

Effet du déficit hydrique sur certains osmolytes chez cinq variétés de blé dur (*Triticum durum*)

[Water deficit effects on osmolytes traits in five durum wheat varieties (*Triticum durum*)]

Safia Chahbar¹ and Moulay Belkhdja²

¹Laboratory of Agro-Biotechnology and Nutrition in Semi-Arid Areas, Faculty of Natural Sciences and Life, University Ibn Khaldoun, BP 78, 14000 Tiaret, Algeria

²Department of Biology, Laboratory of Plant Physiology, University Oran 1 Ahmed Ben Bella, Oran, Algeria

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Water stress is the major environmental stresses that affect agricultural production worldwide, especially in arid and semi-arid regions. This research investigated the effect of water deficit on five wheat cultivars grown in the greenhouse until anthesis. Mild (60%) and severe (30%) water deficit regimes were used with a control of 100% soil field capacity. The effect of water stress on parameters was investigated including; Relative water content (RWC), pigment content (chl a, chl b, carotenoids, chl tot), proline, soluble sugars, rate of K^+ and Na^+ were determined.

The results indicated that the effect of water deficit on biochemical parameters depended on the combination of water stress regime and wheat cultivars. The analyses carried show that under water deficit stress RWC was sharply reduced due a combination of leaf growth reduction and abscission. Water deficits impose leaf chlorophyll content decrease. In addition, wheat genotypes a more significant accumulation of solubles sugars than of proline. It results from them also a rate high from Na^+ and a low rate of K^+ at the time of the stress. Finally, the contribution of the physio-biochemicals parameters in the adaptation of the durum wheat depends closely on the genotypes and intensity of the hydrous deficit.

KEYWORDS: durum wheat, water deficit, soluble sugar, proline, pigment content, Na^+ , K^+ .

RÉSUMÉ: Le déficit hydrique est la majeure contrainte environnementale qui affecte la production agricole mondiale, spécialement dans les zones aride et semi-aride. Une expérimentation est effectuée sur cinq variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions contrôlées au stade floraison. Un traitement hydrique conduit à capacité au champ (100%), et deux autres traitements subissent des déficits hydriques à intensités différentes modéré (SH60%) et sévère (SH30%). L'effet du déficit hydrique est étudié sur : teneur relative en eau (RWC), pigments chlorophylliens (chl a, chl b, carotenoides et chl tot), proline, sucres solubles, taux de K^+ et Na^+ . Les résultats montrent que la RWC représente l'une des premières caractéristiques altérées en situations d'alimentation hydriques limitantes. La teneur en chlorophylle a et b varie en s'abaissant sous le régime hydrique imposé, si bien que la chlorophylle a reste toutefois supérieure aux autres pigments. L'accumulation des teneurs en sucres solubles et en proline devient plus nette au fur et à mesure que l'intensité du stress s'accroît. Les variétés utilisées accumulent plus de Na^+ que de K^+ à la déclaration de la contrainte hydrique imposé. Finalement, Les résultats obtenus lors de cette étude montrent que l'effet du déficit hydrique sur les paramètres biochimiques étudiés dépend de la durée et de l'intensité du déficit hydrique imposé ainsi que les variétés étudiées.

MOTS-CLEFS: blé dur, déficit hydrique, sucres solubles, proline, pigments chlorophylliens, Na^+ , K^+ .

1 INTRODUCTION

Depuis toujours, les céréales constituent une part importante des ressources alimentaires de l'homme et de l'animal. De plus la majeure partie de l'alimentation est fournie par les aliments en grain, dont 96% sont produit par les cultures céréalières tels que le blé, l'orge, le seigle, le riz, le maïs et le triticale...etc [1],[2]. Parmi ces céréales, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) compte l'une des espèces les plus anciennes et constitue une grande partie de l'alimentation de l'humanité, d'où son importance économique [3], [4]. A l'échelle mondiale, près d'un tiers des terres arables souffrent d'un déficit en eau qui limite notamment les rendements des productions végétales [5], [6]. Dans la plupart des régions du monde les rendements céréaliers sont périodiquement exposés au stress hydriques [7], [8], [9]. En Algérie, cette céréale occupe une place très privilégiée dans les ménages, malheureusement son rendement en grains est le plus faible du bassin méditerranéen. Cette faiblesse de la production de blé en Algérie était toujours liée aux effets du stress hydrique qui se fait ressentir de manière très importante depuis la dernière décennie [10]. Cependant, des études récentes révèlent que ce sont plutôt les basses températures hivernales et printanières qui handicapent le plus cette spéculation [11], [12], [13]. Par ailleurs, dans beaucoup de régions du monde, le manque d'eau est le facteur le plus limitant auquel fait et doit faire face la céréaliculture algérienne. Tout progrès sensible des agro- systèmes, basés sur la culture des céréales, dans l'étage bioclimatique semi-aride, semble être conditionné par une meilleure gestion des eaux pluviales [14].

L'amélioration des rendements et la gestion durable des ressources phylogénétiques passent par la réhabilitation de certaines variétés de blé [12]. Ces dernières devraient être introduites dans le schéma de sélection. L'objectif d'amélioration fixé est une combinaison entre le potentiel de production, d'adaptation aux différentes zones agro-écologiques et de tolérance aux principales maladies [15]. Plusieurs caractères adaptatifs, d'ordre morphologiques, biochimie et physiologiques, participent à l'amélioration de la tolérance aux stress abiotiques [16]. Pour réaliser ces objectifs plusieurs outils d'analyse de la variabilité génétique existant, les uns reposent sur des critères morpho-physiologiques et biochimiques. L'objectif de ce travail est d'analyser l'impact du stress hydrique sur quelques paramètres physio-biochimiques de la résistance à la sécheresse de cinq variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions contrôlées, comme la teneur relative en eau, la teneur en pigments chlorophylliens (chlorophylle a, chlorophylle b caroténoïdes et chlorophylle totale), teneur en sucres solubles, teneur en proline, taux de Na⁺ et le taux en K⁺ afin d'apprécier leur réponse adaptative.

2 MATERIEL ET METHODES

L'expérimentation est conduite dans une serre semi-automatique au sein de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret. Les graines préalablement désinfectées avec l'eau javellisée sont mises dans des boîtes de pétri. Après germination, les jeunes plantules sont repiquées dans des cylindres en P.V.C (60cm de long et 15cm de diamètre). Le dispositif expérimental comprend trois traitements : Un traitement hydrique témoin conduit à la capacité au champ. Les deux autres traitements subissent des déficits hydriques à intensités différentes 30% (SH30) et 60% (SH60) de la capacité au champ. Chaque traitement est répété trois fois. Le substrat de culture est irrigué à la capacité au champ par l'apport quotidien d'une dose d'arrosage calculée à l'évapotranspiration journalière de chaque pot. Chaque semaine, l'eau d'irrigation est substituée par une solution nutritive commerciale.

3 LES MESURES EFFECTUEES

3.1 LA TENEUR RELATIVE EN EAU (RWC)

La teneur relative en eau exprimée par la RWC (Relative Water Content) est déterminée selon la méthode de [17], utilisé par [18]. La teneur relative en eau est déduite par la formule suivante :

$$RWC \% = (Pi - Ps) / (Ppt - Ps) \times 100$$

Pi : poids frais initial ; PPT : poids en plein turgescence ; ps : poids sec.

3.2 EXTRACTION DES PIGMENTS CHLOROPHYLLIENS

La teneur en chlorophylle a, chlorophylle b, caroténoïdes et les chlorophylles totales sont déterminées selon la méthode de [19], [20], [21] et au niveau de l'avant dernière feuille. Dans des tubes à essais, on ajoute à 1000 mg d'échantillon frais, coupé en petits fragments, 10 ml d'acétone à 95%, l'ensemble est conservé à l'obscurité et à 4°C pendant 48 heures. Les concentrations de la chlorophylle a, chlorophylle b et les caroténoïdes sont effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre (type Pharmacia Biotech. NOVASPEC II) à des densités optiques respectives de 662, 644 et 470 nm. L'appareil est étalonné avec la

solution témoin à base d'acétone à 95%, les concentrations de la chlorophylle a, chlorophylle b, caroténoïdes et les chlorophylles totales sont calculées par les formules suivantes :

$$\text{Chl a} = 9,784x \text{ Do (662)} - 0,99x \text{ Do (644)}$$

$$\text{Chl b} = 21,42x \text{ Do (644)} - 4,65x \text{ Do (662)}$$

$$\text{Chlorophylle totale} = \text{Chl a} + \text{chl b}$$

$$C(x + c) = \frac{1000 \text{ DO (470)} - 1,90 \text{ Chl a} - \text{Chl b}}{214}$$

Do : densité optique

x = xanthophylles ; c = caroténoïdes.

3.3 DOSAGE DES SUCRES SOLUBLES

Les oses (glucoses, fructose et saccharose) sont dosés par la méthode [22]. Ces sucres sont extraits après macération dans un solvant capable de les solubiliser et de bloquer l'activité enzymatique susceptible de les dégrader. Le principe de la réaction est basé sur la condensation des produits de dégradation des oses neutres par l'acide sulfurique: ce dernier, très concentré, transforme à chaud les oses en dérivés du furfural qui donnent une coloration bleu-vert avec l'antrone, dosée par colorimétrie à 585 nm, la concentration est exprimée en $\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \text{MF}$.

3.4 DOSAGE DE LA PROLINE

Le dosage de la proline par la méthode de [23]. L'échantillon végétal est traité par l'éthanol à 40% puis chauffé au bain marie à 85°C pendant 10 minutes. Ensuite, 1 ml d'extrait ajouté dans un mélange d'eau distillée, d'acide acétique et de ninhydrine. La densité optique est lue à 528 nm au spectrophotomètre UV1200.

3.5 DOSAGE DES CATIONS Na^+ ET K^+

Après séchage à l'étuve à 70 °C pendant 16 heures, 200 mg de matière sèche des feuilles sont broyées et incinérées à 450°C pendant 4 heures au four à moufle. Après refroidissement, 2 ml de HNO_3 /capsule sont ajoutés puis on remet au four pendant 1 heure. La cendre obtenue est dissoute dans 3 ml d'HCl (6N) puis filtrée et le volume est amené à 100 ml. A partir de cette solution, les dosages de Na^+ et K^+ sont effectués par photométrie de flamme (Flame photometer corning 400).

Une étude statistique comportant une analyse de la variance du modèle GLM et le calcul de corrélations, est effectué par le logiciel SPSS.

4 RESULTATS

4.1 TENEUR RELATIVE EN EAU (RWC)

Le tableau 1 montre que la RWC est grandement influencée par la nature des variétés testées ($p < 0,05$). Ce paramètre dépend également et d'une manière hautement significative du régime hydrique appliqué ($p < 0,05$). Il faut noter que le comportement de ces variétés varie selon la contrainte appliquée. Ceci est justifié à travers la forte probabilité, établie à travers l'étude de l'interaction de deux facteurs d'étude ($p < 0,05$).

La figure 1 montre que la RWC fluctue pour les feuilles des plantes témoins entre une valeur maximale de $94,08 \pm 1,15$ % enregistrée pour la variété Chen's et une valeur minimale de $91,69 \pm 1,02$ % pour la variété Hedba3. Sous le traitement (SH 60), la RWC atteint une valeur de $90,09 \pm 1,53$ % pour les feuilles des plantes de la variété Hedba3 pour chuter vers $79,89 \pm 3,23$ % dans celles des plantes de la variété Waha. Lorsque les plantes sont soumises au régime hydrique plus sévère (SH 30), les RWC des feuilles des plantes des variétés Bidi17 et Waha varient respectivement de $90,66 \pm 1,90$ % et de $84,47 \pm 1,00$ %.

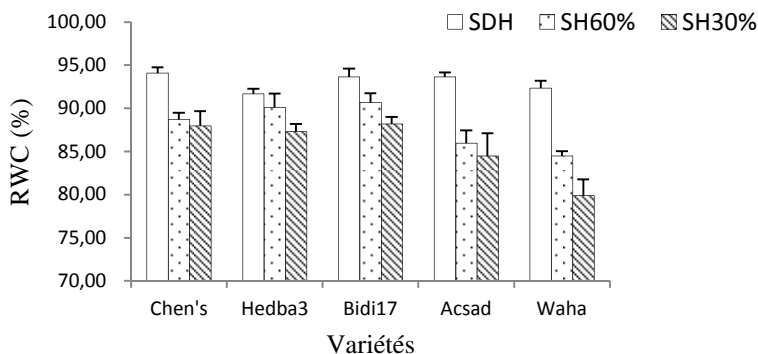


Fig. 1. RWC des feuilles excisées (%) des plantes des variétés de blé conduites sous régime hydrique à SH60 et SH30 au stade floraison

4.2 TENEUR EN PIGMENT CHLOROPHYLLIENS

L'analyse de la variance montre que les pigments chlorophylliens (chl a, chl b, caroténoïdes et chl tot) sont hautement gérée par la nature du matériel végétal conduit ($p < 5\%$) ainsi que par les variations du régime hydrique imposé ($p < 5\%$). Il est important de noter également à la suite de cette analyse qu'une certaine spécificité de réponse au manque d'eau est manifestée par les génotypes testés. Cette dernière s'établit à travers l'influence d'interaction des deux facteurs d'étude sur l'élaboration des pigments ($p > 5\%$)(tableau 1).

4.2.1 TENEUR EN CHLOROPHYLLE A (CHL A), LA CHLOROPHYLLE B (CHL B) ET LA CHLOROPHYLLE TOTALE

Comparativement entre les variétés conduites, l'impact des variations du régime hydrique est perçu de manières similaires pour la teneur en chlorophylle a, chlorophylle b et chlorophylle totale. En effet, Les figures 2.3 et 4 indiquent que pour les plantes témoins la variété Acsad affiche les teneurs les plus importantes de chl a, chl b et chl tot avec respectivement 22.74 ± 0.44 , 11.92 ± 0.65 et $34.66 \pm 0.72 \mu\text{g.g}^{-1}\text{MF}$ et la variété Bidi 17 donne les valeurs les plus faibles des pigments chlorophylliens avec respectivement 10.70 ± 1.57 , 3.41 ± 0.73 et $14.10 \pm 22.15 \mu\text{g.g}^{-1}\text{MF}$.

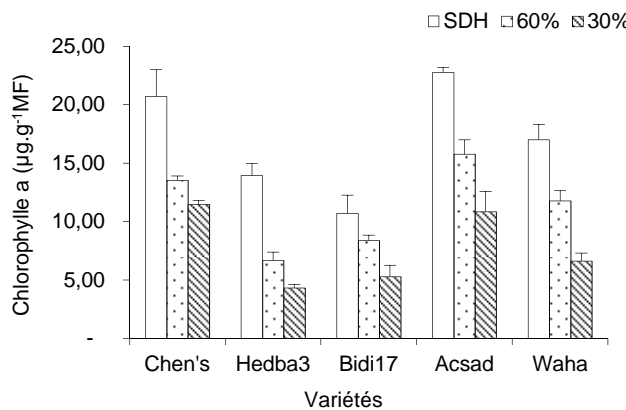


Fig. 2. Teneur en chlorophylle a (chl a) des feuilles excisées ($\mu\text{g.g}^{-1}\text{MF}$) des plantes des variétés de blé conduites sous régime hydrique à SH60 et SH30 au stade floraison.

Sous le traitement SH60, les chl a, chl b et carot passent respectivement de 15.77 ± 1.22 , 6.97 ± 1.13 et $22.74 \pm 1.54 \mu\text{g.g}^{-1}\text{MF}$ enregistrées pour la variété Acsad à 6.68 ± 0.70 , 2.71 ± 1.15 et $9.39 \pm 2.16 \mu\text{g.g}^{-1}\text{MF}$ pour la variété Hedba 3.

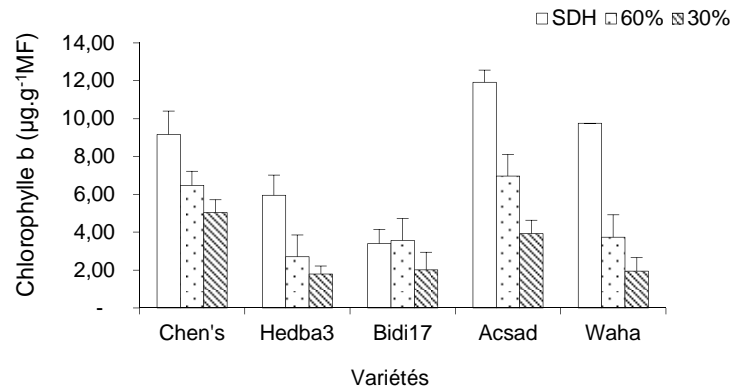


Fig. 3. Teneur en chlorophylle b (chl b) des feuilles excisées ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{MF}$) des plantes des variétés de blé conduites sous régime hydrique à SH60 et SH30 au stade floraison.

Pour les plantes conduites sous traitement SH30, les plus hautes valeurs des pigments estimées pour la variété chen's avec respectivement 11.45 ± 0.35 , 5.04 ± 0.67 et 16.50 ± 1.90 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{MF}$ et les plus faibles valeurs enregistrées pour la variété Hedba 3 avec respectivement 4.33 ± 0.29 , 1.80 ± 0.42 et 6.12 ± 1.70 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{MF}$.

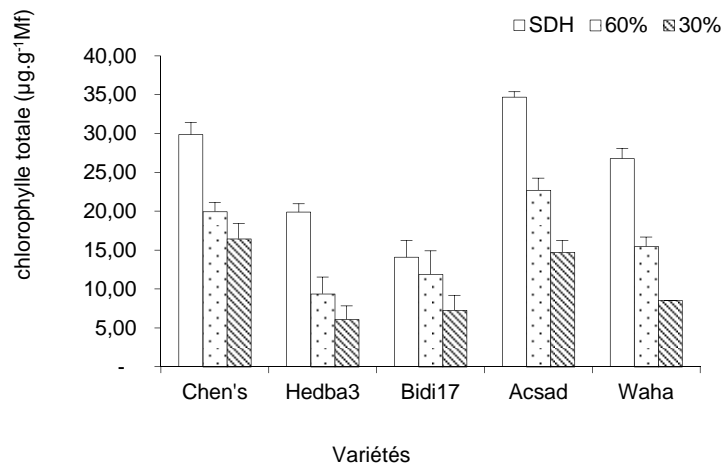


Fig. 4. Teneur en chlorophylle totale (chl tot) des feuilles excisées ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{MF}$) des plantes des variétés de blé conduites sous régime hydrique à SH60 et SH30 au stade floraison.

4.2.2 TENEUR EN CAROTÉNOIDES (CAROT)

La teneur en carot est affectée par le déficit hydrique de manière significative et proportionnelle à l'intensité du régime hydrique appliqué. Pour les feuilles des plantes témoins, carot est limitée entre 7.72 ± 0.11 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{MF}$ pour la variété chen's et 4.86 ± 0.79 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{MF}$ pour la variété Hedba3. Sous le traitement SH60 de la capacité au champ, les carot fluctuent entre 6.59 ± 0.88 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{MF}$ pour la variété chen's et 3.57 ± 0.19 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{MF}$ enregistré pour la variété Bidi17. Au niveau du lot SH30 de la capacité au champ, la plus importante valeur 5.12 ± 0.16 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{MF}$ affichée pour la variété waha et la plus faible donnée estimée pour la variété Bidi17 avec 2.35 ± 0.19 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{MF}$.

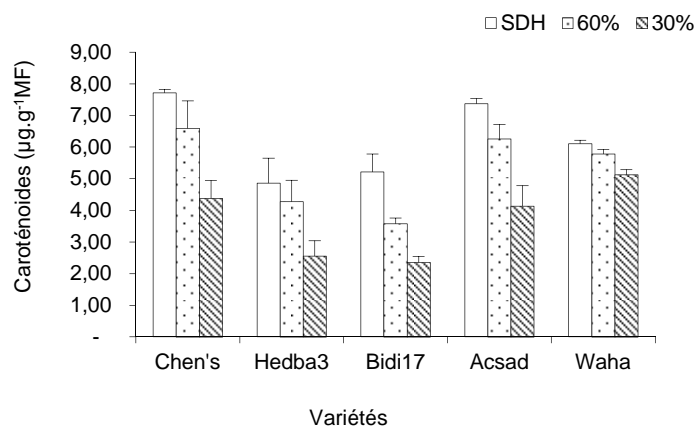


Fig. 5. Teneur en caroténoïdes (carot) des feuilles excisées ($\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\text{MF}$) des plantes des variétés de blé conduites sous régime hydrique à SH60 et SH30 au stade floraison.

Tableau 1. Analyse de la variance de la RWC et la teneur des pigments chlorophylliens des feuilles des plantes des variétés de blé sous régime hydrique au stade floraison.

Paramètre	Effet variétal F1		Effet hydrique F2		Interaction F1xF2	
	Test F	Probabilité	Test F	Probabilité	Test F	Probabilité
RWC	8.322	0.000	41.622	0.000	3.045	0.012
Chl a	7.830	0.000	19.101	0.000	0.356	0.958
Chl b	12.608	0.000	33.587	0.000	2.363	0.052
Carot	14.469	0.000	26.178	0.000	0.808	0.631
Chl tot	10.282	0.000	25.889	0.000	0.746	0.725

4.3 TENEUR EN PROLINE

L'examen des résultats présentés dans le tableau 2 montre que l'élaboration du taux de proline est en relation avec la variabilité génotypique et le régime hydrique appliqué ($P < 0.05$, $P < 0.05$). L'interaction entre les deux facteurs d'étude influe également sur l'élaboration de cette caractéristique ($P < 5\%$). Ce résultat indique que les réponses extériorisées par les variétés expérimentées sont différentes.

L'analyse des résultats montre qu'à la déclaration de la carence hydrique s'accompagne une accumulation de la proline. La figure 6 indique que pour la variété Waha, les valeurs les plus importantes du taux de proline passe de 399 ± 141.26 , 742.66 ± 80.26 à 1040 ± 130.63 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\text{MF}$ respectivement en passant du lot témoin aux situations hydriques, SH60% et SH30%. Concernant la variété bidi17, la proline évolue de 288.33 ± 36.27 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\text{MF}$ pour le lot témoin à 355.50 ± 49.50 , 578 ± 51.15 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\text{MF}$ respectivement pour les traitements SH60% et SH30%.

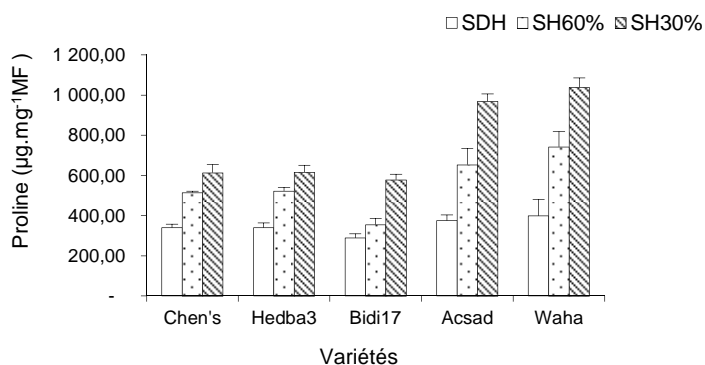


Fig. 6. Teneur en proline des feuilles excisées ($\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\text{MF}$) des plantes des variétés de blé conduites sous régime hydrique à SH60 et SH30 au stade floraison

4.4 TENEUR EN SUCRES SOLUBLES

L'étude analytique des résultats montre que l'expression du taux des sucres solubles présente une forte relation avec la variabilité génotypique ($P < 0.05$). Ainsi que l'alimentation hydrique ($P < 0.05$). L'interaction entre le déficit hydrique et la variabilité testée, aucune distinction n'est notée pour les variétés testées sous contrainte hydrique ($P > 0,05$).

La figure 7 montre que le taux de sucres solubles est affecté par le déficit hydrique de manière significative et proportionnelle à l'intensité du régime hydrique appliqué. Pour les feuilles des plantes témoins, le taux de sucres solubles est limité entre $6.71 \pm 0.43 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \text{MF}$ pour Bidi17 et $4.32 \pm 0.80 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \text{MF}$ pour la variété Hedba3. Sous le traitement SH60 de la capacité au champ, les taux de sucres solubles fluctuent entre $7.93 \pm 1.57 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \text{MF}$ pour la variété Waha et $5.30 \pm 0.86 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \text{MF}$ pour la variété Hedba3. Au niveau du traitement SH30 de la capacité au champ, la plus importante valeur est affichée pour la variété Acsad avec $9.59 \pm 0.07 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \text{MF}$ et la plus faible donnée est estimée pour la variété Hedba avec $7.37 \pm 1 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \text{MF}$.

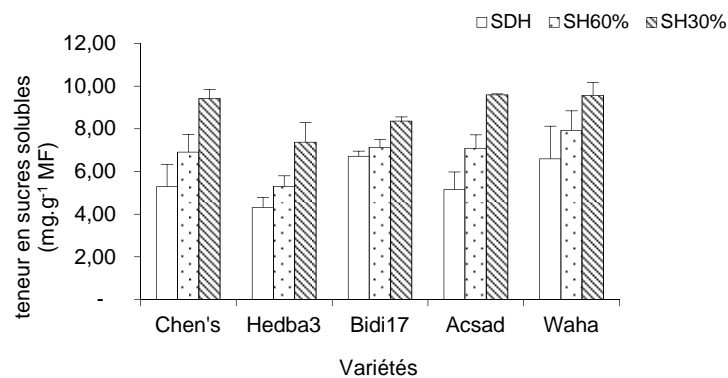


Fig. 7. Teneur en sucres solubles des feuilles excisées ($\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \text{MF}$) des plantes des variétés de blé conduites sous régime hydrique à SH60 et SH30 au stade floraison.

4.5 TAUX DE K⁺

L'analyse statistique présentée dans le tableau 2 démontre que le taux de K⁺ des feuilles est indépendante du régime hydrique et de la variété ($P > 0,05$). L'interaction de ces deux facteurs provoque des fluctuations élevées sur cette perte d'eau ($P < 0.05$). Cet effet s'explique par le fait que la variabilité conduite extériorise des réponses différentes vis-à-vis du régime hydrique appliqué.

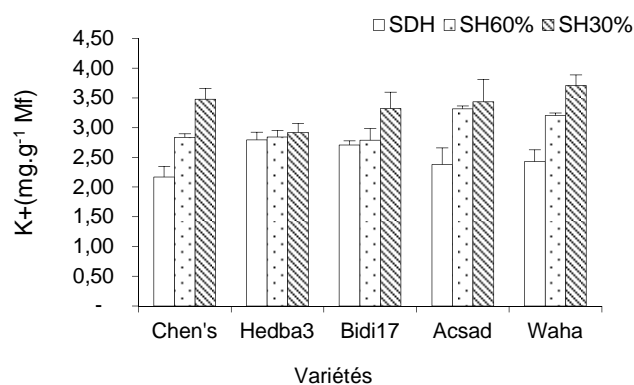


Fig. 8. Teneur K⁺ des feuilles excisées ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Ps}$) des plantes des variétés de blé conduites sous régime hydrique à SH60 et SH30 au stade floraison

Les résultats montrent qu'au niveau du traitement témoin, c'est la variété Hedba qui inscrit la valeur la plus importante avec $2.79 \pm 0.13 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Ps}$, à l'opposé de la variété Chen's qui donne la valeur la plus faible $2.17 \pm 0.18 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Ps}$. Au niveau du traitement SH60 la teneur la plus importante en K⁺ est enregistrée pour la variété Acsad ($3.32 \pm 0.05 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Ps}$) la plus faible

teneur en K^+ est observée pour la variété Bidi17 ($2.79 \pm 0.20 \text{ mg.g}^{-1}\text{Ps}$). Au niveau du traitement SH30 la teneur en K^+ passe de $3.71 \pm 0.18 \text{ mg.g}^{-1}\text{Ps}$ pour la variété waha à $2.92 \pm 0.15 \text{ mg.g}^{-1}\text{Ps}$ pour la variété Hedba3.

4.6 TAUX DE Na^+

L'étude analytique des résultats montre que la teneur en Na^+ ne présente aucune relation avec la variabilité génotypique ($P > 0.05$). Ainsi que l'alimentation hydrique ($P > 0.05$). L'interaction de ces deux facteurs provoque de faibles fluctuations ($P < 0.05$). Cet effet s'explique par le fait que la variabilité conduite extériorise des réponses similaires vis-à-vis du régime hydrique appliqué.

Les valeurs moyennes révèlent que pour les feuilles des plantes témoins, une nette augmentation de la teneur en Na^+ observée pour la variété Hedba3 avec $0.74 \pm 0.10 \text{ mg.g}^{-1}\text{Ps}$ et une valeur minimale de $0.61 \pm 0.07 \text{ mg.g}^{-1}\text{Ps}$ pour la variété Waha. Sous le traitement SH60, la teneur en Na^+ chute remarquablement de $0.95 \pm 0.05 \text{ mg.g}^{-1}\text{Ps}$ pour Bidi17 à $0.75 \pm 0.04 \text{ mg.g}^{-1}\text{Ps}$ pour les variétés Hedba3 et chen's. Au niveau du traitement SH30 la teneur en Na^+ des feuilles de la variété Bidi17 baisse de $0.95 \pm 0.05 \text{ mg.g}^{-1}\text{Ps}$ à $0.86 \pm 0.12 \text{ mg.g}^{-1}\text{Ps}$ pour Hedba3.

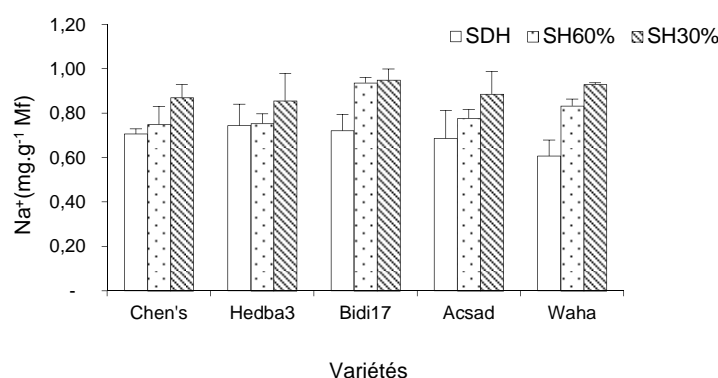


Fig. 9. Teneur Na^+ des feuilles excisées ($\text{mg.g}^{-1}\text{Ps}$) des plantes des variétés de blé conduites sous régime hydrique à SH60 et SH30 au stade floraison.

Tableau 2. Analyse de la variance des teneurs en sucre solubles et les taux de proline des feuilles des plantes des variétés de blé sous régime hydrique au stade floraison.

Paramètre	Effet variétal F1		Effet hydrique F2		Interaction F1xF2	
	Test F	Probabilité	Test F	Probabilité	Test F	Probabilité
Proline	27.818	0.000	111.218	0.000	4.898	0.000
Sucres solubles	4.262	0.007	24.965	0.000	0.576	0.788
K^+	0.548	0.701	1.387	0.265	3.591	0.004
Na^+	0.617	0.653	0.520	0.599	2.124	0.064

5 DISCUSSION

L'état hydrique de la plante, exprimé par la teneur relative en eau, s'est montré sensible aux variations des disponibilités en eau dans le sol. En effet, une comparaison entre l'évolution de la RWC des cinq variétés de blé étudiées a montré que la RWC diminue au fur et à mesure que le déficit hydrique s'accroît. Ces constatations se confirment par la nette relation négative et significative révélée entre le déficit hydrique et la RWC ($r = -0,551^{**}$). La référence [9],[24], [25] notent que cette diminution de la RWC est plus rapide chez les variétés sensibles que chez les variétés résistantes. Par contre une RWC élevée dans des conditions de stress a été observée chez le soja. D'autre part, [25], [26] montrent que les génotypes qui maintiennent une RWC élevée en présence de stress hydrique sont des génotypes tolérants.

Une corrélation négative est observée entre le déficit hydrique et les teneurs en chlorophylle b ($r = -0,320^*$) et les caroténoïdes ($r = -0,394^{**}$). Ces corrélations sont traduites par les faibles teneurs en chlorophylles enregistrées en situation de déficit hydrique. La teneur en chlorophylles a été affectée par le manque d'eau de manière significative et proportionnelle à l'intensité du stress hydrique appliqué chez les cinq variétés testées [27]. Cette baisse observée par les plants du traitement

SH30% a été significativement plus importante que celle des plants du traitement SH60%. Ces résultats sont en concordance avec ceux de [9] qui ont montré que sous un stress hydrique, une diminution de la teneur en chlorophylle est remarquée chez le blé dur.

La capacité d'ajustement apparaît, chez de nombreuses espèces comme un mécanisme clé dans la tolérance à la déshydratation [28], [29]. Il consiste en une diminution du potentiel osmotique, provoquée par l'accumulation d'osmoticums, essentiellement ceux issus du propre métabolisme de la plante et dont principalement les sucres solubles et la proline [28]. Elle se rapporte spécifiquement à une augmentation de ces solutés, provoquée par des processus métaboliques déclenchés par le stress.

L'ajustement osmotique fait diminuer le potentiel hydrique qui devient donc plus négatif, permettant ainsi de maintenir le mouvement d'eau vers les feuilles et par conséquent leur turgescence [3], [11], [30]. Ce type de tolérance permet à la plante d'assurer normalement ses fonctions physiologiques malgré une dépression de son état hydrique interne conséquente à la sécheresse [14]. Les sucres sont considérés par plusieurs auteurs comme de bons osmorégulateurs qui peuvent jouer un rôle important dans l'ajustement osmotique et l'adaptation des plantes à la sécheresse [28], [30]. Une forte corrélation positive est notée entre la contrainte hydrique appliquée et la teneur en sucres solubles ($r=0,695^{**}$). Le déficit hydrique augmente considérablement la teneur en sucres solubles. Cette hausse devient plus nette au fur et à mesure que l'intensité du stress s'accroît. Les résultats enregistrés lors de cette étude se trouvent largement confirmés par les nombreux travaux réalisés dans ce domaine. En effet, l'implication des sucres dans la tolérance au stress hydrique a été mise en évidence par les corrélations observées entre le contenu en certains sucres et l'acquisition de la tolérance [31].

L'accumulation de la proline constitue aussi un véritable mécanisme de tolérance à la sécheresse [32]. En effet, la teneur en proline est plus élevée en cas de déficit hydrique et, en particulier, chez les génotypes les plus résistants à la sécheresse [30]. Les résultats dégagés de notre étude démontrent efficacement cette logique. Ainsi, on démontre que l'augmentation de la proline est favorisée par l'accroissement de la sévérité du déficit hydrique appliqué ($r=0,743^{**}$). Certains auteurs, [33] ont proposé l'accumulation de la proline comme technique de sélection. [31], [32] montrent que plusieurs sélectionneurs et physiologistes ont utilisé la capacité de son accumulation dans le criblage de génotypes résistants au déficit hydrique [3], [11], [34]. Les résultats que nous venons de décrire sur l'analyse des cations monovalents comme les Na^+ et K^+ suggèrent une variabilité cationique de la réponse de blé comme un bon marqueur physiologique au déficit hydrique. En effet, l'intensification du déficit hydrique s'accompagne d'une progression du Na^+ des plantes utilisées. Divers travaux rapportent que l'accumulation du Na^+ dans les feuilles peut causer la toxicité chez les glycophytes [21], [11]. Cette forme de séquestration du Na^+ en excès dans les feuilles indique l'abaissement du potentiel osmotique [33]. Un taux élevé de K^+ conduit à un ratio K^+/Na^+ relativement important qui influe sur la photosynthèse ce qui est confirmé par les résultats de [34], ratio clé de la tolérance des plantes à la sécheresse. Les variétés utilisées accumulent plus de K^+ que de Na^+ comme le confirment les travaux de [35] sur le blé dur et [34], [36] sur le blé et l'orge. L'effet du déficit hydrique sur l'absorption de K^+ a été observé chez plusieurs espèces végétales telles que les triticales [33], et l'olivier [38], [31].

6 CONCLUSION

La sécheresse constitue la principale contrainte abiotique responsable de la faiblesse du rendement des céréales et celui du blé dur. La résistance à la sécheresse est un phénomène complexe faisant intervenir devant les contraintes environnementales, de nombreux mécanismes d'adaptation interagissant entre eux et les conditions du milieu. L'identification des mécanismes de résistance demeure déterminante dans toutes manipulations de création de matériel végétal tolérant à cette contrainte abiotique. Le travail entrepris se fixait comme objectifs la sélection des paramètres d'ordre divers impliqués dans la fonction de tolérance au déficit hydrique chez le blé dur. Les résultats obtenus lors de cette étude montrent que la teneur relative en eau représente l'une des premières caractéristiques altérées en situations d'alimentation hydriques limitantes. Il se dégage de cette étude que le déficit hydrique est accompagné d'une forte augmentation des teneurs en sucres solubles et en proline. Ainsi, au niveau des traitements maintenus à des faibles teneurs en eau, la teneur en sucre solubles croît considérablement en comparaison avec celui des traitements plus hydratés.

L'existence chez les céréales d'une variation intraspécifique pour l'accumulation de la proline sous l'effet du stress hydrique suggère la possibilité d'une sélection, sur la base de ce caractère, des génotypes qui auront une bonne capacité à survivre et un rendement en grains stable en conditions hydriques limitantes.

REFERENCES

- [1] R. Motzo, G. Pruneddu, F. Giunta, "The role of stomatal conductance for water and radiation use efficiency of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment". Science direct. Europ Journal Agronomy, no. 44, pp. 87-97. 2013
- [2] F. Ouerghi, G. Bouzaïen, A. Albouchi, M. Ben-Hammouda, H. Cheikh M'hamed, S. Aloui- Rezgui, and B. Nasraoui, " Effects of linseed oil spray on some physiological traits of durum wheat and barley under glasshouse water deficit stress. Tunisian Journal of Plant Protection no 5, pp. 1-8, 2010.
- [3] S. Yousfi, M. D. Serret, A. J. Marquez, J. Voltas and J. L. Araus, Combined use of $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$ and $\delta^{15}N$ tracks nitrogen metabolism and genotypic adaptation of durum wheat to salinity and water deficit, New physiologist vol. 194, pp. 230-244, 1011.
- [4] WU Xiao-li and BAO Wei-kai, " Statistical Analysis of Leaf Water Use Efficiency and Physiology Traits of Winter Wheat Under Drought Condition", Journal of Integrative Agriculture, vol. 11, no. 1, pp. 82-89. 2012.
- [5] J. B. Passioura, " Phenotyping for drought tolerance in grain crops: when is it useful to breeders?" functional plant biology, vol. 39 no. 11 pp. 851-859. 2012.
- [6] M. EL fakhri, S. mahboub, M. benchekroun, N. nsarellah, " Effet du stress hydrique sur les caractéristiques d'enracinement du blé dur (*Triticum Durum*. Desf), Nature et Technologie, n° 03, pp. 06- 12, 2010.
- [7] RA. Richards, GJ. Rebetzke, M. Watt, AG. Condon, W. Spielmeyer, R. Dolferus Breeding for improved water productivity in temperate cereals: phenotyping, quantitative trait loci, markers and the selection environment. Functional Plant Biology vol. 37, pp. 85–97. doi:10.1071/FP09219.
- [8] L. Song, D-W. Zhang, F-M. Li, X-W. Fan, Q. Ma, NC. Turner, "Soil water availability alters the inter- and intra-cultivar competition of three spring wheat cultivars bred in different eras". Journal Agronomy & Crop Science.vol. 196, pp.323–335. 2010. doi:10.1111/j.1439-037X.2010.00419.x
- [9] T. Boutraa, A. Akhkha, A. Al-Shoaibi; A. Alhejeli, "Effect of water stress on growth and water use efficiency (WUE) of some wheat cultivars (*Triticum durum*) grown in Saudi Arabia". Journal for science of Taibah university vol. 3, pp.39-48. 2010.
- [10] S. Attab, L. Brinis," Etude comparative de la réponse physiologique de deux variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à l'infection par *Blumeria graminis* f.sp.tritici agent causal de l'oïdium". Rev. Sci. Technol., Synthèse vol.25 pp. 82 – 87. 2012
- [11] S. Yousfi, M. D. Serret, J. Voltas and J. L. Araus, "Affect of salinity and water stress during the reproductive stage on growth, ions concentrations, $\Delta^{13}C$, and $\delta^{15}N$ of durum wheat and related amphiploids", Journal of Experimental Botany, vol. 61, no. 13, pp. 3529-3542, 2010.
- [12] J.L. Araus, G.A. Slafer, C. Royo, M.D. Serret, Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals.Critical Reviews in Plant Sciences vol. 27, pp.377–412, 2008.
- [13] D. Son, E compaore, S. Bonkougou, S. Sangare," Effect of water stress on sesame (*Sesamum indicum*) growth and yield production", Journal of Applied Biosciences vol. 37, pp. 2460-2467, 2011.
- [14] A. Elazab, G.Molero, MD. Serret, Araus JL. Functional Plant Biology, 2012, vol. 39, pp. 379–393. 2012. <http://dx.doi.org/10.1071/FP11237>
- [15] Hacini N. Etude de l'interaction Génotype X Environnement et effet de l'origine de quelques cultivars de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sur les aptitudes adaptatives et qualitatives. 2014
- [16] PL. Drake ; RH. Froend ; PJ. Franks ; Smaller, faster stomata: scaling of stomatal size, rate of response, and stomatal conductance. Journal of Experimental Botany, Vol. 64, No. 2, pp. 495–505, 2013 doi:10.1093/jxb/ers347 10.1093/jxb/ers347
- [17] PY. Ladiges, "Some aspects of tissue water relation in three populations of *Eucalyptus viminalis* Labill", New phytol, vol. 75, pp. 53-62, 1975.
- [18] J.M. Clarke, T.N. Mc Caig, "Excised-leaf water retention capability as an indicator of drought resistance of *Triticum* genotypes", Can. J. Plant Sci. Vol. 62, pp. 571-578, 1982.
- [19] H. K. Lichtenthaler , "Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes", Methods Enzymol, vol. 148, pp. 350-380, 1987.
- [20] SN. Shabala, RR. Lew, "Turgor regulation in osmotically stressed *Arabidopsis* epidermal root cells : support for the role of inorganic ion uptake as revealed by concurrent flux and cell turgor measurements", Plant physiology, no. 129, pp. 290-299, 2002.
- [21] S. N Shabala, S. I. Shabala, A. I. Martynenko, O. Babourina, AND I. A. Newman, "Salinity effect on bioelectric activity, growth, Na^+ accumulation and chlorophyll fluorescence of maize leaves: a comparative survey and prospects for screening", Journal Plant Physiology, Vol. 25, pp 609-616, 1998.

- [22] D. Rekika, "Identification et analyse génétique des caractères physiologiques liés au rendement en conditions de sécheresse chez le blé dur. Intérêt potentiel des espèces sauvages apparentées pour l'amélioration de ces caractères", Thèse Doctorat, ENSAM France : 160 p. 1997.
- [23] W. Troll AND J. Lindsley, "A photometric method for the determination of proline"; *J. Biochem*, pp. 655-660. 1955
- [24] Huseynova I M., Photosynthetic characteristics and enzymatic antioxidant capacity of leaves from wheat cultivars exposed to drought. *Biochimica et Biophysica Acta* vol. 1817 pp.1516–1523.2012.
- [25] A. Thameur, A Ferchichi, M. López-Carbonell. Quantification of free and conjugated abscisic acid in five genotypes of barley (*Hordeum vulgare* L.) under water stress conditions. *Science direct. South African Journal of Botany*, vol. 77, pp.222–228. 2011
- [26] A.Thameur, B. Lachiheb, A. Ferchichi , " Drought effect on growth, gas exchange and yield, in two strains of local barley Ardhaoui, under water deficit conditions in southern Tunisia". *Science direct. Journal of Environmental Management* vol.113 pp. 495-500. 2012.
- [27] Y. Ni, Y.J. Guo, Y.J. Guo, L. Han, H. Tang, and M. Conyers, " Leaf cuticular waxes and physiological parameters in alfalfa leaves as influenced by drought", *PHOTOSYNTHETICA* vol. 50 no. 03, pp. 458-466, 2012.
- [28] P. Diazz, M. Betti, D. H. Sanchez, M. K. Udvardi, J. Monza, A.J. Marquez, Deficiency in plastidic glutamine synthetase alters proline metabolism and transcriptomic response in *Lottus japonicus* under drought stress. *New phytologist*, Vol. 188, pp. 1001-1013, 2010.
- [29] Dias, M.C., Brüggemann, W.: Limitations of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* under drought stress: Gas exchange, chlorophyll fluorescence and calvin cycle enzymes. – *Photosynthetica* vol. 48 pp. 96-102, 2010.
- [30] Hassani, A. Dellal, M. Belkhdja, M. Kaid- Harche, Effet de la Salinite Sur L'eau et Certains Osmolytes Chez L'orge (*Hordeum Vulgare*), *European Journal of Scientific Research*, Vol.23 No.1 (2008), pp.61-69, 2008 .
- [31] E. Ottow, M. Brinker, E. Fritz, T. Teichmann, W. Kaiser, M. Brosche, J. Kangasjarvi, X. Jiang, and A.Polle, "Populus euphratica Displays Apoplastic Sodium Accumulation, Osmotic Adjustment by Decreases in Calcium and Soluble Carbohydrates, and Develops Leaf Succulence under Salt Stress", *Plant Physiology*, Vol. 139, pp. 1762–1772, 2005.
- [32] A.Slama, M. Salem, M. Ben Naceur, E. Zid, "Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanisme de résistance". *Sécheresse*, Vol. 16, pp. 225- 229. 2005.
- [33] A. Morant-Manceau, E. Pradier, G.Tremblin, "Osmotic adjustment, gas exchanges and chlorophyll fluorescence of a hexaploid triticale and its parental species under salt stress". *Journal Plant Physiol*, vol. 161, Pp. 25–33, 2004.
- [34] R. Munns, a.j.Richard, A. Lauchli " Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals". *Journal of Experimental Botany*, Vol. 57, No. 5, pp. 1025–1043, 2006.
- [35] Lindsay, E. Lagudah, and R. Munns. "A locus for sodium exclusion (Nax1), a trait for salt tolerance, mapped in durum wheat". *Functional Plant Biology* vol. 31. Pp.1105–1114. 2004.
- [36] R. Munns..Comparative physiology of salt and water stress; *Plant, Cell and Environment*, vol. 25, pp.239–250, 2002
- [37] A.R.Navarro, F. Rubio. "High-affinity potassium and sodium transport systems in plants" *Journal of Experimental Botany*; 57(5):1149-1160, 2006.