

# Analyse de la tolérance des populations locales de fève (*Vicia faba* L.) à la sécheresse au stade juvénile

N. AQTBOUZ<sup>1</sup>, L. GHAYOUTI<sup>1</sup>, L. BELQADI<sup>1</sup>, W. LINK<sup>2</sup>

(Reçu le 19/02/2016; Accepté le 27/04/2016)

## Résumé

La sécheresse constitue le stress abiotique le plus important, responsable de l'instabilité de la production et de la diminution des niveaux des rendements de la fève (*Vicia faba* L.). La culture de variétés tolérantes peut constituer une possibilité pour stabiliser la production. L'objectif de la présente étude est d'évaluer la variabilité génétique et d'étudier la tolérance à la sécheresse au stade juvénile d'une collection de populations locales marocaines de fève provenant de la province de Taounate. Un nombre de 60 populations locales ont été étudiées sous des conditions contrôlées sous serre. Différents traits morphologiques et physiologiques ont été étudiés avant et sous stress hydrique et en phase de récupération. La différence entre la phase de récupération et le stress hydrique permet d'estimer la capacité des populations locales de se remettre du stress hydrique au stade juvénile. Les populations locales de fève renferment une large diversité pour les différents traits étudiés. Le gain en matière sèche présente une corrélation négative et hautement significative avec le rendement en matière sèche sous stress hydrique ( $r = -0,64^{**}$ ). Les populations 16, 47, 1 et 9 se sont avérées les plus tolérantes à la sécheresse au stade juvénile.

**Mots-Clés:** Populations locales, variabilité génétique, fève, stress hydrique, stade juvénile, sécheresse.

## Abstract

Drought is the most important abiotic stress responsible of the production instability and lower levels of yields of faba bean (*Vicia faba* L.). The cropping of tolerant varieties can be an opportunity to stabilize production. The objective of the present study was to evaluate the genetic variability and to study the drought tolerance in the juvenile plant stage in a collection of local Moroccan faba bean populations from the province of Taounate. A number of 60 local populations were studied under controlled conditions in a greenhouse. Different morphological and physiological traits were studied before and under water stress and during the recovery phase. The difference between recovery and water stress phases estimates the capacity of local populations to recover from drought. The local populations contain a wide diversity for different studied traits. The gain in dry matter has a negative and highly significant correlation with dry matter yield under water stress ( $r = -0.64^{**}$ ). The populations 16, 47, 1 and 9 have proven to be the most drought tolerant at juvenile stage.

**Keywords:** Local populations, genetic variability, faba bean, water stress, juvenile plant stage, drought.

## INTRODUCTION

Au Maroc, la fève (*Vicia faba* L.) est la légumineuse à graines la plus prépondérante. Elle emblave près de la moitié des superficies réservées aux légumineuses avec une production de 1666,80 milliers de quintaux (MAPM, 2014). La production de la fève est concentrée au Centre-Nord du pays, notamment dans les provinces de Taounate, Taza, El Hoceima et Fès (MAPM, 2014). Dans les agro-écosystèmes marginaux, elle est essentiellement cultivée sous forme de populations locales (98 %) produites et maintenues selon un système informel dans lequel les agriculteurs produisent, le plus souvent, leurs propre semences (Sadiki *et al.*, 2002). Malgré ses intérêts agronomiques et nutritionnels, la culture de la fève souffre d'une instabilité de rendement. Elle est principalement cultivée en bour par les petits agriculteurs utilisant des techniques traditionnelles peu performantes. Les régions de culture de la fève se caractérisent par des

niveaux de pluviométrie contrastés qui varient entre les saisons et les années.

La sécheresse constitue le stress abiotique le plus important responsable de l'instabilité de la production et limitant le niveau des rendements de la fève dans les pays méditerranéens (Abdelmula *et al.*, 1999; Ricciardi, 2001; Sadiki et El Bouhmadi, 2002; Amede *et al.*, 2003; Alghamdi *et al.*, 2014). Au Maroc, la fréquence des sécheresses a augmenté depuis les années 1940, passant de cinq années sur 40 ans entre 1940 et 1979 à six années sur 16 entre 1980 et 1995 puis à quatre années sur sept entre 1996 et 2002 (Balaghi, 2000 cité par Balaghi *et al.*, 2007). Un déficit hydrique peut survenir à n'importe quelle phase de développement de la fève. Le stress hydrique réduit la croissance de la plante et provoque plusieurs altérations morphologiques, physiologiques et moléculaire en raison de changements dans le métabolisme et l'expression des gènes (Chaves, 2002; Alghamdi *et al.*, 2014; Siddiqui *et al.*, 2015).

<sup>1</sup> Département de Production, Protection et Biotechnologies Végétales, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, BP. 6202, Rabat-Instituts, 10101 Rabat, Maroc

<sup>2</sup> Institute of Agronomy and Plant Breeding, von Siebold-Straße 8, 37075 Göttingen, Allemagne

Le stress hydrique peut provoquer divers effets nocifs d'une part sur la production de la biomasse en affectant le taux de croissance, et d'autre part sur l'expansion des feuilles et des tiges et sur l'activité photosynthétique des plantes ainsi que la teneur relative en eau des feuilles (Giunta *et al.*, 1995; Sau et Minquez, 2000; Katerji *et al.*, 2011; Zabawi et Dennet, 2010; Alghamdi *et al.*, 2014; Ammar *et al.*, 2014). Plusieurs études sur la sensibilité de la fève au déficit hydrique pendant les phases végétative et reproductive ont été réalisées. Certains auteurs signalent que cette culture est plus sensible à la sécheresse après le stade floraison (Grashoff, 1990). D'autres, n'ont trouvé aucune différence entre les stades (Husain *et al.*, 1990; Pilbeam *et al.*, 1992). Et enfin, Khan *et al.* (2007, 2010) ont montré que la fève est réputée pour être plus sensible au stress hydrique en fin de cycle.

La culture de variétés tolérantes peut constituer une possibilité pour stabiliser la production dans les zones fréquemment touchées par la sécheresse (Khan et Link, 2007; Khan *et al.*, 2010). La sélection pour la tolérance au stress hydrique est un objectif majeur de nombreux programmes d'amélioration. Plusieurs paramètres de sélection (morphologiques, physiologiques et biochimiques) ont été étudiés afin d'identifier les génotypes tolérants à la sécheresse (Ricciardi *et al.*, 2001; Alghamdi *et al.*, 2014; Ammar *et al.*, 2014). L'application des outils moléculaires dans l'amélioration génétique de la fève se sont essentiellement concentrés sur les stress biotiques (Torres *et al.*, 2010). Cependant, quelques études ont été également réalisés sur les stress abiotiques et ont abouti à l'identification des QTL pour la tolérance au froid et à la sécheresse (Arbaoui *et al.*, 2008; Khazaei *et al.*, 2014). Par ailleurs, la tolérance à la sécheresse et la salinité a pu être obtenu par transfert du gène PR10 de la pomme de terre dans le génome de la fève (Hanafy *et al.*, 2013).

Les populations locales de fève expriment une grande diversité génétique pour de nombreux traits morphologiques, agronomiques et physiologiques.

Cependant, peu d'études ont été réalisées sur ce matériel afin de tester sa réaction au stress hydrique (Sadiki et El Bouhmedi, 2002; Sadiki, 2006). En raison de l'insuffisance d'informations sur la variabilité génétique de ce matériel pour la tolérance à la sécheresse, une évaluation approfondie des populations locales de fève constitue une approche importante pour identifier les génotypes adaptés, répondant aux besoins d'agriculteurs, ainsi que pour identifier des sources de tolérance qui peuvent être exploitées dans des programmes de sélection.

La plupart des recherches réalisées sur l'effet du stress hydrique sur la culture de la fève ont été menées soit en phase végétative ou en phase reproductive mais peu d'étude ont été réalisées au stade juvénile des plantes (Ali, 2015). Si les fluctuations des précipitations augmentent avec les changements climatiques, les plantes seront plus exposées de façon répétée au stress hydrique à n'importe quelle phase de développement (Miyashita *et al.*, 2005). La capacité des génotypes de se remettre rapidement du déficit hydrique subi au stade juvénile pourrait être une condition préalable pour la création de variété tolérante à la sécheresse. Une autre considération est de savoir si l'amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse au stade juvénile est plus ou moins efficace et prometteuse que la tolérance à la sécheresse après stade floraison.

L'objectif de la présente étude est d'étudier la variabilité génétique et évaluer la tolérance à la sécheresse au stade juvénile d'une collection de populations locales de fève provenant de différents villages de la province de Taounate.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Matériel

Le matériel végétal utilisé dans cette étude comprend 60 accessions locales de fève issues d'une collecte réalisée

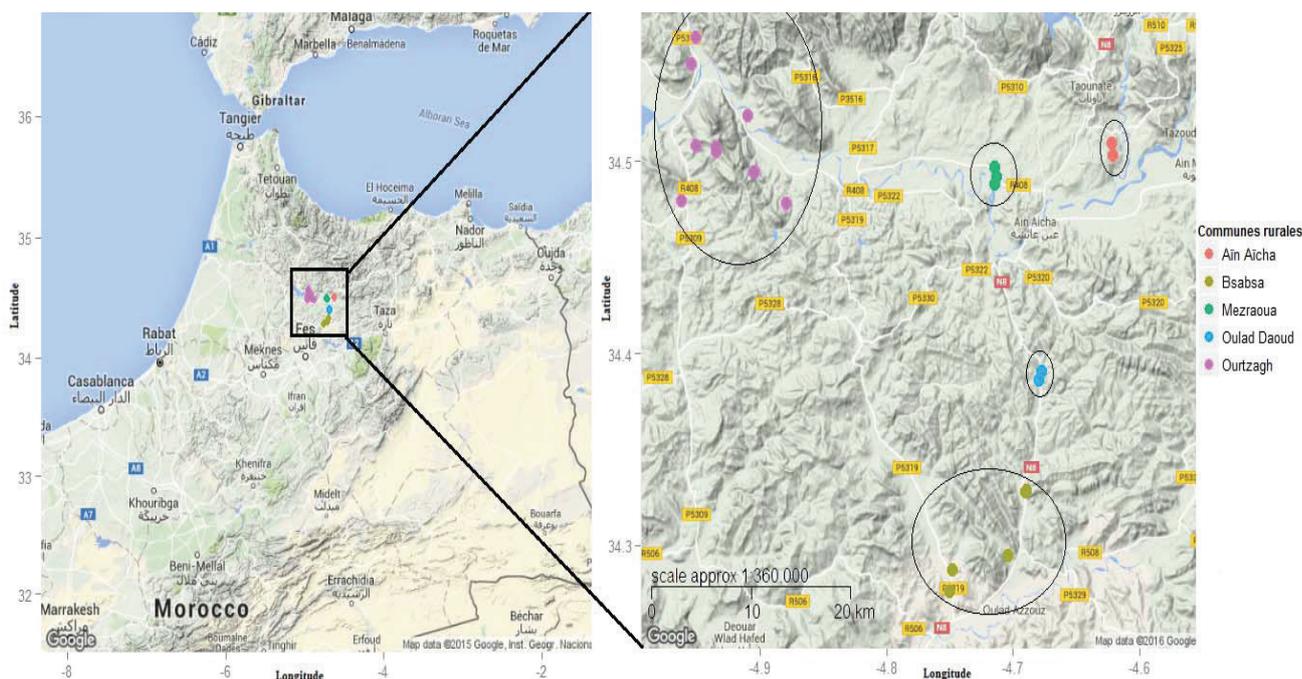


Figure 1: Localisation des 19 villages au sein des cinq communes retenues dans la province de Taounate pour la collecte des populations locales de fève

en septembre 2011, auprès des agriculteurs de la province de Taounate, l'une des principales zones de culture et de production de la fève au Maroc. Le parcours de la collecte a été planifié en collaboration avec les centres de travaux de la région de Taounate. Chaque zone a été prospectée afin d'identifier les régions avec une ancienne tradition de culture de fève et où l'exploitation des variétés commerciales est quasi absente. Parmi les 44 communes présentes dans la province de Taounate, cinq communes (Aïn Aïcha, Bsabsa, Mezraoua, Ouled Daoud et Ourtzagh) avec 19 villages couvrant un maximum de diversité environnementale, ont été retenus (Figure 1). La réalisation de la collecte s'est basée sur le prélèvement d'échantillon de semences en vrac «bulk» dans le stock semencier de la récolte de la campagne agricole 2010-2011. Un échantillon de quatre à cinq kilogrammes de semences locales a été collecté chez chaque agriculteur. La taille de l'échantillon était suffisamment large pour représenter la variabilité existante et permettre les activités de caractérisation et d'évaluation de la population. Au total, 60 populations locales de fève ont été collectées auprès de 58 agriculteurs. Chaque échantillon est accompagné d'une fiche d'identification remplie auprès des agriculteurs. Avant leur utilisation, les graines de l'ensemble des populations échantillonnées ont été caractérisées sur la base de la couleur de la graine et du poids de 1000 grains (PMG) tel que montrés dans le tableau 1. Deux variétés, Côte d'Or/1 et Tatoo ont été insérées en tant que témoins, choisies pour leurs niveaux relativement élevés de tolérance au stress hydrique (Ali, 2015). Tatoo est une variété allemande inscrite en 2006 par la compagnie NPZ Lemkbe. C'est une féverole de printemps à fleurs blanches. Elle est caractérisée par une teneur élevée en protéines. Côte d'Or/1 est une lignée pure de l'ancienne variété locale française Côte d'Or. C'est une féverole d'hiver qui est résistante au froid.

## Méthodes

### Essai expérimental

Afin d'évaluer la tolérance des populations locales de fève à la sécheresse au stade juvénile, deux essais sous serre, en conditions contrôlées ont été conduits à Georg-August-Universität en Allemagne, en février 2013 et décembre 2013. Ces essais ont été installés selon un dispositif expérimental en lattice 6×10, comprenant dix blocs partiels (six populations locales de fève par bloc partiel) avec deux répétitions. Les deux témoins ont été insérés en dehors du dispositif expérimental.

Huit plantes de chaque entrée ont été cultivées dans des pots (15×15×20 cm<sup>3</sup>) contenant 4,2 kg de sol constitué d'un mélange de terre, composte et sable (rapport 3:1). La capacité de rétention d'eau de ce mélange a été déterminée. En effet, deux pots ont été remplis avec ce sol. Un pot a été séché à l'air libre pendant trois jours (20-25°C) et pesé. L'autre pot a été saturé en eau pendant 24 h et égoutté pendant 48 h (l'évaporation a été empêchée en utilisant un film en plastique) et enfin pesé. La mesure effectuée sur le deuxième pot permet d'évaluer la capacité du sol à retenir l'eau. Sur la base de la différence entre le sol entièrement humide et drainé et le sol séché à l'air libre, un poids avec un niveau d'humidité de 70 % a été déterminé. Les plantes ont été maintenues donc avec une capacité de rétention d'eau

du sol de 60-80 % et des conditions bien déterminées de température et de photopériode. La température moyenne au cours de la journée était de 18 °C ± 2 et pendant la nuit était de 15 °C ± 2. La photopériode était de 12/12 h. Après la levée, la photopériode a été ajustée à 10 h le jour afin de simuler des jours courts et après une semaine, la photopériode a été ajustée à 14 h. L'ajustement de la photopériode se faisait pendant le jour. La densité du flux photosynthétique était approximativement de 300 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> au niveau des lampes. L'agencement des pots à l'intérieur de chaque bloc partiel a été changé chaque semaine de façon organisée afin d'équilibrer les différences de lumière et de température au sein de chaque bloc partiel. Les pots ont été irrigués chaque deux jours jusqu'au stade trois feuilles. Au stade trois feuilles, la teneur en eau des pots a été ajustée à 70 % de leur capacité de rétention d'eau afin de créer une situation de départ commune au niveau de tous les pots. L'irrigation a été ensuite arrêtée jusqu'à ce que les populations les plus sensibles soient brutalement flétries (environs trois semaines). Par la suite, quatre plantes ont été récoltées au niveau de la surface du sol (première récolte; R1). Les quatre plantes restantes ont été irriguées régulièrement de telle sorte que l'humidité du sol soit ajustée à 70 % (phase de récupération). Après deux semaines, les plantes ont été finalement récoltées (deuxième récolte; R2).

### Traits mesurés

Au cours des deux expériences, chaque population ainsi que les deux témoins ont été évalués sur la base de différents traits (Tableau 2).

**La teneur en chlorophylle:** mesurée sur deux folioles de la troisième feuille complètement émergée pour chaque plante par pot en utilisant un SPAD mètre (Modèle 502, Spectrum Technologies, Plainfield, IL). Cette mesure permet d'estimer la concentration en chlorophylle dans la feuille. La teneur en chlorophylle a été mesurée trois fois au cours des deux expériences. La première mesure a été prise avant d'exposer les populations locales au stress hydrique (Chl), la deuxième mesure a été prise dix jours après la dernière irrigation (Chl-1) et la troisième mesure a été prise trois jours avant la fin de la phase de récupération (Chl-2).

**La hauteur de la plante:** correspond à la distance qui sépare l'apex de la surface du sol. Elle a été mesurée sur la base de la moyenne des huit plantes par pot.

**Le degré de flétrissement:** a été estimé visuellement sur la base de la moyenne des plantes par pot en utilisant une échelle allant de 1 à 9 (1= pas de flétrissement et 9= flétrissement maximum). Il a été mesuré deux jours avant la fin du stress hydrique.

**Le rendement en matière fraîche:** les quatre plantes récoltées lors de la première et la deuxième récolte ont été pesées. Leurs poids déterminent le rendement de la population en matière fraîche par quatre plantes.

**Le rendement en matière sèche:** les quatre plantes récoltées lors de la première et la deuxième récolte ont été séchées au four à 105°C pendant 48 h et pesées. Le poids résultant détermine le rendement de la population en matière sèche par quatre plantes.

**Tableau 1: Origine et caractéristiques des 60 populations locales de fève collectées dans la province de Taounate**

Code population	Origine		Couleur de la graine	PMG	Variété botanique
	Douar	Commune			
Pop. 25	Bou Aouad	Aïn Aïcha	M	1284	Fève
Pop. 9	Bou Aouad	Aïn Aïcha	M	1457	Fève
Pop. 6	Jyahna	Bsabsa	M	1298	Fève
Pop. 10	Jyahna	Bsabsa	B	1282	Fève
Pop. 14	Jyahna	Bsabsa	M	669	Féverole
Pop. 42	Kbib	Bsabsa	M	1467	Fève
Pop. 57	Kbib	Bsabsa	M	1352	Fève
Pop. 52	Kbib	Bsabsa	MV	1222	Fève
Pop. 55	Kbib	Bsabsa	M	1567	Fève
Pop. 38	Kbib	Bsabsa	M	1485	Fève
Pop. 36	Kbib	Bsabsa	B	1243	Fève
Pop. 18	Massakin	Bsabsa	B	1467	Fève
Pop. 1	Massakin	Bsabsa	B	1220	Fève
Pop. 13	Rkbet El Mal	Bsabsa	B	1191	Fève
Pop. 16	Rkbet El Mal	Bsabsa	M	622	Féverole
Pop. 12	Houara	Mezraoua	M	1286	Fève
Pop. 60	Hrarcha	Mezraoua	M	1520	Fève
Pop. 47	Hrarcha	Mezraoua	M	1152	Fève
Pop. 44	Hrarcha	Mezraoua	M	1331	Fève
Pop. 22	Oulad El Ghoul	Mezraoua	M	1285	Fève
Pop. 58	Oulad El Ghoul	Mezraoua	M	1218	Fève
Pop. 33	Oulad El Ghoul	Mezraoua	M	1330	Fève
Pop. 53	Oulad El Ghoul	Mezraoua	M	1331	Fève
Pop. 15	Bhahda	Oulad Daoud	B	1515	Fève
Pop. 5	Bhahda	Oulad Daoud	M	1568	Fève
Pop. 54	Bhahda	Oulad Daoud	M	1367	Fève
Pop. 56	Bhahda	Oulad Daoud	B	1357	Fève
Pop. 43	Bhahda	Oulad Daoud	M	1418	Fève
Pop. 2	Bhahda	Oulad Daoud	M	1559	Fève
Pop. 40	Oulad Daoud	Oulad Daoud	M	1396	Fève
Pop. 51	Aïn Kchir	Ourtzagh	M	1170	Fève
Pop. 31	Bab zriba	Ourtzagh	M	1354	Fève
Pop. 45	Bab zriba	Ourtzagh	B	1114	Fève
Pop. 50	Bab zriba	Ourtzagh	B	1264	Fève
Pop. 37	Bab zriba	Ourtzagh	MV	922	Fève
Pop. 21	Bab zriba	Ourtzagh	M	1255	Fève
Pop. 34	Bab zriba	Ourtzagh	M	881	Fève
Pop. 30	Bab zriba	Ourtzagh	M	1195	Fève
Pop. 59	Bni Hlal	Ourtzagh	B	1249	Fève
Pop. 26	Bni Hlal	Ourtzagh	M	1569	Fève
Pop. 27	Bni Hlal	Ourtzagh	M	1431	Fève
Pop. 4	Bni Hlal	Ourtzagh	B	1344	Fève
Pop. 32	Bni Hlal	Ourtzagh	M	1258	Fève

<b>Pop. 39</b>	Bni Hlal	Ourtzagh	M	1268	Fève
<b>Pop. 48</b>	Bni Hlal	Ourtzagh	M	1352	Fève
<b>Pop. 3</b>	Bni Hlal	Ourtzagh	M	1558	Fève
<b>Pop. 28</b>	Bni Hlal	Ourtzagh	M	1502	Fève
<b>Pop. 49</b>	Bni Moumen	Ourtzagh	M	1451	Fève
<b>Pop. 8</b>	Bni Moumen	Ourtzagh	M	1477	Fève
<b>Pop. 41</b>	Jouidar	Ourtzagh	M	1219	Fève
<b>Pop. 46</b>	Kodya	Ourtzagh	M	1185	Fève
<b>Pop. 24</b>	Kodya	Ourtzagh	B	1079	Fève
<b>Pop. 29</b>	Kodya	Ourtzagh	M	1067	Fève
<b>Pop. 35</b>	Kodya	Ourtzagh	M	1214	Fève
<b>Pop. 17</b>	Kodya	Ourtzagh	B	1261	Fève
<b>Pop. 19</b>	Kodya	Ourtzagh	B	1197	Fève
<b>Pop. 7</b>	Mrouj	Ourtzagh	MV	1295	Fève
<b>Pop. 23</b>	Mrouj	Ourtzagh	M	1201	Fève
<b>Pop. 20</b>	Mzaourou	Ourtzagh	B	1276	Fève
<b>Pop. 11</b>	Sidi Sennoun	Ourtzagh	M	1388	Fève

\*\*M: graines marron; B: graines blanches, MV: mélange de graines marron et violette

**Tableau 2: Traits mesurés sur les populations locales de fève et stade de mesure**

Trait mesuré	Stade de mesure	Abréviation	Unité
<b>Teneur en chlorophylle</b>	Avant stress hydrique	Chl	Sans unité
	Sous stress hydrique	Chl-1	Sans unité
	Phase de récupération	Chl-2	Sans unité
<b>Hauteur de la plante</b>	Avant stress hydrique	HP	Centimètre (cm)
	Sous stress hydrique	HP-1	Centimètre (cm)
	Phase de récupération	HP-2	Centimètre (cm)
<b>Degré de flétrissement</b>	Sous stress hydrique	Fltr	Sans unité
<b>Matière fraîche</b>	Sous stress hydrique	MF1	Grammes (g)
	Phase de récupération	MF2	Grammes (g)
<b>Matière sèche</b>	Sous stress hydrique	MS1	Grammes (g)
	Phase de récupération	MS2	Grammes (g)

A partir du rendement en matière fraîche et sèche obtenus lors de R1 et R2, différents traits ont été calculés. La différence entre la biomasse de la deuxième et la première récolte a permis l'estimation de la capacité des populations locales à surmonter le stress hydrique au stade juvénile. Le tableau 3 présente les traits calculés et leurs formules.

#### Analyses statistiques

Les données obtenues sur l'ensemble des traits étudiés ont été soumises à une analyse de variance en utilisant le logiciel PLABSTAT v.2H(L) (Utz, 2005). Dans un premier

temps, l'expérimentation conduite sur chacune des deux périodes considérées comme deux environnements a été analysée individuellement en se basant sur le modèle lattice. Dans un deuxième temps, les moyennes ajustées des entrées résultant de l'analyse des deux lattices dans chaque environnement ont été utilisées pour une analyse de variance combinée sur les deux environnements. Les deux facteurs environnement (E) et génotypes (G) ont été considérés comme aléatoires.

Les corrélations de Spearman ont été calculées pour décrire les relations entre les différents traits étudiés.

**Tableau 3: Traits calculés pour les 60 populations locales de fève**

Trait	Abréviation	Formule	Unité
Teneur absolue en eau	TAE-1	TAE-1= MF1-MS1	Grammes (g)
	TAE-2	TAE-2= MF2-MS2	Grammes (g)
Teneur relative en eau	TRE-1	TRE-1 = [(TAE-1 / MF1) × 100]	Pourcentage (%)
	TRE-2	TRE-2 = [(TAE-2 / MF2) × 100]	Pourcentage (%)
Gain en matière fraîche	GMF	GMF = MF2-MF1	Grammes (g)
Gain en matière sèche	GMS	GMS = MS2-MS1	Grammes (g)

**Tableau 4: Analyse de la variance réalisée sur les différents traits étudiés pour les 60 populations locales de fève**

Traits	Source de variation		
	Géotypes (G)	Environnement (E)	G×E
<b>Traits mesurés avant stress hydrique</b>			
Teneur en chlorophylle (Chl)	**	**	NS
Hauteur de la plante (HP)	*	**	+
<b>Traits mesurés sous stress hydrique (R1)</b>			
Teneur en chlorophylle (Chl-1)	**	**	+
Hauteur de la plante (HP-1)	*	**	NS
Degré de flétrissement (Fltr)	**	NS	**
Rendement en matière fraîche (MF-1)	*	**	*
Rendement en matière sèche (MS-1)	+	**	**
Teneur absolue en eau (TAE-1)	*	**	+
Teneur relative en eau (TRE-1)	**	+	NS
<b>Traits mesurés en phase de récupération (R2)</b>			
Hauteur de la plante (HP-2)	**	**	NS
Rendement en matière fraîche (MF-2)	**	NS	**
Rendement en matière sèche (MS-2)	**	**	**
Teneur absolue en eau (TAE-2)	**	*	*
Teneur relative en eau (TRE-2)	**	**	NS
<b>Différence entre R2 et R1</b>			
Gain en matière fraîche (GMF)	**	**	**
Gain en matière sèche (GMS)	**	NS	*

\*\* , \* , + Significatif pour P=0,01; 0,05 et 0,1 respectivement; NS: non significatif

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les différentes populations locales de fève ont été étudiées pour leur tolérance au déficit hydrique. La récupération des plantes, après ré-irrigation suite à une période d'arrêt de l'irrigation, a été étudiée. L'analyse de la variance a été réalisée afin de déceler les différences existantes entre les populations locales pour les différents caractères étudiés (Tableau 4). Les résultats obtenus révèlent des différences significatives à hautement significatives entre les populations locales pour l'ensemble des caractères analysés à l'exception du rendement en matière sèche sous l'effet du stress hydrique. Les populations locales de fève sont différentes les unes des autres pour leur réaction au déficit hydrique et à la ré-irrigation pendant la phase de récupération.

Les coefficients de variation et les écart-types des différents traits montrent une large gamme de variation entre les populations et par conséquent une base génétique étendue (Tableau 5). Le gain en matière sèche présente le coefficient de variation le plus élevé. La répétabilité estimée varie entre 32,13 % pour le rendement en matière sèche des plantes stressées et 77,07 % pour la teneur absolue en eau des plantes en phase de récupération. La comparaison entre les performances moyennes des populations locales de fève sous stress hydrique et en phase de récupération montre une augmentation pour tous les caractères après ré-irrigation.

La hauteur des populations locales de fève augmente durant le stress hydrique. En effet, elle passe de 28,60 cm avant le stress hydrique à 33,42 cm en fin de stress. Les populations locales de fève stressées continuent leur

**Tableau 5: Moyennes et paramètres de variations des traits mesurés sur les 60 populations locales de fève**

Traits	Moyenne	Min	Max	ET	CV	LSD <sub>0,05</sub>	Répétabilité (%)
<b>Traits mesurés avant stress hydrique</b>							
<b>Chl</b>	47,60	43,65	50,6	1,47	3,09	2,48	64,49
<b>HP</b>	28,60	25,02	31,22	1,29	4,51	2,82	40,16
<b>Traits mesurés sous stress hydrique (R1)</b>							
<b>Chl-1</b>	48,40	44,51	51,62	1,50	3,09	2,83	55,25
<b>HP-1</b>	33,42	29,89	37,33	1,42	4,26	3,04	43,14
<b>Fltr</b>	6,23	4,42	7,52	0,64	10,34	1,09	64,29
<b>MF-1</b>	15,28	10,31	19,78	1,64	10,73	3,70	36,54
<b>MS-1</b>	3,94	2,39	4,57	0,42	10,75	0,99	32,13
<b>TAE-1</b>	11,34	7,06	15,31	1,44	12,74	3,07	43,71
<b>TRE-1</b>	73,90	62,24	79,44	2,87	3,89	5,45	55,08
<b>Traits mesurés en phase de récupération (R2)</b>							
<b>HP-2</b>	34,50	30,00	44,50	2,21	6,40	4,35	51,67
<b>MF-2</b>	22,80	10,15	43,44	6,83	29,94	9,39	76,37
<b>MS-2</b>	4,49	2,94	5,65	0,57	12,70	1,00	61,72
<b>TAE-2</b>	18,31	6,68	38,17	6,55	35,79	8,88	77,07
<b>TRE-2</b>	77,69	60,26	87,80	6,91	8,89	10,28	72,36
<b>Différence entre R2 et R1</b>							
<b>GMF</b>	7,53	-5,71	29,43	6,81	90,50	9,84	73,96
<b>GMS</b>	0,55	-0,96	2,41	0,74	133,95	1,27	63,02

Coefficient de variation (CV) = (écart-type (ET) / moyenne) × 100

(Chl) teneur en chlorophylle avant stress hydrique; (HP) hauteur de la plante (cm) avant stress hydrique; (Chl-1) teneur en chlorophylle sous stress hydrique; (HP-1) hauteur de la plante (cm) sous stress hydrique; (Fltr) degré de flétrissement (1-9) sous stress hydrique; (MF-1) rendement en matière fraîche (g/4 plantes) sous stress hydrique; (MS-1) rendement en matière sèche (g/4 plantes) sous stress hydrique; (TAE-1) teneur absolue en eau (g) sous stress hydrique; (TRE-1) teneur relative en eau (%) sous stress hydrique; (HP-2) hauteur de la plante (cm) en phase de récupération; (MF-2) rendement en matière fraîche (g/4 plantes) en phase de récupération; (MS-2) rendement en matière sèche (g/4 plantes) en phase de récupération; (TEA-2) teneur absolue en eau (g) en phase de récupération; (TRE-2) teneur relative en eau (%) en phase de récupération; (GMF) gain en matière fraîche (g); (GMS) gain en matière sèche (g)

croissance (Figure 2). Ce résultat n'est pas en accord avec ceux obtenus par Siddiqui *et al.* (2015) qui ont trouvé que la hauteur des plantes de fève stressées diminue. Une corrélation positive et hautement significative est enregistrée entre la hauteur de la plante avant le stress hydrique et leur hauteur sous stress ( $r=0,54^{**}$ , Tableau 6). Les populations locales de grande taille sont capables de mieux croître sous stress hydrique.

Tableau 6: Corrélation de Spearman entre les traits étudiés pour les 60 populations locales de fève

Traits	Chl	HP	Chl-1	HP-1	Fltr	MF1	MS1	TAE-1	TRE-1	HP-2	MF2	MS2	TAE-2	TRE-2	GMF
HP	0,06														
Chl-1	0,82**	0,09													
HP-1	-0,11	0,54**	-0,17												
Fltr	0,49**	0,08	0,56**	-0,33*											
MF1	0,26*	0,01	0,17	-0,14	0,28*										
MS1	0,32*	0,06	0,34**	-0,30*	0,53**	0,59**									
TAE-1	0,20	-0,02	0,09	-0,07	0,16	0,97**	0,37**								
TRE-1	-0,07	-0,06	-0,17	0,18	-0,29*	0,42**	-0,48**	0,63**							
HP-2	-0,26*	0,33*	-0,24	0,64**	-0,39**	-0,16	-0,46**	-0,04	0,34**	0,28*					
MF2	-0,06	-0,01	-0,02	0,16	-0,14	0,13	-0,15	0,19	0,30*	0,23	0,51**				
MS2	0,08	0,16	0,19	0,19	0,14	-0,10	-0,08	-0,09	-0,03	0,28*	0,99**	0,45**			
TAE-2	-0,07	-0,03	-0,03	0,15	-0,16	0,14	-0,15	0,21	0,31*	0,12	0,88**	0,15	0,90**		
TRE-2	-0,02	-0,12	-0,02	0,04	-0,12	0,19	-0,09	0,24	0,30*	0,32*	0,97**	0,54**	0,96**	0,83**	
GMF	-0,12	-0,01	-0,05	0,20	-0,20	-0,12	-0,29*	-0,05	0,19	0,44**	0,48**	0,82**	0,43**	0,16	0,58**
GMS	-0,13	0,09	-0,06	0,31*	-0,20	-0,43**	-0,64**	-0,29*	0,24						

\*\*, \* significatif pour P=0,01 et 0,05 respectivement.

(Chl) teneur en chlorophylle avant stress hydrique; (HP) hauteur de la plante (cm) avant stress hydrique; (Chl-1) teneur en chlorophylle sous stress hydrique; (HP-1) hauteur de la plante (cm) sous stress hydrique; (Fltr) degré de flétrissement (1-9) sous stress hydrique; (MF-1) rendement en matière fraîche (g/4 plantes) sous stress hydrique; (MS-1) rendement en matière sèche (g/4 plantes) sous stress hydrique; (TAE-1) teneur absolue en eau (g) sous stress hydrique; (TRE-1) teneur relative en eau (%) sous stress hydrique; (HP-2) hauteur de la plante (cm) en phase de récupération; (MF-2) rendement en matière fraîche (g/4 plantes) en phase de récupération; (MS-2) rendement en matière sèche (g/4 plantes) en phase de récupération; (TAE-2) teneur absolue en eau (g) en phase de récupération; (TRE-2) teneur relative en eau (%) en phase de récupération; (GMF) gain en matière fraîche (g); (GMS) gain en matière sèche.

L'irrigation des plantes stressées a permis une reprise de la croissance reflétée par une légère augmentation de la hauteur. En phase de récupération, la hauteur varie entre 30,00 cm et 44,50 cm. Une corrélation positive et hautement significative est enregistrée entre la hauteur en phase de récupération et le gain en matière sèche ( $r=0,44^{**}$ , Tableau 6). Les plantes de grande taille sont capables de mieux se remettre du stress hydrique et ont accumulé plus de matière sèche que les plantes courtes.

Le degré de flétrissement des populations locales de fève sous l'effet du stress hydrique varie entre 4,42 et 7,52 avec une moyenne de 6,23. Le flétrissement est un choix de la plante afin de surmonter le déficit hydrique et d'économiser la quantité d'eau disponible. Une corrélation positive et hautement significative ( $r=0,53^{**}$ , Tableau 6) est enregistrée entre le degré de flétrissement et le rendement en matière sèche sous stress hydrique. Les plantes qui présentent des degrés de flétrissement élevés sont capables d'accumuler des rendements en matière sèche supérieurs sous l'effet du stress hydrique. Cependant, aucune corrélation n'a été enregistrée entre le degré de flétrissement et le gain en matière fraîche ou sèche. Ce résultat est aussi obtenu par Ali (2015). Par conséquent, ce trait ne peut être utilisé comme un outil de criblage de populations tolérantes au stress hydrique au stade juvénile dans les mêmes conditions de travail.

Sous l'effet du stress hydrique, les populations locales de fève ont montré des rendements en matière sèche très diversifiés. Le rendement en matière sèche varie entre 2,39 g et 4,57 g. Parmi les populations locales de fève, les populations 22, 8, 11, 20 et 60 ont présenté les rendements en matière sèche les

plus élevés. Alors qu'en phase de récupération, le rendement en matière sèche varie entre 2,94 g et 5,65 g. Les populations 9, 49, 11, 16, 8, 6, 1 et 38 ont présentées les rendements les plus élevés après ré-irrigation suite à une période de stress hydrique (Tableau 7). Cependant aucune corrélation n'a été enregistrée entre le rendement en matière sèche des plantes stressées et le rendement en matière sèche en phase de récupération (Tableau 6). Ceci est en accord avec les résultats obtenus par Ali (2015) pour les fèves d'hiver Allemande. Les populations locales qui sont capables d'accumuler des rendements supérieurs en matière sèche sous stress hydrique n'arrivent pas à se rétablir complètement et accumuler plus de matière sèche en phase de récupération.

Le rendement moyen en matière sèche a augmenté après ré-irrigation (4,49 g > 3,94 g; Tableau 5). Ceci indique que les populations locales de fève sont capables de se remettre du déficit hydrique. La différence entre le rendement en matière sèche en phase de récupération et celui sous stress hydrique permet d'estimer la capacité des génotypes de fève à surmonter le stress hydrique en stade juvénile. La capacité des plantes à montrer un gain élevé en phase de récupération peut être expliquée par une compensation due à l'aptitude de la plante à avoir des rendements en matière sèche inférieur sous l'effet du stress hydrique. Le gain en matière sèche est différent entre les populations locales de fève. Les populations 16, 47, 1 et 9 présentent les plus grandes valeurs de gain en matière sèche contrairement aux populations 12, 60, 25, 46, 54, 55, 20, 50, 2, 3, 48 et 10 qui dépérissent en fin de stress hydrique et n'arrivent pas à accumuler de matière sèche pendant la phase de récupération (Figure 3).

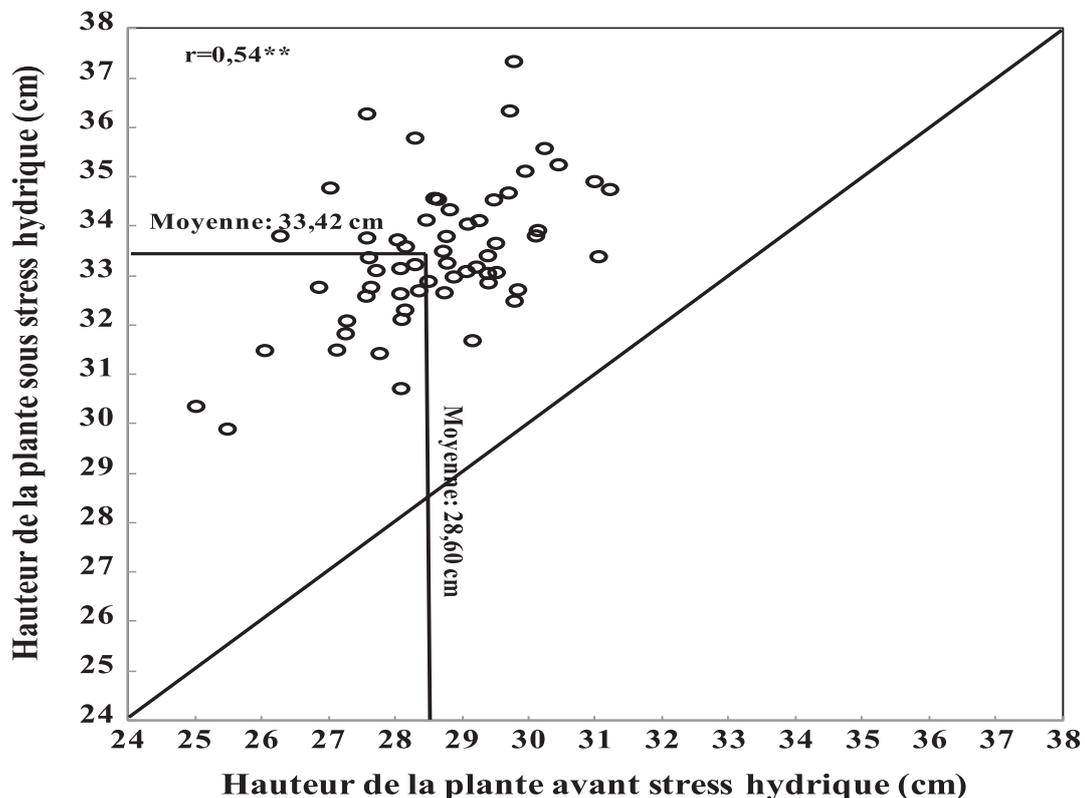


Figure 2: Hauteur des populations locales de fève avant et après le stress hydrique

Une corrélation négative et hautement significative ( $r=-0,64^{**}$ , Tableau 6) est observée entre le rendement en matière sèche des populations locales de fève sous stress hydrique et le gain en matière sèche. Ce résultat indique que les plantes à croissance lente pendant le stress hydrique sont en mesure de mieux se remettre en phase de récupération après ré-irrigation. Ceci peut être dû en partie à une utilisation réduite de l'eau, présente en quantité limitée, par les plantes soumises au déficit hydrique. Par ailleurs, le fait que le gain en matière sèche représente la différence entre le rendement en matière sèche en phase de récupération et celui sous stress hydrique, justifie la signification de la corrélation observée. Les populations 16, 47 et 1 ont présenté un gain en matière sèche élevé, ce qui montre qu'elles sont capables

de mieux se remettre du stress hydrique et accumulent plus de matière sèche en phase de récupération. Cependant, ces populations présentent les plus faibles rendements en matière sèche sous stress hydrique (Figure 4).

Les variations des paramètres physiologiques de la plante pendant une phase de stress hydrique traduisent sa capacité à tolérer la sécheresse. La tolérance est une stratégie qui permet à la plante d'assurer ses fonctions physiologiques malgré une dégradation de son état hydrique (El Jaafari *et al.*, 1993). Le maintien d'une quantité suffisante en eau lors d'un déficit hydrique permet de retarder la fermeture des stomates, de maintenir le volume chloroplastique et de réduire le flétrissement foliaire.

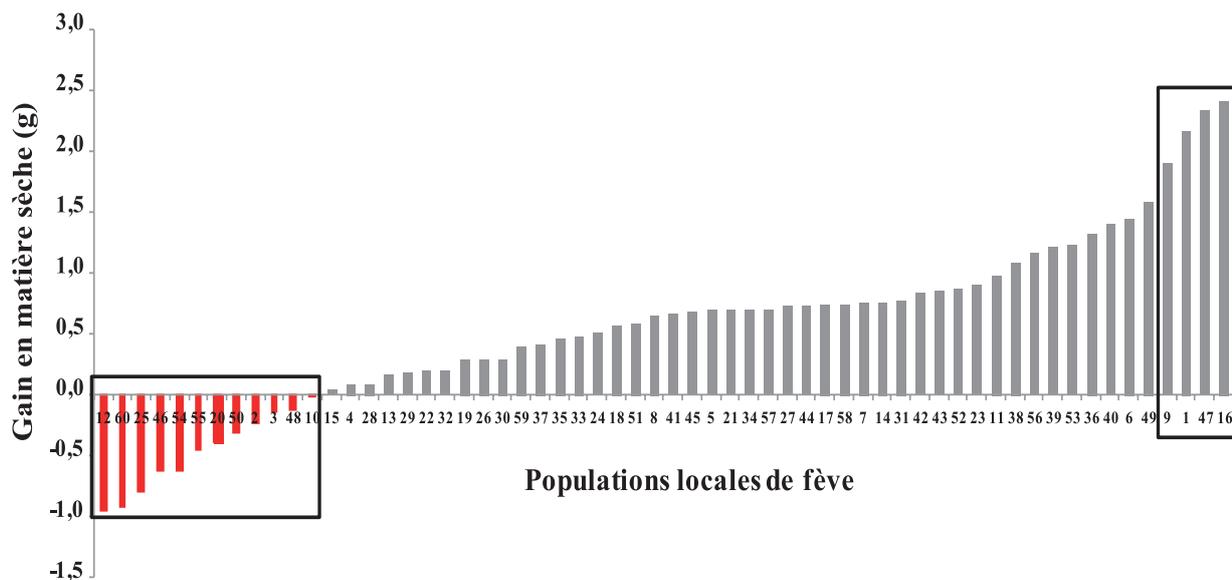


Figure 3: Gain en matière sèche moyen des populations locales de la fève

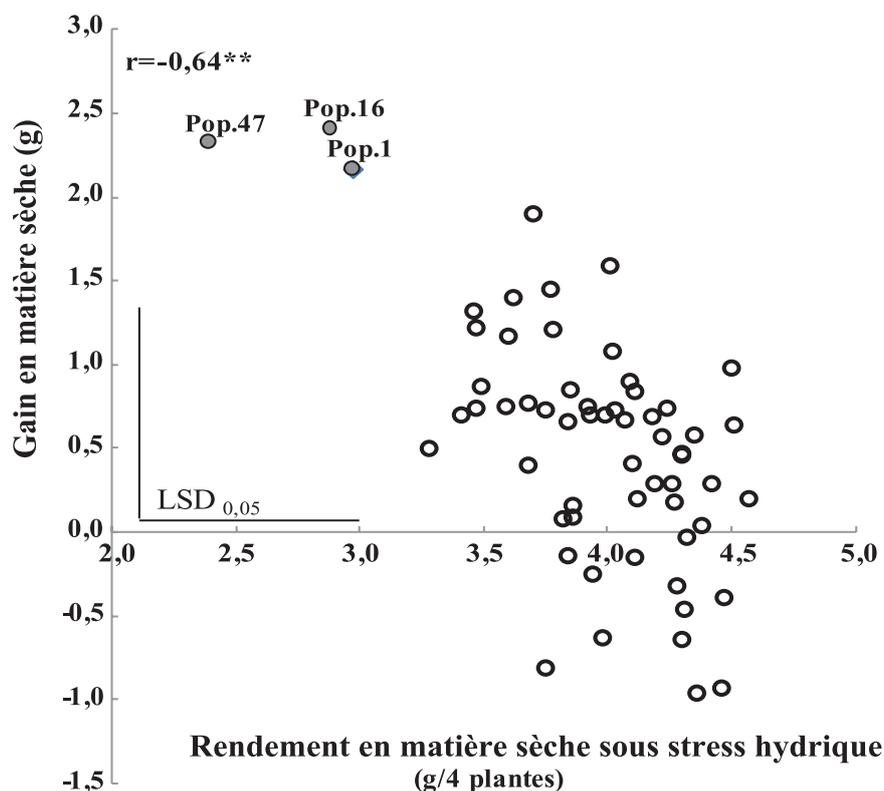


Figure 4: Relation entre le gain en matière sèche et le rendement en matière sèche sous stress hydrique

Sous stress hydrique, la teneur relative en eau (TRE) varie entre 62,24 % et 79,44 %. Pendant la phase de récupération, après deux semaines de ré-irrigation, la teneur relative en eau a augmenté et atteint un maximum de 87,80 % (Tableau 5). Ceci peut suggérer que la capacité des plantes à survivre au déficit hydrique dépend de leur aptitude à limiter la perte d'eau par l'épiderme des feuilles qui résulte d'une phase où les stomates atteignent une ouverture minimum. Parmi les populations locales de fève, les populations 16, 52 et 1 ont présenté des valeurs élevées en TRE, contrairement aux populations 35 et 19 qui ont montré les plus faibles valeurs pour ce caractère (Tableau 7). Sous l'effet du stress hydrique, la TRE joue un rôle important dans la tolérance des plantes au stress en induisant l'ajustement osmotique. Le maintien d'une teneur élevée en eau durant le stress hydrique constitue un mécanisme de défense. Par ailleurs, il est important que la plante conserve suffisamment d'eau en minimisant les pertes (par la fermeture des stomates, la réduction de la surface foliaire, la sénescence des feuilles les plus âgées etc.) et en maximisant l'absorption d'eau par augmentation de la croissance des racines (Khazaei *et al.*, 2013; Araújo *et al.*, 2015). Les populations 16, 47, 1, 9 et 49 qui ont une teneur relative en eau élevée, que ce soit sous stress hydrique ou en phase de récupération, présentent aussi un gain élevé en matière sèche (Tableau 7). Cependant aucune corrélation n'est observée entre ces deux caractères.

La teneur en chlorophylle a augmenté en moyenne chez les plantes stressées relativement aux plantes en conditions optimales (48,40 > 47,60). Sous stress hydrique, la teneur en chlorophylle varie entre 44,51 et 51,62 (Figure 5). Les

populations 38, 28, 15 et 18 présentent les teneurs en chlorophylle les plus élevées alors que les populations 34, 16, 24, 50 et 14 présentent les plus faibles valeurs (Tableau 7). Ceci est en accord avec le résultat trouvé par Mensah *et al.* (2006) qui ont constaté que le stress hydrique chez le sésame cause une augmentation de la chlorophylle au niveau des feuilles. Le même résultat a été obtenu par Arjenak *et al.* (2012) qui ont trouvé que la teneur en chlorophylle augmente sous l'effet du stress hydrique chez des variétés de blé tolérantes à la sécheresse. Les techniques de quantifier des pigments photosynthétiques, à partir des matières végétales, sont basées sur des méthodes qui exigent une destruction de l'échantillon. En revanche, l'utilisation du SPAD mètre pour quantifier la teneur en chlorophylle est une méthode non destructive. Les résultats ont révélé que la teneur en chlorophylle n'est pas corrélée au gain en matière fraîche ou sèche (Tableau 6), ce qui est en accord avec les conclusions de Ali (2015). Ce trait ne peut pas être utilisé comme un outil de dépistage rapide et fiable pour la tolérance à la sécheresse dans ces conditions de travail. Une corrélation positive et hautement significative ( $r=0,34^{**}$  ; Tableau 6) est enregistrée entre la teneur en chlorophylle et le rendement en matière sèche sous l'effet du stress hydrique. Siddiqui *et al.* (2015) ont trouvé que sous l'effet d'un stress hydrique sévère, certains génotypes présentent des valeurs maximales de la teneur en chlorophylles. La synthèse en chlorophylle sous stress hydrique peut être associée à une meilleure efficacité de la récolte de lumière en améliorant ainsi la production de la matière sèche.

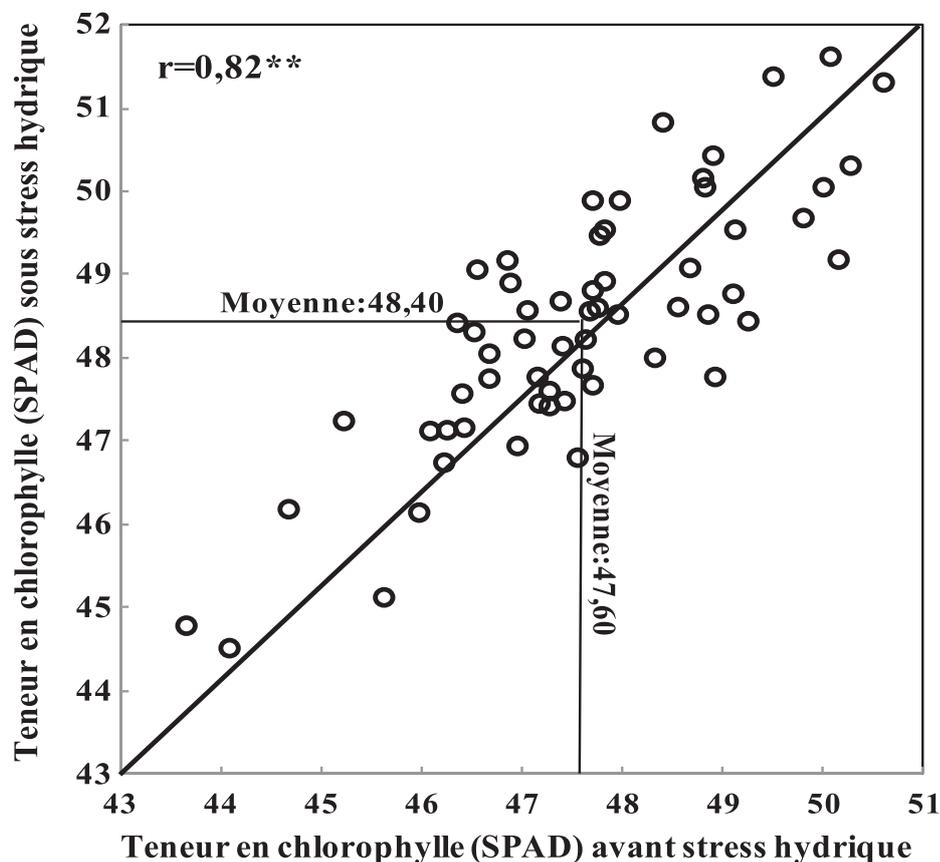


Figure 5: Teneur en chlorophylle (SPAD) avant et après stress hydrique des populations locales de fève

**Tableau 7: Gain en matière sèche, rendement en matière sèche, teneur relative en eau, teneur en chlorophylle et hauteur de la plante des 60 populations locales de fèves testées sous stress hydrique et en phase de récupération**

Populations	Chl	HP	HP-1	Chl-1	Fltr	MS1	TRE-1	HP-2	MS2	TRE-2	GMS
Pop. 16	43,65	29,78	37,33	44,78	4,42	2,88	79,44	44,50	5,32	87,80	2,41
Pop. 47	46,25	27,03	34,77	47,13	4,58	2,39	76,50	37,25	4,68	85,25	2,33
Pop. 1	47,05	28,50	32,88	48,57	5,97	2,97	78,38	36,50	5,15	80,15	2,17
Pop. 9	48,67	28,64	34,54	49,08	7,26	3,70	76,52	36,50	5,65	66,51	1,90
Pop. 49	49,80	30,45	35,24	49,68	6,82	4,01	77,61	35,00	5,57	83,35	1,59
Pop. 6	48,80	25,02	30,35	50,16	6,70	3,77	72,58	30,50	5,16	71,34	1,45
Pop. 40	50,15	30,24	35,57	49,18	6,16	3,62	73,86	38,75	4,97	83,33	1,40
Pop. 36	48,32	31,22	34,74	48,00	5,90	3,46	73,28	37,00	4,76	61,50	1,32
Pop. 53	47,82	27,64	32,76	48,92	6,02	3,47	72,73	34,50	4,68	79,78	1,22
Pop. 39	47,67	28,30	35,78	48,56	6,16	3,78	73,82	35,00	4,96	67,89	1,21
Pop. 56	47,60	26,05	31,48	47,87	5,23	3,60	72,51	33,50	4,86	80,77	1,17
Pop. 38	50,07	29,22	33,17	51,62	6,53	4,02	73,88	34,00	5,09	84,66	1,08
Pop. 11	47,82	29,16	31,68	49,54	6,51	4,50	76,99	35,50	5,54	84,25	0,98
Pop. 23	46,40	27,72	33,10	47,57	6,02	4,09	72,38	34,50	4,99	82,11	0,90
Pop. 52	48,92	27,58	33,76	47,77	5,65	3,49	79,00	33,00	4,39	81,99	0,87
Pop. 43	47,40	29,09	34,04	48,14	6,76	3,85	73,19	33,00	4,71	79,74	0,85
Pop. 42	46,55	28,82	34,33	49,06	6,24	4,11	73,83	34,75	4,91	81,34	0,84
Pop. 31	49,25	29,52	33,06	48,44	6,23	3,68	76,74	35,00	4,48	79,68	0,77
Pop. 7	47,77	29,70	34,67	49,47	7,09	3,92	73,88	34,50	4,70	77,22	0,75
Pop. 14	44,67	29,72	36,33	46,18	4,86	3,59	76,71	38,00	4,38	70,30	0,75
Pop. 17	46,88	28,08	33,14	48,90	6,93	4,24	73,56	35,50	5,00	85,35	0,74
Pop. 58	46,08	27,28	32,08	47,12	6,36	3,47	76,01	36,00	4,20	81,79	0,74
Pop. 27	47,97	30,14	33,91	49,89	6,76	4,03	72,27	34,25	4,74	77,67	0,73
Pop. 44	47,70	29,79	32,48	49,89	6,44	3,75	74,01	34,75	4,49	81,30	0,73
Pop. 21	46,67	31,05	33,38	48,05	5,76	3,93	73,63	33,00	4,57	79,21	0,70
Pop. 34	44,08	27,13	31,49	44,51	5,79	3,41	77,90	34,25	4,11	79,19	0,70
Pop. 57	48,82	28,30	33,22	50,05	7,03	3,99	69,99	33,00	4,65	68,88	0,70
Pop. 5	46,85	28,74	32,65	49,17	6,29	4,18	72,58	34,00	4,88	81,05	0,69
Pop. 45	47,55	28,78	33,25	46,80	6,49	4,07	71,99	34,25	4,73	77,17	0,67
Pop. 41	46,35	29,84	32,71	48,42	6,12	3,84	70,60	33,50	4,39	60,26	0,66
Pop. 8	47,75	29,07	33,08	48,60	6,84	4,51	70,19	36,50	5,16	73,96	0,64
Pop. 51	47,17	28,04	33,72	47,45	6,12	4,35	76,74	35,00	4,95	71,88	0,58
Pop. 18	48,40	28,47	34,12	50,83	6,20	4,22	72,21	34,50	4,80	79,37	0,57
Pop. 24	45,62	27,61	33,36	45,12	5,46	3,28	76,83	33,25	3,79	82,84	0,50
Pop. 33	50,27	27,77	31,42	50,31	6,78	4,30	74,00	31,75	4,77	71,50	0,47
Pop. 35	46,95	30,11	33,80	46,94	5,98	4,30	62,24	32,25	4,78	73,80	0,46
Pop. 37	47,95	29,48	34,53	48,52	5,67	4,10	75,39	32,75	4,50	84,35	0,41
Pop. 59	46,52	28,15	32,30	48,31	6,77	3,68	74,45	34,25	4,07	84,21	0,40
Pop. 19	45,22	29,40	32,85	47,24	6,64	4,19	67,79	33,75	4,38	75,11	0,29
Pop. 26	50,00	28,72	33,49	50,05	7,16	4,42	69,89	34,25	4,71	81,39	0,29
Pop. 30	47,70	28,08	32,63	48,81	7,52	4,26	72,39	32,75	4,56	75,72	0,29
Pop. 22	47,70	27,26	31,82	47,67	6,73	4,57	75,20	30,25	4,76	84,82	0,20
Pop. 32	46,22	28,59	34,56	46,74	6,41	4,12	71,42	31,75	4,31	82,81	0,20
Pop. 29	47,27	28,36	32,69	47,60	6,48	4,27	74,43	31,25	4,46	84,64	0,18
Pop. 13	47,02	29,26	34,11	48,23	6,11	3,86	76,15	35,50	3,99	80,79	0,16
Pop. 28	49,50	26,86	32,76	51,38	6,32	3,86	72,82	34,50	3,99	82,01	0,09

<b>Pop. 4</b>	46,42	29,95	35,11	47,16	5,16	3,82	73,94	34,25	3,86	64,22	0,08
<b>Pop. 15</b>	50,60	28,88	32,97	51,31	6,55	4,38	72,57	34,25	4,44	80,78	0,04
<b>Pop. 10</b>	47,38	27,57	32,58	48,68	5,56	4,32	73,06	34,25	4,27	82,85	-0,03
<b>Pop. 48</b>	48,85	27,58	36,27	48,52	5,68	3,84	77,63	35,50	3,73	82,40	-0,14
<b>Pop. 3</b>	47,63	30,99	34,90	48,22	5,80	4,11	74,82	36,75	3,94	70,31	-0,15
<b>Pop. 2</b>	46,67	28,16	33,58	47,75	6,69	3,94	71,65	35,00	3,73	62,60	-0,25
<b>Pop. 50</b>	45,97	26,28	33,80	46,14	5,46	4,28	72,16	37,25	3,93	85,28	-0,32
<b>Pop. 20</b>	47,42	29,51	33,65	47,48	5,99	4,47	72,57	35,25	4,07	79,18	-0,39
<b>Pop. 55</b>	49,10	28,77	33,79	48,77	6,50	4,31	72,35	35,50	3,90	69,56	-0,46
<b>Pop. 54</b>	49,12	29,39	33,40	49,54	6,17	3,98	76,56	33,25	3,38	87,31	-0,63
<b>Pop. 46</b>	47,27	28,09	30,71	47,42	6,80	4,30	75,34	33,25	3,59	77,42	-0,64
<b>Pop. 25</b>	48,55	28,10	32,11	48,61	6,46	3,75	77,06	34,25	2,94	72,14	-0,81
<b>Pop. 60</b>	48,90	29,39	33,04	50,43	7,22	4,46	73,34	33,25	3,54	72,01	-0,93
<b>Pop. 12</b>	47,15	25,49	29,89	47,77	5,39	4,36	72,16	30,00	3,39	65,06	-0,96

(Chl) teneur en chlorophylle avant le stress hydrique; (HP) hauteur de la plante (cm) avant le stress hydrique; (Chl-1) teneur en chlorophylle sous stress hydrique; (HP-1) hauteur de la plante (cm) sous stress hydrique; (Fltr) degré de flétrissement (1-9) sous stress hydrique; (MS-1) rendement en matière sèche (g/4 plantes) sous stress hydrique; (TRE-1) teneur relative en eau (%) sous stress hydrique; (HP-2) hauteur de la plante (cm) pendant de la phase de récupération; (MS-2) rendement en matière sèche (g/4 plantes) pendant la phase de récupération; (TRE-2) teneur relative en eau (%) pendant la phase de récupération; (GMS) gain en matière sèche (g).

## CONCLUSION

La présente étude a pour but d'évaluer la tolérance à la sécheresse au stade juvénile d'une collection de populations locales de fève originaire de la province de Taounate. Les résultats ont montré que les populations locales de fève renferment une diversité élevée pour différents traits (teneur en chlorophylle, hauteur de la plante, degré de flétrissement, teneur relative et absolue en eau et rendement en matière fraîche et sèche) que ce soit sous stress hydrique ou en phase de récupération.

Les résultats ont également révélé que les caractères relatifs à l'estimation de la concentration en chlorophylles au niveau de la feuille par le SPAD mètre et l'estimation visuelle du degré de flétrissement des plantes sous stress hydrique, ne peuvent pas être utilisés comme outils de criblages rapides et fiables pour la tolérance à la sécheresse dans ces conditions d'expérimentation. La teneur en eau chez la plante peut servir d'indicateur de tolérance au stress hydrique. Le maintien d'une quantité suffisante d'eau, sous un déficit hydrique, constitue un mécanisme de défense de la plante. Les populations qui sont capables de maintenir une teneur relative en eau élevée arrivent à accumuler des rendements en matière fraîche élevés sous stress hydrique.

La capacité des plantes à récupérer après un stress est une caractéristique importante qui permet aux plantes de survivre dans des conditions défavorables. Les populations à croissance lente sous stress peuvent surmonter le stress hydrique et accumuler des rendements élevés en matière fraîche et sèche pendant la phase de récupération.

Les populations 16, 47, 1 et 9 se sont avérées les plus tolérantes à la sécheresse au stade juvénile et par conséquent, il serait utile de les intégrer dans un programme de sélection afin de développer des variétés tolérantes à la sécheresse et adaptées aux environnements de culture de la fève au Maroc.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions le projet MARS II n° 12/19 dans le programme Maroco-Allemand pour la Recherche Scientifique et toute l'équipe scientifique et technique qui a travaillé sur ce projet.

## RÉFÉRENCES

- Abdelmula A.A., Link W., Von Kittlitz E. and Stelling D. (1999). Heterosis and inheritance of drought tolerance in faba bean, *Vicia faba* L. *Plant Breeding*. 118: 485-490.
- Alghamdi S.S., Al-Shameri A.M., Migdadi H.M., Ammar M.H., El-Harty E.H., Khan M.A. and Farooq M. (2014). Physiological and molecular characterization of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes for adaptation to drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 0931-2250.
- Ali M.B. (2015). Physiological response of German winter bean (*Vicia faba* L.) to drought. *Journal of Crop Improvement*. 29: 319-332.
- Amede T., Schubert S. and Stahr K. (2003). Mechanisms of drought resistance in grain legumes I. Osmotic adjustment. *Ethiopian Journal of Science*. 26, 37-46.
- Ammar M.H., Anwar F., El-Harty E.H., Migdadi H.M., Abdel-Khalik S.M., Al-Faifi S.A., Farooq M. and Alghamdi S.S. (2014). Physiological and yield responses of faba bean (*Vicia faba* L.) to drought stress in managed and open field environments. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 0931-2250.
- Araújo S.S., Beebe S., Crespi M., Delbreil B., González E.M., Gruber V., Lejeune-Henaut I., Link W., Monteros M.J., Prats E., Rao I., Vadez V. and Vaz Patto M.C. (2015). Abiotic stress responses in legumes: Strategies used to cope with environmental challenges. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 34: 237-280.

- Arbaoui M., Link W., Satovic S. and Torres A.M. (2008). Quantitative trait loci of frost tolerance and physiologically related trait in faba bean (*Vicia faba* L.). *Euphytica*. 164: 93–104.
- Arjenaki F.G., Jabbari R. and Morshedi A. (2012). Evaluation of drought stress on relative water content, chlorophyll content and mineral elements of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 11: 726-729.
- Balaghi R., Jlibene M., Tychon B. et Mrabet R. (2007). Gestion du risque de sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse*, 18: 1- 8.
- Chaves M.M., Pereira J.S., Maroco J., Rodrigues M.L., Ricardo C.P., Osorio M.L., Carvalho I., Faria T. and Pinheiro C. (2002). How plants cope with water stress in the field; photosynthesis and growth. *Annals of Botany*. 89: 907–916.
- Duc G., Baum M., Redden B., Sadiki M., Suso M.J., Vishniakova M. and Zong X. (2010) Diversity maintenance and use of *Vicia faba* L. genetic resources. *Field Crops Research*. 115: 270–278.
- El Jaafari S., Paul R., Lepoivre P., Semal J. et Laitat E. (1993). Résistance à la sécheresse et réponse à l'acide abscisique : analyse d'une approche synthétique. *Cahiers Agriculture*. 2: 256-263.
- Giunta F., Motzo R. and Deidda M. (1995). Effects of drought on leaf area development, biomass production and nitrogen uptake of Durum wheat grown in a mediterranean environment. *Australian Journal of Agricultural Research*. 49: 99–111.
- Grasshoff C. (1990). Effect of pattern of water supply on *Vicia faba* L. 1. Dry matter partitioning and yield variability. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 38: 21-44.
- Hanafy M.S., El-Banna A., Schumacher H.M., Jacobsen H.J. and Hassan F.S. (2013). Enhanced tolerance to drought and salt stress in transgenic faba bean (*Vicia faba* L.) plants by heterologous expression of the PR10 a gene from potato. *Plant Cell Reports*. 32: 663-674.
- Husain M.M., Reid J.B., Othman H. and Gallagher J. N. (1990). Growth and water use of faba beans (*Vicia faba* L.) in a sub-humid climate I. Root and shoot adaptations to drought stress. *Field Crops Research*. 23: 1-17.
- Katerji N., Mastrorilli M., Lahmerc F.Z., Maalouf F. and Oweis T. (2011). Faba bean productivity in saline-drought conditions. *European Journal of Agronomy*. 35: 2–12.
- Khan H.R., Link W., Hocking T.J. and Stoddard F.L. (2007). Evaluation of physiological traits for improving drought tolerance in faba bean (*Vicia faba* L.). *Plant and Soil*. 292: 205-217.
- Khan H.R., Paull J.G., Siddique K.H.M. and Stoddard F.L. (2010). Faba bean breeding for drought-affected environments: A physiological and agronomic perspective. *Field Crops Research*. 115: 279-286.
- Khazaei H., O'Sullivan D.M., Sillanpää M.J. and Stoddard F.L. (2014). Use of synteny to identify candidate genes underlying QTL controlling stomatal traits in faba bean (*Vicia faba* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 127: 2371-2385.
- Khazaei H., Street K., Santanen A., Bari A. and Stoddard F.L., (2013). Do faba bean (*Vicia faba* L.) accessions from environments with contrasting seasonal moisture availabilities differ in stomatal characteristics and related traits? *Genetic Resources and Crop Evolution*. 60: 2343-2357.
- Köpke U. and Nemecek T. (2010). Ecological services of faba bean. *Field Crops Research*. 115: 217-233.
- Ma Y., Yang T., Guan J., Wang S. and Wang H. (2011). Development and characterization of 21 EST-derived microsatellite Markers in *Vicia faba* (faba bean). *American Journal of Botany*. e22–e24.
- MAPM (2013). Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime. Bilan de la campagne agricole 2012-2013. Direction de la production végétale, Département des statistiques. Rabat, Maroc.
- Mensah J.K., Obadoni B.O., Eroutor P.G. and Onome-Irieguna F. (2006). Simulated flooding and drought effects on germination, growth and yield parameters of Sesame (*Seasamum indicum* L.). *African Journal of Biotechnology*. 5: 1249-1253.
- Miyashita K., Tanakamaru S., Maitani T. and Kimura K. (2005). Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal. *Environmental and Experimental Botany*. 53: 205–214.
- Pilbeam C.J., Akatse J.K., Hebblethwaite P.D. and Wright S.D. (1992). Yield production in two contrasting forms of spring-sown faba bean in relation to water supply. *Field Crops Research*. 23: 273-287.
- Ricciardi L., Polignano G.B. and De Giovanni C. (2001). Genotypic response of faba bean to water stress. *Euphytica*, 118: 39–46.
- Sadiki M. (2006). Diversity of Moroccan local faba bean landraces for reaction to drought stress. In: *Enhancing the use of crop genetic diversity to manage abiotic stress in agricultural production systems*. Proceedings of a workshop, 23-27 may 2005, Budapest (Hungary), 2006. International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy, 11-17.
- Sadiki M. et El Bouhmadi K. (2002). Evaluation de populations locales marocaines de fève et de féverole pour la tolérance à la sécheresse. In : *La conservation in-situ de la biodiversité agricole: un défi pour une agriculture durable*. Actes du séminaire national Rabat, 21 et 22 Janvier 2002, Rabat (Maroc), 2002. International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy, 242-262.
- Sadiki M., Birouk A., Bouizzgaren A., Belqadi L., Rh'rrrib K., Taghouti M., Kerfal S., Lahbhili M., Bouhya H., Doudiden R., Saidi S. et Jarvis D.I. (2002). La diversité génétique in situ du blé dur, de l'orge, de la luzerne et de la fève: Options de stratégie pour sa conservation. In: *La conservation in-situ de la biodiversité agricole: un défi pour une agriculture durable*. Actes du séminaire national Rabat, 21 et 22 Janvier 2002, Rabat (Maroc), 2002. International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy, 43-121.
- Sau F. and Minquez M.I. (2000). Adaptation of indeterminate faba beans to weather and management under a Mediterranean climate. *Field Crops Research*. 66: 81–99.

- Siddiqui M.H., Al- Al-Khaishany M.Y., Al-Qutami M.A., Al-Wahabi M.H., Grover A., Ali H.M., Mona S. Al-Wahabi M.S. and Bukhari N.A. (2015). Response of different genotypes of faba bean plant to drought stress. *International Journal of Molecular Sciences*. 16: 10214-10227.
- Torres A.M., Avila C.M., Gutierrez N., Palomino C., Moreno M.T. and Cubero J.I. (2010). Marker-assisted selection in faba bean (*Vicia faba* L.). *Field Crops Research*. 115: 243–252.
- Zabawi A.G.M. and Dennet M.D.D. (2010). Responses of faba bean (*Vicia faba* L. cv Maris Bead) to different levels of plant available water. II. Yield, water use and water use efficiency. *Journal of Tropical Agriculture and Food Science*, 38: 145-152.