



Étude comparative de six variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) vis-à-vis du stress hydrique

Mots clés: blé dur, stress hydrique, polyéthylène glycol, proline.

Key Words: durum wheat, water stress, polyethylene glycol, proline.

1 RESUME

Les effets d'un déficit hydrique induit par du polyéthylène glycol (PEG) ont été étudiés à la fois durant la phase germination (levée) et la phase fin montaison (remplissage des grains) chez six variétés de blé dur (Khiar, Om Rabia3, Maali, Mahmoudi, Biskri, et Chili). Divers paramètres physiologiques, biochimiques et agronomiques (Teneur en chlorophylle, Teneur en proline, Rendement en grains par plante, Rendement biologique, Poids de 1000 grains) ont été évalués. Les résultats obtenus montrent des différences génotypiques de sensibilité au stress d'autant plus importantes que le stress est sévère. L'application d'un potentiel hydrique de -0,9 MPa a totalement inhibé l'émission de la coléoptile. La germination et l'émission des racines sont fortement affectées et même inhibées à -1,5 MPa. Les variétés Khiar et Chili s'avèrent les plus tolérantes au stress osmotique pendant ce stade précoce. Les résultats obtenus montrent que le déficit hydrique imposé a affecté négativement et significativement tous les paramètres étudiés. Il a été observé que les variétés Khiar et Chili qui ont la teneur relative en eau la plus élevée accumulent plus de sucres solubles et de proline que les autres variétés et ont le plus faible indice de sensibilité au stress. Ces deux génotypes sont les mieux adaptés à la sécheresse et peuvent être utilisés comme donneur de gènes de tolérance à la sécheresse dans un programme d'amélioration de la production du blé dur.

ABSTRACT

The effects of polyethylene glycol (PEG)-induced water deficit were studied at both phases of germination (emergence) and end of stem elongation (grain filling) of six durum wheat varieties (Khiar, Om Rabia3, Maali, Mahmoudi, Biskri, and Chili). Various physiological, biochemical and agronomic parameters (Chlorophyll content, Proline content, Grain yield per plant, Biological yield, and 1000 seed weight) were evaluated. The results obtained

showed genotypic differences in sensitivity to the stress as more important as the stress intensified. The application of a water potential of -0.9 MPa completely inhibited the emergence of the coleoptiles. The germination and the emission of the roots are strongly affected and even inhibited at -1.5 MPa. The varieties Khiar and Chili were the most tolerant to osmotic stress during this early stage. The results show that the imposed water deficit significantly and negatively affected all the parameters studied. It was observed that the varieties Khiar and Chili which gave higher relative water content accumulated more soluble sugars and proline than other varieties and also the lowest sensitivity index stress. These two genotypes were better adapted to drought and can be used as donor genes in a drought tolerance program to improve the production of durum wheat.

2 INTRODUCTION

Les céréales constituent une part importante des ressources alimentaires de l'homme et de l'animal (Karakas *et al.*, 2011). Parmi ces céréales, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) compte parmi les espèces les plus anciennes et constitue une grande partie de l'alimentation de l'humanité, d'où son importance économique. En Tunisie, par l'importance des superficies occupées et par son poids dans la sécurité alimentaire, le secteur céréalier occupe une place importante dans la structure de la production agricole et se détache par sa dimension socio-économique. Les emblavures réservées aux céréales (blé dur, blé tendre, orge et triticale) sont en moyenne de 1.5 million d'hectares. Ainsi, le blé dur représente à lui seul 46,6 % des emblavures (Slama *et al.*, 2005). Les stress environnementaux, notamment le stress hydrique, limitent sérieusement la croissance des plantes ainsi que la productivité végétale. En Tunisie, la production de céréales est confrontée à plusieurs contraintes biotiques et abiotiques d'ordres pédologiques et/ou climatiques. Parmi ces contraintes, la sécheresse est considérée comme le facteur le plus important limitant la production des céréales. Plusieurs études ont montré que la résistance à la sécheresse a été associée à plusieurs caractéristiques d'ordre phénologique, morphologique, physiologique et biochimique reflétant différents types d'adaptation (Monneveux et Nemmar, 1986). Certains auteurs ont conclu donc, que les variétés de céréales résistantes au déficit hydrique se caractérisent par une stratégie regroupant en

même temps, un ensemble des mécanismes d'adaptation (Rejeb et Ben Salem, 1993). En outre, Plusieurs travaux ont aussi montré que le polyéthylène glycol (PEG) est un inducteur de stress hydrique osmotique (Kouakou *et al.*, 2008). Le stress hydrique provoque la mise en place d'un état de régulation hydrique de la plante qui se manifeste par la fermeture stomatique et par une régulation du potentiel osmotique (Anjum *et al.*, 2011). Cette régulation est réalisée grâce à une accumulation de composés osmorégulateurs conduisant à une réduction du potentiel osmotique permettant ainsi le maintien du potentiel de turgescence. L'accumulation de ces composés organiques a été mise en évidence chez plusieurs espèces végétales soumises à la contrainte de stress hydrique tels que le riz, le blé tendre et la pomme de terre (Farhad *et al.*, 2011; Moaveni, 2011; Xiong *et al.*, 2012). La liaison entre l'aptitude d'accumulation de ces solutés et la tolérance des plantes au stress hydrique a fait l'objet de nombreuses discussions (Tahri *et al.*, 1998; Qayyum *et al.*, 2011). Cette accumulation varie dans de larges proportions suivant l'espèce, le stade de développement et le niveau de stress hydrique. Les sucres et les acides aminés libres sont les solutés les plus importantes qui s'accumulent chez les céréales en conditions de déficit hydrique (Zerrad *et al.*, 2008). Bensari *et al.* (1990) ont montré que chez le soja, la teneur foliaire en saccharose contribuerait au maintien d'une pression osmotique élevée limitant les pertes d'eau par transpiration. Certaines études menées sur

L'osmorégulation indiquent que les acides aminés libres peuvent jouer un rôle significatif dans ce processus. Jones *et al.* (1980) rapportent que leur teneur augmente de façon très significative chez le sorgho et le tournesol en cas de stress hydrique. Parmi les acides aminés pouvant être accumulés, la proline représente l'une des manifestations les plus remarquables des stress hydriques et osmotiques. Son rôle d'osmoticum a été rapporté par de nombreux auteurs (Stewart and Lee, 1974; Kauss, 1977; Pirzad *et al.*, 2011; Xiong *et al.*, 2012). Plusieurs sélectionneurs et physiologistes ont utilisé la capacité de son accumulation dans le criblage de génotypes résistants au déficit hydrique (Benlarabi and Monneveux, 1988; Bellinger *et al.*, 1989) sur le blé dur et le maïs

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 Matériel végétal : Les semences des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) utilisées dans cette étude sont fournies par la Coopérative Centrale de Semences (COSEM, Tunisie). Les essais ont porté sur six variétés de blé dur appartenant à deux groupes : variétés anciennes et variétés améliorées. Les variétés anciennes sont Chili, Mahmoudi et Biskri. Les variétés améliorées sont Khiar, Maali et Om Rabia3.

3.2 Mise en stress hydrique : Le déficit hydrique a été induit par l'application de différents traitements de polyéthylène glycol (PEG-6000) comme indicateur de stress hydrique osmotique. Une gamme de potentiels hydriques (0 MPa, -0,3 MPa, -0,6 MPa, -0,9 MPa, -1,2 MPa et -1,5 MPa) a été produite en utilisant des solutions de PEG-6000 préparées selon la méthode décrite par Michel *et al.* (1973). Vingt cinq (25) grains de chaque variété de blé dur ont été placés dans une boîte de Pétri sur une double couche de papier filtre imbibée avec soit 5 ml d'eau distillée (0 MPa), soit avec l'une des solutions de PEG-6000. Chaque traitement a été répété 4 fois. Après une semaine d'incubation à l'obscurité et à 20°C, les grains germés sont comptés et les boîtes sont transférées dans une chambre de culture à une température de 20°C, une humidité relative entre 70 et 80 %, une luminosité de 724 $\mu\text{E m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ et une photopériode de 16 h pendant 7 jours. A la fin de l'essai, le taux de germination, la longueur et le nombre de racines, la

respectivement. La présente étude vise à évaluer chez trois anciennes variétés (Chili, Mahmoudi et Biskri) et trois autres variétés améliorées (Khlar, Maali et Om Rabia3) de blé dur Tunisien l'effet du stress hydrique sur divers caractères physiologiques et biochimiques tels que, la synthèse de la proline et le taux des sucres solubles d'une part, et les relations entre ces deux caractères et d'autres caractères phénologiques et morphologiques d'autre part. L'étude de la réponse de six variétés de blé dur et l'identification des caractères de résistance à la sécheresse peuvent nous permettre de sélectionner un matériel végétal résistant, pouvant croître et donner des rendements satisfaisants dans les zones sujettes à des déficits hydriques périodiques.

longueur du coléoptile, la longueur des feuilles ont été déterminés pour chaque variété soumise au stress hydrique. Pour étudier l'effet du déficit hydrique induit par un arrêt d'arrosage sur plusieurs paramètres morpho-physiologiques et agronomiques du blé dur et après germination en boîtes de Pétri, les plantules de six variétés de blé dur ont été repiquées sous serre dans des pots en plastique de 10 litres (12 Kg de sol/pot). La texture du sol est de type limono-argileuse (argile : 35 %, limon fin : 9 %, limon grossier : 15 %, sable fin : 24,3 %, sable grossier : 16,7 %) avec un pH de 8,71 et une salinité de 0,45 g/l. Le semis a été effectué manuellement à raison de 10 grains réparties d'une façon homogène sur la surface de chaque pot à une profondeur de 2-3 cm. Juste après la levée, les plantes ont été simultanément irriguées tous les 5 jours à la capacité au champ. Au stade gonflement, les pots ont été répartis en deux lots constituant respectivement des plantes témoins et des plantes stressées. Le stress hydrique est imposé en interrompant l'arrosage des pots pendant une période de deux semaines et durant trois stades successifs (gonflement, épiaison-floraison et floraison-remplissage des grains). Ces stades ont été volontairement choisis à cause de la sensibilité du blé dur au déficit hydrique. Ces stades correspondent à des périodes critiques étant donné que l'élaboration des composantes de rendement s'effectue durant ces phases de développement

(Darui *et al.*, 2011). Les plantes stressées ont été ré arrosées à la fin de chaque période de stress hydrique et les plantes témoins sont maintenues toujours à la capacité au champ.

3.3 Analyses et mesures effectuées :

3.3.1 Paramètres physiologiques :

3.3.1.1 Teneur relative en eau : La mesure de la teneur relative en eau a été réalisée par la méthode de Barrs (1968). Les feuilles drapeaux sont pesées immédiatement pour obtenir leur poids frais (PF). Ensuite, ces feuilles ont été mises dans de l'eau distillée à l'obscurité et à 4 °C pendant 24 heures puis pesées de nouveau pour obtenir le poids de la pleine turgescence (PPT). Les échantillons sont enfin séchés à l'étuve à 80 °C pendant 48 heures et pesés pour avoir leur poids sec (PS). La teneur relative en eau des feuilles est déduite par la formule suivante :

$TRE \% = [(PF - PS) / (PPT - PS)] \times 100$ ou $TRE = \text{Teneur relative en eau}$, $PF = \text{Poids frais}$, $PS = \text{Poids sec}$, $PPT = \text{Poids de la pleine turgescence}$.

3.3.1.2 Teneur en chlorophylle : La teneur en chlorophylle a été déterminée par la méthode d'Arnon (1949). Cinquante (50) mg (pour chaque essai) prélevés sur les tiers médians des plus jeunes feuilles, sont broyés en présence de carbonate de calcium (pour neutraliser l'acidité du suc vacuolaire) dans l'acétone à 80 %. Le broyage est répété plusieurs fois afin d'extraire la totalité des pigments chlorophylliens. L'extrait obtenu est filtré. La densité optique de la totalité des filtrats obtenus est mesurée à 663 et 645 nm (spectrophotomètre Jenway). Les concentrations en chlorophylles totales (Chlorophylles a et b), exprimées en mg/g MF (MF : Matière Fraîche) sont données par la formule suivante :

$chl (a+b) \text{ mg/l} = 20,2 (D.O. 645) + 8,02 (D.O. 663)$ ou $chl = \text{La chlorophylle}$, $D.O = \text{Densité optique}$.

3.3.1.3 Teneur en proline : La méthode utilisée est celle de Monneveux and Nemmar (1986). Cent mg (pour chaque essai) prélevés sur les tiers médians des plus jeunes feuilles sont immédiatement pesés puis placés dans un tube à essai. Un volume de 5 ml de méthanol à 40 % est ajouté à l'échantillon et le tout est chauffé, pendant 1 h, dans un bain-marie à 85 °C. Après refroidissement, 1 ml de la solution d'extraction est ajouté à 1 ml d'acide acétique, 25 mg de ninhydrine et 1 ml du mélange eau distillée-acide acétique-acide orthophosphorique de densité 1,7 (120, 300, 80: v /

v/ v). L'ensemble est porté à ébullition pendant 30 mn au bain-marie, puis refroidi et additionné de 5 ml de toluène. Après agitation au vortex, deux phases se séparent, la phase supérieure qui contient la proline est récupérée et sa densité optique est déterminée à 528 nm. Les valeurs obtenues sont rapportées sur un courbe étalon confirmée par des solutions allant de 0 à 0.2 mg/ml de L-Proline. Les teneurs en proline sont exprimées en mg/g MF.

3.3.1.4 Teneur en sucres solubles : Les sucres solubles totaux (saccharose, glucose, fructose, leurs dérivés méthylés et les polysaccharides) sont dosés par la méthode du Dubois *et al.* (1956). Cent mg de matière végétale sont macérés pendant 48 h dans 3 ml d'éthanol 80 % et à température ambiante afin d'assurer l'extraction des sucres solubles. Au moment du dosage et après évaporation de l'alcool, 20 ml d'eau distillée sont ajoutés à l'extrait. A 1 ml de la solution à analyser, on a ajouté 5 ml de phénol 5% et 5 ml d'acide sulfurique concentré. La concentration en sucres solubles est déterminée après une lecture de la densité optique mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre (type Jenway) à une longueur d'onde de 490 nm. Les teneurs en sucres solubles sont exprimées en mg/g MF.

3.3. Longueur de l'épi est mesurée à l'exclusion de la barbe de l'épi sur deux plantes de chaque plot prises au hasard au stade épiaison. La longueur de la barbe est mesurée sur deux plantes de chaque plot prises au hasard au stade épiaison.

3.3.2.2 Rendement en grains par plante : Après le battage, le nombre d'épi par plante, le nombre des grains par épi et le poids des grains ont servi à l'estimation du rendement en grains par plante selon la formule de Garfius (1964): $W = XYZ$ (X, nombre d'épi par plante ; Y, nombre moyen de grains par épi ; Z, poids moyen du grain).

3.3.2.3 Poids de 1000 grains : Déterminé à partir d'une simple pesée de grains comptés à l'aide d'un compteur à grains électronique de type "Numigral".

3.3.2.4 Le rendement biologique : Le rendement biologique est le rendement total en matière sèche aérienne produite à maturité.

3.3.2.5 Indice de récolte : Ce paramètre est déterminé par le rapport du rendement en grains sur le rendement biologique.

3.3.2.6 Indice de sensibilité à la sécheresse : L'indice de sensibilité à la sécheresse a été calculé sur la base du rendement en grains et donné par la formule simplifiée de Fischer et Maurer (1978): $S = (1 - Y_d/Y_p)/D$. Le rendement moyen sous stress

(Yd) et le potentiel de production (Yp) représentent les rendements moyens de toutes les variétés sous stress et en conditions favorables respectivement. L'intensité du stress (D) est calculée par la formule suivante : $D = (1 - YD/YP)$.

3.4 Analyses statistiques : Les analyses statistiques des données ont été effectuées par le

logiciel SAS 9.1. (2005). Les résultats sont soumis à une analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs et les moyennes ont été comparées par le test de Tukey (H.S.D.: Honestly significant differences) au seuil de 5%.

4 RESULTATS

4.1 Effet du stress hydrique sur les paramètres de la phase germination-levée :

4.1.1 Effet du stress hydrique induit par le PEG 6000 sur le taux de germination : Le présent essai a pour but d'étudier les effets de la quantité d'eau disponible pendant la phase de germination sur la faculté germinative des grains de différentes variétés de blé dur. Les différents potentiels hydriques ont un effet hautement significatif sur la germination des semences de blé dur de toutes les variétés testées. Le taux de germination moyen varie entre 98,66% pour le

témoin et 14,44 % pour le milieu le plus concentré en PEG (Tableau 1). Toutefois, un léger déficit hydrique ($\Psi = -0,3$ et $-0,6$ MPa) n'a pas de conséquences notables sur le taux germinatif et même améliore le taux de germination chez certains génotypes (Tableau 1). L'exposition des grains de blé à une carence hydrique sévère diminue le taux de germination de 84 %. En effet, à $-1,5$ MPa, le taux de germination du blé est de 14,44 %. Cette valeur constitue une limite pour laquelle la plupart des grains ne germent plus.

Tableau 1: Pourcentage de germination des différentes variétés de blé dur à différents potentiels hydriques.

Potentiel hydrique (MPa)						
Variétés	0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,2	-1,5
Khlar	99,0	99,0	96,0	96,0	52,0	32,0
Om Rabia3	98,0	98,0	97,0	93,0	54,6	6,7
Maali	98,0	89,0	96,0	89,0	40,0	10,7
Mahmoudi	99,0	100,0	98,0	96,0	42,2	0,0
Biskri	99,0	99,0	100,0	95,0	38,6	2,7
Chili	99,0	96,0	97,0	96,0	61,3	34,7
Moyenne	98,6a	96,8ab	97,3ab	94,1b	48,1c	14,4d

Les différentes lettres indiquent des différences significatives ($P \leq 0.05$).

4.1.2 Effet du stress hydrique sur la longueur et le nombre des racines : La longueur des racines est un critère important d'adaptation pour la tolérance à la sécheresse. En effet, les variétés qui développent un système racinaire important peuvent pomper l'eau à des profondeurs considérables ce qui leur permet de tolérer certaines périodes sèches. Le stress hydrique a un effet hautement significatif sur le nombre et la longueur des racines des variétés testées, ces deux paramètres ont été négativement affectés par un stress hydrique sévère. Les variétés testées ont été différemment affectées par le niveau de déficit hydrique. Selon le Tableau 2, le stress ($-1,5$) MPa permet de classer les

variétés en deux catégories (tolérantes et non tolérantes). Les variétés Chili et Khlar s'avèrent les plus tolérantes parce qu'elles ont été moins affectées par le stress hydrique que les autres variétés.

4.1.3 Effet du stress hydrique sur la longueur du coléoptile : Les résultats présentés au Tableau 3 montrent que l'effet du déficit hydrique sur la diminution de la longueur du coléoptile est d'autant plus accentuée que le stress hydrique est élevé. Le niveau de stress ($-0,9$ MPa) a totalement inhibé l'émission du coléoptile chez toutes les variétés. Cependant, une légère carence hydrique ($-0,3$ MPa) améliore la longueur du coléoptile chez les variétés Khlar, Om Rabia 3 et Maali.

Tableau 2: Longueur (cm) et nombre de racines des différentes variétés de blé dur à différents potentiels hydriques (* longueur de racine, ** nombre de racines).

Potentiel hydrique (MPa)						
Variété	0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,2	-1,5
Khlar	18,4*	10,2	8,5	3,3	1,7	0,5
	5,7**	5,6	4,5	3,1	2,1	1,3
Om Rabia3	12,8	10,1	7,3	3,5	0,8	0,0
	4,7	4,6	3,8	3,2	1,7	0,0
Maali	12,2	11,8	5,3	1,7	0,9	0,0
	6,7	5,9	5,0	3,0	2,0	0,0
Mahmoudi	17,9	12,3	7,1	1,6	0,4	0,0
	5,8	5,5	5,3	2,7	1,0	0,0
Biskri	15,3	11,8	7,0	2,0	0,5	0,0
	5,4	5,5	4,9	2,9	1,5	0,0
Chili	18,0	8,5	8,3	2,1	1,4	0,3
	5,8	5,0	5,0	3,0	2,5	1,3
Moyenne	15,7a	10,7b	7,2c	2,3d	0,9e	0,1e
	5,62a	5,4a	4,7b	2,9c	1,8d	0,4e

Les différentes lettres indiquent des différences significatives ($P \leq 0.05$).

Tableau 3: Longueur de la coléoptile (cm) des différentes variétés de blé dur à différents potentiels hydriques.

Potentiel hydrique (MPa)						
Variété	0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,2	-1,5
Khlar	3,6	4,3	4,2	0,0	0,0	0,0
Om Rabia3	4,4	5,0	3,2	0,0	0,0	0,0
Maali	4,0	4,6	1,4	0,0	0,0	0,0
Mahmoudi	7,2	6,3	2,6	0,0	0,0	0,0
Biskri	6,9	6,5	3,2	0,0	0,0	0,0
Chili	6,8	5,9	3,4	0,0	0,0	0,0
Moyenne	5,5a	5,4a	3,0b	0,0c	0,0c	0,0c

Les différentes lettres indiquent des différences significatives ($P \leq 0.05$).

4.1.4 Effet du stress hydrique sur la longueur des feuilles :

L'émission des feuilles juste après la germination est vitale à la jeune plantule qui pendant ce stade devient autotrophe. Le grain de blé qui germe dans des conditions stressées et qui arrive à développer des feuilles est un bon indicateur pour la tolérance à la sécheresse. Les résultats relatifs à la longueur des feuilles sont

présentés au Tableau 4. Le stress hydrique a considérablement réduit la longueur des feuilles, les résultats présentés au Tableau 4 indiquent que la longueur des feuilles est un paramètre très sensible au déficit hydrique puisqu'à partir du stress -0,6 MPa l'émission des feuilles est totalement inhibée chez la plupart des variétés.

Tableau 4: Longueur des feuilles (cm) des différentes variétés du blé dur blé à différents potentiels hydriques.

Potentiel hydrique (MPa)						
Variété	0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,2	-1,5
Khlar	8,5	3,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Om Rabia3	10,2	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Maali	9,1	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Mahmoudi	13,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Biskri	7,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Chili	10,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Moyenne	9,8a	1,2b	0,0b	0,0b	0,0b	0,0b

Les différentes lettres indiquent des différences significatives ($P \leq 0.05$).

4.2 Effet du déficit hydrique induit par un arrêt d'arrosage sur des paramètres morpho-physiologiques et agronomiques du blé dur :

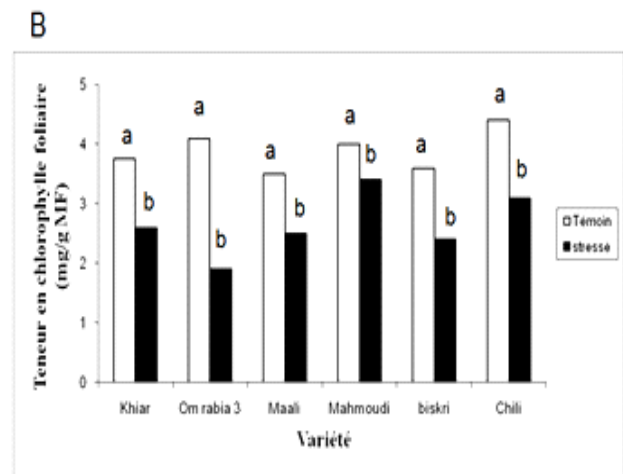
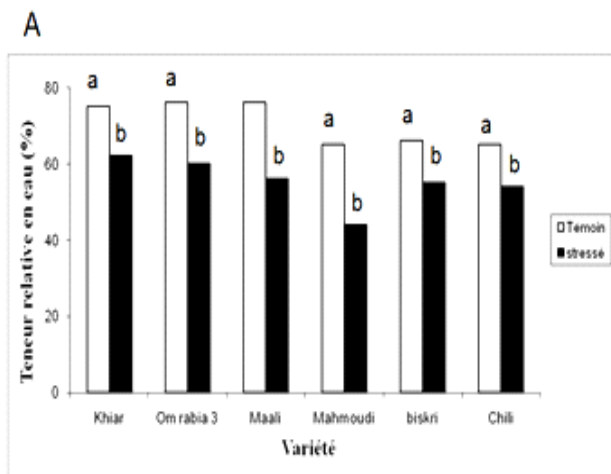
4.2.1 Teneur relative en eau : Pour mieux apprécier l'effet du stress hydrique sur l'alimentation hydrique du blé, la teneur relative en eau (TRE) a été déterminée dans les feuilles. La figure 1A montre que le déficit hydrique entraîne une chute de la TRE chez toutes les variétés. Le pourcentage de réduction varie entre 18 % par rapport au témoin pour la variété Khlar et 28,8 % pour la variété Mahmoudi.

4.2.2 Teneur en chlorophylle : L'analyse de la variance de l'effet du stress hydrique sur la teneur en chlorophylle foliaire montre une absence d'interaction variété x stress hydrique. Cependant, une baisse dans les teneurs en pigments chlorophylliens totaux (Chlorophylles a et b) a été enregistrée chez toutes les variétés (Figure 1B). Cette réduction peut être attribuée à une dégradation enzymatique de la chlorophylle suite à

la fermeture des stomates et la faible disponibilité en eau.

4.2.3 Teneur en sucres solubles : En réponse au déficit hydrique, les sucres solubles totaux ont connu une augmentation de la concentration chez toutes les variétés (Figure 1C). Les variétés Khlar, Om Rabia3, Biskri et Chili ont manifesté les teneurs les plus élevées en sucres solubles.

4.2.4 Teneur en proline : La proline est un osmoticum qui s'accumule dès que la plante est en phase d'une contrainte qui perturbe le fonctionnement de son cycle tel que la contrainte hydrique. Le dosage de la proline libre montre que le stress hydrique entraîne une accumulation de cette molécule chez les six variétés de blé (Figure 1D). Cette augmentation de la concentration est variable selon les variétés. En effet, les variétés Khlar et Chili présentent les teneurs en proline les plus élevées, soit une augmentation qui dépasse 2,5 fois le témoin.



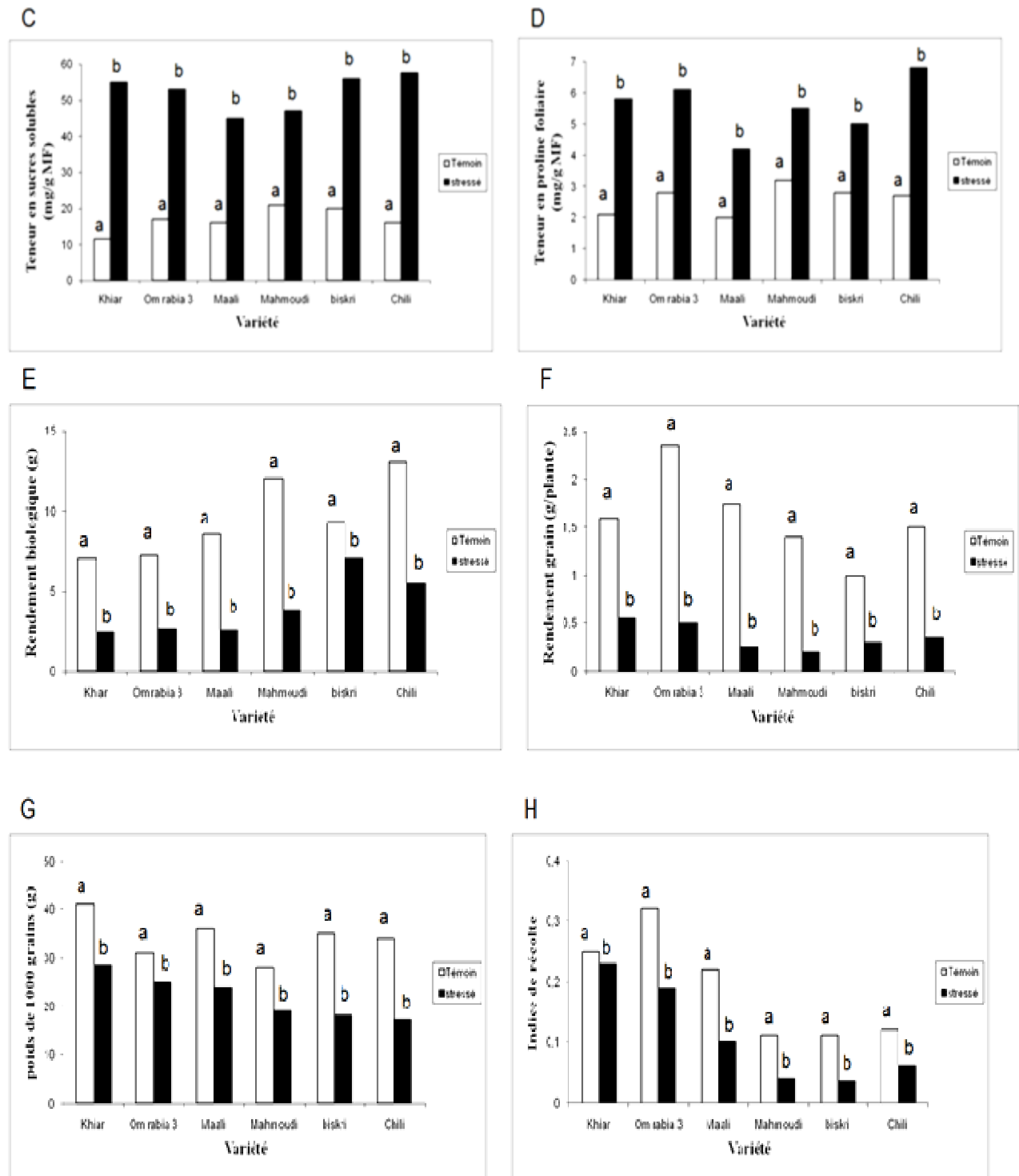


Figure 1: Effet du stress hydrique sur la teneur en eau relative (A), la teneur en chlorophylle totale (B), sucres solubles (C), la teneur en proline (D), le rendement biologique (E), le rendement en grains (F), le poids de 1000 grains (G), et l'indice de la récolte (H) de six variétés de blé dur. Les différentes lettres indiquent des différences significatives ($P \leq 0.05$).

4.2.5 Effet du stress hydrique sur la matière fraîche et la matière sèche : Les effets du stress hydrique sur la matière fraîche et la matière sèche produites sont indiqués dans le Tableau 5. Ces deux paramètres ont été mesurés pour toutes les variétés, en respectant la différence de précocité entre ces variétés (l'âge moyen des plantes à l'épiaison a été

de 95 jours pour les variétés améliorées et 120 jours pour les variétés locales). On observe une réduction significative de la matière fraîche et de la matière sèche ce qui confirme l'effet des traitements sur la production de la biomasse. La réponse générale de ces deux paramètres est similaire mais avec des différences variétales.

Tableau 5: Effet du stress hydrique sur la matière fraîche et la matière sèche de six variétés de blé dur.

Variétés	MF (g/plante)		MS (g/plante)	
	Témoin	Stressé	Témoin	Stressé
Khlar	23,6 ± 2,5	11,4 ± 3,5	8,9 ± 1,0	2,8 ± 0,8
Om Rabia 3	19,9 ± 2,9	10,3 ± 0,9	6,8 ± 1,0	4,2 ± 0,4
Maali	25,1 ± 5,4	8,8 ± 1,4	7,7 ± 1,7	2,3 ± 0,2
Mahmoudi	32,6 ± 4,5	12,3 ± 2,0	10,0 ± 1,7	3,4 ± 0,3
Biskri	22,6 ± 1,2	18,3 ± 1,7	6,1 ± 0,6	5,6 ± 0,3
Chili	26,3 ± 3,3	16,8 ± 3,7	6,5 ± 0,9	4,1 ± 0,8
Moyenne	25,0a	13,0b	7,7a	3,7b

Les différentes lettres indiquent des différences significatives ($P \leq 0.05$).

4.2.6 Effet du stress hydrique sur la longueur de l'épi, la hauteur de la tige, et la longueur des barbes : L'effet de stress hydrique sur la longueur de l'épi, la hauteur de la tige, et la longueur des barbes sont indiqués dans le Tableau 6. L'analyse statistique de la variance de la longueur de l'épi montre un effet génotypique significatif. La longueur moyenne passe de 7,69 cm pour les plantes témoins à 7,02 cm pour les plantes stressées soit une diminution de 8.71% (Tableau 6). Le stress hydrique réduit la longueur de l'épi ce qui se répercute négativement sur le nombre de grains/épi. L'absence d'une interaction variété X stress hydrique indique que ce paramètre n'est pas un critère de sélection pour la tolérance à la sécheresse. Le paramètre hauteur de la tige présente une variabilité importante (Tableau 6). Chez les plantes témoins, on distingue deux groupes de génotypes : des génotypes à tige haute représentés par les variétés anciennes Biskri, Mahmoudi et Chili et les génotypes à tige courte représentés par les variétés améliorées Khlar, Om Rabia3 et Maali. L'effet du déficit hydrique est très néfaste sur ce caractère, la hauteur moyenne de la tige passe de 109,29 cm chez les plantes témoins à 81,64 cm chez les plantes stressées soit une réduction de 25,3 %. L'analyse statistique de la variance met en évidence un effet génotypique et un effet traitement hautement significatif sur la longueur des barbes. Le pourcentage de réduction de ce caractère par rapport au témoin est de 21,5 % (Tableau 6).

4.2.7 Rendement biologique, masse des grains par plante et poids de 1000 grains :

Sur l'ensemble des caractères étudiés à maturité, l'analyse statistique révèle qu'il y a un effet traitement significatif sur le rendement biologique, la masse des grains par plante et le poids de 1000 grains. Les figures 1E, 1F et 1G montrent que ces caractères sont affectés par le déficit hydrique chez toutes les variétés. Le poids de 1000 grains le plus élevé sous contrainte hydrique est enregistré chez les variétés améliorées (Khlar, Om Rabia3 et Maali). Le pourcentage de réduction moyen par rapport au témoin est de 27,42 pour les variétés améliorées et de 41,38 pour les variétés locales. Contrairement au rendement biologique des variétés locales qui est supérieur à celui des variétés améliorées, le rendement en grains est plus élevé chez les variétés améliorées pour les deux traitements.

4.2.8 Indice de récolte (IR) : Les indices de récolte les plus faibles sont observés chez variétés locales pour les deux traitements hydriques ; cela est probablement dû à un détournement des produits de la photosynthèse vers l'appareil végétatif (tige + racine) au détriment du remplissage des grains (Figure 1H). Ce résultat est en accord avec les travaux de Hamidou *et al.* (2005) et Bahlouli *et al.* (2008).

4.2.9 Indice de sensibilité au stress (ISS) : L'indice de sensibilité au stress est un paramètre indépendant du potentiel de production et de l'intensité de stress (Bayoumi *et al.*, 2008), il est

potentiellement utilisable pour des comparaisons de la sensibilité des génotypes au stress hydrique soumis à différents niveaux de déficit hydrique. Plus l'indice est élevé (>1) plus la sensibilité au stress est importante. Les résultats indiquent que l'ISS varie entre 0,86 et 1,12, les variétés Maali et Mahmoudi

ont un ISS supérieur à 1 cela signifie que ces deux variétés sont les plus sensibles (Tableau 7). Cet indice permet donc de classer les variétés dans l'ordre de tolérance suivant : Khiar > Chili = OM Rabia3 = Biskri > Maali > Mahmoudi.

Tableau 6: Effet du stress hydrique sur la hauteur de la tige (H.T.), la longueur de l'épi (L.E.) et la longueur de la barbe (L.B.) de six variétés de blé dur.

Variétés	H.T. (cm)		L.E. (cm)		L.B. (cm)	
	Témoin	Stressé	Témoin	Stressé	Témoin	Stressé
Khiar	77,5 ± 1,9	57,5 ± 1,9	7,5 ± 0,1	6,6 ± 0,8	11,2 ± 0,2	10,4 ± 0,4
Om Rabia 3	80,2 ± 3,7	68,2 ± 3,8	7,3 ± 0,1	6,5 ± 0,5	11,6 ± 0,2	9,5 ± 0,2
Maali	83,0 ± 2,1	65,7 ± 5,5	7,8 ± 0,1	7,4 ± 0,4	13,5 ± 0,9	12,2 ± 0,3
Mahmoudi	130,0 ± 7,3	96,3 ± 2,5	8,0 ± 0,5	7,3 ± 0,9	14,8 ± 0,4	11,3 ± 1,2
Biskri	136,0 ± 1,0	102,2 ± 4,2	7,6 ± 0,2	7,1 ± 1,4	14,2 ± 0,8	11,0 ± 0,8
Chili	149,0 ± 1,0	99,7 ± 3,4	7,7 ± 0,5	7,1 ± 1,3	14,6 ± 0,2	8,3 ± 0,5
Moyenne	109,2a	81,6b	7,6a	7,0b	13,3a	10,4b

Les différentes lettres indiquent des différences significatives ($P \leq 0.05$).

Tableau 7: Indice de sensibilité au stress hydrique de six variétés de blé dur

Variété	Khiar	Om Rabia 3	Maali	Mahmoudi	Biskri	Chili
ISS	0,86a	0,98b	1,08c	1,12d	0,98b	0,94b

Les différentes lettres indiquent des différences significatives ($P \leq 0.05$).

5 DISCUSSION

La tolérance à la sécheresse pendant la germination est un critère important pour l'identification de variétés de blé dur capables de supporter un déficit hydrique pendant la première phase de développement. Par ailleurs, des différences génotypiques de sensibilité au stress hydrique, au stade de la germination, ont été signalées par Millequant (1980). En effet, les génotypes Khiar et Chili ont présenté des taux de germination supérieurs à ceux des autres génotypes à -1,5 MPas ; cependant c'est le traitement léthal pour la variété Mahmoudi. Cette inhibition de la germination résulterait en particulier d'une difficulté d'hydratation des tissus, qui se répercute sur le processus d'élongation de la racine (Hegarty and Ross, 1978) et d'une difficulté de la pénétration de la molécule d'eau dans les graines, ce qui ne favorise pas l'ajustement osmotique (Manohar, 1966). Cependant, il est à remarquer qu'un léger déficit hydrique améliore cette faculté germinative. Un tel résultat a été mentionné par de nombreux auteurs et sur diverses cultures tels que le tournesol et le millet (Chojnowski *et al.*, 1977; Ashraf *et al.*,

2003). Les variétés Khiar et Chili s'avèrent les plus tolérantes à la sécheresse pendant la germination.

L'intensité du stress hydrique imposé a provoqué une réduction de la longueur et du nombre des racines d'autant plus importante que le stress est plus sévère (Tableau 2). Cette réduction est due probablement à un arrêt de la division et de l'élongation cellulaire au niveau de la racine (Fraser *et al.*, 1990), conduisant à une sorte de tubérisation qui consiste à une lignification du système racinaire permettant à la plante une « entrée en vie » ralentie, en attendant que les conditions redeviennent favorables (Vartanian, 1973). L'analyse de la variance a révélé une interaction variété X stress hydrique hautement significative. Ces résultats indiquent que le nombre et la longueur des racines sont des critères valables pour la sélection pour la tolérance à la sécheresse.

La longueur du coléoptile est aussi une caractéristique variétale fortement influencée par les effets du milieu. Le stress hydrique pendant le stade jeune plantule peut inhiber le développement du coléoptile (Boubaker and Yamada, 1995).



On observe une diminution accentuée de la longueur du coléoptile lorsque le déficit hydrique est d'autant plus élevé, à l'exception d'une légère amélioration de la longueur de coléoptile observée chez les variétés Khiar, Om Rabia 3 et Maali suite à une légère carence hydrique (-0,3 MPa). Ceci peut être attribué à une accélération de ces semences au développement de leurs parties végétatives. Ceci permettra d'assurer le déclenchement de la photosynthèse le plus vite possible afin de fournir l'énergie nécessaire pour le développement et la formation des racines pour les stades ultérieurs ce qui favorise plus de protection à la croissance de la jeune plantule sous condition de stress (Bayoumi *et al.*, 2008). Toutefois, si le stress est sévère on peut observer aussi un arrêt total du développement foliaire (Tableau 4). Ces résultats montrent que les paramètres liés au stade post-germination peuvent servir comme indicateur de tolérance à la sécheresse. L'analyse de la variance de la teneur relative en eau montre un effet variétal significatif. Ceci peut être attribué soit aux différences entre les variétés dans le pouvoir de pompage de l'eau du sol par les racines, soit au pouvoir du contrôle stomatique des pertes d'eau par les surfaces évaporèrent. Il peut être aussi attribué à des différences entre les variétés dans le pouvoir d'accumulation des métabolites et de l'ajustement osmotique pour le maintien de la turgescence cellulaire et les activités physiologiques (Bayoumi *et al.*, 2008). Une augmentation significative de la teneur en sucres solubles et en proline a été enregistrée chez toutes les variétés testées (Figures 1C et 1D). Cette augmentation peut être due au rôle osmoprotecteur des sucres solubles contre la déshydratation des cellules par maintien de l'équilibre de la force osmotique en gardant la turgescence et le volume cytosolique aussi élevé que possible et par une préservation de l'intégrité

6 CONCLUSION

Le stress hydrique a provoqué une diminution de la teneur relative en eau (TRE) chez toutes les variétés testées. La corrélation entre la TRE et le rendement en grains est positive et significative ($r = 0,62$), les génotypes qui maintiennent leur TRE élevée lors du stress hydrique seront probablement les plus tolérants et seront les plus productifs. Ces résultats sont similaires à ceux de Bennet *et al.* (1987), Schonfeld *et al.* (1988) et Bayoumi *et al.* (2008). Ces résultats confirment que la TRE est un bon

membranaire dans les organes desséchés ainsi qu'une protection des protéines (Darbyshire, 1974). Alors que l'explication de l'accumulation de la proline est différente selon les auteurs (Valentovic *et al.*, 2006), certains comme Hanson *et al.* (1977) affirment que c'est une conséquence pathologique, d'autres comme Stewart et Lee (1974) suggèrent que la proline à des fortes concentrations agit comme soluté pour l'ajustement osmotique ; cette dernière pourrait, également intervenir dans la régulation du pH cytoplasmique (Pesci et Beffagna, 1984) ou pour servir de réservoir de composés azotés et de carbone pour utilisation ultérieure dans la croissance. Selon Wilfred (2005) La capacité d'accumuler la proline chez les plantes est un facteur variétal et un signe de tolérance au stress hydrique.

Un effet variétal a été également observé sur certains paramètres agronomiques tels que le rendement biologique, rendement en grains, et le poids de 1000 grains (Figures 1E, 1F, et 1G). Cela signifie qu'une différence dans l'expression de ces caractères existe entre les variétés. Une interaction traitement x variété a été observée sur le poids de 1000 grains indiquant que l'effet du stress hydrique sur ce paramètre dépend de la variété. Les variétés Khiar et Om Rabia 3 sont les plus productives sous condition de déficit hydrique. Ceci s'explique par leur précocité, suivant la voie d'esquive qui leur permet de bénéficier des conditions d'humidité favorables tôt au cours de la saison. Ce résultat est confirmé par Daaloul *et al.* (2009). La variété locale Chili donne un rendement en grains proche des variétés améliorées sous condition de stress bien qu'elle est tardive. Ceci peut être dû selon Daniels *et al.* (1982) à une augmentation de la matière sèche de la paille suite à une plus grande disponibilité d'assimilats pour le remplissage des grains.

indicateur de tolérance à la sécheresse et peut être utilisé dans un programme de sélection pour le blé en condition de sécheresse. Les sucres solubles et la proline sont les osmolytes les plus impliqués dans l'ajustement osmotique comme mécanisme d'adaptation à la sécheresse. Plusieurs études (Nayer et Reza, 2008; Tatar et Gevrek, 2008) ont prouvé que ces deux métabolites sont de bons marqueurs biochimiques pour la sélection des génotypes de blé dur tolérants à la sécheresse. Le rendement en grain

est corrélé significativement et positivement avec l'accumulation des sucres solubles ($r = 0,84$) et de la proline ($r = 0,7$).

L'ISS est négativement ($r = -0,75$) associé avec le rendement en grain sous conditions de stress ce qui prouve que la sélection pour ce caractère sous stress hydrique se traduit par une diminution de la sensibilité au stress. Les variétés Khiar et Chili qui

ont la teneur relative en eau la plus élevée accumulent plus de sucres solubles et de proline que les autres variétés et ont le plus faible indice de sensibilité au stress. Ces deux génotypes peuvent être donc utilisés comme donneurs de gènes de tolérance à la sécheresse dans un programme d'amélioration.

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anjum SA, Xie X, Wang L, Saleem MF, Man C. and Lei W: 2011. Morphological, physiological and biochemical response of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research* 6: 2026-2032.
- Arnon DL: 1949. A copper enzyme is isolated chloroplast polyphenol oxidase in Beta vulgaris. *Plant Physiology* 24: 1-15.
- Ashraf M, Kausar A. and Asraf MY: 2003. Alleviation of salt stress in pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) through seed treatment. *Agronomy* 23: 227-234.
- Bahlouli F, Bouzerzour H. and Benmahammed A : 2008. Effets de la vitesse et de la durée du remplissage du grain ainsi que de l'accumulation des assimilats de la tige dans l'élaboration du rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions de culture des hautes plaines orientales d'Algérie. *Biotechnology Agronomy Society and Environment* 12 : 31-39.
- Barrs H: 1968. Determination of water deficit in plant tissues. In: Water Deficit and Plant Growth, Koslowski. (Eds): Academy Press New York.
- Bayoumi TY, Manal H. and Metwali EM: 2008. Application of physiological and biochemical indices as a screening technique for drought tolerance in wheat genotypes. *African Journal of Biotechnology* 14: 2341-2352.
- Bellinger Y, Bensaoud A. and Lahrer P: 1989: Physiological accumulation: a trait of use to breeding for stress tolerance. In : Acevedo, Conesa, Monneveux & Srivastava. (Eds): Physiology breeding of winter creates for stressed Mediterranean environments. Montpellier.
- Benlarabi M. and Monneveux PH: 1988. Étude comparée du comportement en situation de déficit hydrique de deux variétés algériennes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) adaptées à la sécheresse. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France* 74 : 73-83.
- Bennet J, Sinclair T, Muchow R. and Costello S: 1987. Dependence of stomata conductance on leaf water potential, turgor and relative water content in field grown soybean and maize. *Crop Science* 27 : 984-990.
- Bensari M, Calmes J. and Viala G : 1990. Régulation du carbone fixé par photosynthèse entre l'amidon et le saccharose dans la feuille de soja: Influence d'un déficit hydrique. *Plant Physiology and Biochemistry* 28 : 113-121
- Boubaker M. and Yamada T: 1995. Differential genotypic responses of string wheat early seedling growth to limited moisture conditions. *Tropicultura* 13 : 50-53.
- Chojnowski M, Corbineau F. and Côme D: 1977. Physiological and biochemical changes induced in sunflower seeds by osmopriming and subsequent drying, storage and aging. *Seed Science Technology* 7 : 323-331.
- Daaloul A, Bchiri H. and Sayar R: 2009. Variabilité génétique de quelques paramètres du système racinaire du blé dur sous deux régimes hydriques. *Plant Genetic Resources* 129 : 25-31.
- Daniels RW, Alcock MB. and Scarisbrick DH: 1982. A reappraisal of stem reserve contribution to grain yield in spring barely (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Agricultural Science* 98 : 347-355.
- Darbyshire B: 1974. The function of the carbohydrate units of tree fungal enzymes in their resistance to deshydration. *Plant Physiology* 54 : 714-721.
- Darui A, Boukroute A, Kajeiou M, Kouddone NE. and Berrichi A: 2011. Effet de l'irrigation d'appoint sur le rendement d'une culture de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) (Variété



- Rajae) au Maroc Oriental. *Nature & Technologie* 5 : 80-86.
- Dubois M, Gilles KA, Hamilton JK, Rebers PA. and Smith F: 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry* 38: 350-356.
- Farhad MS, Babak AM, Reza ZM, Mir Hassan RS. and Afshin T: 2011. Response of proline soluble, sugars, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes in potato (*Solanum tuberosum* L.) to different irrigation regimes in green house condition. *Australian Journal of Crop Science* 5: 55-60.
- Fischer RA. and Maurer R: 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research* 29: 897-912.
- Fraser TE, Silk WK. and Rost TL: 1990. Effect of low water potential on cortical cell length in growing region of maize roots. *Plant Physiology* 93: 648-651.
- Garfius GE: 1964. A geometry for plant breeding. *Crop Science* 4: 241-246.
- Hamidou F, Dicko MH, Zombre G, Traoré AS. and Ginko S: 2005. Adaptative response of two varieties of cowpeas to water stress. *Cahiers d'études et de recherche francophones* 14 : 561-567.
- Hanson AD, Nelson CE. and Everson EH: 1977. Evaluation of free proline accumulation as an index of drought resistance using two contrasting barely cultivars. *Crop Science* 17: 720-726.
- Hegarty TW. and Ross HA: 1978. Differential sensitivity to moisture stress of seed germination and seedling radicle growth in calabrese (*Brassica oleracea* var. *italica*) and cress (*Lepidium sativum*). *Annals of Botany* 42: 1003-1005.
- Jones MM, Osmond CB. and Turner NC: 1980. Accumulation of solutes in leaves of sorghum and sunflower in response to water deficits. *Australian Journal of Plant Physiology* 7: 193-205.
- Karakas O, Gurel F. and Uncuoglu AA: 2011. Assessment of genetic diversity of wheat genotypes by resistance gene analog-Est markers. *Genetics and Molecular Research* 10:1098-1110.
- Kauss H: 1977. Biochemistry of regulation. In : Northcote. (eds). *International Review of Biochemistry*.
- Kouakou TH, Kone M, Kone D, Kouadio YJ. and Zouzou M: 2008. Réponse physiologique au stade juvénile du génotype R405-2000 de cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) au déficit hydrique induit par le polyéthylène glycol. *Sciences and Nature* 5: 81-87.
- Manohar MS: 1966. Effect of osmotic systems on germination of peas. *Planta* 71 : 81-86.
- Michel BE. and Kaufmann R: 1973. The osmotic Potential of polyethylene Glycol 6000. *Plant physiology* 51 : 914-916.
- Millequant A: 1980. Contribution à la connaissance des réactions morphologiques, physiologiques et biochimiques de jeunes plants de deux hybrides de maïs soumis à une contrainte hydrique modérée et momentanée. Thèse de doctorat, INAPG (Paris).
- Moaveni P: 2011. Effect of water deficit stress on some physiological traits of wheat (*Triticum aestivum*). *Agricultural Science Research Journal* 1 : 64-68.
- Monneveux P. and 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* 6 : 583-590.
- Nayer M. and Reza H: 2008. Drought-induced accumulation of soluble sugars and proline in two maize varieties. *World Applied Sciences Journal* 3 : 448-453.
- Pesci P. and Beffagna A: 1984. Inhibiting effect of fusaric acid on abscisic acid induced proline accumulation in barley leaves. *Plant Science Letters* 37 : 7-12.
- Pirzad A, Shakiba MR, Zehtab-Salmasi S, Mohammadi SA, Darvishzadeh R. and Samadi A: 2011. Effect of water stress on leaf relative water content, chlorophyll, proline and soluble carbohydrates in *Matricaria chamomilla* L. *Journal of Medicinal Plants Research* 5 : 2483-2488.
- Qayyum A, Razzaq A, Ahmad M. and Jenks MA: 2011. Water stress causes differential effects on germination indices, total soluble sugar and proline content in wheat (*Triticum*

- aestivum* L.) genotypes. *African Journal of Biotechnology* 10 : 14038-14045.
- Rejeb MN. and Ben Salem M: 1993. Les divers mécanismes d'adaptation à la sécheresse chez les végétaux supérieurs, cas du blé et du caroubier. *Bull Soc Sci Nat* 22 : 49-52.
- Schonfeld M, Johnson R, Carver B. and Mornhinweg D: 1988. Water relations in winter wheat as drought resistant indicators. *Crop Science* 28 : 526-531.
- Slama A, Ben Salem M, Ben Naceur M. and Zid E: 2005. Les céréales en Tunisie: Production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. *Sécheresse* 16 : 225-229.
- Stewart CR. and Lee JA: 1974. The role of proline accumulation in halophytes. *Planta* 120 : 273-289.
- Tahri H, Belabed A. and Sadki K : 1998. Effet d'un stress osmotique sur l'accumulation de proline, de chlorophylle et des ARNm codant pour la glutamine synthétase chez trois variétés de blé dur (*Triticum durum*). *Bulletin de l'Institut Scientifique Rabat* 21 : 81-87.
- Tatar O. and Gevrek MN: 2008. Influence of water stress on proline accumulation lipid peroxidation and water content of wheat. *Asian Journal of Plant Science* 7 : 409-412.
- Valentovic P, Luxova M, Kolarovic L. and Gasparikova O: 2006. Effect of osmotic stress on compatible solutes content, membrane stability and water relation in two maize cultivars. *Plant Soil and Environment* 4 : 186-191.
- Vartanian N : 1973. Particularités adaptatives de la moutarde blanche (*Sinapsis alba* L.) à la sécheresse. In : Réponses des plantes aux facteurs climatiques. (eds). Actes Coll Uppsala. Unesco.
- Wilfried C: 2005. Proline as a measure of stress in tomato plants. *Plant Sci* 168 : 241-248.
- Xiong J, Zhang L, Fu G, Yang Y, Zhu C. and Tao L: 2012. Drought-induced proline accumulation is uninvolved with increased nitric oxide, which alleviates drought stress by decreasing transpiration in rice. *Journal of Plant Research* 125 : 155-164.
- Zerrad W, Maataoui BS, Hilali S, El Antri S. and Hmyene A: 2008. Étude comparative des mécanismes biochimiques de résistances au stress hydrique de deux variétés de blé dur. *Lebanese Science Journal* 9 : 27-36.