
Soumis le : 08 Février 2012
 Forme révisée acceptée le : 11 Octobre 2012
 Email de l'auteur correspondant :
 o.idrissi@yahoo.fr

Comparaison de lignées avancées de lentille sous stress hydrique durant la phase de floraison et formation des gousses

Omar Idrissi*, Houasli Chafika*, Nasserlhaq Nsarellah*

Institut National de la Recherche Agronomique du Maroc, Centre Régional de Settat B.P. 589 Settat 26000 Maroc

Résumé

La lentille (*Lens culinaris* Medikus Subspecies *culinaris*) est cultivée dans les zones arides et semi arides au Maroc dans des sols de faible humidité. La tolérance à la sécheresse et le rendement grain élevé et stable sont parmi les caractères des variétés appréciées par les agriculteurs. Une expérimentation a été conduite sous serre pour déterminer la sensibilité de quelques lignées avancées de lentille au déficit hydrique de fin de cycle. Le semis des lignées a été fait dans des pots de 20 cm de diamètre et 40 cm de hauteur selon un dispositif expérimental en blocs aléatoires complets avec quatre répétitions sous deux régimes hydriques, irrigué (600 mL d'eau, trois fois par semaine) et stressé (180 mL d'eau, une fois par semaine). Les résultats montrent que pour toutes les lignées testées, le stress hydrique provoqué lors de la phase de reproduction réduit, le rendement grain, le poids des graines, l'indice de récolte et la matière sèche et raccourcit la durée de remplissage des graines en accélérant la sénescence et la maturité. La lignée F87-9 est la lignée la plus sensible parmi les lignées testées. En revanche, la lignée F2003-7 a montré de bonnes performances de tolérance au déficit hydrique. Le cycle court, la durée de remplissage des graines élevée est moins affectée par le stress hydrique, l'indice de récolte élevé, le système racinaire développé (nombre de racines latérales et longueur de la racine principale élevés) et la capacité du maintien du contenu relatif en eau des feuilles à un niveau élevé ont permis à cette lignée de réaliser le rendement le plus élevé. Les lignées F00-24 et L8PS05-5-7 ont montré également des caractéristiques de tolérance au stress hydrique. Le contenu relatif en eau des feuilles le plus faible a été enregistré chez la lignée la plus sensible F87-9.

Mots clés : lentille, stress hydrique, phase de reproduction, sensible, tolérant.

Abstract

Lentil (*Lens culinaris* Medikus Subsp. *culinaris*) is grown as a rain-fed crop in Morocco mainly in moisture-deficient soils. Drought tolerance as well as high and stable seed yield are among the important traits of lentil cultivars preferred by Moroccan farmers. In order to determine terminal drought tolerance of some advanced lentil genotypes, an experiment was conducted in a greenhouse. The lines were planted in plastic pots (20 cm diameter and 40 cm height) in a randomized complete block with four replications and two treatments: well watered (applied 600 ml of water, three times per week) and water stressed condition (applied 180 ml of water, once a week). The results revealed that, for all the genotypes tested, drought stress reduced seed yield, seed weight, harvest index, total biomass and pod filling period by accelerating the maturity. Among the genotypes tested, the genotype F87-9 was the most susceptible. On the other hand the genotype F2003-7 was the most drought tolerant genotype because of its short cycle, a long pod filling period and less affected by water stress. This genotype was also characterized by a high harvest index, well developed root architecture (higher number of lateral roots and root length) and the capacity to maintain high leaf relative water content. Two other genotypes namely F00-24 and L8PS05-5-7 showed moderate level of drought tolerance characteristics. The susceptible genotype F87-9 had the lowest leaf relative water content.

Keywords: lentil, water stress, flowering and podding time, susceptible, tolerant.

1. Introduction

La lentille (*Lens culinaris* Medikus Subsp. *culinaris*) est une légumineuse alimentaire annuelle, autogame et diploïde avec $2n=14$ chromosomes. La lentille est probablement la première légumineuse domestiquée par

l'Homme [1]. Ses centres d'origine sont le Proche Orient et l'Asie de l'Ouest d'où elle s'étend aux différentes régions dans le monde. Elle est cultivée en Asie (Turquie, Inde et Syrie) et en Afrique (Ethiopie, Maroc). Elle est fortement cultivée en Amérique du Nord (Canada, Etats Unies). L'Australie est devenue un grand producteur depuis 1990 [2]. Elle est également cultivée dans d'autres pays de la Méditerranée et en Amérique Latine. Depuis sa

domestication la lentille est cultivée en rotation avec les céréales et utilisée pour la nutrition humaine grâce à la richesse de ses graines en protéines et d'autres micronutriments. La teneur en potassium des graines de lentille varie de 242 à 290 mg/kg, elle varie de 5.4 à 14.4 g/kg pour le phosphore. Les graines de lentille sont riches en Fer (54 à 505 mg/kg), en Zinc (18 à 330 mg/kg) et en β -carotène (200 mg/kg) [3]. La paille de la lentille est importante pour l'alimentation animale ; elle constitue un aliment de bétail fortement apprécié. En effet la teneur en protéines de la paille varie de 5 à 7 % et la digestibilité de sa matière sèche varie de 43 à 46 % [4]. Son rôle dans l'équilibre nutritionnel des sols grâce à son pouvoir fixateur de l'azote atmosphérique par l'association symbiotique des racines avec la bactérie *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* contribue à l'amélioration de la productivité des systèmes de culture. Au Maroc, la lentille occupe 14 % des superficies réservées aux légumineuses alimentaires, elle vient en troisième position après la fève (42%) et le pois chiche (19%). La lentille est cultivée dans trois principales régions du Maroc : Chaouia-Abda, Zear et Saïs-moyen atlas. Dans les zones de production céréalière, notamment dans les zones à faible pluviométrie arides et semi-arides, la lentille constitue l'une des alternatives culturales de valorisation des terrains de l'exploitation. En dépit de ses rôles multiples, cette culture subit plusieurs contraintes qui freinent son développement. Le rendement et la rentabilité de cette culture sont faibles et limités par plusieurs contraintes biotiques et abiotiques. La sécheresse de fin de cycle constitue l'une des contraintes abiotiques qui causent des pertes importantes de rendement. Le déficit hydrique de fin de cycle est fréquent au Maroc. Cette situation est commune dans l'ensemble des pays de l'Afrique du Nord [5]. La lentille est particulièrement sensible au stress hydrique lors de la phase de reproduction notamment durant la floraison et la formation des gousses. La croissance de la lentille est souvent assurée par l'eau résiduelle du sol dans les zones arides et semi-arides caractérisées par des sécheresses de fin de cycle qui causent des pertes de rendement grain élevées [6; 7]. Le déficit hydrique qui intervient lors de la phase de reproduction affecte négativement les composantes de rendement, notamment le nombre de fleurs, le nombre de gousses, le nombre de grains par gousse ainsi que l'indice de récolte [6; 8]. Le déficit hydrique réduit également la hauteur de la plante de 20 %, la surface foliaire de 48 à 81 % et la matière sèche totale de 60 %. Des résultats similaires ont été rapportés dans d'autres études [9]. Dans les environnements semi-arides caractérisés par la fréquence du déficit hydrique de fin de cycle, les rendements élevés sont associés au développement rapide et à la vigueur précoce de la plante, à la floraison précoce, au prolongement de la durée de floraison, à la durée de remplissage des graines longue, au nombre des gousses élevé et à un indice de récolte élevé [5 ; 6 ; 10]. D'un

autre côté, les caractéristiques des racines comme la longueur de la racine principale et le nombre des racines latérales sont des traits de tolérance à la sécheresse [5 ; 11]. Ils contribuent à une meilleure exploitation de l'humidité du sol et à une bonne acquisition des éléments nutritifs dans les sols secs et pauvres [11 ; 12]. L'ensemble de ces caractères sont utilisés pour la sélection à l'adaptation et à la tolérance à la sécheresse de fin de cycle.

Ce travail a pour objectif l'étude et la comparaison sous serre de quelques lignées avancées de lentille sous stress hydrique lors de la phase de floraison et de maturité en utilisant des caractères morphologiques, agronomiques, phénologiques et physiologiques.

2. Matériel et méthodes

Douze lignées avancées dont la variété Bakria (témoin) ont été installées sous serre pour l'évaluation de leurs comportements en réponse au déficit hydrique appliqué durant la phase de reproduction à partir du début de la floraison.

L'essai est conduit pendant l'année 2008-2009. Les lignées testées sont des lignées introduites de l'ICARDA qui ont été identifiées comme prometteuses lors des essais aux champs les années précédentes dans différentes stations expérimentales de l'Institut National de la Recherche Agronomique du Maroc (Jemâat Shaim, Sidi Elaidi et Marchouche) [13 ; 14 ; 15]. Le semis a été réalisé selon un dispositif expérimental en blocs aléatoires complets avec quatre répétitions durant la première semaine de Décembre dans des pots de 20 cm de diamètre et 40 cm de hauteur à une profondeur de 2 à 2.5 cm. Les pots contiennent du sol qui a été stérilisé et mélangé avec de la tourbe pour avoir une bonne structure (à raison de $\frac{1}{4}$ pour la tourbe et $\frac{3}{4}$ pour le sol). Les pots ont été remplis de façon homogène. Le sol utilisé provient d'un champ au domaine expérimental de Sidi El Aidi dans lequel le précédent cultural était l'orge (Tableau 1). Quatre plantes par pot ont été maintenues propres par des désherbages manuels chaque fois que nécessaire.

Tableau 1. Caractéristiques du sol utilisé.

pH (eau)	pH (KCl 1M)	Matière organique (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	K ₂ O (ppm)
8.42	7.12	1.37	55.62	961.86

Deux régimes hydriques ont été appliqués, un régime irrigué durant tout le cycle (IRR) et un régime stressant dès le début de la floraison (STR). A partir de la date d'apparition de la première fleur, les pots des blocs irrigués continuent à être irrigués trois fois par semaine (Lundi, Mercredi et Vendredi). Pour ce régime hydrique la dose apportée est de 200 mL (70 % de l'humidité à la capacité au champ) par irrigation. Les pots des blocs

stressés, quant à eux, reçoivent une faible irrigation de 180 mL d'eau (63 % de l'humidité à la capacité au champ) une fois par semaine.

Les paramètres étudiés sont des paramètres liés à la phase de reproduction (nombre de jours à la floraison,...), les composantes de rendement, les caractéristiques des racines (nombre de racines latérales, longueur de la racine principale) ainsi qu'un paramètre physiologique, le contenu relatif en eau des feuilles qui permet d'apprécier le statut de l'eau dans les feuilles en terme des conséquences physiologiques du déficit hydrique sur les cellules végétales. Le contenu relatif en eau des feuilles (CRE) a été déterminé en se basant sur la formule suivante [16] :

$$CRE = \left[\frac{(\text{poids frais} - \text{poids sec})}{(\text{poids à la turgescence} - \text{poids sec})} \right] * 100$$

Le poids frais des feuilles est obtenu en mesurant le poids des feuilles juste après leur prélèvement. Le poids à la turgescence des feuilles est mesuré après l'obtention de la pleine turgescence en trempant les feuilles dans de l'eau distillée durant 7 heures. Le poids sec des feuilles est mesuré après séchage des feuilles à 65°C pendant 48 heures [16].

Les composantes de rendement et les caractéristiques des racines ont été déterminées en se basant sur la moyenne de quatre plantes de chaque pot. La date de la floraison et de la maturité correspondent respectivement, au jour de l'apparition de la première fleur de 50 % des plantes de chaque pot et au jour de la maturité de 50 % des plantes de chaque pot [2; 6].

Les données ont été traitées par le logiciel SPSS (11.5 pour Windows) en se basant sur les analyses de variance, les tests de comparaison de moyennes (test de Dunnett et test de Student-Newman-Keuls) et le calcul de la matrice de corrélation.

L'analyse de variance à deux facteurs fixes (ANOVA2) a été faite selon le modèle statistique :

$$Y = M + L + RH + L * RH + E$$

M : moyenne générale ; L : écart à la moyenne dû au facteur *Lignée* ; RH : écart à la moyenne dû au facteur *Régime Hydrique* ; L.RH : écart à la moyenne dû à l'interaction des deux facteurs ; E : erreur résiduelle (variance non expliquée).

Les températures sous serre ont varié de 12°C à 28°C durant la période de l'expérimentation. Les températures ont été enregistrées à midi (12h). La serre est équipée d'un système automatique de refroidissement par vapeur et ventilation qui a permis de garder la température inférieure à 28 °C.

3. Résultats et discussion

Le déficit hydrique appliqué au début de la floraison réduit l'ensemble des caractères étudiés. L'indice de récolte a été réduit de 0.86 % (ILL7217) à 28.5 % (F87-9). Les cycles des cultures ont été raccourcis pour l'ensemble des lignées étudiées par la réduction de la phase de remplissage des graines (de 0.74 % pour la lignée L8PS05-5-13 à 24.39 % pour la lignée F87-9), et par l'accélération de la sénescence et l'avancement de la maturité (Figure 1, figure 2). En effet, le nombre de jours à la maturité sous stress hydrique (JAS MA.STR) a été réduit significativement par rapport à celui de régime irrigué convenablement (JAS MA-IRR) (Tableau 2). Le nombre de jours à la floraison (JAS FL) n'a pas été affecté pour toutes les lignées par l'application du stress.

L'analyse de variance montre l'effet significatif du régime hydrique sur le nombre de gousses produites par pot (Tableau 2).

Le test de comparaison de moyennes de Dunnett montre que trois lignées sont significativement différentes du témoin Bakria ; il s'agit de la lignée F87-9 qui a été sévèrement affectée par le stress hydrique et a produit le plus faible nombre de gousses (12 gousses) et les deux lignées F2003-7 et L8PS05-5-7, moins affectées et qui ont produit le plus grand nombre de gousses (respectivement 78 gousses et 73 gousses). La variété témoin Bakria a produit 46 gousses (Tableau 3). Le pourcentage de réduction du nombre de gousses produites entre les régimes hydriques irrigué et stressé pour la lignée F87-9 est de 81%, le plus élevé parmi les lignées testées. En revanche, les nombres de gousses produites ont été réduits respectivement de 56 % et 48 % par le stress pour les deux lignées F2003-7 et L8PS05-5-7. La lignée F2003-7 peut être considérée comme la lignée la moins sensible au stress hydrique (tolérante), celle-ci a un rendement potentiel le plus élevé. En effet, elle a produit le nombre de gousses le plus élevé pour le régime hydrique irrigué convenablement.

Le test de Student Newman et Keuls montre que les lignées F00-24, F97-29, F95-41 et ILL7217 appartiennent au même groupe homogène que le témoin Bakria selon le nombre de gousses produites. Le pourcentage de réduction des gousses produites par le stress le plus faible a été obtenu pour la lignée ILL7217 (39 %). Les pourcentages de réduction des nombres de gousses produites des deux lignées F2003-7 et L8PS05-5-7 supérieurs à celui de la lignée ILL7217 peuvent être expliqués par les nombres élevés des gousses produites par ces deux lignées.

Les lignées F00-24, F97-29, F95-41 et ILL7217 sont moyennement tolérantes au stress hydrique et leurs phases de reproduction n'ont pas été sévèrement réduites. En effet, le pourcentage de réduction de la durée de la phase de reproduction est seulement de 10.41 % (moins de cinq

jours) et 7.43 % (moins de trois jours) respectivement pour F00-24 et ILL7217 (tableau 3).

L'indice de récolte de la lignée F87-9 a été le plus affecté par le stress. En effet, il a été réduit de 28%.

Des résultats similaires ont été obtenus dans d'autres études [6 ; 9 ; 12 ; 17]. La réduction de la durée de

remplissage des gaines par l'effet du déficit hydrique de fin de cycle est relativement plus rencontrée chez les lignées qui ont des graines larges dont le poids de cent graines est supérieur à 4.5g [6 ; 9].

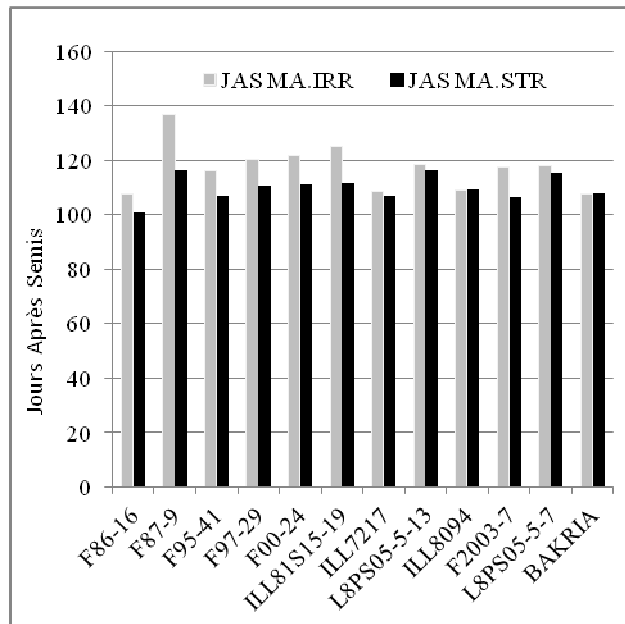


Figure 1 : Comparaison des nombres de jours à la maturité (JAS MA) entre les deux régimes hydriques (IRR : irrigué ; STR : stressé).

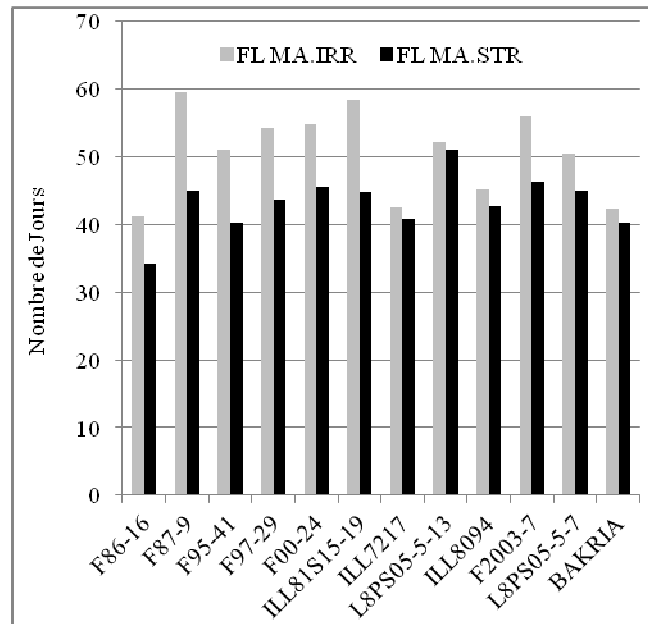


Figure 2 : Comparaison de la durée de la phase de reproduction (FL MA) entre les deux régimes hydriques (IRR : irrigué ; STR : stressé).

Tableau 2

ANOVA2 des caractères phénologiques et composantes de rendements.

Variables	Degré de liberté	Carrés moyens	F	Signification
Date de floraison				
LIGNEE	11	143,623	32,711	0,000 ***
REGIME HYDRIQUE	1	11,391	2,594	0,114 NS
LIGNEE X REGIME HYDRIQUE	11	1,891	0,431	0,878 NS
ERREUR RESIDUELLE	72	14.52	3.532	
Date d'apparition de la 1^{ère} gousse				
LIGNEE	11	101,699	11,699	0,000 ***
REGIME HYDRIQUE	1	23,766	2,750	0,104 NS
LIGNEE X REGIME HYDRIQUE	11	23,266	2,693	0,119 NS
ERREUR RESIDUELLE	72	19.712	4.235	
Nombre de gousses par pot				
LIGNEE	11	109.714	10.501	0.000 ***
REGIME HYDRIQUE	1	517.562	49.537	0.000 ***
LIGNEE X REGIME HYDRIQUE	11	25.134	2.406	0.134 NS
ERREUR RESIDUELLE	72	87.125	36.254	
Date de maturité				
LIGNEE	11	207,634	7,666	0,000 ***
REGIME HYDRIQUE	1	8100,00	299,07	0,000 ***
LIGNEE X REGIME HYDRIQUE	11	192,714	7,116	0,000 ***
ERREUR RESIDUELLE	72	412.256	8.241	
Durée de la phase de remplissage des graines				
LIGNEE	11	123.248	3.393	0.005 **
REGIME HYDRIQUE	1	7246.26	199.46	0.000 ***
LIGNEE X REGIME HYDRIQUE	11	144.48	3.977	0.212 NS
ERREUR RESIDUELLE	72	256.123	9.213	
Poids de 100 graines				

LIGNEE				
REGIME HYDRIQUE	11	4.439	2.417	0.033 *
LIGNEE X REGIME HYDRIQUE	1	129.415	70.469	0.000 ***
ERREUR RESIDUELLE	11	4.433	2.414	0.034 *
Indice de récolte	72	102.325	7.128	
LIGNEE				
REGIME HYDRIQUE	11	133.928	4.342	0.001 **
LIGNEE X REGIME HYDRIQUE	1	2132.39	69.136	0.000 ***
ERREUR RESIDUELLE	11	148.683	4.821	0.000 ***
	72	215.235	50.214	

*** test très hautement significatif au seuil de 5 % ; ** test hautement significatif au seuil de 5% ; * test significatif au seuil de 5% ; NS test non significatif au seuil de 5%.

Tableau 3

Paramètres de reproduction et indice de récolte

Lignées	Date d'apparition de la 1 ^{ère} gousse (Jours après semis)		Nombre de gousses par pot		Durée de la phase de remplissage des graines (nombre de jours)		Indice de récolte	
	Irrigué	Stressé	Irrigué	Stressé	Irrigué	Stressé	Irrigué	Stressé
F86 16	73 ^a	72.25 ^a	142 ^a	63 ^a	36.75 ^a	35.5 ^a	44.07 ^a	38.41 ^a
F87 9	82 ^b	81.5 ^b	66.25 ^b	12.5 ^b	56.5 ^b	45.25 ^b	15.49 ^b	11.07 ^b
F95 41	73.75 ^a	82.75 ^b	134 ^a	70.75 ^c	42.5 ^c	32.72 ^a	48.81 ^a	46.97 ^c
F97 29	75.25 ^a	74.5 ^a	102.25 ^c	52.75 ^d	45 ^c	38.5 ^a	42.14 ^a	42.18 ^c
F00 24	73.75 ^a	74 ^a	142.75 ^a	58.5 ^d	48 ^c	43.25 ^b	49.29 ^a	44.35 ^c
ILL81S15 19	73.5 ^a	73 ^a	103.25 ^c	50.25 ^d	51.25 ^c	37.75 ^a	45.67 ^a	38.85 ^a
ILL 7217	71.5 ^a	73.5 ^a	101.75 ^c	61.25 ^a	37 ^a	34.25 ^a	48.21 ^a	47.79 ^c
L8PS05 5 13	74.25 ^a	71.75 ^a	104.75 ^c	49.75 ^d	45 ^c	44.66 ^b	49.2 ^a	38.03 ^a
ILL8094	72.25 ^a	74.5 ^a	101 ^c	41.25 ^c	36.75 ^a	34.75 ^a	42.61 ^a	33.61 ^a
F2003 7	71 ^a	68.75	180.25 ^d	78 ^c	46.25 ^c	37.75 ^a	51.22 ^a	64.17 ^d
L8PS05 5 7	75.25 ^a	75 ^a	139 ^a	72.25 ^c	42.5 ^c	40.25 ^b	44.94 ^a	54.23 ^d
BAKRIA	70 ^a	73.5 ^a	117.25 ^c	46 ^f	37.5 ^a	34.25 ^a	48.82 ^a	63.78 ^d

Le déficit hydrique conduit à l'avortement des fleurs et des gousses. La réduction du nombre de gousses par pot est due à la réduction de la production des fleurs qui aboutissent aux gousses et à la chute des jeunes fleurs et des jeunes gousses avant la formation et le remplissage des graines

(tableau 3). Ces résultats sont en accords avec ceux obtenus par [9] et [17]. La réduction du rendement grains sous la contrainte hydrique durant la phase de reproduction est en grande partie expliquée par la réduction des nombres de fleurs, de gousses et de graines [6 ; 9].

L'étude et l'utilisation des caractères morphologiques des racines (longueur des racines, nombre des racines latérales, densité des racines,...) peut permettre l'identification de lignées avec des caractères racinaires supérieurs [18; 19]. Ces caractères peuvent aider pour une meilleure valorisation des éléments nutritifs et de l'eau des sols pauvres des zones semi arides. Les lignées présentant ces caractéristiques peuvent être intégrées dans le programme d'amélioration génétique pour la réalisation de variétés tolérantes à la sécheresse [18].

L'analyse de variance montre l'effet significatif du régime hydrique et de la lignée sur le poids sec racinaire, la longueur de la racine principale et le nombre de racines latérales. Sous stress hydrique les lignées diffèrent significativement pour les trois variables : poids sec racinaire, le nombre de racines latérales et la longueur de la racine principale (tableau 4).

Le tableau 5 présente les valeurs moyennes de la matière sèche aérienne, de la matière sèche racinaire, de la longueur

de la racine principale et du nombre des racines latérales obtenues chez les lignées testées sous les deux régimes hydriques. La longueur de la racine principale a été réduite par le stress seulement pour trois lignées : F86-16, ILL7217 et L8PS05-5-13. Le nombre des racines latérales a été réduit par les stress pour la moitié des lignées testées. Une réduction de plus de 32 % a été enregistrée chez la lignée sensible F87-9.

Sous stress hydrique le nombre de racines latérales (NRL.STR) le plus élevé est obtenu chez la lignée L8PS05-5-7 avec en moyenne 27.25 cm. Le test de comparaison de moyennes de Dunnett montre que cette dernière lignée ainsi que les quatre lignées F2003-7, ILL8094, F97-29 et F87-9 ont des nombres de racines latérales supérieurs significativement au témoin Bakria. La lignée tolérante F2003-7 est caractérisée, selon le test de Dunnett, par une longueur de la racine principale élevée, similaire pour les deux régimes hydriques (plus de 17 cm), et significativement supérieur au témoin Bakria.

Bien que la lignée F87-9 ait une bonne vigueur végétative (Poids sec aérien, poids sec racinaire, longueur de la racine principale et nombre de racines latérales élevés), elle est la lignée la plus sensible au stress hydrique parmi les lignées testées et son rendement grain est le plus faible. Cette sensibilité peut être expliquée par la longueur de son cycle. En effet, la formation des gousses et le remplissage des graines sont affectés et limités par le manque d'eau dans le sol. La lignée ILL18S15-19 a été également fortement affectée, la durée de la phase de

reproduction a été réduite de plus de 24 % et l'indice de récolte réduit de 17 %.

Tableau 4.
ANOVA2 des caractéristiques des racines et de la matière sèche.

Variables	Degré de liberté	Carrés moyens	F	Signification
Poids sec aérien				
LIGNEE	11	1,433	13,685	0,000 ***
REGIME HYDRIQUE	1	11,799	112,708	0,000 ***
LIGNEE X REGIME HYDRIQUE	11	0,109	1,043	0,415 NS
ERREUR RESIDUELLE	72	19,214	125,214	
Poids sec racinaire				
LIGNEE	11	0,009	4,118	0,001 **
REGIME HYDRIQUE	1	0,021	9,794	0,003 **
LIGNEE X REGIME HYDRIQUE	11	0,008	3,951	0,002 **
ERREUR RESIDUELLE	72	1,025	8,124	
Longueur de la racine principale				
LIGNEE	11	4,537	1,459	0,0205 **
REGIME HYDRIQUE	1	95,063	30,567	0,000 ***
LIGNEE X REGIME HYDRIQUE	11	3,651	1,174	0,335 NS
ERREUR RESIDUELLE	72	85,124	32,125	
Nombre de racines latérales				
LIGNEE	11	28,634	2,448	0,031 **
REGIME HYDRIQUE	1	105,063	12,828	0,001 **
LIGNEE X REGIME HYDRIQUE	11	18,491	1,581	0,164 NS
ERREUR RESIDUELLE	72	132,245	18,145	

*** test très hautement significatif au seuil de 5% ; ** test hautement significatif au seuil de 5% ; * test significatif au seuil de 5% ; NS test non significatif au seuil de 5%.

Tableau 5
Caractéristiques des racines et de la matière sèche des lignées testées.

Lignées	Longueur de la racine principale (cm)		Nombre de racines latérales (/ plante)		Poids sec racinaire (g/plante)		Poids sec aérien (g/plante)	
	Irrigué	Stressé	Irrigué	Stressé	Irrigué	Stressé	Irrigué	Stressé
F86 16	17.25 ^a	11.25 ^a	24 ^a	19 ^a	1.07 ^a	0.35 ^a	20.55 ^a	8 ^a
F87 9	19 ^a	21.25 ^b	34.75 ^b	23.5 ^b	2.61 ^b	1.03 ^b	25.84 ^b	14.83 ^b
F95 41	13.87 ^b	17.75 ^c	24.75 ^a	18 ^a	0.4 ^c	0.40 ^a	19.19 ^a	10.28 ^a
F97 29	14.62 ^b	16.06 ^c	20.75 ^a	24.5 ^b	0.56 ^c	0.49 ^a	17.01 ^a	9.69 ^a
F00 24	13.12 ^b	15.87 ^c	18.75 ^a	19 ^a	0.43 ^c	0.48 ^a	20.57 ^a	9.73 ^a
ILL81S15 19	11 ^b	14 ^a	20 ^a	17 ^a	0.65 ^c	0.46 ^a	16.71 ^a	8.55 ^a
ILL 7217	17.06 ^a	11.12 ^a	17 ^c	14.25 ^c	0.32 ^c	0.34 ^a	15.53 ^a	9.57 ^a
L8PS05 5 13	15 ^a	10.81 ^a	22 ^a	16.5 ^a	0.51 ^c	0.48 ^a	17.57 ^a	7.49 ^c
ILL8094	12.25 ^b	13.81 ^a	16.5 ^c	23.25 ^b	0.44 ^c	0.51 ^a	18.80 ^a	10.06 ^a
F2003 7	17.25 ^a	17.68 ^c	21 ^a	24.5 ^b	0.64 ^c	0.51 ^a	19.33 ^a	9.91 ^a
L8PS05 5 7	13.12 ^b	15.43 ^c	18.25 ^a	27.25 ^b	0.52 ^c	0.39 ^a	19.06 ^a	10.61 ^a
BAKRIA	10.31 ^b	11.62 ^a	16 ^c	16.75 ^a	0.57 ^c	0.29 ^a	16.99 ^a	8.39 ^a

Pour chaque colonne : mêmes lettres pour deux lignées : pas de différence significative ; lettres différentes : différence significative.

L'analyse de la matrice de corrélation (tableau 6) montre que, sous restriction d'apport d'eau lors de la phase de reproduction, le nombre de gousses est positivement corrélé au poids sec aérien ($r^2=0.81$), à l'indice de récolte ($r^2=0.31$), et à la durée de la phase de remplissage des graines ($r^2=0.27$). En revanche, des coefficients de corrélation négatifs ont été enregistrés entre le nombre de gousses et la date de floraison ($r^2=-0.37$), la date d'apparition de la première gousse ($r^2=-0.28$) et le poids de cent graines ($r^2=-0.25$).

Le contenu relatif en eau est un paramètre qui donne une mesure appropriée sur le statut hydrique de la plante en exprimant les conséquences physiologiques d'un déficit hydrique au niveau cellulaire. Ce paramètre a été utilisé pour la comparaison des comportements

physiologiques des lignées avancées suite à l'application du déficit hydrique dès le début de la floraison. Le tableau 7 présente l'évolution du contenu relatif en eau des feuilles des lignées étudiées sous stress hydrique.

L'analyse de variance pour le contenu relatif en eau des feuilles pour les trois mesures (80, 89 et 109 jours après semis) a été réalisée. La différence n'est pas significative (0.24) pour la première mesure prise 80 jours après semis, qui correspond à 10 jours après l'application du régime hydrique stressé, et très hautement significative (0.0001) pour les deux mesures prises après 89 et 109 jours après semis. En effet, le test de comparaison de moyennes de Student Newman et Keuls a mis en évidence deux groupes homogènes pour la première mesure et trois pour la deuxième et la troisième mesure. Ceci peut être

expliqué par le fait que la différence entre les contenus relatifs en eau des feuilles est de plus en plus grande avec l'augmentation de la durée après l'application du déficit hydrique c'est-à-dire avec l'augmentation de l'intensité du stress hydrique (tableau 7). A 109 jours après semis, les résultats du test de comparaison de moyennes de Dunnett montrent que les contenus relatifs en eau des feuilles des deux lignées F86-16 et F87-9 diffèrent significativement de celui du témoin Bakria. La première présente le contenu relatif en eau des feuilles le plus élevé (67.84 %)

Tableau 6

Matrice de corrélation.

		JAS.F	JAS.PG	JAS.MAT	PG-MAT	NTG	P100G	IR	LRP	NRL	PSR	PSA
JAS.F	Pearson	1	,585(**)	,586(**)	,112	-,379(**)	,091	-,566(**)	,230(*)	,393(**)	,573(**)	-,020
	Sig. bilat	.	,000	,000	,287	,000	,385	,000	,024	,000	,000	,844
JAS.PG	Pearson	,585(**)	1	,481(**)	-,115	-,281(**)	,302(**)	-,528(**)	,309(**)	,269(*)	,311(**)	-,167
	Sig. bilat	,000	.	,000	,276	,006	,004	,000	,003	,011	,003	,109
JAS.MAT	Sig. bilat	,586(**)	,481(**)	1	,816(**)	,055	-,006	-,485(**)	,316(**)	,524(**)	,586(**)	,300(**)
	Sig. bilat	,000	,000	.	,000	,596	,951	,000	,002	,000	,000	,003
PG.MAT	Pearson	,112	-,115	,816(**)	1	,278(**)	,023	-,140	,056	,272(*)	,180	,422(**)
	Sig. bilat	,287	,276	,000	.	,007	,832	,189	,595	,010	,087	,000
NTG	Pearson	-,379(**)	-,281(**)	,055	,278(**)	1	-,251(*)	,314(**)	-,072	-,038	,001	,818(**)
	Sig. bilat	,000	,006	,596	,007	.	,015	,002	,489	,721	,992	,000
P100G	Pearson	,091	,302(**)	-,006	,023	-,251(*)	1	-,264(*)	,151	-,053	-,228(*)	-,083
	Sig. bilat	,385	,004	,951	,832	,015	.	,010	,146	,618	,028	,425
IR	Pearson	-,566(**)	-,528(**)	-,485(**)	-,140	,314(**)	-,264(*)	1	-,264(*)	-,328(**)	-,576(**)	,016
	Sig. bilat	,000	,000	,000	,189	,002	,010	.	,010	,002	,000	,876
LRP	Pearson	,230(*)	,309(**)	,316(**)	,056	-,072	,151	-,264(*)	1	,634(**)	,390(**)	,022
	Sig. bilat	,024	,003	,002	,595	,489	,146	,010	.	,000	,000	,835
NRL	Pearson	,393(**)	,269(*)	,524(**)	,272(*)	-,038	-,053	-,328(**)	,634(**)	1	,615(**)	,158
	Sig. bilat	,000	,011	,000	,010	,721	,618	,002	,000	.	,000	,134
PSR	Pearson	,573(**)	,311(**)	,586(**)	,180	,001	-,228(*)	-,576(**)	,390(**)	,615(**)	1	,231(*)
	Sig. bilat	,000	,003	,000	,087	,992	,028	,000	,000	,000	.	,024
PSA	Pearson	-,020	-,167	,300(**)	,422(**)	,818(**)	-,083	,016	,022	,158	,231(*)	1
	Sig. bilat	,844	,109	,003	,000	,000	,425	,876	,835	,134	,024	.

** La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

* La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral)

Légende :

Pearson : Corrélation de Pearson

Sig. bilat : Signification bilatérale.

JAS.F : Nombre de jours après semis à la floraison.**JAS.PG** : Nombre de jours après semis à l'apparition de la première gousse.**JAS.MAT** : Nombre de jours après semis à la maturité.**PG.MAT** : Durée de la phase de remplissage des graines.**NTG** : Nombre total des gousses.**P100G** : Poids de cent graines.**IR** : Indice de récolte.**LRP** : Longueur de la racine principale.**NRL** : Nombre de racines latérales**PSR** : Poids sec racinaire.**PSA** : Poids sec aérien

et la deuxième lignée, qui est la plus sensible au déficit hydrique, présente le contenu relatif en eau des feuilles le plus faible (40.44 %) parmi les lignées testées. Les contenus relatifs en eau des feuilles des deux lignées F2003-7 et F00-24 sont respectivement de 61.41 % et 57.25 %, elles appartiennent toutes les deux avec la variété Bakria au même groupe homogène selon le test de Student Newman et Keuls.

Tableau 7.

Evolution du contenu relatif en eau des feuilles pour les lignées testées sous stress hydrique.

Lignées	Nombre de Jours Après Semis		
	80	89	109
F86-16	56.09 ^a	54.11 ^a	67.84 ^a
F87-9	57.47 ^a	48.59 ^b	40.44 ^b
F95-41	55.61 ^a	58.16 ^a	57.60 ^c
F97-29	54.67 ^a	49.71 ^b	60.84 ^c
F00-24	52.76 ^a	50.29 ^b	57.25 ^c
ILL81S15-19	-	50.01 ^b	60.70 ^c
ILL7217	59.31 ^a	44.38 ^c	58.86 ^c
L8PS05-5-13	52.75 ^a	58.60 ^a	63.94 ^d
ILL8094	53.53 ^a	54.06 ^a	52.97 ^c
F2003-7	55.53 ^a	57.23 ^a	61.41 ^c
L8PS05-5-7	56.49 ^a	48.53 ^b	55.16 ^c
BAKRIA (témoin)	52.45 ^a	48.29	56.23 ^c

Pour chaque colonne : mêmes lettres pour deux lignées : pas de différence significative ; lettres différentes : différence significative.

4. Conclusion

Cette étude a montré que le déficit hydrique de fin de cycle affecte les composantes de rendement, la matière sèche totale et la durée de remplissage des graines.

La restriction d'apport d'eau durant la floraison et la formation des gousses conduit à des comportements morphologiques et agronomiques différents chez les lignées testées. La réduction de la durée entre l'apparition de la première gousse et la maturité et de la matière sèche, d'une part, et la durée du cycle des lignées, d'autre part, sont les raisons qui expliquent le plus les différences des rendements grain obtenus. Les corrélations positives entre le nombre de gousses produites et la matière sèche aérienne, l'indice de récolte et la durée de la phase de remplissage des graines peuvent être expliquées par la

croissance indéterminée chez la lentille. En effet, plus il y a de ramifications, la floraison et la formation des gousses continuent et plus la phase de formation et remplissage des graines est longue. La corrélation négative entre le nombre de gousses et la date de floraison peut être expliquée par le fait que la précocité permet d'échapper à la contrainte hydrique de fin de cycle. L'intensité du stress hydrique augmente et s'accumule et affecte négativement les lignées tardives.

Cette expérimentation est une simulation de la situation de disponibilité des réserves en eau dans les sols durant la fin du cycle au Maroc dans les zones semi arides où la lentille est cultivée. Le protocole expérimental adopté a permis de mettre toutes les lignées testées sous la même contrainte hydrique afin de comparer les réponses de chaque lignée.

Dans les zones arides et semi-arides au Maroc, les pluies deviennent rares durant la fin du cycle (avril et mai) et les réserves en eau des sols deviennent de plus en plus faibles. Cette situation limite le potentiel de lignées tardives même si elles ont une grande capacité d'accéder aux réserves en eau du sol par une vigueur racinaire plus importante (cas de la lignée F87-9). En revanche, les lignées précoces qui exploitent l'eau disponible et arrivent à la maturité avant le stress hydrique de fin de cycle (cas des lignées F2003-7, F00-24, L8PS05-5-7) offrent un avantage pour l'amélioration de la production sous la contrainte hydrique.

L'évaluation de la tolérance à la sécheresse a un grand intérêt dans le programme d'amélioration génétique de la lentille pour développer des variétés productives et moins sensibles au déficit hydrique. Cette expérimentation a montré l'intérêt de certains caractères agro morphologiques et physiologiques dans la sélection des lignées tolérantes à la sécheresse. Le rôle des caractères liés aux racines dans la tolérance au déficit hydrique mérite plus d'attention pour une meilleure compréhension.

Références

- [1] F.J. Muehlbauer and A. Tullu. *Lens culinaris* Medik. Purdue University, Center for New Crops and Plant Products, 1997.
- [2] W. Erskine, F. J. Muehlbauer, A. Sarker and B. Sharma. Introduction. In: Erskine et al., (Eds). *The Lentil: Botany, Production and Uses*, CAB International, 2009, 1-3.
- [3] A. Grusak Michael. Nutritional and health-beneficial quality. In: Erskine et al., (Eds). *The Lentil: Botany, Production and Uses*, CAB International, 2009, 368-390.
- [4] Y. El Saleh, T. Ozcan and W. Erskine. Factors affecting lentil harvest mechanisation. International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy, 26-27 May, Adana- Turquie, 1999.
- [5] A. Sarker and W. Erskine. Recent progress in the ancient lentil. *Journal of Agricultural Science*, 144, 2006 19-29.
- [6] R. Shrestha, N. C. Turner, Kh. M. Siddique, D. W. Turner and J. A. Speijers. Water deficit during pod development in lentils reduces flower and pod number but not seed size. *Australian Journal of Agricultural Research* 57 (2006a) 427-438.
- [7] N. Mhammedi. Evaluation of ground cover, grain filling and seed germination of two lentil (*Lens culinaris* Medick.) varieties under normal and drought stress conditions. *Plant Breeding* 122 (2003) 542-548.
- [8] R. Shrestha, Kh. M. Siddique, N. C. Turner, D. W. Turner and J. D. Berger. Growth and seed yield of lentil (*Lens culinaris* Medikus) genotypes of West Asian and South Asian origin and crossbreds between the two under rainfed conditions in Nepal. *Australian Journal of Agricultural Research* 56 (2005) 971-981.
- [9] R. Shrestha, N. C. Turner, Kh. M. Siddique and D. W. Turner. Physiological and seed yield responses to water deficits among lentil genotypes from diverse origins. *Australian Journal of Agricultural Research* 57 (2006b) 903-915.
- [10] Sabaghpour. Morphological and physiological aspects of water stress in legumes. Dryland Agricultural Research Institute. Symposium on Biotechnology and Stress Physiology, Sararood, Kermanshah, Iran, 2000.

- [11] T. Gahoonia, O. Ali, A. Sarker, M. R. Matiur, and W. Erskine. Root traits nutrient uptake multilocation grain yield and benefit-cost ratio of two lentil (*lens culinaris*, Medikus.) varieties. *Plant and Soil* 272 (2005) 153-161.
- [12] W. Erskine, M. Tufail, A. Russell, M. C. Tyagi, M. M. Rahman, and M. C. Saxena. Current and future strategies in breeding lentil for resistance to biotic and abiotic stresses. *Euphytica* 73 (1994) 127-135.
- [13] B. Sakr. Rapport de synthèse des activités de recherche effectuées par B. Sakr. Institut National de la Recherche Agronomique du Maroc, Settat, Maroc (2004).
- [14] O. Idrissi. Programme d'amélioration génétique de la lentille. Rapport de synthèse des travaux de recherches effectuées par O. Idrissi. Institut National de la Recherche Agronomique du Maroc, Settat, Maroc (2007).
- [15] O. Idrissi. Programme d'amélioration génétique de la lentille. Rapport de synthèse des travaux de recherches effectuées par O. Idrissi. Institut National de la Recherche Agronomique du Maroc, Settat, Maroc (2008).
- [16] P. J. Kramer. Drought stress and origine of adaptation, In: N.C. Turner and P.J. Kramer (Eds), *Adaptation of plants to water and high temperature stress*. John Wiley and Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, 1980, 482, 6-20.
- [17] H. A. A. Tambal, W. Erskine, R. Baalbaki and H. Zaiter. Relationship of flower and pod numbers per inflorescence with seed yield in lentil. *Experimental Agriculture* 36 (2000) 369-378.
- [18] T. Gahoonia, O. Ali, A. Sarker, N. E. Nielsen, and M. R. Matiur. Genetic variation in root traits and nutrient acquisition of lentil (*Lens culinaris*, Medikus) genotypes. *Journal of Plant Nutrition* 29(4) (2006) 643-655.
- [19] A. Sarker, W. Erskine and M. Singh. Variation in shoot and root characteristics and their association with drought tolerance in lentil landraces. *Genetic Resources and Crop Evolution* 52(1) (2005) 89-97.