magnésium	SO ₄ Mg.7H ₂ O	61.50
Phosphate-mono potassique	PO ₄ H ₂ K	54.40
Hydrogénophosphate- dipotassium	PO ₄ K ₂ H. 3H ₂ O	34.23
Chlorure de manganèse	Cl ₂ Mn, 4H ₂ O	1.80
Sulfate de cuivre	CuSO ₄ ,5H ₂ O	0.176
Sulfate de zinc	ZnSO ₄ ,7H ₂ O	0.219
Acide borique	BO ₃ H ₃	2.861
Molybdate d'ammonium	MO ₇ O ₂₄ (NH ₄),7H ₂ O	0.285
Complexe ferrique	EDTA ferrique (C ₁₀ H ₁₂ FeN ₂ NaO ₈)	0.050

III.7 Paramètres mesurés

Les prélèvements sont effectués à un stade précoce appelé « stade trois feuilles » qui correspond au stade 13 sur l'échelle de Zadoks (stade début de tallage), et c'est la troisième feuille qui est mis en étude.

III.7.1 Paramètre morphologique

III.7.1.1 La surface foliaire

La surface foliaire des feuilles de blé dur a été estimée par la méthode de Paul *et al.*, (1979) ; c'est une méthode gravimétrique indirecte reposant sur l'utilisation d'un gabarit papier. Dans un premier temps, les feuilles ont été soigneusement posées sur une feuille blanche, puis leurs contours ont été tracés à l'aide d'un crayon. Les contours dessinés ont ensuite été découpés avec précision afin d'obtenir des silhouettes correspondant à la forme réelle des feuilles. Chaque découpe a été pesée à l'aide d'une balance de précision. En parallèle, un carré de papier blanc de dimensions connues (1 cm × 1 cm, soit 1 cm²), découpé dans le même type de papier, puis son poids a été mesuré.

La surface foliaire de chaque feuille a été déterminée par une règle de trois, en utilisant la formule suivante :

$$\text{Surface foliaire (cm}^2\text{)} = \frac{\text{Poids de la découpe de la feuille (g)}}{\text{Poids de la de caré (g)}} \times 1 \text{ cm}^2$$

III.7.2 Paramètres physiologiques

III.7.2.1 Teneur relative en eau

La teneur relative en eau des feuilles a été déterminée par la méthode de Barrs (1968) ; selon cette méthode les feuilles sont coupées à la base du limbe, puis pesées immédiatement pour obtenir leur poids frais (PF).

Les feuilles sont mises par la suite dans des tubes à essai contenant de l'eau distillée et placés à l'obscurité pendant 24 h ; au terme de cette durée, elles sont pesées à nouveau pour

obtenir le poids frais à turgescence hydrique maximale (PFTH). Les échantillons sont ensuite mis à l'étuve réglée à 80°C pendant 24h, puis pesées pour avoir leurs poids sec (PS).

La teneur relative en eau (TRE) est calculée par la formule suivante :

$$\text{TRE \%} = (\text{PF-PS} / \text{PFTH-PS}) \times 100$$

PF: Poids frais

PS: Poids sec

PFTH: Poids frais a turgescence hydrique

III.7.2.2 Dosage de la chlorophylle

La teneur moyenne en chlorophylle a et b est déterminé par la méthode FRANCIS *et al* (1970) ; elle consiste en une macération de 1g de feuilles dans un mélange d'acétone à 75% et éthanol à 25%, avec un volume respectif de 80% et 40%. Les feuilles fragmentées sont mises dans des tubes à essai fermés et recouverts par du papier aluminium pour éviter l'oxydation de la chlorophylle. Les tubes sont ensuite mis au repos pendant 48 heures à température ambiante. Après ce délai, on passe à la lecture spectrophotométrique à des longueurs d'ondes de 663nm et 645nm. La quantité de chlorophylle brute (a+b) est obtenue par la formule suivante :

- Chlorophylle a: $\text{Chl a} = (12,7 \times \text{DO (663)} - 2,69 \times \text{DO (645)}) \times V / 1000 \times W$
- Chlorophylle b: $\text{Chl b} = 22,9 \times \text{DO (645)} - 4,68 \times \text{DO (663)} \times V / 1000 \times W$
- Chlorophylle brute (totale) : $\text{Chl tot} = \text{Chl (a)} + \text{Chl (b)}$

V : volume de la solution extraite

W : le poids de matière fraîche

III.7.2.3 Dosage de la proline

La proline est facilement oxydée par la ninhydrine, c'est sur cette réaction que se base le protocole de dosage de la proline des échantillons foliaires (EL Jaafri.1993).

La méthode suivie est celle de Troll et Linsley (1955) modifiée par Drein et Going (1974), elle consiste à prendre 100mg dans des tubes à essai contenant 2ml de méthanol a 40%, le tout est chauffé à 85°C au bain marie pendant 30mn.

Après refroidissement, on prélève 1 ml d'extrait auquel on ajoute : 1ml d'acide acétique (CH_3COOH), 25mg de ninhydrine ($\text{C}_9\text{H}_6\text{O}_4$) et 1ml de mélange contenant 120ml d'eau distillé, 300m d'acide acétique, 80ml d'acide orthophosphorique (H_3PO_4) ($d=1,7$).

La solution obtenue est portée à ébullition pendant 30 mn à 100°C, la solution vire alors au rouge ; après refroidissement, 5 ml de toluène sont rajoutés à la solution qui est agitée et deux phases se séparent, dont une phase supérieure à la couleur rouge, qui contient la proline et une phase inférieure transparente sans proline. Après avoir éliminé la phase inférieure, la phase supérieure est récupérée est déshydratée par l'ajout d'une spatule de sulfate de sodium Na_2SO_4 anhydre (pour éliminer l'eau qu'elle contient). On détermine la densité optique (DO) à l'aide d'un spectrophotomètre sur une longueur d'onde de 528nm. Les valeurs obtenues sont converties en taux de proline par le biais d'une « courbe étalon » (Fig. Annexe.2), préalablement établie à partir d'une série de solution de concentration en proline connue. Cette courbe est utilisée pour déterminer les teneurs en proline dans les feuilles des plantes, L'équation de cette courbe est la suivante :

$$Y = 0.029x + 0.053$$

III.8 Analyse statistique

L'analyse statistique des données obtenues concerne l'analyse de la variance est réalisée en utilisant le logiciel STATISTICA, la méthode utilisée est l'ANOVA.

Résultats et discussions

IV Résultats et discussions

IV.1 Paramètres morphologiques

IV.1.1 La surface foliaire

Les résultats relatifs à l'effet du stress hydrique sur la surface de la 3^{ème} feuille des deux variétés de blé dur (Waha et Vitron) sous deux régimes hydriques (ADH ou avec déficit hydrique et SDH ou sans déficit hydrique), sont présentés dans le tableau 5 et la figure 11.

Tableau 5: Surface foliaire (cm²) de deux variétés de blé dur sous deux régimes hydriques (ADH et SDH)

Traitement \ Variétés	ADH (1)	SDH (2)	(1-2) / 2 x100 (%)
Waha	4.72	6.80	- 30.59
Vitron	5.32	11.25	- 52.71

Nous déduisons d'après les résultats du tableau 5 une nette diminution de la surface foliaire chez les plantes soumises au stress hydrique. Ainsi, les valeurs enregistrées varient de 4.72 et 5,32 cm² pour le lot expérimental (ADH) à 6.80 et 11.25 cm² pour le lot témoin (SDH) et ce, respectivement pour les variétés Waha et Vitron ; soit un retard de croissance respectif de 30.59 et 52.71 % par rapport aux plantes sans déficit hydrique. En effet, l'analyse statistique (ANOVA) (Tab.1, Annexe 1), révèle une différence hautement significative pour l'effet traitement ($P \leq 0.001$).

Par ailleurs, le comportement des deux génotypes étudiés face au stress est aussi différent et l'analyse de la variance révèle un effet significatif ($P \leq 0.05$). Ainsi, les deux variétés répondent différemment face à un stress hydrique qui survient au jeune stade ; la variété Vitron enregistre une plus grande perte de surface (- 52.71 %) par rapport à la deuxième variété, en l'occurrence Waha (- 30.59 %) (Tab.5 et Fig.11).

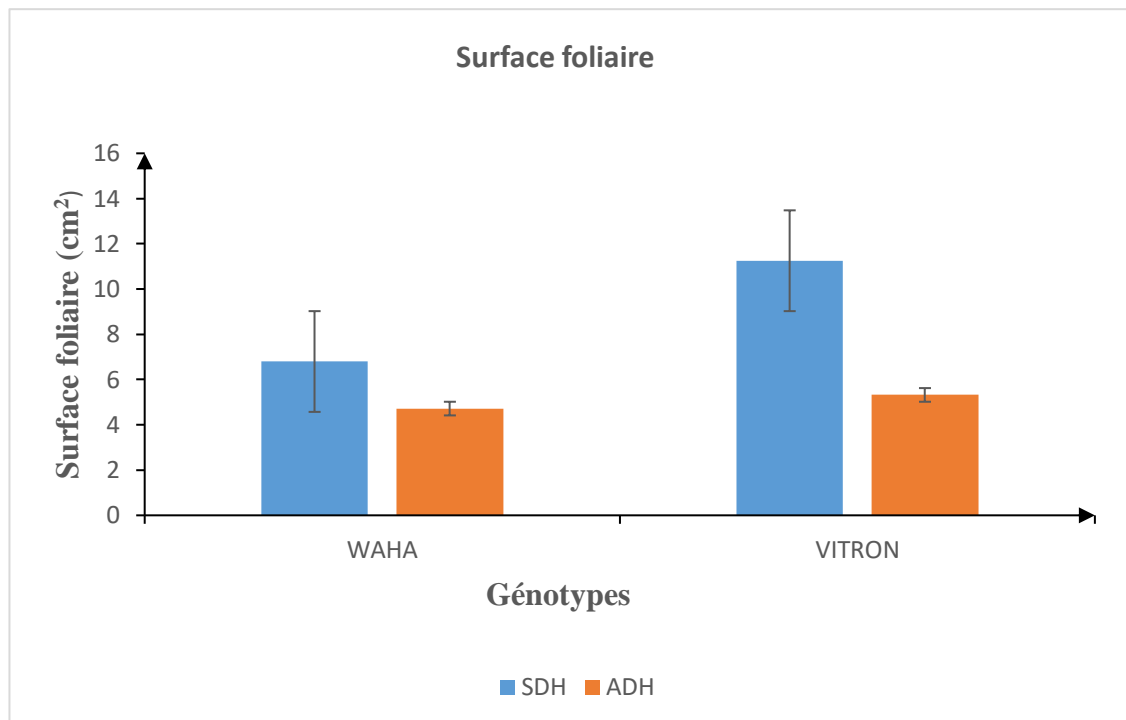


Figure 11: Variation de la surface foliaire (cm²) de deux génotypes de blé dur (Waha et Vitron) en conditions hydriques SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).

L'effet du stress hydrique sur le blé, induit des modifications dans la morphologie de la plante. Ces différentes modifications s'inscrivent comme des stratégies d'adaptation du végétal face à un manque d'eau.

L'effet du stress hydrique peut se traduire, selon la stratégie adaptative de chaque espèce ou génotype, par des modifications morphologiques des racines afin d'augmenter l'absorption d'eau et pour diminuer la transpiration et la compétition entre les organes pour les assimilés. Ces modifications affectent la partie aérienne ou souterraine (Bajji., 1999).

Ainsi, selon Temagout (2009), le déficit hydrique impacte fortement la division et l'élongation cellulaire, ce qui ralentit la croissance de la feuille et réduit la superficie.

La surface foliaire est un déterminisme important de la transpiration. Darera *et al.* (1969), pensent que la diminution de la surface du limbe est un trait majeur des plantes visant à limiter leurs besoins en eau, lorsque celle-là est très insuffisante.

Ainsi, la diminution de la surface de la feuille est considérée comme une des multiples réponses des végétaux à la déshydratation ; elle contribue à la conservation du potentiel hydrique interne, d'où la survie de la plante (Lebon *et al.*, 2004). Par ailleurs, en plus de la diminution de la surface transpirante de la feuille du blé, le nombre de talles est aussi impacté ; la baisse de l'activité de tallage constitue une réaction de la plante face à un manque d'eau (Blum,1996).

Un autre type d'adaptation foliaire développé par la plante face à un manque d'eau est l'enroulement de la feuille qui peut être considéré comme un indicateur de perte de turgescence en même temps qu'un caractère d'évitement de la déshydratation (Amokrane *et al.*, 2002).

IV.2 Paramètres physiologiques

IV.2.1 Teneur relative en eau

L'analyse de la teneur relative en eau permet de décrire d'une manière globale, le statut hydrique en réponse au stress hydrique afin d'évaluer l'aptitude à réaliser une bonne osmorégulation et maintenir une turgescence cellulaire (EL Jaafari *et al.*, 2000).

Les résultats obtenus par rapport à la teneur relative en eau (TRE) de la troisième feuille des deux variétés de blé dur (Waha et Vitron) sous deux régimes hydriques (SDH et ADH) sont présentés dans le tableau 6 et la figure 12.

Tableau 6: Teneur relative en eau (%) des variétés de blé dur (Waha et Vitron) en conditions SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).

Traitement \ Variétés	ADH (1)	SDH (2)	$(1-2) / 2 \times 100$ (%)
WAHA	92.37	91.04	1.46
VITRON	82.103	75	9.46

D'après les résultats obtenus, les valeurs moyennes de la TRE des deux régimes (ADH et SDH), sont similaires. Les valeurs obtenues varient de 92.37 et 82.10 % pour le lot ADH et

de 91.04 et 75 % pour le lot SDH et ce, respectivement, pour les variétés Waha et Vitron. La différence entre les deux traitements est très faible ; elle est de 1.46 % pour la première variété (Waha) et de 9.46 % pour la deuxième variété (Vitron).

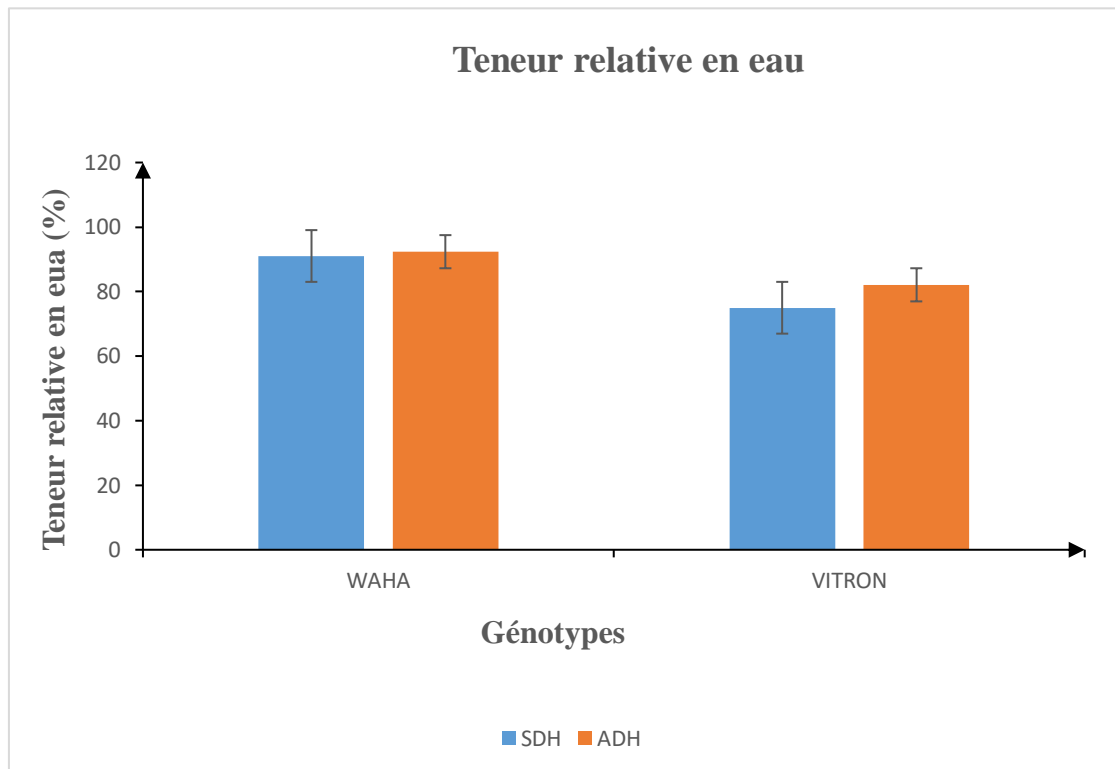


Figure 12: Variation de la teneur relative en eau (%) de deux génotypes de blé dur (Waha et Vitron) en conditions hydriques SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).

L'analyse de la variance (ANOVA) réalisée sur la teneur relative en eau (Tab. 2. Annexe 1) montre que ni le facteur variété ($p = 0,095$), ni le traitement hydrique ($p = 0,574$), ni l'interaction entre les deux variables ($p = 0,706$) ne sont significatifs. Ces tests montrent que dans les conditions expérimentales, les deux variétés étudiées présentent une réponse physiologique similaire face au stress hydrique ; les plantes ont maintenu leur statut hydrique, possiblement grâce à des mécanismes de tolérance ou d'évitement du stress (ex. fermeture stomatique, réduction de croissance). Néanmoins visuellement, la variété Vitron présente une

teneur en eau relative légèrement plus grande ; elle est donc supposée plus tolérante à la sécheresse par rapport à la variété Waha.

La teneur en eau relative est un indicateur physiologique très utilisé pour mettre en évidence l'état de la balance hydrique de la plante ; elle est considérée comme un paramètre indicateur de la résistance vis à vis d'un manque d'eau. L'analyse de la teneur en eau relative, permet de décrire d'une manière générale, le statut hydrique en réponse au stress hydrique et d'évaluer l'aptitude à réaliser une bonne osmorégulation et maintenir une turgescence cellulaire (El Jaafari *et al.*, 2000).

Plusieurs études ont été réalisées sur les conséquences du manque d'eau sur la turgescence relative des feuilles des plantes cultivées, en particulier des céréales dont le blé et les conclusions sont assez divergentes. Ainsi, certains auteurs dont Jameux *et al.*, 1997, attestent que face à un stress hydrique, la TRE a tendance à se maintenir ou à être plus élevée ; ce qui est un signe de tolérance à la sécheresse. A ce titre, Levitt (1980) constate que la capacité de maintenir un potentiel hydrique élevé a été considérée comme un mécanisme qui permet à la plante d'esquiver la déshydratation.

D'autres chercheurs, présentent des avis opposés et estiment qu'en condition de manque d'eau, il y a une diminution du contenu relatif en eau. Cet état de fait induit une réduction significative de la production de la biomasse totale (Abouchi *et al.*, 2000).

La réduction de la perte en eau par la fermeture stomatique est un moyen d'adaptation des plantes au stress hydrique (Gao, 2000). Le principe de fonctionnement des stomates repose essentiellement sur les variations du potentiel de turgescence dans les cellules de garde. Le degré de fermeture et d'ouverture des stomates varie en fonction des espèces (Gahrti-Chherti et Lales, 1990).

IV.2.2 La teneur en chlorophylle

La quantité de chlorophylle des feuilles peut être influencée par beaucoup de facteurs environnementaux tels que la lumière, la température et la disponibilité en eau (Hikosaka *et al.*, 2006).

Résultats Et Discussions

Le tableau 7 et la figure 13 illustre les variations de la teneur en chlorophylle brute (a+b) de la troisième feuille chez deux variétés de blé dur (Waha et Vitron) sous deux régimes hydriques (ADH et SDH).

Tableau 7 : Teneur en chlorophylle brute ($\mu\text{g/g MF}$) de deux variétés de blé dur étudiées (Waha et Vitron) en conditions SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).

Traitement Variétés	ADH (1)	SDH (2)	(1-2) / 2 x100 (%)
WAHA	07.93	13.40	- 45.30
VITRON	05.46	12.90	- 57.67

D'après les résultats obtenus, les valeurs moyennes de la chlorophylle brute des deux régimes (ADH et SDH) sont différentes. On note une diminution très remarquable du taux de chlorophylle brute chez le lot de plantes stressées.

Les valeurs obtenues varient de 7.93 et 5.46 $\mu\text{g/g MF}$ pour le lot ADH et de 13.40 et 12.90 $\mu\text{g/g MF}$ pour le lot SDH et ce, respectivement pour les variétés Waha et Vitron.

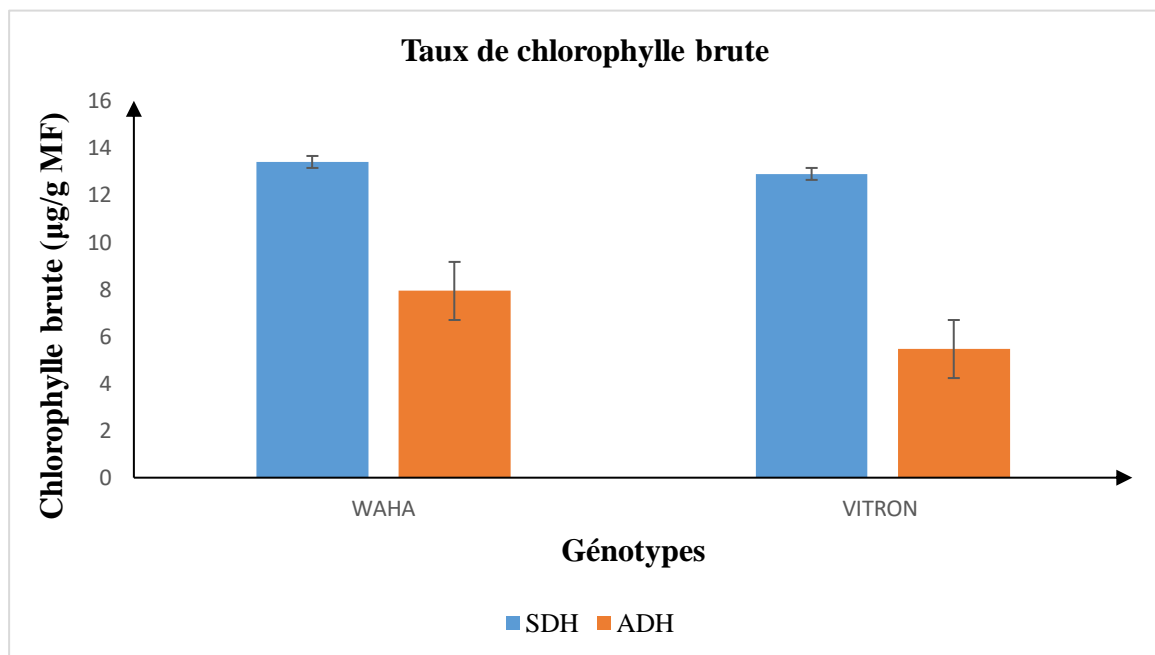


Figure 13: Variation du taux de chlorophylle brute ($\mu\text{g/g MF}$) de deux génotypes de blé dur (Waha et Vitron) en conditions hydriques SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).

L'observation de la figure 13 montre clairement que le stress hydrique a exercé une forte diminution de la teneur en chlorophylle brute pour les deux variétés étudiées.

La différence entre les deux traitements est très importante ; elle est de - 45.30 % pour la première variété (Waha) et de -57.67 % pour la deuxième variété (Vitron) (Tab7.et Fig. 13). Toutefois, ce paramètre ne semble pas affecté par l'effet variétal ; en effet, aucune différence comportementale entre les deux variétés étudiées n'est décelée.

Les résultats obtenus sont soumis à des analyses statistiques et l'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif de l'effet traitement ($P \leq 0.001$) qui confirme bien que le manque d'eau génère une diminution du taux de chlorophylle. Toutefois l'effet variétal ainsi que l'effet de l'interaction ($T \times V$) sont non significatifs ($P > 0.05$) (Tab.3. Annexe1). Ainsi, les plantes répondent de manière similaire au stress hydrique consternant ce paramètre.

Des études comme celle de Bourahla et Hadji (2009) ont montré que le déficit hydrique appliqué au stade précoce induit une réduction significative de la teneur en chlorophylle des feuilles.

La chute des teneurs en chlorophylle chez les deux variétés 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 CO_2 atmosphérique nécessaire à la photosynthèse (Bousba *et al.*, 2009).

La quantité de la chlorophylle des feuilles peut être influencée par beaucoup de facteurs environnementaux tels que la lumière, la température et la disponibilité en eau (Hikosaka *et al.*, 2006). Lorsque la plante subit un stress, le niveau de chlorophylle diminue, affectant la coloration de la plante et perturbe la redistribution des assimilâtes stockés par la tige vers les différentes parties de la plante, ce qui perturbe sa croissance (Karima *et al.*, 2012).

Selon Ernez et Lannoye (1991), l'altération de l'état physiologique des plantes, induite par des conditions environnementales défavorables telles que le déficit hydrique se manifeste rapidement à travers différents signaux biologiques, biochimiques et morphologiques.

Le stress hydrique induit une dégradation des pigments chlorophylliens due à l'accumulation des espèces réactives de l'oxygène (ROS) et à l'inhibition de leur biosynthèse (Farooq *et al.*, 2009). Cette dégradation altère l'efficacité photosynthétique, affectant ainsi la croissance et le rendement des plantes.

IV.2.3 La teneur en Proline

Au niveau cellulaire, le maintien d'une pression osmotique élevée est lié à certains paramètres, à la viscosité protoplasmique et parois cellulaires mais aussi à l'accumulation de certains acides aminés ; parmi ceux-ci, la proline semble jouer un rôle de première importance. Son accumulation rapide lors d'un déficit hydrique a été mis en évidence chez de nombreuses plantes, en particulier chez l'orge et le blé (Monneveux et Nemmar,2020).

Les résultats concernant la variation du taux de proline de la feuille chez les deux variétés de blé dur étudiés (Waha et Vitron) sous deux régimes hydriques (ADH et SDH) sont consignés dans le tableau 8 et la figure 14.

Tableau 8: Teneur en proline ($\mu\text{g}/100\text{mg MF}$) des variétés de blé dur étudiées (Waha et Vitron) en conditions SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique).

Traitement Variétés	ADH (1)	SDH (2)	(1-2) /2 x100 (%)
WAHA	130.45	42.78	204,93
VITRON	134.59	36.2	271.80

D'après les résultats obtenus, les valeurs moyennes de la proline des deux régimes (ADH et SDH) sont différentes. On note une augmentation très remarquable de la teneur en proline chez le lot de plantes stressées et ce, chez les deux variétés étudiées en l'occurrence Waha et Vitron.

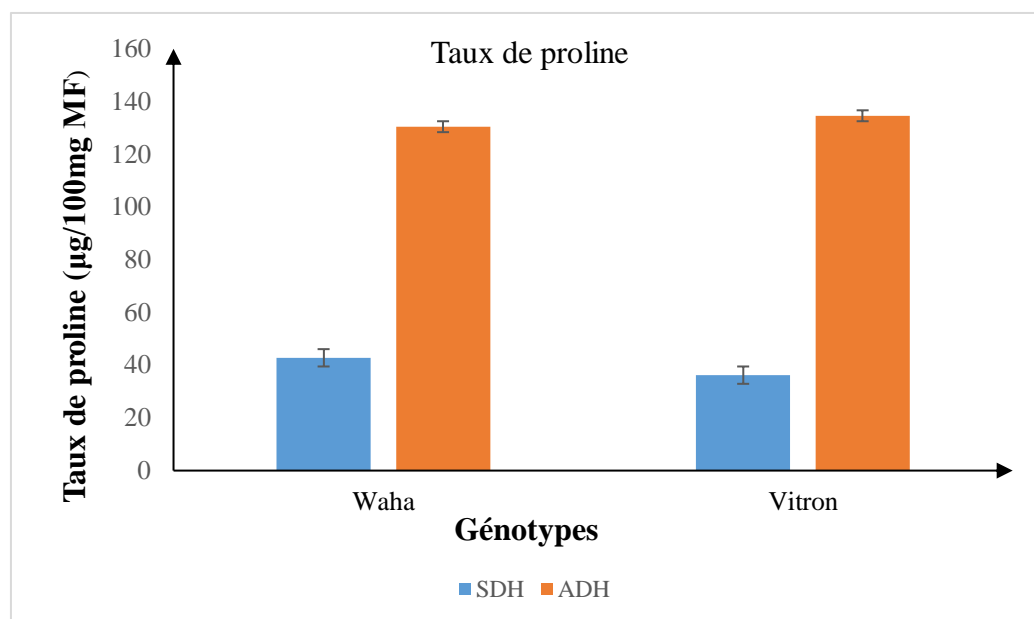


Figure 14: Variation de la teneur en proline ($\mu\text{g}/100\text{mg MF}$) de deux génotypes de blé dur (Waha et Vitron) en conditions hydriques SDH (témoin) et ADH (sous stress hydrique)

La teneur en proline a significativement augmenté chez les deux variétés de blé dur Waha et Vitron en présence de stress hydrique. En condition normale (sans déficit hydrique) (SDH), les teneurs sont relativement faibles, soit $42,78 \mu\text{g}/100\text{mg MF}$ chez Waha et $36,2 \mu\text{g}/100\text{mg MF}$ chez Vitron. En situation de déficit hydrique (ADH), une forte accumulation de proline a été observée, avec des valeurs de $130,45 \mu\text{g}/100\text{mg MF}$ pour Waha et $134,59 \mu\text{g}/100\text{mg MF}$ pour Vitron.

La comparaison des moyennes de la teneur en proline et l'analyse de variance (Tab. 4. Annexe 1), montrent qu'il existe une différence très significative pour l'effet traitement ($P \leq 0.001$), et aucune différence significative pour les variétés et pour l'interaction (variété \times traitement) ; ce qui confirme que les deux espèces étudiées utilisent la même stratégie de tolérance vis à vis au stress hydrique.

Ces résultats confirment que l'accumulation de proline constitue un indicateur pertinent de la tolérance au déficit hydrique chez le blé dur.

Selon Kavi Kishor *et al* (2005), l'augmentation de la proline est un mécanisme adaptatif classique chez les plantes. Elle joue un rôle essentiel dans l'osmoprotection, la stabilisation des structures cellulaires et la réduction du stress oxydatif.

Les plantes accumulent comme osmolyte la proline qui en association avec d'autres facteurs tels que la réduction de la transpiration par fermeture des stomates et la réduction de la surface foliaire, permet de garder la turgescence aussi élevée que possible (Wang *et al.*, 2003 ; Zerrad *et al.*, 2008).

De nombreuses études ont montré que la proline protège les plantes contre les contraintes environnementales en stabilisant la structure et les fonctions des macromolécules et des organites (Hare *et al.*, 1998).

Ainsi, l'accumulation de la proline en situation de stress hydrique contribuerait à la formation d'une couche d'hydratation autour des protéines, les protégeant ainsi de la dénaturation (Schobert & Tschesche, 1978 ; Chadalavada, 1994).

La proline contribue également à la tolérance au stress hydrique, en augmentant la teneur relative en eau et en améliorant la croissance des plantes.

Conclusion

Conclusion générale

Le déficit hydrique constitue un facteur de stress majeur pour les cultures céréalières, en particulier pour le blé. En situation de manque d'eau, les plantes mettent en œuvre diverses adaptations morphologiques et physiologiques leur permettant de survivre. Dans ce contexte, le choix de variétés de blé dur capables de maintenir leur croissance et leur rendement en conditions de stress hydrique représente un enjeu prioritaire pour l'agriculture.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'effet du stress hydrique sur certains paramètres morphologiques (la surface foliaire) et physiologiques (la teneur relative en eau ou TRE, la teneur en chlorophylle et en proline) chez deux variétés de blé dur, Waha et Vitron, au stade jeune « stade trois feuilles », afin de mieux comprendre leurs stratégies de tolérance.

Les résultats obtenus, sous deux régimes hydriques (avec et sans stress hydrique), montrent que le déficit hydrique induit une diminution très hautement significative de la surface foliaire chez les deux variétés étudiées, avec un impact plus marqué chez Vitron. Cette réduction traduit une stratégie adaptative visant à limiter la transpiration et les pertes hydriques.

En revanche, l'effet du stress hydrique sur la teneur relative en eau (TRE) des feuilles n'est pas significatif. Une légère augmentation de la TRE a été observée chez les plants soumis au stress (ADH) par rapport aux témoins (SDH), suggérant une certaine tolérance au déficit hydrique. Cette stabilité pourrait s'expliquer par l'activation de mécanismes d'adaptation physiologique, tels que la fermeture des stomates ou l'accumulation de solutés compatibles (proline, sucres solubles), permettant de maintenir l'hydratation cellulaire en conditions défavorables.

Par ailleurs, une diminution significative de la teneur en chlorophylle a été enregistrée chez les deux variétés, ce qui peut être attribué à la dégradation des pigments chlorophylliens sous l'effet du stress hydrique, entraînant ainsi une baisse de l'activité photosynthétique.

Le stress hydrique a également provoqué une augmentation très significative de l'accumulation de proline. Cette réponse est l'une des manifestations physiologiques les plus caractéristiques en cas de stress hydrique. Selon Dreier (1978), l'augmentation de la teneur en proline constitue un mécanisme de protection des plantes face à toute situation entraînant une perte d'eau cytoplasmique (stress hydrique, salin, etc.).

En conclusion, cette étude a mis en évidence que les deux variétés de blé dur étudiées adoptent des stratégies de réponse similaires face au stress hydrique, bien que de manière différenciée. Les paramètres étudiés peuvent ainsi être considérés comme des critères pertinents pour la sélection et l'amélioration des variétés de blé dur destinées aux régions arides.

Perspectives

Les résultats obtenus dans cette étude offrent plusieurs pistes d'approfondissement. Les paramètres physiologiques évalués (TRE, proline, chlorophylle) pourraient servir d'indicateurs fiables pour la sélection de variétés de blé dur tolérantes à la sécheresse. Leur utilisation dans les programmes d'amélioration génétique permettrait de mieux cibler les génotypes résilients dès les premiers stades de croissance.

Il serait également pertinent d'étendre cette étude à d'autres stades de développement de la plante (montaison, floraison) et à un plus grand nombre de variétés, afin de confirmer la stabilité des réponses observées. Par ailleurs, l'analyse des mécanismes moléculaires associés aux réponses physiologiques pourrait enrichir la compréhension de la tolérance au stress hydrique.

Enfin, les résultats obtenus pourraient contribuer à adapter certaines pratiques culturales dans les zones à climat aride, participant ainsi à la mise en place d'une agriculture plus durable et mieux adaptée aux effets du changement climatique.

Références
Bibliographiques

Références bibliographiques

- 1- AAINB. (2003, 7 mars). Le Blé. AAINB. Consulté le [07/05/2025], sur <https://aainb.com/le-ble/>
- 2- ABBASSENE F., BOUZERZOUR H., HACHEMI L. 1998. Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone aride d'altitude. *Annal. Agron. INA*, 18 :24-36 p
- 3- Abouchi, H., Zid, E., & El Mourid, M. (2000). Effet du stress hydrique sur la croissance et la production de la biomasse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 20(3), 102-108.
- 4- Acevedo, E., Silva, P. and Silva, H., 2009. "Wheat Growth and Physiology," F.A.O. Corporate Repository, pp. 1-24.
- 5- Acevedo, E., Silva, P., & Silva, H., 2009. Wheat growth and physiology. *Dans FAO, Plant Production and Protection*, Series N°30: 39-70
- 6- Ait-Kaki S., 2008. *Contribution à l'étude de l'interaction génotype x milieu, pour la qualité technologiques chez le blé dur en Algérie*. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba 174 p.
- 7- Amokrane, O., Djekoun, A., & Mekliche, L. (2002). Effet du déficit hydrique sur la croissance, la teneur en chlorophylle et la conductance stomatique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Revue des Bioressources*, 2(2), 23-33.
- 8- Amour, H., Chaves, M. M., & Zarrouk, M. (2005). Réponses physiologiques des plantes à la sécheresse : mécanismes d'adaptation. *Cahiers Agricultures*, 14(6), 501-508.
- 9- Anjum, S. A., Xiao, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6(9), 2026-2032.
- 10- APG III (2009). An update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical journal of the Linnean Society*, 165:105- 121.
- 11- Araus, J. L., Slafer, G. A., Reynolds, M. P., & Royo, C. (2002). Plant breeding and drought in C₃ cereals: What should we breed for? *Annals of Botany*, 89 (7), 925-940.

Références bibliographiques

- 12- Bajji, M. (1999). Etude de la tolérance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) : aspects morphologiques, physiologiques et biochimiques (Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, Belgique).
- 13- Bajji, M., 1999. Étude des mécanismes de résistance au stress hydrique chez le blé dur : caractérisation de cultivars différant par leurs niveaux de résistance à la sécheresse et de variants somaclonaux sélectionnés In vitro. Thèse de doctorat. Univ . Louvain.
- 14- Belagrouz, A., & Chennafi, H. (2016). Analyse du comportement Du Blé Tendre sous labours contrastes. Éditions universitaires européennes.
- 15- Belaid D., 1996. Aspects de la céréaliculture Algérienne. *Ed. Office des publications universitaires* (Alger), 206 p.
- 16- Belaid, D., 1987 : *Etude de la fertilisation azotée phosphate d'une variété de blé dur (Hedba 3) en conditions de déficit hydrique*. Mémoire de magistère I.N.A. 109 p.
- 17- Ben Mbarek, K.,2017. Manuel de grandes cultures - Les céréales. *Éditions Universitaires Européennes*, 256 p.
- 18- Ben Naceur, M., Nachit, M. M., Gharbi, A., & Othmani, A. 1999. *Identification de mécanismes de tolérance à la sécheresse chez le blé dur (Triticum durum Desf.) en zones arides et semi-arides*. In *CIHEAM - Options Méditerranéennes. Série A: Séminaires Méditerranéens* (No. 40, pp. 103–110).
- 19- Bendif, N., 2017. *L'itinéraire technique du blé ?* Cours de formation programme P.R.C.P. Document interne ITGC.
- 20- Benlaribi, M.,1990. *Adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (Triticum durum Desf.) : Etude des caractères morphologiques et physiologiques*. Thèse Doctorat. Université Constantine.145 p.
- 21- Benmahammed, A., Djekoun, A., & Mekliche, L. 2008. Réponses morpho-physiologiques du blé dur (*Triticum durum* Desf.) à un stress hydrique en phase de montaison. *African Journal of Agricultural Research*, 3(6), 429-435.
- 22- Bensalem, M., Gharbi, M., & Zid, E., 2005. Accumulation de la proline et tolérance à la sécheresse chez des lignées de blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Revue des Régions Arides*, 1(14), 27-35.

Références bibliographiques

- 23- BESSAOUD O., 2018 : l'Algérie et le marché des céréales section 10. économie et politique session du 23 mai 2018 géostratégie alimentaire en méditerranée. l'enjeu céréalier, (format PDF) pp 03 au 26.
- 24- Blum, A. (1996). Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulation*, 20, 135-148.
- 25- Blum, A., 1996. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulation*, 20, 135–148.
- 26- Boulal, H., Zaghouane, O., El Mourid, M., & Rezgui, S. (2007). Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blés et orge) dans le Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie). TIGC, INRA, ICARDA, Algérie, 176.
- 27- Boulelouah, N., 2002. Analyse de la variabilité génotypique de l'absorption de l'azote chez le blé tendre. DEA.INA. Paris Grignon, 33p
- 28- Bounneche, H., 2015. Technologie de fabrication et qualité. Mémoire de magister, I.N.A.T.A.A, Constantine. 88 p.
- 29- Bourahla, F., & Hadji, K. (2009). Effet du déficit hydrique sur la teneur en chlorophylle chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Revue des Sciences Agronomiques*, 12(1), 45-52.
- 30- Bousba, R., Djebbar, M. R., & Benyahia, A. (2009). Effet du stress hydrique sur la photosynthèse et la teneur en chlorophylle chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Revue des Sciences de la Vie*, 3(2), 67–75.
- 31- Bousba, R., Ykhlef, N. & Djekoun, A., 2009. Water use efficiency and flag leaf photosynthetic in response to water deficit of durum wheat (*Triticum durum* Desf). *Journal of Agricultural Sciences* 5. (5): 609 -616 p.
- 32- Boyeldieu J. (1999). Blé tendre, Techniques Agricoles-Fascicule n°2020, Paris
- 33- Boyeldieu, J., 1997. Blé tendre - Techniques Agricoles .Fascicule n°2020. 360 p.
- 34- Brisson, N. 1996. Modélisation de la croissance du blé dur en relation avec la disponibilité en eau du sol .Thèse de doctorat, Université Paris-Sud.
- 35- Callot, H. (1984). Techniques d'expérimentation en agronomie. Paris : Lavoisier.

Références bibliographiques

- 36- CHABI, H. ; DEROUICHE, M. ; KAFI, M. et KHILASSI, E., 1992. Estimation du taux d'utilisation du potentiel de production des terres à blé dur dans le Nord de la wilaya de Sétif. Thèse. Ing .INA. El Harrach. 317 p.
- 37- Chadalavada, S. (1994). Proline accumulation and its protective role in plants under abiotic stress. *Journal of Plant Physiology*, 144 (4-5), 604-610.
- 38- Chadouli, A., Djane-Mohamed, M., 2015. L'irrigation d'appoint du blé. *Revu ITGC* : 14p.
- 39- Chaves, M.M., Pereira, J.S., Marco, J., Rodrigues, M.L., Ricardo, P.P., Osorio, M.L., Carvalho, T., Faria T. & Pinheiro, C ., 2002. How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and growth. *Annals of Botany* 89: 907-916.
- 40- Cherian, S., Reddy, M. P., & Pandya, J. B., 2005. Study of salt stress in *Avicennia marina* using biochemical markers. *Plant and Soil*, 273, 299-305.
- 41- Clement-Grandcourt, M. et Part, J., 1970 - Les céréales. Collection d'enseignement agricole. 2ème Ed. Paris J.-B. 351-360
- 42- Codacioni, P., Simon, H., Lecoœur, X., 1989. Produire des céréales à paille. Collection : Agriculture d'aujourd'hui. Paris .350 p.
- 43- Cook, J., Johnson, V.A., Allan, R. E., 1991. Le blé. In :Greef.M.W.(Eds). Méthodes traductionnelles de sélection des plantes: un aperçue historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne. Organisation de coopération et de développement économiques, Belgique, 27-38p.
- 44- Cornic, G., Massacci, A., 1996. Leaf photosynthesis under drought stress. In: Baker, NR (ed) *Photosynthesis and the environment*. Springer, Netherlands, pp 347-366
- 45- CRETOIS, A., 1985. Valeur technologique de quelques variétés de blé. *Bull. Industries des céréales* N°20, 26, 32.
- 46- Darera, F. A., Kramer, P. J., & Boyer, J. S. (1969). Water deficits and plant growth: Reduction in leaf area as an adaptive response to water stress. *Plant Physiology*, 44(1), 125-129.

Références bibliographiques

- 47- Debiton, C. (2010). Identification des critères du grain de blé (*Triticum aestivum* L.) favorables à la production de bioéthanol par l'étude d'un ensemble de cultivars et par l'analyse protéomique de lignées isogéniques waxy. Thèse.Doct. Univ, Blaise Pascal.
- 48- Diehl, R.,1975. Agriculture générale. Edition J-B Baillière (2ème éd). 396 p.
- 49- Digo, C. (2002). Nutrition azotée des plantes et stress hydrique. Sécheresse et plantes, Paris : Tec & Doc, 135–150.
- 50- Djebbar, R., 2012. Etude des mécanismes physiologiques de tolérance au stress hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) et leur implication dans la sélection variétale. Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie.
- 51- Dreier, W. (978). Possibilité d'une élaboration d'un test de présélection des variétés de plantes ayant une haute tolérance ou résistance aux sels, sur la base de la relation entre la teneur en proline des tissus végétaux et la résistance aux sels. Journées d'étude et de recherche agronomique. I.N.A. El Harrach, Algérie.
- 52- Drein, D., & Going, B. (1974). Modifications of the Troll and Linsley method for improved microclimatic analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 13(3), 215-220.
- 53- Dubos, C. (2001). Rôle des composés phénoliques dans l'adaptation des plantes au stress hydrique .Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I.
- 54- DUGO, M.V.G., 2002. Effet du déficit hydrique sur l'état de nutrition azotée chez les graminées fourragères. Thèse Université de Poitiers (France), 189p.
- 55- Durand, M., 2007. Structure et fonctionnement des stomates dans la régulation des échanges gazeux. *Physiologie Végétale*, 42(3), 215–223.
- 56- Ehdaie, B., Alloush, G. A., Madore, M. A., & Waines, J. G., 2006. Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat: I. Postanthesis changes in internode dry matter. *Crop Science*, 46(2), 735-746.
- 57- El Fakhri, R., Lahlou, A., & Karrou, M., 2010. Réponses morpho-physiologiques du blé tendre au stress hydrique. *Al Awamia*, 124, 39–58.
- 58- El Jaafari, S., 1993. Contribution à l'étude des mécanismes biophysiques et biochimiques de résistance à la sécheresse chez le blé. Thèse de doctorat. Univ.Gembloux.Belgique. 214 p.

Références bibliographiques

- 59- El Jaafari, S., Ibriz, M., El Antri, A., & Chlyah, A. (2000). Sélection de génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) tolérants à la sécheresse. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 4(3), 186-194.
- 60- FAO. (2007). Food outlook: Global market analysis - June 2007. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/a-a1080e.pdf>
- 61- FAO. (2020). Suivi et analyse des politiques agricoles et alimentaires en Algérie. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- 62- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A., 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1): 185-212.
- 63- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212.
- 64- Farooq, S., and Azam, F., 2005. The use of cell membrane stability (CMS) technique to screen for salt tolerant wheat varieties. *J. Plant Physiol.* 163, 629-637.
- 65- Feillet, P., 2000. Le grain de blé composition et utilisation. Ed. INRA, France.308p.
- 66- Feliachi, A., Djekoune, N., & Bouznad, Z., 2001. Effet de différents facteurs sur la germination des graines de pois chiches (*Cicer arietinum* L.). *Acta Botanica Gallica*, 148(4), 357-363.
- 67- Francis et al., (1970) "Cooper enzymes in isolated chloroplastes". *Plant Physiol.*, 24 (1949), pp: 1-15.
- 68- Gahrtn-Chherti, R., & Lales, B. (1990). Stomatal responses to water stress in different plant species. *Plant Science*, 65, 87-95.
- 69- Gao, X. (2000). Mechanisms of plant adaptation to drought stress: Stomatal regulation and water conservation. *Journal of Plant Physiology*, 156 (2), 123-130.
- 70- GATE, P. (1995). *Ecophysiologie du blé*, Edit. Lavoisier, Paris, Techniques et documentation, 429, p.

Références bibliographiques

- 71- Golan, G., Hendel, E., Méndez Espitia, G. E., Schwartz, N., & Peleg, Z. (2018). Activation of seminal root primordia during wheat domestication reveals underlying mechanisms of plant resilience. *Plant Cell and Environment*, 41(4), 755–766.
- 72- Gregory, P.J., McGowan, M., Biscoe, P.V., Hunter, B. (1978). Water relations of winter wheat:513 Growth of the root system. *The Journal of Agricultural Science* 91, 91-102.
- 73- Grieu, P., Guilioni, L., & Tardieu, F. (2008). Stomatal conductance and water potential regulation in plants under drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 46(1), 1–10.
- 74- Hare, P. D., Cress, W. A., & Van Staden, J. (1998). Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant, Cell & Environment*, 21(6), 535-553.
- 75- Hikosaka, K., Noguchi, K., & Terashima, I. (2006). Response of leaf chlorophyll content and photosynthesis to temperature and light in plant species. *Functional Ecology*, 20 (3), 300-306.
- 76- HOAGLAND, D., 1938. The water culture method for growing plant without soil. *Calif. Agric. Exptl. Sta. Cir. 347: PP1, 39.*
- 77- HOPKINS, W.G., 2003. *Physiologie végétale*. 2ème édition. De Boeck, Bruxelles.
- 78- Jameux, J. M., Chartier, R., & Boiffin, J. (1997). Effets du déficit hydrique sur la turgescence et la croissance foliaire des céréales. *Agronomie*, 17(3), 145-153.
- 79- Karima, F., Benabdeli, K., & Aissat, S. (2012). Effet du stress hydrique sur la croissance et la teneur en chlorophylle de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Courrier du Savoir*, 13, 79-85.
- 80- Karou, M., Haffid, R., Smith, D. N., & Samir, K., 1998. Roots and growth water use and water use efficiency of spring durum wheat under early-season drought. *Agronomy*, 18: 181-186.
- 81- Kavi Kishor, P. B., Sangam, S., Amrutha, R. N., Laxmi, P. S., Naidu, K. R., Rao, K. R. S. S., Rao, S., Reddy, K. J., Theriappan, P., & Sreenivasulu, N. (2005). Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: Its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current Science*, 88(3), 424-438.
- 82- Kelaleche, H., 2020- Résumé d'écophysiologie des organismes vivants. Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi. B.B.A. 8 p.

Références bibliographiques

- 83- Kelaleche, H., 2020. Physiologie végétale (Support de cours). Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi. B.B.A. 22 p.
- 84- Kirby, E.J.M. (2002). Botany of the wheat plant. In Bread wheat - Improvement and production, B.C. Curtis, S. Rajaram, and H. Gomez Macpherson, eds. (Rome: Food and Agriculture Organisation)
- 85- Laberche J-C, 2004. La nutrition de la plante In Biologie Végétale. Dunod. 2e (éd). Paris: 154 -163p.
- 86- Lamaze, T., Chartier, M., & Sinoquet, H. (1994). Croissance et développement des plantes. Collection Biologie Végétale, Masson
- 87- Larcher, W., 2001. Ecole thématique CNRS « Stress biotiques et abiotiques : Physiologie et Génétique de la résistance ». In Stress biotiques et abiotiques : Physiologie et Génétique de la résistance : pp. 3-5.
- 88- LEBON E., 2006. Effet du déficit 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, 4 p.
- 89- Lebon, E., Pellegrino, A., Louarn, G., & Lecoœur, J. (2004). Branch development in grapevine (*Vitis vinifera* L.): The seasonal pattern of leaf area and its implications for radiation balance. *Journal of Experimental Botany*, 55(402), 1195-1203.
- 90- Leclerc, J-C., 1988. Ecophysiologie végétale. Editions l'université de Saint Etienne. 277 p.
- 91- Lecoœur, J., 2007. Influence d'un déficit hydrique sur le fonctionnement d'un couvert végétal cultivé Montpellier. SupAgro, lecoeur@supagro.INRA.fr
- 92- Levitt, J. (1980). Responses of plants to environmental stresses (2nd ed., Vol. 1). Academic Press.
- 93- Madhava Rao, K. V., Raghavendra; A. S., & Reddy, K. J., 2006. Physiology and molecular biology of stress tolerance in plants. Springer. 351 p.
- 94- Martin-Prével, P., Gagnard, J., Gautier, P., 1984. L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Paris : Lavoisier Tec et Doc, 810 p.

Références bibliographiques

- 95- Mathieu,C., Audoye, P., Chossat, J-C.; 2007. Bases techniques de l'irrigation par aspersion. Edition : Lavoisier,Tec et Doc,Paris (FRA). 474p.
- 96- MAUME L et DULACJ ; 1936 : Echantillonnage rationnel de la plante en vue des analyses chimiques comparatives C.R.A cd ,A.C.D agric France _ Naville M ., (2005) , La biodiversité des espèces cultivées : Analyse dans le cas du blé nonparametric méthod.j.agr.sci.tech(2015)
- 97- Mekhlouf A, Bouzerzour H, Bemahammed A, Hadj Sahraoui A. et Harkati N.,2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi- aride. Sécheresse, 2006, 17(4) : 507-513.
- 98- Mesrane, Dihia. L'évolution de la production de blé dur (*Triticum durum*) dans la Daïra de Bouira et El Hachimia. 2018. Thèse de doctorat. Université de Bouira.
- 99- Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche (MADR). (2017). Rapport annuel sur les filières agricoles : Filière céréalière. Alger : MADR, Direction des statistiques agricoles.
- 100- Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7(9), 405-410.
- 101- MOGENSEN, V- 0., 1991. Growth rate of grains of barley in relation to drought. *Acta. Agric. Scand.* 41 : 345 - 353.
- 102- Mojid, M. A., Mousumi, K. A., & Ahmed, T., 2020. Performance of wheat in five soils of different textures under freshwater and wastewater irrigation. *Agricultural Science*, 2(2), pp.89-98
- 103- Monneveux, P., & Nemmar, M. (2020). Tolérance à la sécheresse chez les céréales : rôles physiologiques de la proline et autres osmoprotecteurs. *Revue des Sciences Agronomiques*, 45(2), 123-134.
- 104- Monneveux, P., Nemmar. M. (1986). Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, 1986, 6 (6), pp.583-590.

Références bibliographiques

- 105- Mouellef, A. (2010). Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique, Mémoire de Magister, Option .MENTOURI, Constantine. Pp 8-9.
- 106- Moule, C.,1971. Céréales 2. Phytotechnie spéciale. La maison rustique, Paris, 235p.
- 107- Nachit, M.M., Picard, E., Monneveux, P., Labhilili, M., Baum, M. et Rivoal, R., 1998. Présentation d'un programme international d'amélioration du blé dur pour le bassin méditerranéen. Cahiers Agric., 7 : 510-515p.
- 108- Nasr, M., & Ahmed, A. (2020). Impact of soil physical and chemical properties on plant growth and yield. *Journal of Agricultural Science*, 12(3), 45–58.
- 109- Naville, M., 2005. La biodiversité des espèces cultivées : Analyse dans le cas du blé, Paris: Université Paris XI, Paris, 20p.
- 110- Nedjah, I. (2015). Changements physiologiques chez des plantes (Blé dur *Triticum durum* Desf.) exposées à une pollution par un métal lourd (plomb). Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar – Annaba.98p.
- 111- Omari, M. & Tahri, A. (2021). La maladie de la tache auréolée du blé dans la région d'Adrar. Mémoire de fin d'études, Université d'Adrar, Algérie
- 112- Oukarroum, A. (2007). Vitalité des plantes d'orge (*Hordeum vulgare* L.) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence chlorophyllienne. Thèse de doctorat. Université de Genève Suisse. 16 p.
- 113- Paul M., Planchon C. et Ecochard R., (1979). Etude des relations entre le développement foliaire, le cycle de développement à la productivité chez le soja. *Ann Amélio.Plantes*. 29 (5) : 479-492.
- 114- Paul, K. E., Ewan, B. E., & Rawson, H. M. (1979). A rapid method for estimating leaf area in wheat. *Crop Science*, 19(6), 882-883.
- 115- Plaut, Z., Butow, B. J., Blumenthal, C. S., & Wrigley, C. W. (2004). Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature. *Field Crops Research*, 86 (2–3), 185– 198.
- 116- Prats,J., Clement-Grandcourt,M., Desclaude, G., 1971. Les céréales. Ed : Paris, J.B. Baillièrè (2ème édition).351p.

Références bibliographiques

- 117- Royo, C., Abaza, M., Blanco, R., & del Moral, Luis. F- G., 2000. Triticale grain growth and morphometry as affected by drought stress, late sowing and simulated drought stress. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27(11): 1051-1059.
- 118- Schobert, B., & Tschesche, H. (1978). Unusual properties of proline and its accumulation in plants under stress. *Plant, Cell & Environment*, 1(2), 135-141.
- 119- Schuhwerk D., Nakhforoosh, A., Kutshka, S., Bodner, G., Rausgruber, H., 2010. Field-screening of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) for drought tolerance. In *Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs. LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irdning, Austria.* p. 147-154
- 120- Seyed, Y.S. Lisar, Rouhollah M, Mosharraf M, Hossain M, Ismail M, Rahman M., 2012: *Water Stress in Plants: Causes, Effects and Responses*, Water Stress. 978-953-Edition: INTECH. 16 p.
- 121- Slama, A., Ben Salem, M., Ben Naceur, M., Zid, E., 2005. Les céréales en Tunisie: production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. *Sècheresse*, 16 (3) : 225-229.
- 122- Slama, A., Ghnaya, T., Hessini, K., Messedi, D., Savoure, A., & Abdelly, C. (2005). Physiological response of two wheat species to long term salinity. *Comptes Rendus Biologies*, 328(8), 847-855
- 123- Slama, I., Smaoui, A., & Ben Salah, H., 2005. Effets de la densité stomatique sur la résistance au stress hydrique chez les céréales. *Revue des Sciences Agronomiques*, 58(2), 89-97.
- 124- Soltner, D. (1999). *Les grandes productions végétales : Céréales, plantes sarclées, prairies et autres fourragères. Sciences et Techniques Agricoles. 19e éd., pp. 50-65.*
- 125- 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.*
- 126- Soltner, D., 1990. *Les grandes productions végétales : Céréales, plantes sarclées, prairies. Sciences et Technique Agricoles éd., 244p.*
- 127- Soltner, D., 2000. *Phytotechnie générale : les bases de la production végétale. Tome 1 : Le Sol et son amélioration. Ed. Collection Sciences et Techniques Agricoles. 467p.*

Références bibliographiques

- 128- soltner, D.,1988: Les grandes productions végétales. Les collections sciences et techniques agricoles, Ed. 16^{ème} éditions ; 464 P.
- 129- Sousa, C. A. (2020). La germination des graines : processus physiologiques et facteurs influents. Paris : Éditions BioAgriTech, 25–26.
- 130- Taiz, L., & Zeiger, E., 2010. Plant Physiology (5th ed.). Sinauer Associates Inc.,Sunderland. 782 p.
- 131- Tardieu, F., 2011. Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: just design the right drought scenario. Journal of experimental botany, 63, 25-31.
- 132- Temagoult, A. (2009). Effet du déficit hydrique sur la croissance et la productivité du blé dur (*Triticum durum* Desf.) [Mémoire de Magister, Université de Batna]. Université Hadj Lakhdar – Batna, Algérie, p. 45.
- 133- Teulat, B - Rekika, D - Nachit, M.M - Monneveux, P: Comparative osmotic adjustments in barley and tetraploid wheats (Poměrné osmotické přizpůsobení u ječmene a tetraploidních pšeníc.). Plant Breeding, 116, 1997, 6, 519-523 ISSN: 0179-9541
- 134- Toumi, M., Barris, S., & Aid, F. (2014). Effects of water and osmotic stress on the accumulation of proline and malondialdehyde (MDA) in two varieties of colza (*Brassica napus* L.). Bulletin de l'Institut Scientifique: Section Sciences de la Vie, 36, 17-24.
- 135- Triboï, E., 1990. Modèle d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre. Agronomie (10). pp : 191-200.
- 136- Troll, C., & Linsley, B. (1955). *Méthodes d'analyse microclimatique appliquées aux sciences de l'environnement*. Paris : CNRS Éditions, pp. 122–124.
- 137- Turner, N- C., 1986. Adaptation to water deficits: A changing perspective. Australian Journal of Plant Physiology, 13(2), 175-190.
- 138- Tuteja, N., 2007. Abscisic acid and abiotic stress signaling. Plant Signaling & Behavior, 2(3). P:135-138.
- 139- Wang, W., Vinocur, B., & Altman, A. (2003). Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. Planta, 218(1), 1-14.

Références bibliographiques

- 140- Yaklef, N., 2001. Photosynthèse, activité photochimique et tolérance au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Dref). Thèse de doctorat d'Etat, Université Mentouri, Constantine. 146 P
- 141- Yokota, H., Tanaka, N., Kusaba, S., Sasanuma, T., & Hara, Y., 2006. Physiological response of spring wheat cultivars to water stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 192(5), 345-355.
- 142- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*, 14(6), 415-421.
- 143- -ZENASNI. F et BELHADJ. F, 2006 –Contribution à l'étude de l'influence de la Salinité des sols et des eaux sur les céréales cas de blé tendre et l'orge dans la plaine de Sidi Bel Abbes ; Mémoire de fin d'étude. Faculté de science. Agronomie (Tlemcen).
- 144- Zerrad, W., Bousba, R., & Djebbar, M. R. (2008). Effet du stress hydrique sur l'accumulation de proline chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Sciences & Technologie. C, Biotechnologies*, 27, 52-57.
- 145- Zoghmar, A. (2007). Étude de la variabilité génétique de la profondeur d'enracinement chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). Mémoire de fin d'études, INA Algérie.

Annexe

Annexe

Annexe 1 : Analyse de la variance (ANOVA) des différents paramètres étudiés

Tableau 1 : Analyse de la variance (ANOVA) de la surface foliaire de la troisième feuille chez deux variétés de blé dur (Waha et Vitron) sous deux régimes hydriques (SDH et ADH)

	SC	DDL	MC	F	p
Variété	19,1875	1	19,1875	8,7622	0,018144
Traitement	48,1441	1	48,1441	21,9854	0,001564
Variété*Traitement	11,1169	1	11,1169	5,0766	0,054301
Erreur	17,5185	8	2,1898		

Tableau 2 : Analyse de la variance (ANOVA) de la teneur relative en eau de la troisième feuille chez deux variétés de blé dur (Waha et Vitron) sous deux régimes hydriques (SDH et ADH).

	SC	DDL	MC	F	p
Variété	503,24	1	503,24	3,5627	0,095793
Traitement	48,44	1	48,44	0,3429	0,574282
Variété*Traitement	21,57	1	21,57	0,1527	0,706138
Erreur	1130,02	8	141,25		

Tableau 3 : Analyse de la variance (ANOVA) de la teneur en chlorophylle brute de la troisième feuille chez deux variétés de blé dur (Waha et Vitron) sous deux régimes hydriques (SDH et ADH).

	SC	DDL	MC	F	p
Variété	9,945	1	9,945	3,3885	0,102922
Traitement	138,246	1	138,246	47,1033	0,000129
Variété*Traitement	5,169	1	5,169	1,7611	0,221106
Erreur	23,480	8	2,935		

Tableau 4 : Analyse de la variance (ANOVA) de la teneur en proline de la troisième feuille chez deux variétés de blé dur (Waha et Vitron) sous deux régimes hydriques (SDH et ADH).

	SC	DDL	MC	F	p
Variété	4,47	1	4,47	0,0104	0,921136
Traitement	25965,60	1	25965,60	60,7026	0,000053
Variété*Traitement	86,19	1	86,19	0,2015	0,665429
Erreur	3422,01	8	427,75		

Annexe 2 : Courbe d'étalonnage de la proline (à 528 nm)

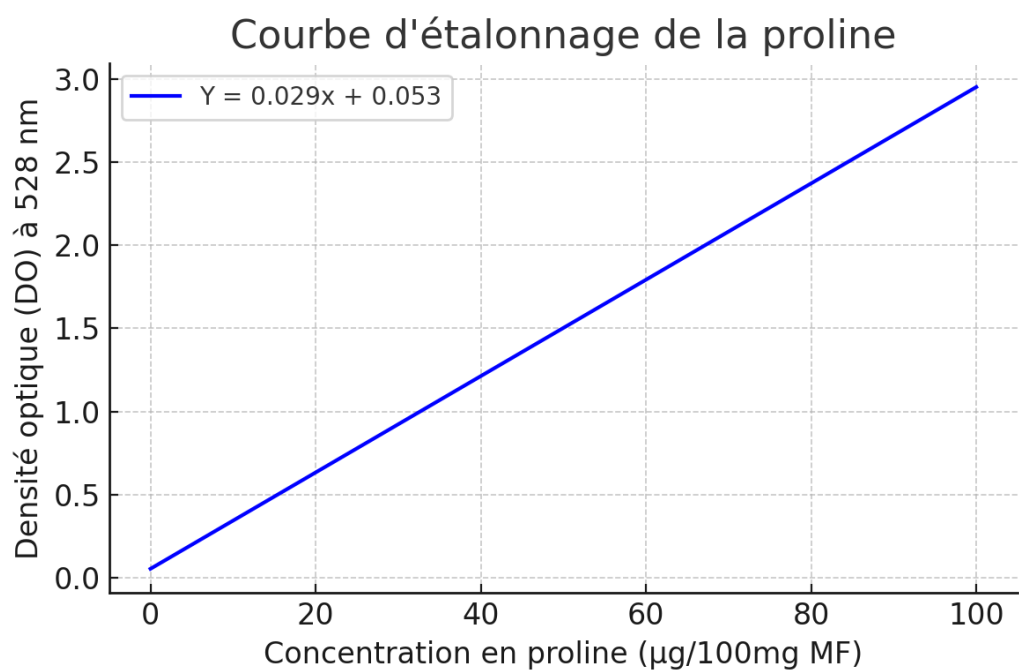


Figure : Courbe d'étalonnage de la proline. La densité optique (DO) est mesurée à 528 nm en fonction de la concentration en proline ($\mu\text{g}/100$ mg de matière fraîche). Équation de la droite : **$Y = 0.029x + 0.053$** .

Résumé

Le stress hydrique est l'un des principaux facteurs limitant la productivité du blé dur (*Triticum durum* Desf.). Ce travail vise à évaluer ses effets sur des paramètres morphologiques (surface foliaire) et physiologiques (teneur relative en eau, chlorophylle totale et proline) chez deux variétés : Waha et Vitron. Les résultats révèlent une réduction significative de la surface foliaire et de la teneur en chlorophylle sous déficit hydrique. En revanche, aucune différence significative n'a été notée pour la teneur relative en eau. Une accumulation importante de proline a été observée dans les deux variétés en réponse au stress. Bien que les réactions soient globalement similaires, leur intensité varie selon la variété. Ces résultats soulignent l'importance de la sélection de génotypes tolérants à la sécheresse pour stabiliser les rendements et favoriser une agriculture durable.

Mots clés : Blé dur (*Triticum durum* Desf), Stress hydrique, Paramètres morphologiques, physiologiques, Variétés

Abstract

Water stress is one of the main limiting factors for the productivity of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). This study aims to evaluate its effects on morphological (leaf area) and physiological (relative water content, total chlorophyll, and proline) parameters in two varieties: Waha and Vitron. The results revealed a significant reduction in leaf area and chlorophyll content under water deficit. In contrast, no significant difference was noted in the relative water content. A substantial accumulation of proline was observed in both varieties in response to stress. Although overall reactions were similar, their intensity varied between varieties. These findings highlight the importance of selecting drought-tolerant genotypes to stabilize yields and promote sustainable agriculture.

Keywords: Durum wheat (*Triticum durum* Desf.), Water stress, Morphological parameters, Physiological parameters, Varieties

ملخص

يُعدّ الإجهاد المائي أحد العوامل الرئيسية التي تحدّ من إنتاجية القمح الصلب (*Triticum durum* Desf). يهدف هذا العمل إلى تقييم تأثير هذا الإجهاد على بعض المعايير المورفولوجية (المساحة الورقية) والفسولوجية (المحتوى النسبي من الماء، الكلوروفيل الكلي والبرولين) لدى صنفين من القمح الصلب (Waha) و (Vitron). أظهرت النتائج انخفاضاً ملحوظاً في المساحة الورقية وفي محتوى الكلوروفيل تحت ظروف الإجهاد المائي. بالمقابل لم تُسجّل فروق معنوية في المحتوى النسبي من الماء. كما لوحظ تراكم كبير للبرولين في كلا الصنفين استجابةً للإجهاد. وعلى الرغم من أن الاستجابات كانت متشابهة عموماً، إلا أن شدتها اختلفت حسب الصنف. وتؤكد هذه النتائج أهمية اختيار الأصناف المتحملة للجفاف من أجل تثبيت الإنتاج وتحقيق زراعة مستدامة.

الكلمات المفتاحية:

القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) ، الإجهاد المائي، المعايير المورفولوجية، المعايير الفسولوجية، الأصناف