

# Criblage et performances agronomiques de 45 géotypes de pois chiche (*Cicer arietinum* L.) soumis à un régime hydrique limité

Kamel Ben Mbarek <sup>(1)</sup>, Abdelhamid Boujelben <sup>(1)</sup>, Mohsen Boubaker <sup>(2)</sup>, Chérif Hannachi <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Institut supérieur agronomique de Chott Mariem. TU-4042 Sousse (Tunisie). E-mail : benmbarekkamel@yahoo.fr

<sup>(2)</sup>École supérieure d'Agriculture de Mograne. TU-1120 Zaghuan (Tunisie).

Reçu le 21 mai 2008, accepté le 2 décembre 2008.

Le pois chiche (*Cicer arietinum* L.), l'une des plus importantes légumineuses à graines en Tunisie, est pratiqué en deux types de culture : pois chiche d'hiver et pois chiche de printemps. Le pois chiche de printemps a l'avantage d'occuper le sol pendant une courte durée (février à juin). Néanmoins, la culture est exposée aux stress abiotiques et principalement le stress hydrique. En conséquence, le développement végétatif et le rendement potentiel sont négativement affectés en quantité et en qualité. Dans l'objectif de cribler des géotypes de pois chiche tolérants au stress hydrique, une collection de 45 accessions a été testée, en culture tardive de printemps, sous un régime hydrique stressant. L'essai *in situ* a été réalisé dans la région de Chott Mariem (Tunisie) appartenant à l'étage bioclimatique du semi-aride supérieur. Le stress hydrique a été imposé au début de la floraison et s'est accentué durant les phases de grossissement et de maturité des graines. L'évaluation de la tolérance à la sécheresse des géotypes de pois chiche a été basée sur des paramètres agronomiques relatifs au rendement en grains et ses composantes, à l'efficacité de l'utilisation de l'eau et à la durée thermique. L'analyse statistique a révélé une importante diversité biologique entre les géotypes testés. Les 45 accessions peuvent être réparties en trois groupes. Un premier groupe est composé de géotypes 'Kabuli', sensibles à la sécheresse, ne convenant pas pour une culture de printemps dans les zones semi-arides. Un second groupe de géotypes, parmi lesquels deux sont du type 'Dési', est tolérant au stress hydrique et peut être recommandé pour une culture de printemps dans les zones semi-arides. Le dernier groupe renferme des géotypes moyennement sensibles au stress hydrique. Ils peuvent être conduits en culture de printemps dans les zones du semi-aride supérieur avec des irrigations complémentaires.

**Mots-clés.** Pois chiche, *Cicer arietinum* L., stress hydrique, performances agronomiques, criblage, géotypes.

**Screening and agronomic performances of 45 chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.) submitted to a limited hydrous pattern.** In Tunisia, chickpea (*Cicer arietinum* L.) is one of the most important legume grain crops. It is conducted during two periods of the year either as winter crop or as spring crop. The last type has the advantage to occupy the soil in a short period of time (February to June). However, it exposes plants to water stress. Consequently, vegetative development and grain yield are negatively affected in quantity and quality. In order to study plant reactions to drought conditions, 45 genotypes of chickpea (*C. arietinum*) were tested in delayed spring culture under a water stressed treatment. A field trial was carried out in the region of Chott Mariem belonging to the semi-arid superior. The drought stress is established at the beginning of flowering stage and was accentuated during the grain filling and the seed maturity phases. To evaluate the chickpea genotypes stress tolerance, parameters related to the vegetative development, the seed yield, the water use efficiency and the thermal duration were measured. The analysis of the grain yield and its components revealed that there is a biological diversity among the genotypes tested. The 45 accessions can be divided into three groups. The first one is composed of 'Kabuli' chickpea genotypes which are sensitive to drought stress. They are not appropriate for spring crop in semi-arid regions. The second group is composed of genotypes, of which two are of 'Dési' type, that are tolerant to drought stress and can be recommended for a spring crop in the superior semi-arid zones. The last group of genotypes is moderately sensitive to drought stress. They can be led as spring crop in the semi-arid superior zones with complementary irrigations.

**Keywords.** Chickpea, *Cicer arietinum* L., drought stress, agronomic performances, screening, genotypes.

## 1. INTRODUCTION

Les légumineuses alimentaires constituent une source très importante de protéines végétales qui peuvent corriger le déficit en protéines animales. En plus de leur importance dans le régime alimentaire des êtres humains, elles ont un intérêt particulier dans le concept d'agriculture durable dans la mesure où leur introduction dans l'assolement instaure la rotation des cultures, la diversification des productions et la protection de l'environnement par l'économie des engrais azotés et des désherbants chimiques. Pour pouvoir introduire ces espèces dans les systèmes de culture, il faudrait impérativement améliorer les performances génétiques des variétés.

En Tunisie, la culture des légumineuses à graines reste marginale par rapport aux céréales. Elles n'occupent que 6 à 7 % des superficies emblavées en céréales. Le pois chiche (*Cicer arietinum* L.) et la fève (*Vicia faba* L.) occupent 86 % des superficies des légumineuses avec une production annuelle de 22000 tonnes (Kramer, 1983) et un rendement moyen ne dépassant pas 7 qx·ha<sup>-1</sup>. La production nationale ne couvre pas les besoins internes du pays et l'État a recours à des importations (Aouani et al., 2001). Dans nos conditions, deux types de culture de pois chiche sont pratiquées, notamment le pois chiche d'hiver et le pois chiche de printemps. Ils diffèrent entre eux par les dates de semis en novembre-décembre pour le pois chiche d'hiver et en fin février-début mars pour le pois chiche de printemps (Saccardo et al., 1990). Le cycle de culture est de huit mois pour un semis d'hiver et de trois mois seulement pour un semis de printemps. Singh et al. (1994) ont indiqué que le semis précoce permet à la culture de pois chiche de profiter des pluies hivernales engendrant un développement végétatif et un rendement meilleurs. En fait, le pois chiche d'hiver a un rendement potentiel plus élevé que celui du pois chiche de printemps (Saxena, 1980 ; Malhotra, 1998). Néanmoins, le pois chiche d'hiver ne manque pas d'inconvénients. L'occupation du sol est plus longue et les travaux d'entretien, notamment le désherbage, sont multiples. Les conditions climatiques hivernales caractérisées par une hygrométrie relative élevée de l'ordre de 93 % et des températures clémentes, variant de 9 à 18,5 °C (Habaieb et al., 2003), favorisent le développement des maladies très redoutables, en l'occurrence le fusarium (*Fusarium oxysporum*), l'antracnose (*Ascochyta rabiei*) et autres, telles que la pourriture grise (*Botrytis cinerea*), la pourriture humide des racines (*Fusarium solani*) et la pourriture sèche des racines (*Rhizoctonia bataticola*), surtout pour les variétés sensibles.

Le pois chiche est une espèce rustique par son système racinaire puissant qui se développe dans les deux sens, latéral et pivotant, et qui peut dépasser un

mètre de profondeur (Saxena, 1987). Malgré cela, le pois chiche de printemps craint la sécheresse accompagnée de stress hydrique et thermique (Singh et al., 1994). Le stress hydrique reste la principale contrainte limitante de la production du pois chiche cultivé sous un régime pluvial (Kramer, 1983 ; Blum et al., 1989). Il dépend de plusieurs facteurs, entre autres les fréquences et la répartition des précipitations le long du cycle de la culture, l'évaporation et la capacité de stockage de l'eau dans le sol (Belhassen et al., 1995).

Comme second stress abiotique lié au stress hydrique, les hautes températures supérieures à 38 °C retardent considérablement la floraison du pois chiche (Ellis et al., 1994). Les températures supérieures à 30 °C, qui se manifestent durant une période de 3 à 4 jours de suite, occasionnent de lourdes pertes du rendement. D'après Singh et al. (1994), 50 % des fleurs des plantes exposées durant l'anthèse à une température supérieure à 30 °C sont presque stériles. Slama (1998) a indiqué que les cultivars dont les gousses ont mûri pendant des jours chauds ont subi des réductions du rendement en grains.

Singh et al. (1994) ont préconisé qu'un semis retardé d'une culture de pois chiche, conduite en sec ou en irrigué, permet de déterminer son rendement potentiel. Le *screening* des génotypes de pois chiches tolérants au stress hydrique pourrait être effectué en retardant le semis de trois semaines de la date normale du semis de printemps (Malhotra et al., 1996). En outre, selon Sarrafi et al. (1993), il est difficile de sélectionner directement pour la résistance à la sécheresse car le contrôle génétique de ce caractère quantitatif est très complexe. L'approche actuelle consiste à sélectionner pour plusieurs paramètres liés à la résistance au stress hydrique.

Sous des conditions de sécheresse, la sélection empirique des génotypes tolérants au stress hydrique est basée sur le rendement en grains et ses composantes. Toutefois, toutes les composantes adoptées pour ce type de criblage devraient être caractérisées par une forte corrélation avec un rendement en grains élevé et stable, un niveau d'héritabilité élevé et une expression de la tolérance facilement mesurable et répétitive (Serraj et al., 2003). D'après Ofori (1996), le rendement en grains le plus élevé est prévisible si toutes les composantes du rendement sont à leurs niveaux maximums.

Yousaf et al. (1999a ; 1999b) ont indiqué que le rendement en grains est un caractère complexe qui résulte de l'interaction d'une multitude de facteurs hautement sensibles aux variations environnementales. Il pourrait être estimé sur la base de la performance d'un certain nombre de composantes morpho-physiologiques et phénologiques telles que la hauteur de la plante, le nombre de branches, de gousses et de graines par plant, la date de floraison et le poids de 100 graines (Singh,

1977). Selon Jain et al. (1991), la combinaison entre ces composantes s'est révélée le meilleur moyen pour l'amélioration du rendement. Silim et al. (1993) ont indiqué que le rendement potentiel élevé et la floraison précoce représentent les deux principaux critères de sélection pour la tolérance au stress hydrique de la lentille et du pois chiche. Singh et al. (1991) ont conclu que, sous des conditions de stress hydrique, 75 % des variations du rendement en grains sont attribués aux dates de floraison et de maturité et au poids de 100 graines. Seulement, ces variations, traduites par des corrélations négatives entre certaines de ces composantes, peuvent être atténuées par des phénomènes de compensation (Ofori, 1996).

L'indice de récolte, qui indique le degré de reconversion d'une partie de la biomasse aérienne en graines (Bouzerzour et al., 1998), est également considéré comme un critère potentiel pour la sélection indirecte des génotypes à haut rendement et tolérants au stress hydrique (Berger et al., 2006).

Par ailleurs, Kuruvadi (1989) et Erchidi et al. (2000) ont signalé que le stress hydrique induit une diminution de la densité stomatique qui ne se traduit pas toujours par une réduction des pertes en eau par la plante à cause d'un phénomène de compensation lié à l'augmentation de la taille des stomates (Sapra et al., 1975 ; Kuruvadi, 1989 ; Wang et al., 1993). De même, Huang et al. (2000) ont indiqué que l'efficacité de l'utilisation de l'eau est un important facteur pour la détermination de la résistance au déficit hydrique. Sur la base de ce critère, le pois chiche d'hiver a été trouvé le plus efficace (Kamel, 1990 ; Saccardo et al., 1990 ; Soltani et al., 1999).

En Tunisie, la culture du pois chiche est exposée à deux types de sécheresse. L'une est intermittente et causée par la rupture des précipitations et l'autre est terminale et se produit pendant la phase de floraison et de remplissage des graines. Les dégâts les plus graves se manifestent sur le pois chiche cultivé dans les zones semi-arides où le rendement en grains peut chuter de 40 % à 100 % (Saxena, 1987 ; Slama, 1998). Pour remédier à cette contrainte de production, la solution la plus efficace réside dans l'amélioration de la tolérance des génotypes de pois chiche à la sécheresse et de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (Boubaker et al., 1995 ; 1997). Dans un programme d'amélioration des légumineuses à graines, le développement des génotypes de pois chiches tolérants au stress hydrique et adaptés à une large gamme d'humidité variant d'une saison à une autre et d'un milieu à un autre est un objectif de premier ordre. Le présent travail est réalisé dans l'objectif de sélectionner les génotypes les plus performants pour une culture de pois chiche de printemps en zones semi-arides qui couvrent les deux tiers du territoire tunisien (MEAT, 2001). Le criblage des génotypes de pois chiche est basé sur la détermination du

bilan hydrique de cette culture, la délimitation des stades phénologiques et leur coïncidence avec l'avènement des stress hydrique et thermique et l'évaluation de l'impact de ces stress sur le rendement et ses composantes.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le comportement agronomique de 45 génotypes de pois chiche (**Tableau 1**), dont 43 sont du type 'Kabuli' et 2 du type 'Dési', a été évalué sous les conditions pluviales de la région semi-aride de Chott Mariem qui est localisée au centre est de la Tunisie (latitude : 35°52' nord, longitude : 10°38' est et altitude : 6 m). Le microclimat du site expérimental est semi-aride supérieur à hiver doux et humide et été chaud et sec (**Tableau 2**). Le sol est peu évolué d'origine non climatique, d'apport alluvial, vertique, de texture sablo-limoneuse, de structure massive et favorable aux grandes cultures. Ce sol a un taux d'humidité ( $H_{pr}$ ) de 24,4 % à la capacité au champ et de 12,3 % au point de flétrissement permanent.

Le précédent cultural est une jachère travaillée. Avant l'installation de l'essai, le sol a été préparé par un labour moyen, d'une profondeur de 30 cm, suivi par deux façons superficielles en vue d'obtenir un bon lit de semences. Les niveaux phosphatés et potassiques du sol, déterminés par analyse, étaient favorables à une production optimale de légumineuses. Par conséquent, aucun apport de ces deux éléments n'a été réalisé. Le semis a été effectué le 16 avril 2006 (soit un retard de 5 semaines par rapport à la date normale) à la densité de 22,2 plants par mètre carré et avec des écartements de 0,1 x 0,45 m<sup>2</sup>. La lutte contre les mauvaises herbes envahissant les parcelles expérimentales a été réalisée par un désherbage manuel.

Des irrigations localisées d'appoint ont été réalisées avec de l'eau du barrage de Nébhana dont le résidu sec est de 1 g.l<sup>-1</sup>. Les goutteurs intégrés du système d'irrigation sont du type GR, avec un écartement de 0,4 m et ont un débit nominal de 2 l.h<sup>-1</sup> chacun. Le test d'uniformité réalisé a montré que le débit réel moyen des goutteurs est de 1,75 l.h<sup>-1</sup>. La quantité totale d'eau reçue par la culture est de 171,7 mm dont 46,7 mm sont d'origine pluviale (**Figure 1**). Les températures minimales et maximales varient respectivement de 10,6 à 28,7 °C et de 18,2 à 36,5 °C (**Figure 2**). L'évapotranspiration de la culture (ETc) a été déterminée dans l'intervalle séparant deux irrigations successives suivant l'équation simplifiée du bilan hydrique du sol (Choisnel, 1984) :

$$ETc \text{ (mm)} = P + I - D - \Delta S$$

où P = Précipitations (mm) ; I = Irrigation (mm) ; D = Drainage (mm) et  $\Delta S$  = variations de l'humidité dans le sol (mm).

**Tableau 1.** Liste des génotypes des pois chiches utilisés — *List of used chickpea genotypes.*

N°	Génotype	Type	Pédigrée	Origine
1	ILC 588	Kabuli	NEC 1628-1	Inde
2	ILC 1799	Kabuli	NEC 2904	Syrie
3	ILC 3101	Kabuli	ICC 10315	Turquie
4	ILC 3105	Kabuli	ICC 10319	Turquie
5	ILC 3182	Kabuli	ICC 10738 PC	Turquie
6	ILC3832	Kabuli	Pch 80	Maroc
7	ILC 3843	Kabuli	Pch 102	Maroc
8	ILC 4134	Kabuli	2139	Tunisie
9	FLIP87-85C	Kabuli	x85 TH 248/ILC 3398 x FLIP 83-48C	ICARDA/ICRISAT
10	FLIP88-42C	Kabuli	x85 TH 230/ILC 3395 x FLIP 83-13C	ICARDA/ICRISAT
11	FLIP95-74C	Kabuli	x92 TH 129/ILC 3520 X ILC 100	ICARDA/ICRISAT
12	FLIP96-114C	Kabuli	X93 TH 74/FLIP87-51CXFLIP91-125C	ICARDA/ICRISAT
13	FLIP96-116C	Kabuli	X93 TH 75/ILC6104XFLIP91-120C	ICARDA/ICRISAT
14	FLIP96-119C	Kabuli	X93 TH 75/ILC6104XFLIP91-120C	ICARDA/ICRISAT
15	FLIP97-20C	Kabuli	X94 TH 81/FLIP 91-119C X ILC 3366	ICARDA/ICRISAT
16	FLIP97-21C	Kabuli	X94TH81/FLIP91-119XILC3366	ICARDA/ICRISAT
17	FLIP97-48C	Kabuli	X94TH36/FLIP88-70XFLIP87-85	ICARDA/ICRISAT
18	FLIP97-49C	Kabuli	X94TH41/FLIP 89-118 X FLIP 88- 42C	ICARDA/ICRISAT
19	FLIP97-51C	Kabuli	X94TH44/FLIP88-24CXFLIP88-42C	ICARDA/ICRISAT
20	FLIP97-254C	Kabuli	X94TH65/FLIP81-83CXUC 15	ICARDA/ICRISAT
21	FLIP97-258C	Kabuli	X94TH71/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
22	FLIP97-259C	Kabuli	X94TH71/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
23	FLIP97-261C	Kabuli	X94TH75/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
24	FLIP97-263C	Kabuli	X94TH75/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
25	FLIP97-265C	Kabuli	X94TH75/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
26	FLIP97-266C	Kabuli	X94TH75/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
27	FLIP97-267C	Kabuli	X94TH75/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
28	FLIP97-268C	Kabuli	X94TH75/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
29	FLIP97-269C	Kabuli	X94TH75/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
30	FLIP97-270C	Kabuli	X94TH75/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
31	FLIP97-280C	Kabuli	X94TH75/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
32	FLIP97-281C	Kabuli	X94TH75/FLIP87-59CXUC15	ICARDA/ICRISAT
33	FLIP98-23C	Kabuli	X95TH2/FLIP91-18CXFLIP90-95C	ICARDA/ICRISAT
34	FLIP98-106C	Kabuli	X95TH47/FLIP88-6CXILC3373XFLIP89-4C	ICARDA/ICRISAT
35	FLIP98-121C	Kabuli	X95TH42/(FLIP90-15CXILC5362)XFLIP93-2C	ICARDA/ICRISAT
36	FLIP98-134C	Kabuli	X95TH69/(FLIP89-118CXFLIP87-85)XFLIP88-34C	ICARDA/ICRISAT
37	FLIP98-141C	Kabuli	X95TH 40/ICCV-2XS93018	ICARDA/ICRISAT
38	FLIP98-142C	Kabuli	X95TH 40/ICCV-2XS93018	ICARDA/ICRISAT
39	FLIP98-143C	Kabuli	X95TH 40/ICCV-2XS93018	ICARDA/ICRISAT
40	ICCV-2	Kabuli		ICRISAT/ICARDA
41	ILC3279	Kabuli	témoin	Ferme URSS
42	S 96125	Dési		Production locale
43	ICC 3991	Dési		Production locale
44	K 121 L	Kabuli		Production locale
45	CH2	Kabuli		Production locale

Les 41 premiers génotypes nous ont été fournis aimablement par l'ICARDA, Alep (Syrie) — *The 41 first genotypes were pleasantly provided by the ICARDA, Alep (Syria).*

**Tableau 2.** Caractéristiques climatiques de la zone de Chott Mariem (moyennes de la période 1982-1991) — *Climatic characteristics of Chott Mariem zone (means of the period 1982-1991).*

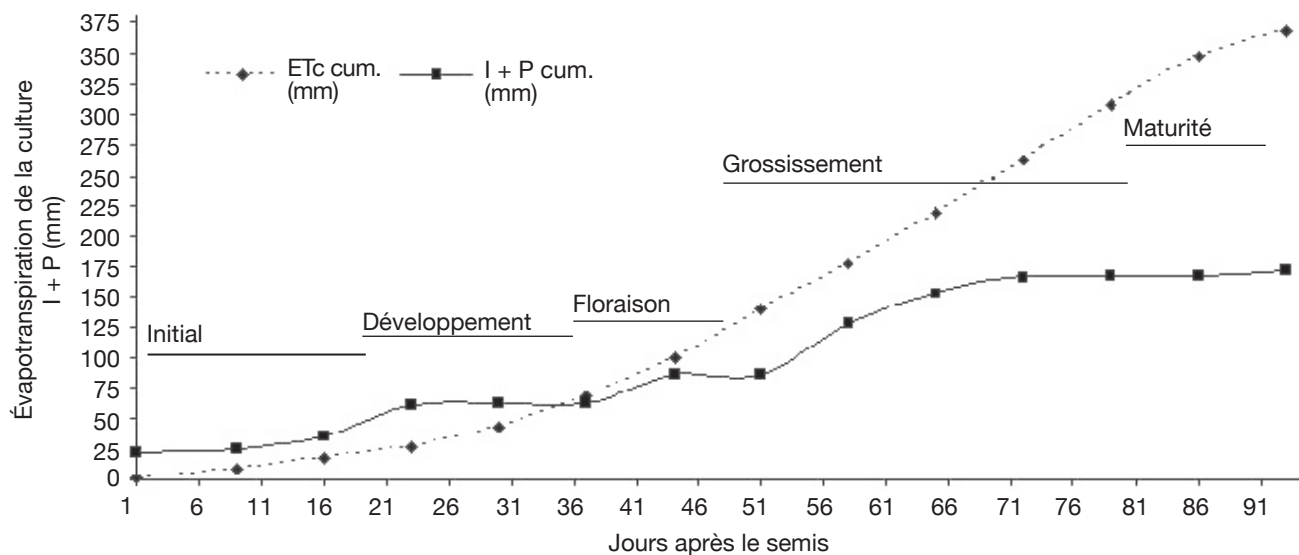
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Moyenne par an
Pluie (mm)	48,1	35,7	36,9	40,8	25,9	12,3	7,4	12,8	52,1	74,8	73,5	64,2	370
Évaporation (mm)	50,4	59,3	85,3	108,8	141,5	161,9	195,6	174,4	139,1	89,8	64,7	49,5	1320
Température maximum (°C)	16,2	17,3	18,4	20,4	23,2	26,5	30,9	31,5	29,6	25,8	21	17	23
Température minimum (°C)	7,8	8,2	9,4	11,2	14,3	18,1	21,3	22,4	20,3	17,5	12,7	8,9	14,3
Température moyenne (°C)	10,8	12,4	13,9	15,8	18,7	22,3	25,2	24,2	25,0	21,7	16,9	13,0	18,3
Vitesse du vent (m/s)	2,4	2,4	2,5	2,6	2,4	2,4	2,1	2,1	2,2	2,0	2,2	2,5	2,3
Hygrométrie relative (%)	72	70	72	70	71	69	67	70	68	72	71	73	70

Source : Station météorologique de l'Institut supérieur agronomique de Chott Mariem.

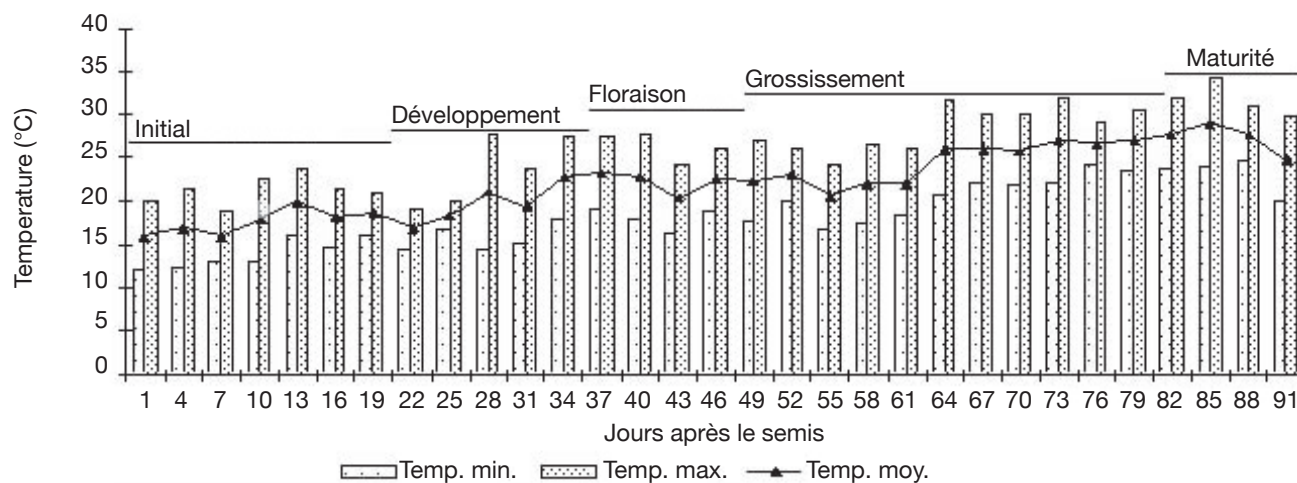
**Tableau 3.** Résultats de l'analyse de variance, valeurs et signification de F pour les différents facteurs étudiés de 45 géotypes de pois chiche (*Cicer arietinum* L.) — *Results of the variance analysis, values and significance of F for the various studied factors of 45 chickpea genotypes (Cicer arietinum L.).*

Source de variation	Degré de liberté	Date de floraison (j)	Poids de 100 graines (g)	Production de biomasse aérienne (g·m <sup>-2</sup> )	Rendement en grains (g·m <sup>-2</sup> )	Indice de récolte (%)	Efficiences de l'eau (kg·m <sup>-3</sup> )	Durée thermique (°C par jour)
Blocs	2	3,6ns	0,2ns	1304,8ns	118,3ns	2,449ns	0,004ns	190ns
Géotypes	44	909,5**	21,9**	60990**	16111**	169,8**	0,55**	1068,8**
Variance erreur	88	3,15	7,11	1251,2	260,4	13,20	0,009	167,62
Coefficient de variation (%)	-	2,22	4,16	4,12	4,00	3,84	8	8
Moyennes	-	40	32,02	429,04	201,6	47,35	1,17	170,71
ppds (5 %)	-	2,9	4,3	57,3	26,2	5,9	0,15	21,04
ppds (1 %)	-	3,8	5,7	75,4	34,4	7,7	0,2	27,9

ppds (5 %) : la plus petite différence significative au seuil de 0,05 — *the smallest significant difference at the level of 0.05* ; ppds (1 %) : la plus petite différence significative au seuil de 0,01 % — *the smallest significant difference at the level of 0.01*.



**Figure 1.** Évapotranspiration de la culture (ETc) et apports d'eau (irrigations + pluviométrie (I+P) en mm), et stades phénologiques de la culture du pois chiche (*Cicer arietinum* L.) durant l'expérimentation en 2006 — *Culture evapotranspiration (ETc) and provided water (irrigations + precipitation (I+P) in mm), and phenologic stages of the chickpea's culture (Cicer arietinum L.) during the campaign in 2006.*



**Figure 2.** Températures (minimales, maximales et moyennes) et stades phénologiques de la culture du pois chiche (*Cicer arietinum* L.) durant l'expérimentation en 2006 — *Temperatures (minimal, maximum and average) and phenologic stages of the chickpea's culture (Cicer arietinum L.) during the campaign in 2006.*

L'ETc (mm) a été pratiquement calculée sur la base de l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ) et le coefficient cultural (Kc) (Ben Mechlia, 1998) selon la relation :

$$ETc \text{ (mm)} = Kc \cdot ET_0 \text{ (mm)}$$

L'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ) a été calculée à partir de la formule de Blannay-Criddle (Poirée

et al., 1966). Le coefficient cultural (Kc) ainsi que les durées des phases physiologiques du pois chiche ont été adoptés conformément aux normes utilisées par la FAO (Allen et al., 1998).

Les variables agronomiques étudiées sur l'ensemble des génotypes sont les suivantes :

- la date de floraison (j) : le nombre de jours depuis le semis jusqu'à l'épanouissement de 50 % des fleurs,

- le poids de 100 graines (g),
- le rendement en grains par m<sup>2</sup> (g·m<sup>-2</sup>) : le poids total des graines récoltées par m<sup>2</sup>,
- la production de biomasse aérienne par m<sup>2</sup> (g·m<sup>-2</sup>) : le poids sec total de la partie aérienne des plantes récoltées par m<sup>2</sup>,
- l'indice de récolte (%) : le rapport du rendement en grains par la production de biomasse aérienne par m<sup>2</sup>,
- l'efficacité de l'utilisation de l'eau (kg·m<sup>-3</sup>) : le rapport du rendement en grains obtenu par l'évapotranspiration de la culture,
- la durée thermique (comme déterminée par Gate, 1995) en degré par jour calculée comme suit :

$$D = \sum_{i=1}^{i=2} (T_i - T_{\text{base}})$$

où  $T_i$  = Température moyenne journalière, soit  $(T_{\text{max}} + T_{\text{min}})/2$  ;  $T_{\text{base}}$  = Température de base qui représente la température en dessous de laquelle la plante ne fleurit pas. Pour le pois chiche,  $T_{\text{base}}$  est estimée à 15 °C (Slama, 1998).

Le dispositif expérimental adopté est en blocs aléatoires randomisés avec trois répétitions. Les résultats obtenus lors de ce travail ont été traités par une analyse de variance à un facteur pour tester les différences entre les cultivars. Les moyennes ont été soumises au test des groupes homogènes (Student-Newman et Keuls au seuil de 5 %). Une analyse en composantes principales (ACP) est faite pour identifier les principales variables agronomiques discriminantes des génotypes soumis au régime hydrique limité. Le but est d'identifier les variables qui pourraient servir de critères de base pour la sélection des génotypes tolérants au stress hydrique. Les logiciels utilisés à ces fins sont SPSS 10.0 et XLSTAT 2008.

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le bilan hydrique de la culture du pois chiche a montré que les stades phénologiques au sein de l'essai sont répartis sur deux phases : une première phase sous stress composée des stades initial et développement et une seconde phase durant laquelle le stress hydrique a affecté les stades de grossissement et de maturité (**Figure 1**). Cette phase de stress a coïncidé avec le début de la floraison des génotypes précoces, soit 36 jours après le semis. En fait, la phase de floraison, qui est particulièrement sensible à la sécheresse, a un effet direct sur la date de maturité et le rendement en grains de la culture du pois chiche (Summerfield et al., 1996).

Durant le stade floraison, la température maximale a varié de 25,5 à 29 °C avec une moyenne de 26,8 °C. Tandis qu'aux stades remplissage des graines et

maturité, elle a varié de 24,7 à 32,2 °C avec une moyenne de 30,1 °C (**Figure 2**). Roberts et al. (1980) ont remarqué une augmentation linéaire du taux de floraison du pois chiche à des températures variant de 10,8 à 29,3 °C. D'ailleurs, des températures variant de 20 à 30 °C le jour et une température voisine de 20 °C la nuit favorise un bon développement du pois chiche (Skrypetz, 2002). Par contre, Singh et al. (1994) ont indiqué que le pois chiche est sensible aux hautes températures durant la phase reproductive et surtout pendant les phases de remplissage des graines et de maturité. De même, comme déjà précisé, l'exposition d'une culture de pois chiche au cours de l'anthèse à des températures supérieures à 30 °C pendant 3 à 4 jours occasionne la stérilité de 50 % des fleurs et une réduction progressive du rendement en grains. D'après Ellis et al. (1994), les températures élevées, supérieures à 38 °C, retardent considérablement la floraison chez le pois chiche. En fait, il semble que la culture du pois chiche a subi un léger stress thermique durant les stades de remplissage des graines et de maturité.

#### 3.1. Analyse individuelle des variables agronomiques étudiées

Les résultats de l'analyse de la variance à un facteur ont montré qu'il y a une variabilité génotypique hautement significative pour tous les paramètres étudiés. Les coefficients de variation sont faibles et varient de 2,22 % pour la date de floraison à 8 % pour l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la durée thermique (**Tableau 3**). Ces résultats révèlent la précision élevée de l'essai.

La date de floraison des génotypes de pois chiche varie de 36 à 47 jours après le semis (**Tableau 4**). Chez le pois chiche, ce paramètre exerce un effet important sur l'expression du potentiel génétique. En effet, Silim et al. (1993) ont indiqué qu'en présence du stress hydrique, la date de floraison contribue avec 37 à 69 % dans la variation génotypique totale du rendement du pois chiche. Les durées des phases de développement du pois chiche qui est considéré comme une plante de jours longs, particulièrement la date de floraison, dépendent étroitement du génotype, de la température et de la photopériode (Roberts et al., 1980 ; Perez de la Vega, 1996). La comparaison des moyennes a permis de définir 8 groupes homogènes de cultivars présentant beaucoup de chevauchements entre eux. Le premier groupe, ayant la date de floraison la plus précoce, est composé des génotypes 4, 44, 9, 10, 6, 23, 27, 3, 1, 25, 36, 45, 5, 37, 12, 13, 19, 26, 7, 20, 11, 2, 21, 24, 8, 14, 17, 22, 38, 16, 34, 39, 15, 18, 35, 33. Le dernier groupe, qui a la date de floraison la plus tardive, est composé des génotypes 43, 29, 32, 42, 40, 30, 41. Le génotype ILC 3105 paraît avoir la floraison la plus précoce (36 jours après le semis), alors que ILC3279 paraît avoir la floraison la plus tardive (47 jours après le semis). Le

**Tableau 4.** Valeurs moyennes des caractères étudiés de 45 génotypes de pois chiche (*Cicer arietinum* L.) — Average values of the studied characters of 45 chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.).

Génotype	Date de floraison (j)	Poids de 100 graines (g)	Production de biomasse aérienne (g·m <sup>-2</sup> )	Rendement en grains (g·m <sup>-2</sup> )	Indice de récolte (%)	Efficacité de l'utilisation de l'eau (kg·m <sup>-3</sup> )	Durée thermique (°C par j)
1	38	33,11	267	139	52,09	0,810	154
2	39	35,14	356	179	50,29	1,041	167
3	37	36,13	273	144	53,08	0,838	152
4	<b>36</b>	31,19	221	93	42,19	0,543	<b>141</b>
5	38	31,13	301	140	46,37	0,814	155
6	37	29,77	290	148	50,96	0,862	150
7	39	34,89	376	163	43,55	0,947	161
8	40	33,15	314	161	51,56	0,940	172
9	37	37,42	475	255	53,65	1,486	146
10	37	34,08	271	149	55,16	0,870	150
11	39	<b>49,22</b>	417	176	42,40	1,026	167
12	38	41,83	416	227	54,49	1,322	160
13	39	36,40	455	237	52,11	1,378	161
14	40	35,93	352	192	54,60	1,118	174
15	41	35,03	366	150	41,42	0,874	181
16	41	35,31	540	244	45,43	1,424	179
17	40	23,48	<b>163</b>	<b>74</b>	45,69	<b>0,433</b>	174
18	41	31,45	393	203	51,84	1,184	181
19	39	43,60	271	97	35,75	0,562	161
20	39	26,88	468	226	48,29	1,314	164
21	39	31,51	369	148	40,39	0,864	167
22	40	30,06	369	184	50,12	1,072	175
23	37	25,70	203	95	47,09	0,554	152
24	40	26,85	433	208	48,13	1,212	169
25	38	35,97	588	331	56,29	1,927	154
26	39	33,80	455	258	<b>56,79</b>	1,504	161
27	37	37,31	466	219	46,88	1,275	152
28	42	33,44	417	203	48,47	1,180	187
29	44	36,32	569	309	54,26	1,797	197
30	45	32,83	434	166	38,90	0,968	209
31	42	33,20	489	227	46,38	1,320	186
32	45	34,30	510	269	52,94	1,569	204
33	42	26,59	428	209	48,92	1,216	183
34	41	29,81	425	207	48,76	1,204	178
35	41	26,67	470	223	47,77	1,300	181
36	38	31,76	510	252	49,56	1,469	155
37	38	33,68	471	253	53,80	1,474	157
38	40	30,81	447	247	55,12	1,436	174
39	41	29,38	573	267	46,57	1,554	179
40	45	28,02	553	244	44,18	1,421	207
41	<b>47</b>	25,80	447	117	26,07	0,679	<b>218</b>
42	45	12,29	<b>912</b>	<b>471</b>	51,77	<b>2,743</b>	204
43	42	<b>9,16</b>	710	303	42,61	1,762	189
44	<b>36</b>	46,11	342	133	39,79	0,777	144
45	38	24,18	712	128	<b>17,96</b>	0,747	155

Les chiffres en gras représentent la moyenne la plus faible et la moyenne la plus élevée de chaque caractère — The bold figures represent the weakest and highest average of each character.

premier groupe a tendance à manifester un mécanisme d'échappement ou d'esquive au déficit hydrique. Abernethy (1987) a indiqué que la floraison précoce engendre une longue période de remplissage des graines et par conséquent, un rendement potentiel élevé. Une

floraison tardive induit une courte période reproductive et un faible rendement en grains. Malhotra et al. (2002) ont signalé que la floraison précoce est la principale composante d'évitement du stress hydrique chez le pois chiche. Ce type de résistance traduit la capacité



de la plante de terminer son cycle de développement avant l'épuisement des réserves de l'eau dans le sol. La floraison précoce a été largement utilisée comme critère de sélection de génotypes tolérant le stress hydrique (Saxena et al., 1993). L'exploitation de la variabilité génétique de la durée du cycle des cultures est un moyen important dans l'ajustement du cycle de la culture à la saison pluvieuse. La superposition de la saison de croissance à la saison pluvieuse permet de profiter des disponibilités en eau pour la transpiration et fait échapper la culture au stress hydrique durant sa période reproductive. La durée de la saison des pluies est généralement de 4 à 5 mois dans le semi-aride tunisien. L'utilisation de variétés plus ou moins précoces permet une augmentation et une stabilisation des rendements dans ces zones.

La température est un facteur déterminant du rendement en grains du pois chiche puisqu'elle règle son rythme de croissance et de développement. En fait, une plante ne peut passer d'un stade phénologique à un autre que si ses durées thermiques sont satisfaites. Les effets de la température varient en fonction du stade de développement végétatif. L'apparition des températures extrêmes entraîne des dégâts irréversibles qui se traduisent par la destruction des fleurs, des gousses et parfois même de la plante entière. Les durées thermiques déterminées pour la floraison des génotypes de pois chiche varient de 141 à 218 °C par jour (**Tableau 4**). La comparaison des moyennes permet de définir 9 groupes homogènes de cultivars. Le premier groupe, caractérisé par les plus faibles durées thermiques, est composé des génotypes 4, 44, 9, 10, 6, 27, 3, 23, 1, 25, 36, 45, 5, 37, 12, 19, 7, 13, 26, 20, 11, 2, 21, 24, 8, 17, 14, 38, 22, 34, 16, 39, 35, 15, 18, 33. Le dernier groupe, caractérisé par les durées thermiques les plus élevées, est composé des génotypes 31, 28, 43, 29, 32, 42, 40, 30, 41. Les génotypes à floraison précoce paraissent caractérisés par de faibles durées thermiques, alors que les génotypes à floraison tardive sont exigeants en durée thermique. Afin de palier aux effets néfastes des hautes températures, les génotypes à floraison tardive devraient avoir un semis précoce.

L'efficacité de l'utilisation de l'eau, définie comme étant le ratio entre la production en grains et la quantité d'eau consommée par la plante, exprime la capacité des feuilles d'échanger l'eau contre le gaz carbonique et traduit le rapport entre la photosynthèse et la transpiration. Huang et al. (2000) ont indiqué qu'elle représente un important critère de sélection pour la tolérance au stress hydrique. Dans nos conditions, ce paramètre varie de 0,43 à 2,74 kg·m<sup>-3</sup> d'eau (**Tableau 4**). La comparaison des moyennes permet de faire apparaître 18 groupes homogènes. Le génotype 42 s'individualise et se montre le plus efficace. Un groupe assez efficace est composé des génotypes 43, 29, 25. Par contre, le

groupe le moins efficace est composé des génotypes 17, 4, 23, 19. Il en découle que, dans les conditions de l'essai, le premier groupe de génotypes de pois chiche tolère le déficit hydrique et peut donc être adopté pour une culture printanière. Tandis que le second groupe, qui chevauche avec celui qui renferme les génotypes 45 et 41 (ILC 3279 ou Chetoui), a manifesté une forte réduction de l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Il pourrait être conduit en culture d'hiver et ne devrait pas être envisagé pour une culture de printemps. L'efficacité de l'utilisation de l'eau peut être améliorée par le choix de génotypes adaptés au déficit hydrique de la région considérée et par l'ajustement des besoins en eau de la culture à l'offre climatique. En Tunisie, la première alternative est la plus efficace car les précipitations sont toujours variables dans le temps et dans l'espace.

Le poids de 100 graines varie de 9,1 à 49,2 g (**Tableau 4**). La comparaison des moyennes fait apparaître 11 groupes homogènes. Le premier groupe est formé des génotypes du type 'Dési' : 42 et 43, qui ont produit des graines du plus petit calibre. Il est suivi par un groupe de génotypes du type 'Kabuli' : 17, 45, 23, 41, 33, 35, 24, 20, 40, 39, 6, 34, 22, 38, dont les graines sont un peu plus grosses, tandis que les génotypes 11 et 44 ont les graines du plus gros calibre. Les génotypes 12 et 19 ont produit des graines de moindre calibre. Meadley et al. (1970) ont suggéré que le poids de 100 graines est un important caractère agronomique pour la sélection de génotypes à haut rendement. De même, Acevedo et al. (1987) ont signalé que, sous contrainte hydrique, les plantes tolérantes au stress hydrique sont caractérisées par des poids de 100 graines élevés. Il paraît donc que les deux derniers groupes de génotypes testés tolèrent plus le stress hydrique que les premiers groupes. Miller et al. (2002) ont signalé que le pois chiche du type 'Dési' est caractérisé par des graines de petit calibre, par comparaison à celui du type 'Kabuli'. Ceci pourrait indiquer que, chez le pois chiche, le poids de 100 graines est un caractère génétique. En fait, les deux génotypes, S 96125 et ICC 3991, sont du type 'Dési' et ont les plus faibles poids de 100 graines.

La production de biomasse aérienne varie de 163 à 912 g·m<sup>-2</sup> (**Tableau 4**). La comparaison des moyennes fait apparaître 19 groupes. Le groupe de génotypes ayant la plus faible production de biomasse aérienne est composé de 17, 23, 4, alors que le génotype 42 représente, à lui seul, le groupe ayant produit la biomasse la plus élevée. Les génotypes 43 et 45 forment le groupe précédent et ont produit des biomasses aériennes moins élevées. D'après Pacucci et al. (2006), dans des conditions de sécheresse, la vigueur des plants et la production élevée de la matière sèche pourraient être envisagées comme principales caractéristiques pour le maintien et l'amélioration du

rendement du pois chiche. Boubaker et al. (1995) ont rapporté que sous hautes conditions de stress hydrique, la vigueur des plantules de céréales peut être utilisée pour l'identification des génotypes tolérants au stress hydrique.

Le rendement en grains varie de 74 à 471 g·m<sup>-2</sup> (Tableau 4). La comparaison des moyennes permet de distinguer 18 groupes homogènes de génotypes. Le groupe ayant le plus faible rendement en grains est composé des génotypes 17, 4, 23, 19. Le génotype 42 représente, à lui seul, le groupe ayant le rendement en grains le plus élevé. Il est précédé par le groupe formé des génotypes 43, 29, 25, 42 qui ont donné des rendements en grains moins élevés. Singh et al. (1994) ont indiqué que les génotypes tolérants au stress hydrique produisent 40 à 50 % de leur rendement en grains potentiels, alors que les génotypes sensibles n'en produisent que 10 %. D'après Sarrafi et al. (1993), la résistance à la sécheresse d'un génotype pourrait être évaluée par sa capacité à maintenir un rendement acceptable en conditions de déficit hydrique.

L'indice de récolte varie de 18 à 56,8 % (Tableau 4). La comparaison des moyennes fait apparaître 13 groupes homogènes de génotypes. Le génotype 45 représente le premier groupe et a le plus faible indice de récolte. Les génotypes 16, 17, 31, 5, 39, 27, 23, 35, 24, 20, 28, 34, 33, 36, 22, 2, 6, 8, 42, 18, 1, 13, 32, 3, 9, 37, 29, 12, 14, 38, 10, 25, 26 forment le groupe caractérisé par l'indice de récolte le plus élevé. Selon Rosielle et al. (1975), le rendement en grains et l'indice de récolte sont influencés par les conditions du milieu de culture. D'ailleurs, Silim et al. (1993) ont remarqué qu'un haut indice de récolte est associé à une moindre sensibilité à la sécheresse.

### 3.2. Analyse en composantes principales (ACP) des variables étudiées

L'analyse en composantes principales (Frontier, 1981) a montré que le rendement en grains, l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la production de biomasse aérienne ont les contributions les plus élevées dans l'édification du premier axe avec des valeurs respectives de 28,43, 28,43 et 24,68 %, alors que l'axe 2 est composé principalement de l'indice de récolte (49 %), du poids de 100 graines (19,55 %) et de la date de floraison (18,65 %) (Tableau 5).

Les deux premiers axes (1 et 2) ont les valeurs propres les plus élevées. Ils totalisent à eux seuls 78,79 % de la variabilité totale (Tableau 6). Le premier axe absorbe à lui seul 53,98 % de la variabilité observée. C'est un axe de rendement et d'efficacité de l'utilisation de l'eau. Il est en corrélation négative avec le poids de 100 graines et positive avec la date de floraison, la production de la biomasse aérienne, le rendement en grains et l'efficacité de l'utilisation de

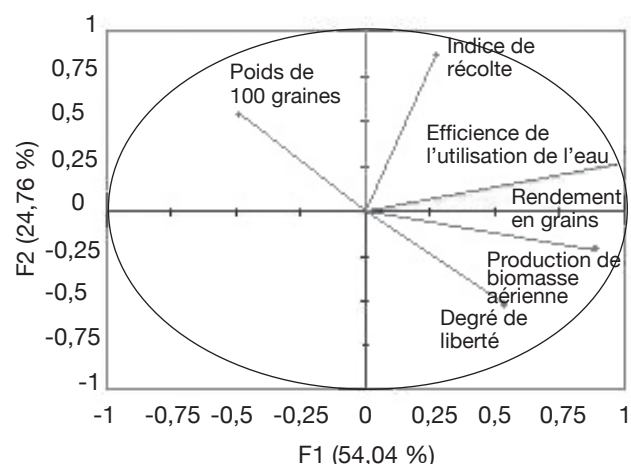
**Tableau 5.** Pourcentages de contribution des variables dans l'édification des axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales — *Contribution percentages of the variables in the edification of the axes 1 and 2 of the principal component analysis.*

Variable	Axe 1	Axe 2
Date de floraison (j)	8,952	18,649
Poids de 100 graines (g)	7,072	19,547
Production de biomasse aérienne (g·m <sup>-2</sup> )	24,680	3,331
Indice de récolte (%)	2,426	49,329
Efficacité de l'utilisation de l'eau (kg·m <sup>-3</sup> )	28,435	4,573
Rendement en grains (g·m <sup>-2</sup> )	28,435	4,573
<b>Total</b>	<b>100,000</b>	<b>100,000</b>

**Tableau 6.** Valeurs propres et variabilité des facteurs principaux — *Eigenvalues and variability of the principal components.*

Axe	Valeur propre	Variabilité (%)	Pourcentages accumulés
1	3,24	53,98	53,98
2	1,49	24,81	78,79
3	0,65	10,82	89,60
4	0,61	10,15	99,76
5	0,01	0,24	100,000

l'eau (Figure 3). Il sépare les génotypes principalement selon leur tolérance au stress hydrique et, à moindre importance, selon leur précocité. Le second axe explique 24,8 % de la variabilité observée. Il est en corrélation négative avec la date de floraison et positive avec l'indice de récolte et le poids de 100 graines. C'est



**Figure 3.** Projection des caractères sur le plan engendré par les axes 1 et 2 — *Projection of the characters on the plan generated by axes 1 and 2.*

un axe d'architecture du plant et de calibre des graines. Il permet de différencier les génotypes selon le calibre des graines et l'indice de récolte.

En considérant l'axe 1, on distingue deux groupes de génotypes (**Figure 4**). Le premier groupe est formé des génotypes qui ont toléré le stress hydrique. Ils ont produit de hauts rendements en grains et en biomasse aérienne. Ils sont caractérisés par une efficacité de l'utilisation de l'eau élevée. Certains génotypes sont précoces, tels que 16, 25, 36, 39 et d'autres sont tardifs, tels que 29, 31, 32, 40, 42 et 43. Le second groupe renferme des génotypes sensibles au stress hydrique. Ils ont donné de faibles rendements en grains et biomasse aérienne et ont présenté une efficacité de l'utilisation de l'eau réduite. Certains génotypes sont précoces, tels que 4, 19, 23, 45 et d'autres sont tardifs, tels que 17 et 41.

En considérant l'axe 2 (**Figure 4**), deux groupes de génotypes peuvent être distingués. Le premier englobe des génotypes de haut rendement dont les graines sont de gros calibre et ont des indices de récolte élevés, tels que 9, 12, 13, 16, 25 et 29. Le second groupe est caractérisé par un rendement en grains élevé mais dont les graines sont de petit calibre, tels que 20, 38, 39, 40, 42 et 43.

#### 4. CONCLUSION

La mise en culture de la collection des 45 génotypes de pois chiche a montré une variabilité génotypique hautement significative pour tous les paramètres agronomiques et phénologiques étudiés. Elle indique une importante diversité biologique entre ces génotypes de pois chiches.

Un groupe est constitué de génotypes fortement stressés par le manque d'eau et les températures relativement élevées. Certains sont précoces, tels que

4, 19, 23, 45 et d'autres sont tardifs, tels que 17 et 41. Ils ont donné de faibles rendements en grains et en biomasse aérienne et leur efficacité d'utilisation de l'eau est réduite. L'aire de culture de ces génotypes n'est certainement pas en milieu semi-aride en culture de printemps. On peut supposer qu'elle serait plutôt limitée aux zones humides et sub-humides du territoire tunisien avec un semis d'hiver pour les génotypes qui ont une floraison tardive et un semis de printemps pour ceux qui ont une floraison précoce.

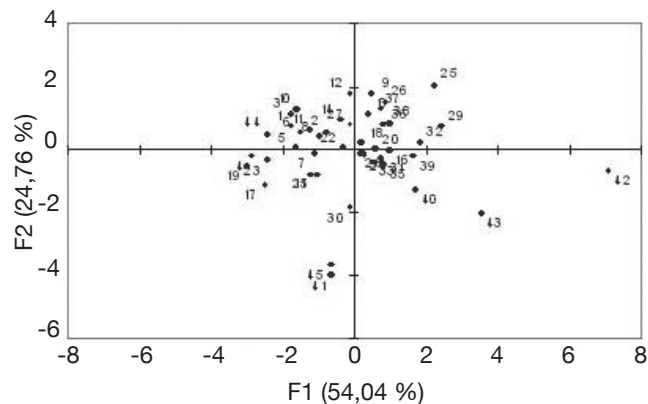
Un second groupe est constitué de génotypes ayant toléré les stress hydrique et thermique. Ces génotypes ont produit de hauts rendements en grains et des biomasses aériennes élevées et ont une efficacité de l'utilisation de l'eau élevée. Certains sont précoces et caractérisés par des graines de gros calibre, tels que les génotypes 16, 25 et 29. D'autres sont tardifs et caractérisés par des graines de petit calibre, tels que 20, 38, 39, 40, 42 et 43. Ces génotypes pourraient être conduits en culture de printemps dans le semi-aride tunisien.

Le dernier groupe est composé du reste des génotypes qui sont du type 'Kabuli'. Ils sont moyennement affectés par les stress hydrique et thermique. Ils paraissent plus adaptés pour une culture d'hiver que pour une culture de printemps. Ils peuvent être conduits en culture d'hiver dans les zones du semi-aride supérieur avec des irrigations complémentaires.

Ainsi, sous des conditions de stress hydrique, parmi les caractères agronomiques étudiés, le rendement en grains, l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la production de biomasse aérienne, l'indice de récolte, la date de floraison et le poids de 100 graines sont les plus utiles pour la caractérisation des génotypes de pois chiches tolérants au stress hydrique. Néanmoins, le poids de 100 graines paraît un caractère génétique relié au type de pois chiche. En fait, le pois chiche du type 'Desi' est caractérisé par des graines de petit calibre et de faible poids de 100 graines, par comparaison au pois chiche du type 'Kabuli'. Afin de valoriser davantage les ressources génétiques et de mieux discerner les génotypes de pois chiche qui répondent aux exigences de l'agriculteur, d'autres techniques de criblage de génotypes tolérants au stress hydrique basées sur les marqueurs chimiques, biochimiques et moléculaires et intégrant d'autres critères agronomiques comme le calibre, la couleur et la qualité organoleptique des graines peuvent être utilisées.

#### Remerciements

Les auteurs remercient l'ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas) pour la fourniture du matériel végétal et Messaoud Mars, Maître de Conférence à l'Institut supérieur agronomique de Chott Mariem, pour sa collaboration et sa contribution dans la révision du présent document.



**Figure 4.** Dispersion des génotypes dans le plan engendré par les axes 1 et 2 — *Dispersion of the genotypes in the plan generated by axes 1 and 2.*

**Bibliographie**

- Abernethy R.H., 1987. Response of *Cicer Milkvetch* seed to osmoconditioning. *Crop Sci.*, **27**, 117-121.
- Acevedo E. & Ceccarelli S., 1987. Role of the physiologist-breeder in a breeding program for drought resistance conditions. In: Baker F.W.G., ed. *Drought resistance in cereals*. Wallingford, UK: CAB International, 117-139.
- Allen G., Pereira L., Raes D. & Smith M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. In: *FAO Irrigation and drainage, paper n°24*, <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490eob.htm>, (08/12/07).
- Aouani M.E., Mhamdi R., Jebara M. & Amarger N., 2001. Characterization of rhizobia nodulating chickpea in Tunisia. *Agronomie*, **21**, 577-581.
- Belhassen E., This D. & Monneveux P., 1995. L'adaptation génétique face aux contraintes de sécheresse. *Cah. Agric.*, **4**, 251-261.
- Ben Mechlia N.B., 1998. Manuel de formation : application des données climatiques à la planification et à la gestion efficace de l'irrigation. Projet INAT - CGRE. Mise au point d'un système d'irrigation. In: *Séminaire FAO/OMM/PNUE*.
- Berger J.D. et al., 2006. Genotype by environment studies demonstrate the critical role of phenology in adaptation of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to high and low yielding environments of India. *Field Crops Res.*, **98**, 230-244.
- Blum A.L., Golan G. & Mayer J., 1989. Yield stability and canopy temperature of wheat genotypes under drought stress. *Field Crops Res.*, **22**, 289-296.
- Boubaker M. & Yamada T., 1995. Differential genotypic responses of string wheat early seedling growth to limited moisture conditions. *Tropicultura*, **13**(2), 50-53.
- Boubaker M. & Ben-Hammouda M., 1997. Screening durum wheat for drought tolerance at the seedling growth stage. *Agric. Mediterr.*, **127**(3), 267-274.
- Bouzerzour H., Djekoune A., Benmhammed A. & Hassous L., 1998. Contribution de la biomasse aérienne, de l'indice de récolte et de la précocité au rendement en grain de l'orge (*H. vulgare* L.) en zone semi-aride d'altitude. *Cah. Agric.*, **7**, 307-317.
- Choisnel E., 1984. Un modèle agrométéorologique opérationnel de bilan hydrique utilisant des données climatiques. In: *Les besoins en eau des cultures*. Versailles, France : Éditions Inra, 116-132.
- Ellis R.H. et al., 1994. Towards the reliable prediction of time to flowering in six annual crops. V. Chickpea. *Exp. Agric.*, **30**, 271-282.
- Erchidi A.E., Benbella M. & Talouizte A., 2000. Relation entre certains paramètres contrôlant les pertes en eau et le rendement grain chez neuf variétés de blé dur soumises au stress hydrique. *CIHEAM, Options Méditerranéennes, Séries Séminaires*, **40**, 279-282.
- Frontier S., 1981. *Méthode statistique. Applications à la biologie, la médecine et l'écologie*. Paris : Masson.
- Gate P., 1995. *Écophysiologie du blé de la plante à la culture*. Cachan, France : Éditions Tech & Doc, Lavoisier.
- Habaieb H. & Masmoudi-Charfi C., 2003. Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées au nord de la Tunisie : estimation de l'évapotranspiration de référence par différentes formules empiriques (cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte). *Sècheresse*, **14**(4), 257-265.
- Huang B. & Goo H., 2000. Root physiological characteristics associated with drought resistance in tall fescue cultivars. *Crop Sci.*, **40**, 196-203.
- Jain K.S., Sharma H.L., Mehra R.B. & Khare J.P., 1991. Multiple correlation and regression analysis in lentil. *Lens Newsl.*, **18**, 11-13.
- Kamel M., 1990. Winter chickpea: status and prospects. *CIHEAM, Options Méditerranéennes, Séries Séminaires*, **9**, 145-150.
- Kramer P.J., 1983. *Water relations of plants*. New York, USA: ICRISAT, Academic Press Inc.
- Kuruvadi S., 1989. Stomatal frequency in bread wheat under irrigated and rainfed conditions. *Rachis*, **8**, 22-28.
- Malhotra M.C., 1998. *Germplasm program legumes. Annual report*. Aleppo, Syria: ICARDA.
- Malhotra R.S. & Johansen C., 1996. *Germplasm program legumes. Annual Report*. Aleppo, Syria: ICARDA.
- Malhotra R.S. & Saxena M.C., 2002. Strategies for overcoming drought stress in chickpea. *Caravan ICARDA*, **17**.
- Meadley J. & Milbour J., 1970. The growth of vining peas. II. The effect of density of planting. *J. Agric. Sci.*, **74**, 273-278.
- MEAT (Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire), 2001. *Communication initiale de la Tunisie à la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. Tunis : MEAT.
- Miller P. et al., 2002. Growing chickpea in the Northern Great Plains. *Montguide*, **3**.
- Ofori I., 1996. Correlation and path-coefficient analysis of components of seed yield in Bambara groundnut (*Vigna subterranea* L.). *Euphytica*, **91**, 103-107.
- Pacucci G.C., Troccoli B. & Leoni B., 2006. Effect of supplementary irrigation on yield of chickpea genotypes in a Mediterranean climate. *Agric. Eng. Int.*, **8**.
- Perez de la Vega M., 1996. Plant genetic adaptedness to climatic and edaphic environment. *Euphytica*, **92**(1-2), 27-38.
- Poirée M. & Ollier C., 1966. *Irrigation. Les réseaux d'irrigation, théorie, technique et économie des arrosages*. 3<sup>e</sup> éd. Paris : Éditions Eyrolles.
- Roberts E.H., Summerfiel R.J., Minchin F.R. & Haley P., 1980. Phenology of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in contrasting aerial environments. *Exp. Agric.*, **16**, 343-360.
- Rosielle A.A. & Frey K.J., 1975. Estimates of selection parameters associated with harvest index in oat lines derived from a bulk population. *Euphytica*, **24**, 121-131.

- Saccardo F. & Calcagno F., 1990. Consideration of chickpea plant ideotypes for spring and winter sowing. *CIHEAM, Options Méditerranéennes, Séries Séminaires*, **9**, 35-41.
- Sapra V.T., Hughes J.L. & Sharma G.C., 1975. Inheritance and physiological effects of stomatal frequency in Barley. *Crop Sci.*, **11**, 780-783.
- Sarrafi A., Mentewab A. & Monneveux P., 1993. Variabilité génétique de la fluorescence chlorophyllienne chez les haploïdes doubles d'orge et son utilisation dans la sélection pour la résistance au stress hydrique. *In: Monneveux P. & Ben Salem M. Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétale*. Paris : Éditions INRA, 396-402.
- Saxena M.C., 1980. Recent advances in chickpea agronomy. *In: Proceedings of the international workshop on chickpea improvement, 28 February-2 March 1979, ICRISAT, Hyderabad, India*, 96-98.
- Saxena M.C., 1987. Agronomy of chickpea. *In: Saxena M.C. & Singh K.B., eds. The chickpea*. Wallingford, UK: CAB International, 207-232.
- Saxena N., Johansen P.C., Saxena M.C. & Silim S.N., 1993. Selection for drought and salinity resistance in cool-season food legumes. *In: Singh K.B. & Saxena M.C., eds. Breeding for stress tolerance in cool-season food legumes*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 245-270.
- Serraj R. et al., 2003. Management of drought in ICRISAT cereal and legume mandate crops. *In: Kijne J.W., Barker R. & Molden D., eds. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*. Wallingford, UK: CAB International, 127-144.
- Silim S.N. & Saxena M.C., 1993. Adaptation of spring-sown chickpea to the Mediterranean basin. I. Response to moisture supply. *Field Crops Res.*, **34**, 121-136.
- Singh T.P., 1977. Harvest index in lentil. *Euphytica*, **26**, 833-839.
- Singh K.B., Bejiga G., Saxena M.C. & Sinh M., 1991. Transferability of selection indices from drought-free to drought-prone environments in chickpea. *Int. Chickpea Newsl.*, **24**, 19-22.
- Singh K.B. et al., 1994. Current status and further strategy in breeding chickpea for resistance to biotic and abiotic stresses. *Euphytica*, **73**, 137-149.
- Skrypetz S., 2002. Pois chiches : situation et perspectives. *Bull. Bimens.*, **15**(16).
- Slama F., 1998. *Les cultures industrielles et les légumineuses à graines*. Tunis : Centre universitaire de diffusion.
- Soltani A., Ghassemi-Golezani K., Khoie F.R. & Moghaddem M., 1999. A simple model for chickpea growth and yield. *Field Crops Res.*, **62**, 213-224.
- Summerfield R.J., Ellis R.H. & Craufurd P.Q., 1996. Phenological adaptation to cropping environment. From evaluation descriptors of times to flowering to the genetic characterisation of flowering responses to photoperiod and temperature. *Euphytica*, **92**(1-2), 281-286.
- Wang H. & Clarke J.M., 1993. Genotypic, intraplant and environmental variation in stomatal frequency and size in wheat. *Can. J. Plant Sci.*, **73**, 671-678.
- Yousaf A., Haq M.A., Tahir G.R. & Ahmed N., 1999a. Effect of various morphological traits on chickpea yield under drought and normal field conditions. *Pak. J. Biol. Sci.*, **2**(3), 1071-1073.
- Yousaf A. & Tahir G.R., 1999b. Correlation and regression studies in chickpea genotypes. *Pak. J. Biol. Sci.*, **2**, 318-319.

(52 réf.)