

Effet du stress hydrique sur les critères physiologiques et biochimiques chez neuf géotypes de pois chiche (*Cicer arietinum* L.)

Houasli Chafika^{a*}, Nasserlhaq Nsarellah^a, Elbouhmedi Keltoum^b, Mahboub Said^b,
 Sripada Udupa^c

^aInstitut National de la Recherche Agronomique du Maroc, Centre Régional de Settat, Settat 26000, Maroc.

^blaboratoire d'Ecologie et d'Environnement, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Casa, Maroc

^cCentre international pour la recherche agricole dans les zones arides, Syrie

*Auteur correspondant : houaslichafika@gmail.com

Résumé

Le pois chiche (*Cicer arietinum* L.) est une espèce largement cultivée à travers le monde. La sécheresse est un facteur important dans la faible productivité du pois chiche. La valeur des pertes causées par ce fléau est estimée à 1,2 milliards de dollars dans le monde. L'augmentation des rendements passerait obligatoirement par l'utilisation de variétés tolérantes aux stress hydrique. L'objectif de ce travail est d'étudier quelques réponses physiologiques et biochimiques à la sécheresse de cette espèce et d'évaluer la contribution du facteur génétique à l'amélioration de la tolérance du pois chiche à la sécheresse.

Mots clés : Pois chiche, stress hydrique, composés biochimiques, caractéristiques physiologiques, tolérance

Effect of water stress on physiological and biochemical characteristics of nine chickpea (*Cicer arietinum*) genotypes

Abstract

Chickpea (*Cicer arietinum* L) is a widely cultivated crop species throughout the world. Drought is a major constraint to chickpea production. Losses attributed to drought are estimated at 1.2 billion dollars worldwide. Improved yields would be brought by the use of water stress tolerant varieties. The objective of this work is to study some physiological and biochemical responses in this crop species to drought stress and to assess the contribution of the genetic factor in improving chickpea tolerance to drought. Nine chickpea genotypes were subjected, in a three blocks trial, to two watering regimes. The experiment was conducted in a greenhouse with controlled environment. Several physiological and biochemical criteria were studied (membrane stability, relative water content, chlorophyll (a, b and total), free proline, total soluble carbohydrates and total amino acids contents). The results showed that water stress induced changes in concentrations of several of the compounds studied. The genotype factor showed effects that were statistically significant for certain characteristics (RWC and Chlorophylls). The interaction between water regime and genotypes showed no significant effect. This study shows that all measured criteria were involved in the response of chickpea to water stress and that the genetic factor is involved in the case of chlorophyll. This study also shows that further study of the genetic factor could produce genotypes more efficient in terms of drought tolerance.

Key words: Chickpea, water stress, biochemical components, physiological characteristics, tolerance

1. Introduction

Le pois chiche est une espèce principalement cultivée sous conditions pluviales et généralement dans des zones à climat semi-aride. Les sécheresses fréquentes et la mauvaise répartition des pluies constituent la majeure

contrainte abiotique de la production. Les pertes de rendement peuvent être le résultat de sécheresses intermittentes pendant la phase végétative, le développement ou encore pendant la phase de reproduction (sécheresse de fin du cycle de la culture) [1]. Pendant la période sèche de l'année, les plantes sont soumises à une forte demande évaporatrice de l'atmosphère et à une faible disponibilité en eau du sol.

Pour réduire les effets de la sécheresse, la plante a deux possibilités : réduire les pertes en eau par transpiration et/ou maintenir une meilleure alimentation hydrique malgré une réduction des disponibilités en eau du milieu [2]. La tolérance dans le cas d'un abaissement du potentiel hydrique s'exprime par un maintien de la turgescence, rendu possible grâce au phénomène d'ajustement osmotique [3 ; 4]. La capacité d'ajustement osmotique d'un végétal est liée à sa capacité d'accumuler, au niveau symplasmique et de manière active certains solutés [5 ; 6 ; 7]. Les solutés responsables de l'osmorégulation sont essentiellement des acides organiques, des acides aminés et des sucres. Parmi les acides aminés, l'accumulation de la proline permet la protection de la membrane cellulaire et participe à l'ajustement osmotique. L'ajustement osmotique peut être aisément évalué à partir des mesures de potentiel osmotique et de la teneur relative en eau, l'accumulation des sucres solubles étant la cause essentielle de la baisse du potentiel osmotique [8]. Les améliorateurs recherchent à identifier des paramètres physiologiques et biochimiques pouvant être exploités pour la sélection de génotypes tolérants à la sécheresse.

L'objectif du présent travail pourrait être décomposé en deux niveaux :

1) Etudier et analyser les changements de certains paramètres physiologiques et biochimiques des neuf génotypes face à un stress hydrique.

2) Choisir parmi les caractéristiques étudiées, celles qui indiqueraient le mieux la tolérance des variétés du pois chiche à la sécheresse. Dans ce contexte, la tolérance peut être reliée majoritairement à un seul de ces paramètres comme il peut l'être à plusieurs de ceux-ci.

2. Matériel et méthodes

Matériel végétal utilisé : Le matériel végétal utilisé dans cette étude est représenté par neuf génotypes de pois chiche (*Cicer arietinum* L.) (variétés ou lignées sélectionnées) ayant des comportements contrastés vis-à-vis du stress hydrique, constaté au champ. Le génotype ILC3279 est le plus sensible au stress hydrique, tandis que le génotype ILC3182 est le plus tolérant ; les autres génotypes (Flip97-114C, Flip97-190C, Flip97-281C, Flip98-50C, Flip 98-121C, Farihane et Moubarak) présentant des niveaux intermédiaires de tolérance à la sécheresse [9]. Ces génotypes proviennent du programme national Marocain de l'amélioration génétique des plantes légumineuses de l'Institut National de la Recherche Agronomique à Settat.

Expérimentation : les semences des neuf génotypes ont été semées en serre dans un environnement contrôlé. L'expérimentation a été conduite au centre régional de recherche agronomique de Settat (INRA, Maroc) durant la campagne 2010-2011. La température de l'air est maintenue entre 20 et 24°C. Le semis a été effectué dans

des pots en plastique (hauteur 0.40m * diamètre 0,25m), remplis d'un mélange équivalent de terre, de sable de rivière et de tourbe préalablement désinfectés. Le tableau 1 présente les caractéristiques de ce mélange.

Tableau 1. Caractéristiques du sol utilisé.

pH (eau)	pH (KCl 1M)	Matière organique (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	K ₂ O (ppm)	NO ₂ (ppm)
8.18	7.12	8.45	169.17	1059.25	93.68

La densité de semis était de huit graines/ pot. Après la levée, seulement cinq plantes ont été maintenues par pot. L'installation a été réalisée selon un dispositif expérimental en trois blocs aléatoires complets (trois répétitions). Les traitements suivants ont été affectés à chaque bloc :

- T : représente le traitement non stressé (Témoin) irrigué durant tout le cycle.
- S : représente l'application d'un stress hydrique dès le début de la floraison.

Le stress hydrique est provoqué par la réduction de la dose et de la fréquence d'irrigation. En effet les pots des blocs irrigués continuent à être irrigués trois fois par semaine, alors que les pots des blocs stressés, reçoivent une faible irrigation (correspondant à 80 % de l'humidité à la capacité au champ) une fois par semaine. Les pots mis sous stress sont irrigués, dès que le seuil de 80% de l'humidité à la capacité au champ est atteint, et ceci, jusqu'à la fin de la phase concernée par le stress.

Mesure des paramètres physiologiques

La teneur relative en eau des feuilles: La teneur relative en eau des feuilles est le rapport entre la teneur en eau de l'échantillon au moment de sa récolte sur la teneur en eau maximale lorsque les cellules sont à pleine turgescence. Elle est calculée selon la méthode décrite par Turner [10]. Les trois dernières folioles de la quatrième feuille ont été coupées et pesées immédiatement pour déterminer le poids frais (PF). Les feuilles pesées ont été mises dans de l'eau distillée à l'obscurité et à 4°C pendant 24 heures puis de nouveau pesées afin d'obtenir leur poids à la turgescence (PT). Ensuite les échantillons ont été mis à l'étuve (à 70°C) pendant 48h ; le poids sec (P.S.) a alors été mesuré et la Teneur Relative En eau TRE a été calculée selon la formule :

$$TRE = \left(\frac{PF - PS}{PT - PS} * 100 \right)$$

La stabilité membranaire : Elle a été évaluée 90 Jours après semis (JAS), selon la méthode développée par Sullivan et Ross [11], qui consiste à mesurer, sur des disques foliaires, les pourcentages des dommages subis par les membranes cellulaires après un choc osmotique (-3,30 MPa) ou un choc thermique (10 minutes à 50°C).

Mesure des paramètres biochimiques

La concentration en chlorophylle a et b des feuilles : Les concentrations des feuilles en chlorophylles a et b ont été déterminées, durant le stade floraison-formation des gousses, sur des feuilles terminales en utilisant des disques foliaires (30 mg). Après extraction à l'aide de diméthylformamide, le dosage des chlorophylles a et b est réalisé au spectrophotomètre aux longueurs d'onde de 664,5 nm (maximum d'absorption pour la chlorophylle a) et 647 nm (maximum d'absorption pour chlorophylle b). Les concentrations en chlorophylles a et b exprimées en mg. L⁻¹ sont déterminées selon Inskeep et Bloom [12]. Chl a (mg/L) = 12,7 A664,5 - 2,79 A647 et Chl b (mg/L) = 20,7 A647 - 4,62 A664,5. A est l'Absorbance en nm. Les concentrations en chlorophylles sont ensuite converties en (mg/g MF) en multipliant la concentration (en mg/L) par le volume de diméthylformamide en litre/poids des disques foliaires (en g).

La concentration en proline : La proline a été dosée par la méthode Troll et Lindsey [13], améliorée par Magne et Larher [14]. Une gamme étalon est faite à l'aide d'une solution de proline pure. La densité optique est lue à 515 nm au spectrophotomètre.

La concentration en glucides solubles totaux : Le dosage des glucides solubles a été effectué par la méthode de Roe [15].

La concentration en acides aminés libres totaux: Pour le dosage des acides aminés libres, la méthode de Yemm et Cocking [16] a été utilisée.

Analyses statistiques : Les résultats ont été soumis à une analyse de la variance du modèle complètement aléatoire à deux facteurs. Le modèle statistique utilisé pour l'analyse de la variance est : Variable = (G) Génotype + (RH) Régime hydrique + G x RH + erreur résiduelle ; Les moyennes ont été soumises aux tests des groupes homogènes selon la méthode de Student-Newman-Keuls et Duncan au seuil de 5%. Une analyse en composantes principales (ACP) est faite pour identifier les principales variables discriminantes des géotypes soumis au régime hydrique limité. Le but est d'identifier les variables qui pourraient servir de critères de base pour la sélection de géotypes tolérants au stress hydrique.

RESULTATS

L'analyse de la variance montre que le stress hydrique a eu un effet significatif sur tous les critères mesurés et que le génotype a montré un effet significatif sur les teneurs de chlorophylle seulement (chl a, chl b et chl totales). L'interaction entre les deux facteurs (G x RH) est partout non significative (Tableaux 1 et 2). L'absence d'interaction entre génotype et régime hydrique indique que tous les géotypes ont eu la même réponse au stress

Tableau 2: Analyse de variance de la Teneur Relative en Eau et des chlorophylles

Sources de variation	Somme des carrés				
	DL	TRE	Chl a	Chl b	Chl T
Régime hydrique (RH)	1	2565,32***	3,7278***	0,45199**	4,9386***
Génotype (G)	8	296,93***	0,7414***	0,12527*	1,2226***
G X RH	8	122,05 ns	0,1530ns	0,09234ns	0,3394ns
CV (%)	-	14,8	27,3	51,4	25,5

***, **, * significatif à 0,1% ; 1% ; 5% respectivement ; ns : non significatif. ; DL : Degrés de liberté ; TRE : teneur relative en eau ; Chl a : chlorophylle (a) ; Chl b : chlorophylle (b) ; Chl T : chlorophylle totale

Tableau 3: Analyse de la variance des composés hydrosolubles

Sources de variation	Somme des carrés			
	DL	Proline	AAT	GST
Régime hydrique (RH)	1	20328,07***	45241,9***	8803,1***
Génotype (G)	8	117,43 ns	966,7 ns	119,8 ns
G X RH	8	26,62 ns	374,8 ns	142,4 ns
CV (%)	-	16,4	20,3	25,5

***, **, * significatif à 0,1% ; 1% ; 5% respectivement ; ns : non significatif. ; DL : Degrés de liberté ; AAT : acide aminés totaux ; GST : glucides solubles totaux;

Réponse des paramètres physiologiques

La teneur relative en eau : La teneur relative en eau a montré des différences très hautement significative entre les variétés et entre les traitements hydriques (Tableau1). Le stress hydrique a induit une baisse de la TRE chez tous les géotypes (Figure1). La diminution varie entre 7% (chez les deux géotypes Moubarak et ILC 3182) et

50,22% (chez le génotype sensible ILC3279) (Tableau3). Ainsi les géotypes tolérants sous conditions de champs, ont maintenu une TRE plus élevée sous stress hydrique (Figure 1). Les mêmes résultats ont été rapportés chez le haricot [17]. L'interaction entre les effets du génotype et du stress hydrique a été non significative (les variétés ont ainsi répondu de manière uniforme au stress hydrique).

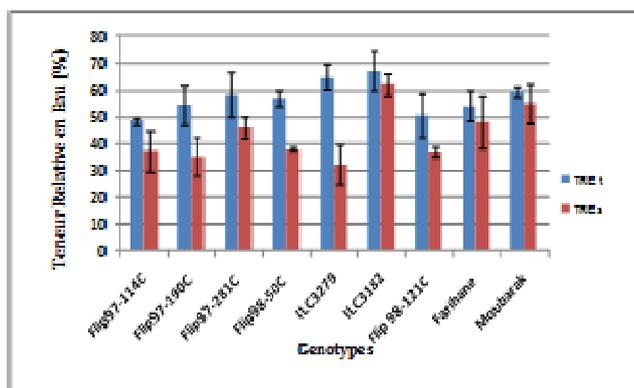


Figure 1 : Teneur relative en eau de neuf géotypes de pois chiche sous deux régimes hydrique différents

La teneur relative en eau est un indicateur très utilisé pour mettre en évidence l'état de la balance hydrique d'une plante. Matin et al [18] suggère que les géotypes qui arrivent à maintenir une teneur relative en eau élevée sous stress hydrique sont des géotypes les plus tolérants à la sécheresse. Ainsi, Levit J [19] 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. Ainsi, ces résultats indiqueraient que la teneur relative en eau serait un outil de comparaison ou un critère de sélection pour la tolérance à la sécheresse.

La teneur des feuilles en chlorophylle

Chlorophylle a : Le stress hydrique et le facteur géotype ont montré des effets statistiquement significatifs sur ce critère. L'effet de l'interaction entre régime hydrique et géotype est non significatif. L'évolution de la teneur en chlorophylle a, montre que tous les géotypes étudiés répondent négativement au stress hydrique et montrent une diminution de la teneur en chlorophylle a après l'application du stress (Figure 2). Cependant cette réduction est variable d'un géotype à l'autre.

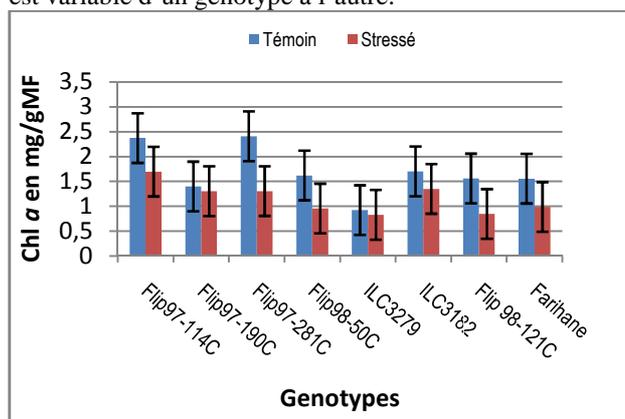


Figure 2. Variation de la teneur en chlorophylle (a) chez les différents géotypes de Pois chiche soumis au stress hydrique

Les géotypes Flip 97-281C, Flip 98-121C, Flip 98-50C, Farihane, Moubarak et Flip 97-114C, ont montré une diminution significative par rapport à leur témoins et ont enregistré des réductions de teneurs en chlorophylle a variant de 28 à 46% (Tableau 3). Les géotypes ILC3182, ILC3279 et Flip 97-190C semblent être les moins touchés et ont affiché une réduction de 20, 10 et 6,8% respectivement.

Chlorophylle b : Le stress hydrique et le facteur géotype ont montré des effets statistiquement significatifs sur ce critère. L'analyse de l'évolution de la teneur en chlorophylle b sous stress hydrique fait ressortir que les géotypes étudiés sont répartis en trois groupes : Un premier groupe formé de géotypes ayant subi une réduction importante de leur teneur en chlorophylle b sous l'effet du stress hydrique. Ce groupe est formé des géotypes : Flip97-114C, F197-190C, Flip98-121C, ILC3182C et Moubarak. Pour le second groupe constitué de Flip97-281C, Flip98-50C et ILC 3279 la teneur en chlorophylle b a subi une réduction légère suite à l'effet du stress hydrique. Le troisième groupe est constitué par la variété Farihane : il y a une augmentation de la teneur en chlorophylle b.

Tableau 4 : Pourcentage de variation de la TRE, la Chl a et la Chln b des feuilles de pois chiche sous stress hydrique

Géotypes	TRE	Chl a	Chl b
Flip97-114C	-22,90	-28,45	-33,97
Flip97-190C	-35,64	-6,80	-59,87
Flip97-281C	-21,22	-45,76	-21,87
Flip98-50C	-32,81	-41,05	-23,96
ILC3279	-27,25	-10,20	-7,02
ILC3182	-10,97	-20,63	-62,63
Flip 98-121C	-7,67	-45,70	-39,78
Farihane	-50,23	-36,61	157,71
Moubarak	-7,26	-30,84	-48,44

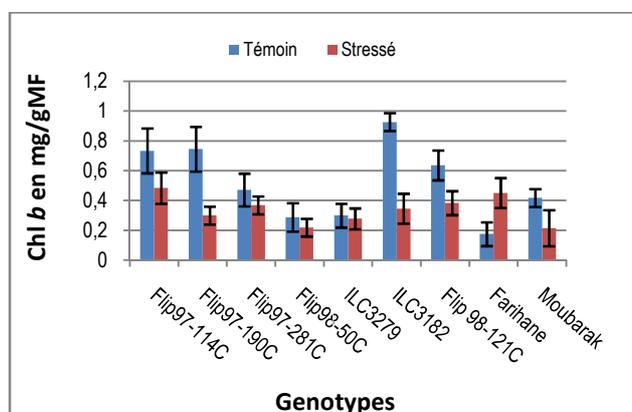


Figure 3: Variation de la teneur en chlorophylle (b) chez les géotypes de Pois chiche soumis au stress hydrique

Rapport chl a/chl b : sous stress hydrique, il y a eu une diminution importante du rapport chl a/chl b pour les géotypes Flip97-281C, Flip98-50C et Farihane variant entre 22 % et 75% (tableau 4). Cela veut dire que la chlorophylle a est plus rapidement détruite que la chlorophylle b. Pour les géotypes Flip97-114C, ILC3279 et Flip 98-121C, l'effet du stress hydrique sur le rapport chl a/chl b n'a pas été significatif. Ceci peut être expliqué par une stabilité des pigments chlorophylliens et un bon fonctionnement de la photosynthèse. Alors que pour les géotypes Flip97-190C ILC3182 et Moubarak, ce rapport chl a/chl b a augmenté sous l'effet du stress hydrique, du à une diminution importante de la chlorophylle b par rapport à la chlorophylle a.

*Significatif ; **Non Significatif

Stabilité membranaire des feuilles

L'analyse de la variance a montré qu'il y a une variabilité génotypique hautement significative de la stabilité membranaire. Le test de comparaison des moyennes révèle que les géotypes ILC3182 se distingue par une forte stabilité membranaire (11.4% de dégâts) suivi par les géotypes Flip98-121C, Flip97-281C, Flip97-114C et Flip97-190C qui ont enregistré des pourcentages de dégâts faibles (i.e.: stabilité membranaire élevée) qui varient entre 25.6% et 37.2 % (Figure 5). Ces géotypes se sont montrés significativement différents du géotype ILC3279.

Tableau 5 : Variation du rapport chl a/chl b des géotypes de pois chiche soumis au stress hydrique

Géotypes	Chl a/b Témoin	Chl a/b Stressés	% de variation	S*/NS**
Flip97-114C	3.24	3.51	8.37	NS
Flip97-190C	1.88	4.36	132.23	S
Flip97-281C	5.11	3.55	-30.58	S
Flip98-50C	5.63	4.36	-22.48	S
ILC3279	3.08	2.98	-3.41	NS
ILC3182	1.84	3.90	112.40	S
Flip 98-121C	2.45	2.21	-9.83	NS
Farihane	8.90	2.19	-75.40	S
Moubarak	3.62	4.86	34.14	S

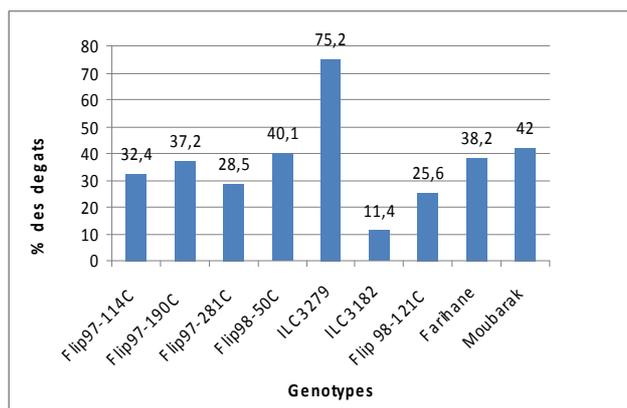


Figure 4: Pourcentage de dégâts des neuf géotypes de pois chiche suite à un choc osmotique

Ce dernier a enregistré le pourcentage de dégâts le plus élevé soit 75,2%. Les valeurs de la stabilité membranaire et des concentrations en chlorophylles pourraient être considérées comme des indicateurs de la tolérance de la plante aux effets du stress.

Réponse des paramètres biochimiques au stress hydrique

L'application du stress hydrique a provoqué une augmentation de la teneur foliaire en proline, acides aminés libres totaux et glucides solubles totaux.

L'analyse de la variance a mis en évidence des différences très hautement significatives causées par le traitement hydrique ($P < 0,001$) sur la teneur en proline, la teneur en acides aminés totaux et la teneur en glucides solubles totaux. Cependant, ni l'effet du géotype ni de l'interaction entre le géotype et le traitement hydrique n'a été significatif (Tableau 2).

La teneur en proline : La teneur en proline varie peu entre géotypes aussi bien sous stress, qu'en absence de stress.

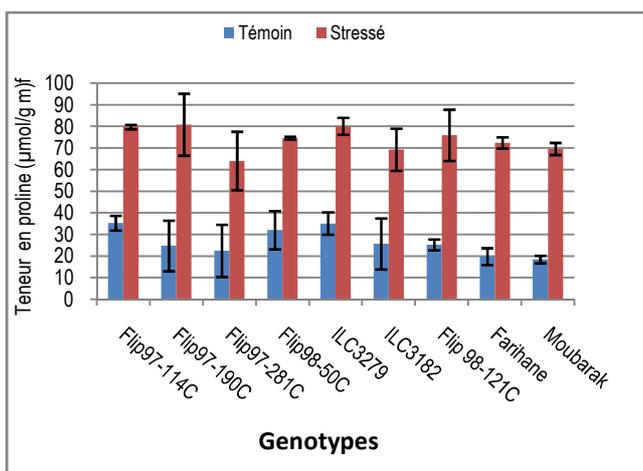


Figure 5: Variation de la teneur en proline chez les 9 géotypes de Pois chiche sous stress hydrique

Le stress hydrique a causé une augmentation de la teneur en proline dans tous les géotypes (Figure 6) et donc le facteur

géotype est peu impliqué dans la réponse à la sécheresse via le contenu en proline. L'accumulation de la proline serait impliquée dans la protection de la membrane cellulaire et participerait à l'ajustement osmotique [20 ; 21]. La proline interviendrait aussi dans la régulation du PH cytoplasmique [22] et constituerait des réserves réduites de carbone et d'azote, utilisés par la plante postérieurement à la période du stress [23].

La teneur en acides aminés libres totaux

L'effet du régime hydrique sur les AAT est hautement significatif alors que celui du géotype et de l'interaction entre géotype et stress hydrique sont non significatifs. L'évolution des teneurs en acides aminés libres totaux au niveau des feuilles est rapportée au niveau de la figure 7. Sept géotypes montrent une augmentation des teneurs en acides aminés libres totaux après le stress hydrique. En effet, cette teneur a respectivement augmenté de 86%, 77%, 73% et 61 % chez ILC3182, Flip97-281C, Flip97-114C et Flip98-50C. Pour les autres géotypes, la teneur en acides aminés restent stables. La majorité des géotypes de pois chiche ont répondu face aux conditions de stress hydrique par une hausse dans le niveau des acides aminés totaux. Cette augmentation est une réaction d'adaptation de la plante vis-à-vis du stress, et peut s'expliquer par son effet d'ajustement osmotique (osmoticum), pour équilibrer le potentiel osmotique du sol.

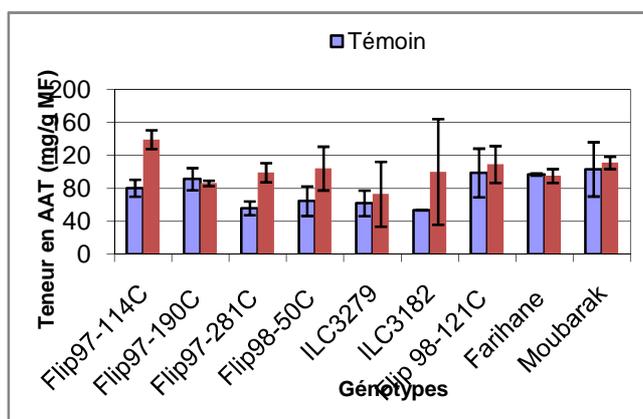


Figure 6: Variation de la teneur en acides aminés totaux chez les 9 géotypes de Pois chiche sous stress hydrique

La teneur en glucides solubles totaux : L'application du stress hydrique a provoqué une accumulation de glucides chez la plupart des géotypes étudiés. Les plantes ont toujours des teneurs plus élevées en glucides solubles totaux lorsqu'elles se développent dans des conditions de sécheresse [24]. Même si les différences entre variétés sont non significatives, les résultats de cette étude montrent que les teneurs les plus élevées ont été enregistrées chez les géotypes Flip97-190C, ILC3182 et Fairihane qui sont tolérants à la sécheresse et que la teneur la plus faible en glucide a été enregistrée chez les géotypes Flip98-121C et ILC3279, géotypes les plus sensibles à la sécheresse (Figure 8). Ainsi, cette étude indique que les géotypes

tolérants sous conditions de champ accumulent ont accumulé plus de glucides solubles que les géotypes sensibles. Cette conclusion est comparable à celles de Sircelj et al [25].

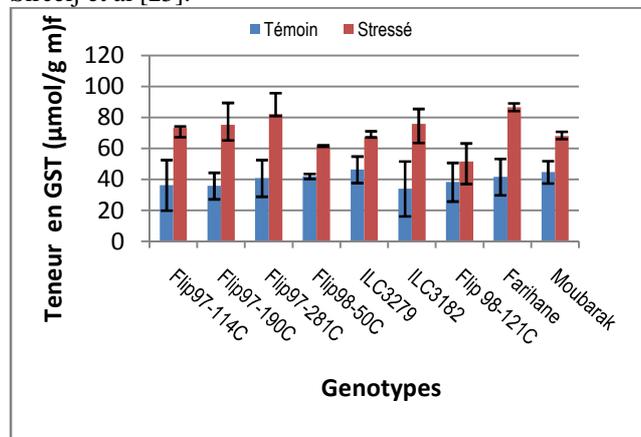


Figure 7: Variation des teneurs en glucides solubles totaux chez les 9 géotypes de Pois chiche sous stress hydrique

DISCUSSION

En ce qui concerne le premier objectif, les données recueillies dans cette étude ont abouti à des propositions qui sont en accord avec les nombreuses autres études similaires. Ces résultats se résument en un effet significatif du stress hydrique sur les paramètres mesurés, et d'un effet significatif du géotype et parfois même de l'interaction géotype et stress hydrique sur certains de ces mêmes critères. Le stress hydrique semble être accompagné par une augmentation des concentrations en acides aminés et/ou des concentrations des sucres. En parallèle, le stress hydrique semble être accompagné par une diminution des concentrations des chlorophylles *a* et *b*. Sachant que la variété ILC3182 est la plus tolérante à la sécheresse sous condition de champ, et que le géotype ILC3279 est le plus sensible, il devient apparent que la TRE et la SM sont les variables les plus corrélées avec la tolérance à la sécheresse. Il reste que les autres variables ont toutes été affectées par le traitement hydrique et par le géotype (TRE, SM, Chl *a*, Chl *b*) et que certains paramètres ont été affectés par le régime hydrique seul (teneur en proline, teneur en acides aminés et teneur en glucides solubles). Les variations observées dans ces paramètres se font en groupe et peuvent interagir entre eux pour produire un résultat final variable. Ainsi, il serait judicieux d'étudier ces critères en groupe. Une analyse des composantes principales (ACP) des critères mesurés sous régime normal et sous régime sec a été effectuée et les résultats ont été illustrés par des graphiques issus de l'analyse en grappe correspondante (Figures 9, 10, 11 et 12). L'ACP appliquée aux critères mesurés sous condition normale montre qu'un seul axe explique 95,7% de la variabilité observée ; de même, quatre groupes sont obtenus sur cet axe 1) Teneur relative en eau 2) teneurs en chlorophylles, 3) teneur en proline 4) stabilité

membranaires et Glucides solubles totaux (Figure 9); L'ACP appliquée aux critères mesurés sous conditions de stress hydrique montre qu'un seul axe explique 97,7% de la variabilité observée. Aussi, les paramètres sont groupés de la même manière en donnant trois groupes 1) Teneur relative en eau 2) teneurs en chlorophylles, 3) stabilité membranaires et 4) teneur en proline et teneur en glucides solubles totaux (Figure 10);

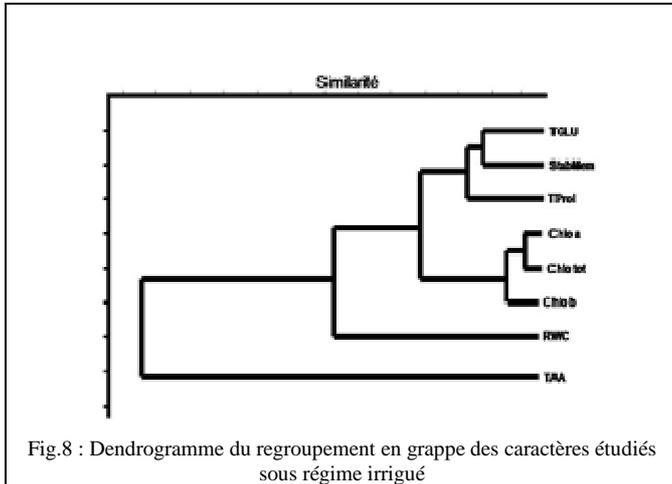


Fig.8 : Dendrogramme du regroupement en grappe des caractères étudiés sous régime irrigué

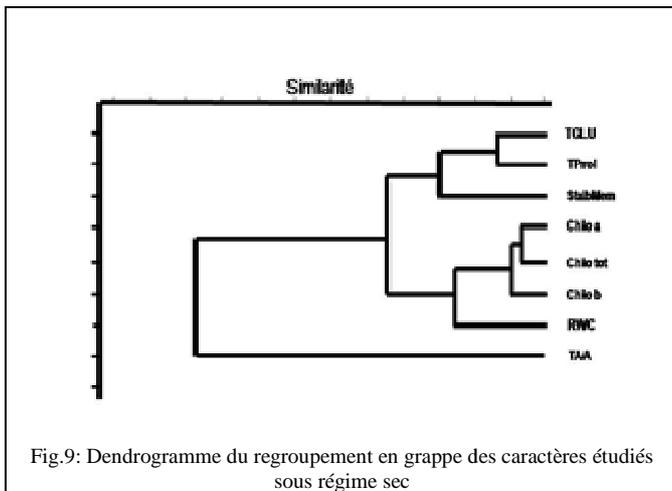


Fig.9: Dendrogramme du regroupement en grappe des caractères étudiés sous régime sec

Les résultats des deux ACP illustrent ainsi des relations entre la teneur relative en eau, critère le plus relié à la tolérance à la sécheresse (exprimée sous condition de champs) avec la stabilité membranaire, les teneurs en chlorophylles, en proline et en acides aminés totaux. La teneur en glucides solubles totaux est le dernier à être attaché aux critères présentant une certaine cohérence entre eux.

Les géotypes utilisés dans cette étude ont aussi été regroupés selon la méthode ACP. Sous condition normale, le regroupement par ACP des géotypes montre que le premier axe explique 40 % de la variabilité alors que les deux autres axes expliquent 24% et 21% respectivement de

la variabilité totale. Ce résultat signifie que le facteur variété est sous l'effet de plusieurs facteurs à la fois.

Le classement des géotypes sur le premier axe présente trois groupes 1) la variété la plus sensible dans une extrême, 2) un groupe constitué par toutes les variétés intermédiaires avec à l'autre extrémité, le géotype tolérant ILC3182 (Figure 11).

L'analyse ACP des géotypes sous condition sèche montre que le premier axe explique 48 % de la variabilité alors que les deux autres axes expliquent 24% et 20% respectivement, de la variabilité totale. Cette analyse isole le géotype ILC3279 comme étant le plus sensible et FLIP97-281 et ILC3182 comme étant les plus tolérants. Cette classification correspond bien aux caractérisations déjà connues de ces géotypes vis-à-vis de la tolérance à la sécheresse (Figure.12).

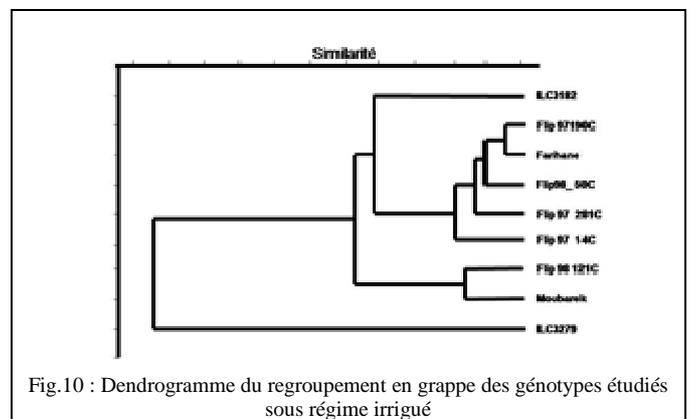


Fig.10 : Dendrogramme du regroupement en grappe des géotypes étudiés sous régime irrigué

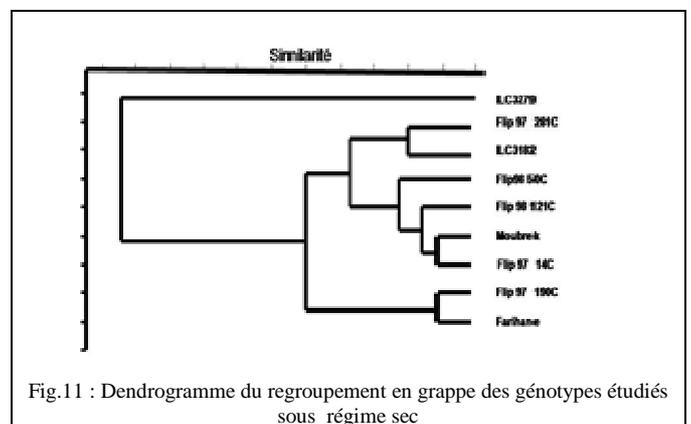


Fig.11 : Dendrogramme du regroupement en grappe des géotypes étudiés sous régime sec

Comme l'étude ACP a clairement séparé les géotypes les plus tolérants, sensibles, et moyennement sensibles, similairement à leur comportement au champ, ceci démontre que les critères utilisés peuvent bien servir à caractériser la tolérance des différents géotypes à la sécheresse en utilisant ces critères en groupe. Le fait que l'effet du géotype soit statistiquement non significatif sur certains critères étudiés séparément n'empêche pas un effet collectif de tous les critères pris en groupe. Pour répondre à une telle problématique, un dispositif expérimental plus

élaboré et un autre choix des génotypes doivent être utilisés.

Conclusion

Le stress hydrique a induit des changements statistiquement significatifs au niveau de tous les paramètres considérés dans cette étude. Le facteur génotype a montré des effets significatifs sur les teneurs en chlorophylles. L'effet du facteur stress hydrique était généralement plus prononcé que celui de la variété. Les interactions entre les deux facteurs (stress hydrique et génotype) étaient pour la plupart non significatives. Ceci indique que les effets des deux facteurs seraient additifs. Les réponses des critères étudiés sont similaires à plusieurs études faites sous d'autres environnements et avec d'autres génotypes. L'analyse des données des critères a été effectuée pour tous les critères et génotypes en groupe (ACP et cluster) sous le régime stressé et celui non stressé. Cette analyse en composantes principales a révélé des sous-groupes de critères similaires quant à leur effet sur les performances des différents génotypes. Ces groupes de paramètres peuvent être utilisés comme indicateurs de la tolérance à la sécheresse. Notamment la teneur relative en eau, la stabilité membranaire, les teneurs en chlorophylles, la teneur en proline et la teneur en acides aminés totaux.

L'analyse en composantes principales des performances des génotypes a aussi montré une classification des génotypes qui est concordante avec leur niveau de tolérance documenté sous condition de champ.

Cette étude montre donc que la sélection pour la tolérance à la sécheresse chez le pois chiche peut être améliorée par l'identification de critères biochimiques et physiologiques adéquats.

RÉFÉRENCES

- [1] R. Serraj, L. Krishnamurthy, J. Kashiwagi, J. Kumar, S. Chandra, J.H. Crouch, Variation in root traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.) grown under terminal drought. *Field Crops Research* 88 (2004) 115–127.
- [2] Y. Kara, M. Zoghmar, Etude des caractéristiques racinaires du statut hydrique et de l'ajustement osmotique de quelques génotypes de blés durs et d'espèces sauvages apparentées. *European Journal of Scientific Research*, Vol.48, No.3 (2011) 434-445.
- [3] R. Munns, Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell and Environment*, 25 (2002) 239-250.
- [4] A. Moinuddin, R. Fischer, K. Sayre, M P. Reynolds, Osmotic adjustment wheat in relation to Grain Yield under Water Deficit Environments. *Agronomy Journal* 97 (2005) 1062-1071.
- [5] A.R. Navarro, F. Rubio, High- affinity potassium and sodium transport systems in plants. *Journal of Experimental Botany*, vol 57 No 5 (2006) 1149-1160.
- [6] 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 (2006), 1025–1043.
- [7] E. Ottow, M. Brinker, E. Fritz, T. Teichmann, W. Kaiser, M. Brosche, J. Kangasjarvi, X. Jiang, 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, (2005) 1762–1772.
- [8] A. Hassani, A. Dellal, M. Belkhdja, M. Kaid- Harche. Effet de la salinité sur l'eau et certains osmolytes chez l'orge (*Hordeum vulgare*). *European Journal of Scientific Research*, Vol.23, No.1, (2008) 61-69.
- [9] R. Dahan. Rapport de synthèse des activités de recherche effectuées par R.Dahan. Institut National de la Recherche Agronomique du Maroc, Settat, Maroc (2005).
- [10] N.C. Turner. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and Soil* 58 (1981) 336-339.
- [11] C.Y. Sullivan, W.M. Ross. Selecting for drought and heat resistance in grain sorghum, Dans: *Stress Physiology in Crop Plants* (eds H. Mussell, et R.C. Staples), Wiley Intersciences, New York, (1979), 236-281.
- [12] W.P. Inskeep, P.R. Bloom. Extinction Coefficients of Chlorophyll a and b in N, N-Dimethylformamide and 80% Acetone. *Plant Physiology*. 77 (1985) 483-485.
- [13] W. Troll, G. Lindsey. A photometric method for the determination of proline. *Journal of Biological Chemistry*. 215: (1954) 655-660
- [14] C. Magne and F. Larher, High sugar content of extracts interferes with colorimetric determination of amino acid and free proline, 1992.
- [15] J.H. Roe, The determination of sugar in blood and spinal fluid with anthrone reagent. *Journal of Biological Chemistry*. 212 (1955) 335-343.
- [16] E.W. Yemm, E. F. Cocking, The determination of amino acids with ninhydrin. *Analyst* 80 (1955) 209-213.
- [17] P. Korir, J. Nyabundi, P. Kimutro, Genotypic response of common bean (*Phaseolus vulgaris*, L) to moisture stress condition in Kenya. *Asian Journal of Plant sciences* 5 (2006) 24-32.
- [18] M. Matin, H. Jarvis, F. Hayden, Leaf water potential, relative water content, and diffusive resistance in Barley. *Agronomy Journal* 81 (1989) 100-105.
- [19] J. Levit. Responses of Plants to Environmental Stresses, Volume II (1980) 2nd ed, Academic Press, New York.

- [20] P. Valentovic, M. Luxova, L. Kolarovic, O. Gasparikova. Effect of osmotic stress on compatible solutes content, membrane stability and water relations in two maize cultivars. *Plant Soil and Environment*. 4 (2006) 186-191.
- [21] A. Gunes, A. Inal, M.S. Adak, E.G. Bagci, N. Cicek, F. Eraslan. Effect of drought stress implemented at pre- or post- anthesis stage some physiological as screening criteria in chickpea cultivars. *Russian Journal of plant Physiology*. 55(2008) 59-67.
- [22] M. Denden, T. Bettaieb, A. Salhi, M. Mathlouthi, Effet de la salinité sur la fluorescence chlorophyllienne, la teneur en proline et la production florale de trois espèces ornementales. *Tropicultura* Vol. 23, No 4 (2005) 220-225.
- [23] F. Keller, M.M. Ludlow, Carbohydrate metabolism in drought-stressed leaves of Pigeonpea (*Cajanus cajan*). *Journal of Experimental Botany*. Vol.44, No. 265, (1993) 1351-1359.
- [24] M. Mafakheri, A. Siosemardeh, B. Bahramnejad, PC. Struik, Y. Sohrabi, Effect of drought stress on yield, praline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. *Australian Journal of Crop Science*. 4 (2010) 580-585.
- [25] H. Sircelj, M. Tausz, D. Grill, F. Batic, Biochemical responses in leaves of two apple tree cultivars subjected to progressing drought. *Journal of Plant Physiology*. 162, (2005).1308-1318.