



Revue semestrielle – Université Ferhat Abbas Sétif 1

REVUE AGRICULTURE



Quantification précoce des capacités symbiotiques racinaires de quatre variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf) et deux variétés d'orge (*Hordeum vulgare* L.) conduites en zone semi aride des hautes plaines de l'Ouest algérien

Early quantification of symbiotic root capabilities of four durum wheat varieties (*Triticum durum* Desf) and two barley varieties (*Hordeum vulgare* L.), grown in the semi-arid high plains of western Algeria.

Taibi Hadj Youcef Hassiba¹, Smail Saadoun Noria^{1,2}, Hadj Ali Dihia¹.

1 : Université Mouloud Mammeri. Département des Sciences Agronomiques

2 : Laboratoire Ressources Naturelles. Route Hasnaoua. BP 17. 15000 Tizi Ouzou (Algérie).

Auteur correspondant: htaibi@hotmail.fr

ARTICLE INFO

Reçu : 24-11-2016

Accepté : 31-12-2016

Mots clés :

Céréales, cinétique symbiotique, symbiose mycorhizienne, symbiose endophytique, quantification, semi-aride, colonisation racinaire, profondeur racinaire.

Key words :

Cereals, symbiotic kinetics, mycorrhizal symbiosis, endophytic symbiosis, quantification, semi -

RÉSUMÉ

L'objectif visé par ce travail est d'étudier à un stade précoce (tallage) le comportement symbiotique racinaire mycorhizien et endophytique de quatre variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf) et deux variétés d'orge (*Hordeum vulgare* L.) largement cultivées en Algérie et connues pour leur origine et comportement contrastés. L'expérimentation est menée à la station expérimentale régionale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Saida, située dans une zone céréalière semi-aride de la région Ouest du pays. L'essai est installé sous des conditions naturelles de plein champ, selon les conduites culturales les plus communément pratiquées. Les mesures sont effectuées durant le stade tallage sur trois niveaux de profondeur racinaire. L'évaluation de la colonisation se fait après coloration des fragments racinaires à travers la quantification des structures fongiques. Les résultats obtenus montrent une différence variétale observée pour les paramètres étudiés. Elle est statistiquement significative pour le taux de vésicules et très hautement significative pour le taux d'endophytisme. L'analyse montre aussi une différence variétale pour la cinétique symbiotique en fonction de la profondeur racinaire. L'accent étant mis sur l'interaction entre la symbiose mycorhizienne et endophytique au sein de chaque espèce étudiée. Ainsi, l'application de la méthode de quantification de McGonigle a permis d'évaluer le niveau et la dynamique des interactions de la plante hôte (blé et orge) avec ses partenaires fongiques, endophytiques et mycorhiziens.

ABSTRACT

In the Algerian cereal zones, endophytic and arbuscular mycorrhizae fungi have an important function in nutrition and plant protection, especially early in the growing cycle of the crop. This work aims to quantify mycorrhizal and endophytic roots capacity of two varieties of barley and

four varieties of durum wheat, widely grown in Algeria and known for their contrasting behavior. The experiment was conducted in the experimental station of the field crop Institute of Saida area, a cereal-producing region of western Algeria. The measurements are performed during tillering stage, on three root depth levels [0-20] [20-40] and [40-60]cm. Root portions are removed, stained, crushed and observed under light microscope. Mycorrhization rates (hyphae) of vesicles arbuscular fungi as well as endophytism rates are determined at each level. At this stage, the results show that the mycorrhization rate is higher than the rate of endophytism for both species; they highlighted heavy infection with mycorrhizae as well. The studied parameters showed varietal differences but significance was only for vesicle rates. The study also shows varietal difference for symbiotic kinetics in relation to the root depth.

1. Introduction

La céréaliculture pratiquée dans l'Ouest algérien est menée en extensif et en régime pluvial. Cette zone céréalrière se caractérise par des épisodes de déficit hydrique (sécheresse) et de hautes températures qui peuvent apparaître, d'une façon progressive ou brutale soit au début, au milieu ou en fin de saison. Cette irrégularité du climat (Baldy, 1986) implique une variabilité temporelle de la production des céréales pluviales (Smadhi et Zella, 2009). Pour améliorer cette production et la rendre plus stable, plusieurs voies ont été adoptées. Parmi elles, nous pouvons citer selon Lahmar (1993) :

- une introduction de la fumure minérale et de produits phytosanitaires ;
- la mécanisation complète de la culture ;
- la recherche et la création de nouvelles variétés adaptées et plus résistantes à de telles conditions.

La dernière option a toujours été associée à des marqueurs phénologique, morphologique, physiologique et biochimique reflétant l'éviction, l'évitement ou la tolérance (Turner, 1979).

Parmi les marqueurs morphologiques, nous citons la modification de la dynamique de croissance des racines (Richards et Passioura, 1981) en relation avec la tolérance au déficit hydrique qui a été mise en évidence chez certaines variétés de blé dur (Benlaribi et al., 1990) et d'orge (Khalidoun et al., 1990) cultivées dans ces zones céréalrières du pays.

Mais toutes ces mesures sont insuffisantes dans les conditions de ces régions où une approche de gestion intégrée visant la diminution d'intrants et limitant le travail du sol permettrait plutôt une production plus stable et plus durable ainsi qu'une préservation des ressources naturelles. Ceci peut être réalisé dans le cadre d'une agriculture de conservation (AC) (FAO, 2003) qui est en train de prendre de l'ampleur à l'échelle mondiale et locale où elle est passée de 1523ha en 2009/10 à 5315ha en 2013/14 (Zeghouane et al., 2015). Outre la préservation des ressources locales (eau et sol) cette agriculture permet également aux espèces céréalrières cultivées de mieux interagir au niveau racinaire avec des champignons qui pénètrent entièrement (champignons endophytiques) ou partiellement (champignons mycorrhiziens à vésicules et à arbuscules VAM) dans la racine et qui permettent, en effet, à la plante de s'adapter à certains facteurs abiotiques grâce à des modifications morphologiques (Rodriguez et al., 2004). Les études menées sur l'évaluation des capacités symbiotiques des variétés céréalrières cultivées en Algérie sont peu nombreuses et ce, malgré l'abondance des travaux de part le monde rapportant les effets bénéfiques de ces symbioses comme dans la bioséquestration du carbone, le cycle des nutriments, la biodiversité végétale et la productivité des écosystèmes naturels et agricoles. En effet la mycorrhization améliore l'aptitude de la plante hôte à tolérer les différents types de stress (sécheresse, salinité et haute température) tout en augmentant ses capacités de croissance et d'absorption de nutriments (Augé, 2001 ; Rodriguez et al., 2004, Al-Karaki et al., 2004, Fortin et al., 2013). Les endophytes racinaires sont définis comme étant des champignons localisés entre les tissus racinaires qui apparaissent sains et fonctionnels au moment de la collecte des échantillons (Sieber, 2007), ils sont considérés comme étant des agents contrôleurs qui améliorent la bioprotection des plantes hôtes (Clay, 2004). Bien que l'endomycorrhization soit une règle générale chez les céréales, la colonisation de leurs racines dépend de la sensibilité de l'espèce et de la variété à être infectée par les champignons MA (Trouvelot et al., 1982 ; Boyetchko et Tewari, 1995) ; ce processus étant dépendant du stade végétatif de la culture, une mycorrhization précoce permettrait une meilleure installation de la culture (Castillo et al., 2012).

La quantification de ces symbioses permet de connaître le niveau de colonisation racinaire par les champignons concernés. Le diagnostic établi est un outil pertinent permettant en premier lieu de caractériser le matériel végétal étudié et d'évaluer si les pratiques culturales sont favorables au bon développement de ces associations. Les espèces ou variétés les plus mycophiles sont sensées avoir une meilleure croissance et à une meilleure résistance à divers stress biotiques et abiotiques.

C'est dans cet objectif qu'une étude sur le comportement symbiotique racinaire mycorhizien et endophytique à un stade précoce (tallage) a été menée sur quatre variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf) et deux variétés d'orge (*Hordeum vulgare* L.) largement cultivées en Algérie et connues pour leur origine et comportement contrastés. L'expérimentation est menée dans des conditions naturelles de plein champ, dans une zone semi aride, selon les conduites culturales les plus communément pratiquées.

2. Matériel et méthodes

2.1. Le site expérimental

L'essai a été mené en plein champ au sein de la station expérimentale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de la wilaya de Saida. Celle-ci étant située à 1050 m d'altitude, avec une latitude de 34°30' Nord et une longitude 2°20' Ouest.

2.2. L'étude climatique

La zone d'étude est classée, selon la méthode de Le Houérou (1995), comme étant une zone semi aride inférieure à hiver froid. Une étude climatique sur 30 ans (période 1980-2009) montre une période sèche de 05 mois qui s'étale du mois de mai au mois d'octobre. La figure 1 illustre les conditions climatiques de la campagne agricole durant laquelle s'est déroulé l'essai.

La pluviométrie moyenne enregistrée est de 373mm et les amplitudes thermiques atteignent les 15°C.

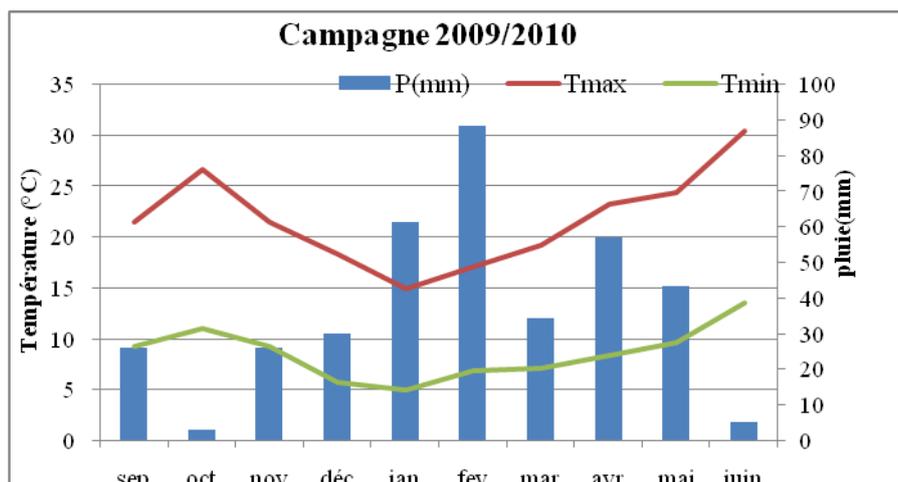


Figure 1. Variations de la pluviométrie et de la température mensuelle maximale et minimale du site expérimental – Variations of the pluviometry and the monthly maximal and minimal temperature of the experimental site

2.3. Etude pédologique

Le sol de la parcelle expérimentale est uniforme sur les trois niveaux retenus [0-20]; [20-40]; [40-60] cm et sa texture est argilo-limoneuse. Il présente une densité apparente de 1,21 et ses caractéristiques hydriques sont telles que : (CC = 2,37 mm/cm, PF = 1,7mm/cm, RU = 0,67mm/cm et RFU = 0,44 mm/cm). La présence de calcaire varie entre des taux moyens de 5 à 25% et de 25 à 50 % CaCO₃% pour les plus élevés. (CC : humidité du sol à la capacité au champ ; RU et RFU : la réserve utile et facilement utilisable en eau du sol)

2.4. Matériel végétal

Il provient de la collection de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) et comprend deux variétés d'orge (*Hordeum vulgare* L.) et quatre de blé dur (*Triticum durum* Desf) les plus cultivées en Algérie. En plus de leur origine distincte, les travaux que nous avons menés au préalable ont montré leurs comportements contrastés quant à leur adaptation aux différentes zones de productions céréalières du pays (Taibi Hadj-Youcef et al., 2003).

Les principales caractéristiques du matériel végétal retenu, fournies par l'ITGC (Institut Technique des grandes cultures) sont indiquées au tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques du matériel végétal utilisé Boufenar- Zaghouane, 2006 ; Taibi Hadj-Youcef et al., 2003).

Espèces Céréalières	Variétés	Origine	Caractéristiques	Rendement et adaptation ¹
Orge	Rihane 03	ICARDA (Syrie)	Précoce et sensible à la sécheresse	Faible adaptation
	Saida 183	Algérie	Semi-précoce et tolérante à la sécheresse	Large adaptation
Blé dur	Ardente	France	Très précoce, très sensible à la sécheresse	Adaptation spécifique aux conditions favorables
	Bidi 17	Algérie	Tardive, tolérante à la sécheresse	Adaptation spécifique aux conditions limitantes
	Vitron	Espagne	Semi-précoce tolérance moyenne à la sécheresse	Large adaptation
	Waha 03	ICARDA (Syrie)	Précoce tolérante à la sécheresse	Large adaptation

¹ analyse de la stabilité du rendement selon la méthode de Finlay et Wilkinson (1963) puis Eberhart et Russel (1966)

2.5. Mise en place de l'essai

L'essai en plein champ est semé en épis lignes au mois de février 2010 (chaque épi est répété quatre fois). Il a été installé sur une jachère travaillée selon un labour profond avec une charrue 3 disques suivi de trois recroisages. La fertilisation comprend une fumure de fond (100 kg/ha de superphosphate triple) et une de couverture composée de 50 kg d'Urée /ha. Cet itinéraire technique est le plus utilisé dans cette région.

2.6. Prélèvement et traitement des échantillons

L'échantillonnage a eu lieu au stade tallage (60 jours après semis) à raison de deux plants par épi en ligne, répétés quatre fois pour chaque variété. Le prélèvement des plants est réalisé avec une tarière allant jusqu'à 60cm de profondeur. Ensuite, les racines sont récupérées sur les niveaux de sol considérés [0-20]; [20-40]; [40-60] cm puis conservées dans de l'alcool à 70°. Leur coloration est réalisée au bleu de trypan selon la technique de Phillips et Hayman (1970). Notons qu'au préalable, elles ont été lavées délicatement pour enlever les particules de sol y adhérant puis découpées en fragments d'environ 1cm de longueur.

Le traitement de ces fragments consiste à les mettre dans une solution de KOH à 10% et les placer à l'étuve à une température de 90 °C pendant 1heure. Ensuite, ils subissent plusieurs rinçages.

A l'issue du dernier, ils sont transférés dans une solution d'H₂O₂ à 10% et placés à l'étuve à 90°C jusqu'à blanchissement total. D'autres rinçages sont nécessaires et enfin, les racines sont neutralisées par l'acide chlorhydrique (1%) pendant 4mn puis trempées dans la solution colorante du bleu de trypan à l'étuve à 90°C pendant 1h. Dès qu'elles sont retirées du bain de coloration, elles sont rincées de nouveau à l'eau courante puis montées entre lame et lamelle dans une solution de glycérol.

2.7. Paramètres observés et traitement de données

L'observation au microscope photonique Olympus YS100 grossissement (100 et 400) est réalisée sur trois lames de 12 fragments racinaires par traitement. Elle porte sur des structures fongiques mycorrhizogènes (Hyphes, Arbuscules et Vésicules) au niveau du cortex ainsi que sur des structures de champignons endophytiques (hyphes septés foncés, microsclérotés ou autres) au niveau du cortex et du cylindre central. La quantification a été réalisée par la méthode McGonicle et al. (1990) sur 100 observations (3 points d'observation par fragment), selon les formules 1, 2, 3 et 4. Elle porte sur le taux de mycorhization (H%), du taux d'arbuscules (Arb%) et de vésicules (Vés%) pour la symbiose mycorrhizienne ainsi que le taux d'endophytisme (endo%) pour la symbiose endophytique.

$$H\% = (G - p)/G * 100; \quad (1) \quad Arb\% = (q+s)/G * 100; \quad (2)$$

$$Ves = (r+s)/G * 100; \quad (3) \quad endo\% = E/G * 100 \quad (4)$$

G : nombre total d'intersections ; **p** : aucune structure mycorrhizienne ; **q** : présence d'arbuscules ; **r** : présence de vésicules ; **s** : présence d'arbuscules et vésicules **E** : présence de structures endophytiques

L'analyse statistique est réalisée par le logiciel Stat Box, une ANOVA 2 (analyse de variance à deux critères de classification) est faite sur tous les paramètres étudiés, et est complétée par une ACP (une analyse en composantes principales). Comme il s'agit de pourcentages et que certains d'entre eux sont inférieurs à 20%, il est certain que les distributions ne sont pas normales, mais il est possible de les « normaliser » par une transformation arcsinus des variables, c'est-à-dire que chaque proportion p (= pourcentage divisé par 100) est remplacée par p' selon la formule $p' = \arcsin \sqrt{p}$. L'ANOVA est ensuite appliquée sur les données transformées.

3. Résultats

3.1. Quantification des paramètres symbiotiques de mycorhization et d'endophytisme chez les variétés d'orge et de blé dur étudiées

Les résultats figurant aux tableaux 2 et 3 montrent le degré de mycorhization et d'endophytisme, par niveau de profondeur racinaire, respectivement chez l'orge et le blé dur. Pour l'orge, le taux de mycorhization total (H) qui représente les hyphes non septés, au sein du cortex, a atteint en moyenne 90,5% tandis que le taux d'endophytisme correspondant à toutes les structures de champignons endophytes dans le cylindre et pouvant atteindre le cortex, n'est que de 7,5%. La présence des arbuscules et des vésicules est respectivement de 36% et 55%. En ce qui concerne le blé dur, la proportion des structures mycorhiziennes (H% et arb%) est similaire à celle de l'orge mais le taux de vésicules est plus faible (- 10%); cependant, le taux d'endophytisme est plus élevé atteignant ainsi le seuil de 34,25% soit 26,75% de plus que pour l'orge.

Tableau 2. Paramètres de mycorhization et d'endophytisme chez les variétés d'orge étudiées

Variété par Niveau de profondeur	Mycorhization			Endophytes
	H%	Arb%	Vés%	Endo%
Saida 183 N1	100	82	85	11
Saida 183 N2	100	0	100	0
Saida 183 N3	100	100	66	11
Moyenne	100± 0,063	61± 0,493	84a± 0,113	7,7b± 0,04
Rihane 03 N1	44	0	0	1
Rihane 03 N2	100	0	25	0
Rihane 03 N3	100	33	55	22
Moyenne	81± 0,261	11± 0,145	27ab± 0,296	7,3b ± 0,077
Moyenne Orge	90,5	36	55	7,5

N1= [0-20]cm ; N2= [20-40]cm ; N3= [40-60] cm

Tableau 3. Paramètres de mycorhization et d'endophytisme chez les variétés de blé dur étudiées

Variété par Niveau de profondeur	Mycorhization			Endophytes
	H%	Arb%	Ves%	Endo%
Waha 03 N1	93	41	43	50
Waha 03 N2	100	90	78	31
Waha03 N3	100	0	17	25
Moyenne	97±0,022	44±0,498	46ab±0,243	35ab±0,158
Ardente N1	100	27	48	42
Ardente N2	100	100	78	44
Ardente N3	100	86	50	71
Moyenne	100±0,063	71±0,398	59ab±0,103	52a±0,117
Bidi 17 N1	98	0	30	16
Bidi 17 N2	100	0	7	25
Bidi 17 N3	100	28	0	47
Moyenne	99±0,051	9±0,116	12b±0,18	29ab±0,123
Vitron N1	100	57	66	28
Vitron N2	100	0	47	25
Vitron N3	100	0	72	11
Moyenne	100±0,063	19±0,343	62ab±0,198	21ab±0,138
Moyenne Blé dur	99,00	36	45	34,25

N1= [0-20]cm ; N2= [20-40]cm ; N3= [40-60] cm

Les données montrent également que sur toute la profondeur de sol retenue pour cette expérimentation, la mycorhization est plus prolifique que l'endophytisme. Soulignons que pour la symbiose mycorhizienne, le taux de vésicules est plus élevé que celui des arbuscules (Tableau 4).

Tableau 4. Résultats des paramètres de mycorhization et d'endophytisme par niveau d'enracinement

Niveau de profondeur Racinaire	Mycorhization			Endophytes
	H%	Arb%	Vés%	Endo%
N1	89±0,149	35±0,284	45±0,15	25±0,109
N2	100±0,074	32±0,378	56±0,177	21±0,045
N3	100±0,074	41±0,307	43±0,207	31±0,134
Moyenne Générale	96±0,13	36±0,4	50±0,22	26±0,13

N1= [0-20[cm ; N2= [20-40[cm ; N3= [40-60] cm

L'analyse statistique par le stat box ANOVA 2 indique que l'effet profondeur racinaire n'est pas significatif. Elle révèle également que l'effet variété est significatif pour le taux de vésicules dans la symbiose mycorhizienne et hautement significatif pour celui relatif à l'endophytisme caractérisant la symbiose endophytique (Tableau 5).

Tableau 5. Résultats de l'analyse statistique des paramètres de mycorhization et d'endophytisme par niveau d'enracinement

Analyse de variance	Mycorhization			Endophytes
	H%	Arb%	Ves%	Endo%
Test F var	1	1,124	4,1	5,61
Test F prof	1,349	0,29	0,56	1,586
Prob fact variété	0,466	0,41	0,02	0,01
Prob fact profondeur	0,303	0,76	0,59	0,2519
C.V %	7,94	100,31	37,31	33,92
Effet variété	NS	NS	S	HS

3.2. Etude de la variation paramétrique

Le comportement symbiotique a été étudié aussi bien pour la variété que pour la profondeur racinaire. Les observations relatives aux paramètres des symbioses racinaires d'ordre mycorhizien ou endophytique chez les variétés d'orge et de blé dur retenues sont illustrées par la figure 2.

L'histogramme (Figure 2) montre un taux moyen de mycorhization (H%) avoisinant le 100% pour toutes les variétés étudiées à l'exception de Rihane (orge) avec 80%. Cette baisse se justifie par ce qui a été noté (44%) sur la profondeur allant de 0 à 20 cm (Tableau 2).

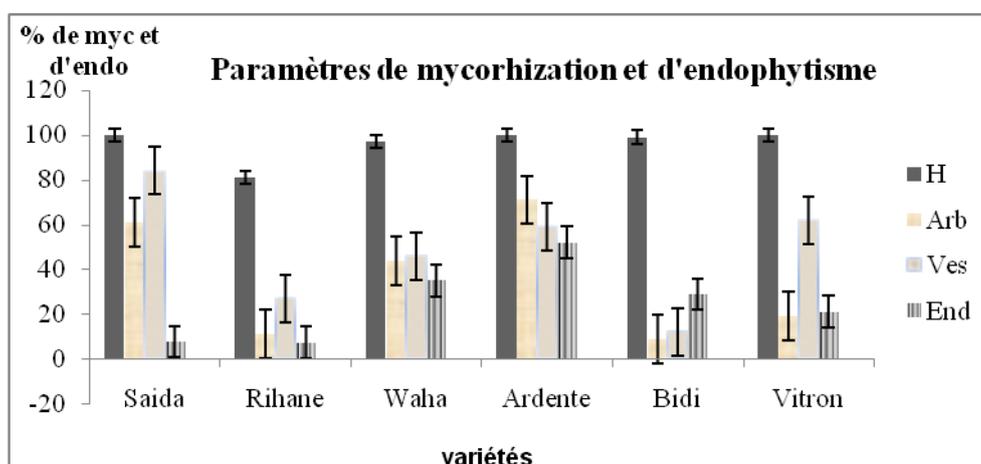


Figure 2. Variation du taux de mycorhization (H) d'arbuscules (Arb), de vésicules (Ves) et d'endophytisme (End) chez les variétés d'orge (Saida 183, Rihane 03) et de blé dur (Waha, Ardente, Bidi 17 et Vitron) — Change in the rate of mycorrhizal (H) of arbuscules (Arb), vesicles (Ves) and endophytic (End) in durum wheat (Waha03, Ardent, Bidi17 and Vitron) and barley varieties (Saida 183, Rihane 03).

Pour ce qui est de l'importance des arbuscules, une grande variabilité est observée. Cependant, elle n'est pas statistiquement significative. Les taux moyens les plus élevés sont relevés chez les variétés Ardente et Saida 183 avec respectivement 71% et 61% tandis que Vitron (19%), Rihane 03 (11%) et Bidi 17 (9%) présentent les plus faibles ; la variété Waha 03 se situant comme intermédiaire avec 44%. Quant au taux de vésicules, une différence significative entre les variétés est notée ($p \leq 0,05$) avec par conséquent, 3 groupes distincts :

-le premier comprend la variété d'orge Saida 183 (84%) ;

-le deuxième rassemble les variétés de blé dur Vitron, Ardente et Waha 03 avec des taux respectifs de 62%, 59% et 46% ainsi que Rihane 03 (orge) avec 27% ;

-le troisième correspond au blé dur Bidi17 avec seulement 12%.

Pour ce qui est du taux d'endophytisme, il est nettement plus faible que celui de la mycorhization et présente une différence variétale hautement significative ($p \geq 0,01$). Il ne dépasse pas 7,5% dans le cas de l'orge alors que chez les variétés de blé dur, il atteint 52% avec Ardente, 35% avec Waha03, 29% et 21% respectivement avec Bidi17 et Vitron. Le comportement symbiotique variétal par niveau de profondeur racinaire est illustré par la figure 3.

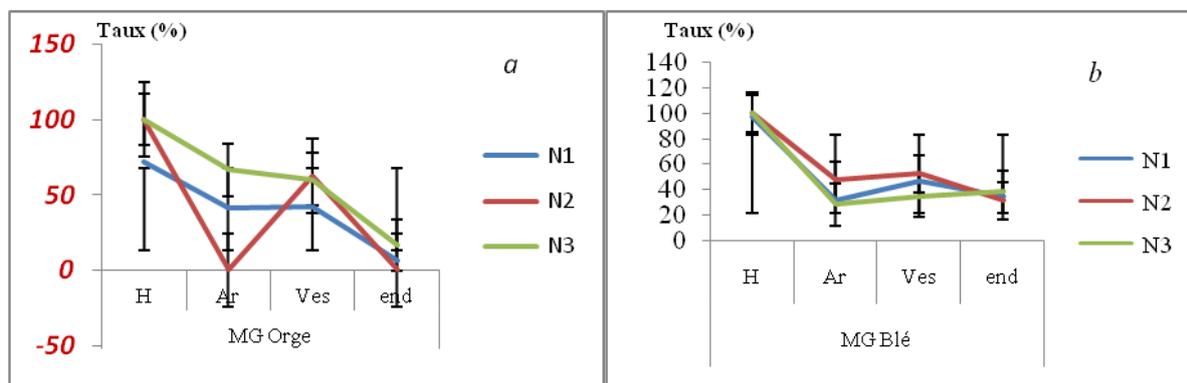


Figure 3. Cinétique symbiotique racinaire moyenne des variétés d'orge (a) et de blé dur (b) sur les différentes profondeurs racinaires — *Average root symbiotic kinetics of barley (a) and (b) durum wheat varieties at different root depth.* (MG : moyenne générale ; average)

3.3. Etude de la cinétique symbiotique

L'étude de la cinétique de la symbiose mycorhizienne et endophytique à travers la profondeur racinaire a été réalisée pour illustrer son évolution à l'échelle spécifique (Figure 3) et variétale (Figures 4 et 5).

La figure 3 montre un comportement distinct entre les deux espèces étudiées. L'orge présente une activité symbiotique concentrée particulièrement en profondeur (40-60cm) tandis que pour le blé, celle-ci est en moyenne plus faible. Cependant, elle est plus manifeste sur l'horizon N2 (20-40cm) pour la symbiose mycorhizienne et au niveau N3(40-60cm) pour l'endophytisme.

La répartition des arbuscules dans les différents horizons du sol est aléatoire pour l'ensemble du matériel végétal retenu contrairement à celle des vésicules qui est plus uniforme. En effet, la majorité des variétés présente des vésicules sur toute la profondeur racinaire étudiée (0-60cm), excepté Rihane 03 (orge) qui n'en porte pas en surface (0-20cm) et Bidi17 (blé dur) en profondeur (40-60cm).

Les champignons endophytes sont également bien répartis sur la trajectoire du blé dur, alors que pour l'orge, ils sont absents entre 20 et 40cm et faiblement présents pour les autres niveaux. Afin de cerner le comportement de chacune des variétés, nous avons suivi leur cinétique (Figures 4 et 5).

Les variétés d'orge ont un comportement racinaire différent (Figure 4). Rihane 03 a une activité profonde ce qui apparaît à travers tous les paramètres symbiotiques qui se trouvent au niveau N3 (40 -60cm). Son activité mycorhizienne est plus faible par rapport à celle de Saida 183 dont les taux de mycorhization, d'arbuscules et de vésicules atteignent 100% et qui sont répartis sur toute la profondeur racinaire.

Quant à l'activité endophytique, elle est faible pour les deux variétés. Chez le blé dur, les variétés Ardente et Waha ont une forte activité symbiotique. Le seuil le plus élevé se situe au niveau N2 (20-40cm) pour la symbiose mycorhizienne. Pour ce qui est de l'activité endophytique, elle est superficielle pour Waha 03 N1 (0-20) et profonde pour Ardente N3 (40-60cm).

La variété Vitron, elle, présente une activité symbiotique moyenne comparativement à celles citées ci-dessus. Elle est superficielle (0-20cm) mais la majeure partie de ses vésicules sont stockées au niveau (40-60cm). Son activité endophytique est plus faible, superficielle et s'étale jusqu'à la profondeur. Quant à Bidi17, son activité

symbiotique mycorhizienne est faible, profonde, (40-60cm) mais les vésicules sont localisées superficiellement tandis que l'endophytique est moyenne.

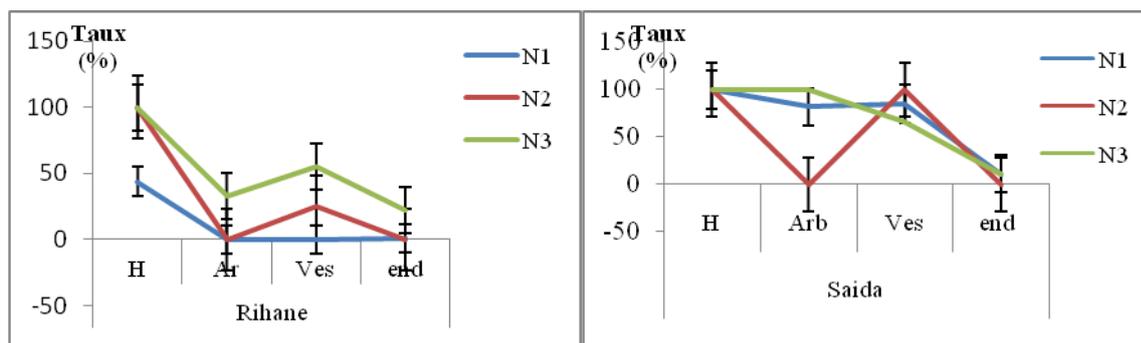


Figure 4. Cinétique racinaire de la symbiose mycorhizienne et endophytique des variétés d'orge sur les différentes profondeurs racinaires — *Root kinetics of mycorrhizae and endophyte symbiosis of barley varieties at different root depths.*

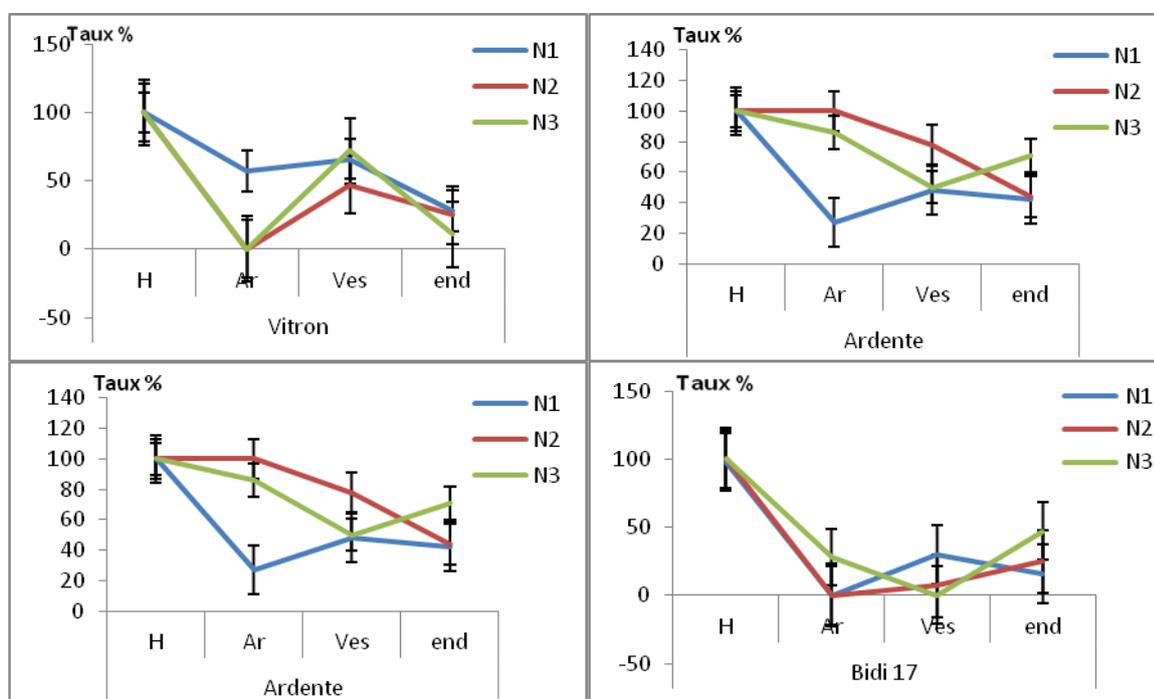


Figure 5. Cinétique racinaire de la symbiose mycorhizienne et endophytique des variétés de blé dur sur les différentes profondeurs racinaires — *Kinetics of root mycorrhizae and endophyte symbiosis of durum wheat at different root depths.*

3.4. Interaction entre la symbiose mycorhizienne et endophytique

Une étude d'ACP est effectuée dans le but d'illustrer l'interaction entre les différents paramètres symbiotiques des espèces et variétés considérées. Dans ce sens, la corrélation de Pearson (Tableau 6) montre une corrélation positive et significative entre un paramètre de la symbiose mycorhizienne (Arb%) et endophytique (endo%) uniquement chez le blé dur.

La présentation des paramètres sur le plan (1,2) de l'ACP fait apparaître trois groupes chez le blé répartis comme suit (Figure 6) :

-le **groupe A** comprend la variété française Ardente qui a une symbiose endophytique et mycorhizienne élevée sur toute la profondeur racinaire avec les deux variétés Vitron (espagnole) et Waha 03 (syrienne) qui présentent quant à elles une interaction symbiotique très variable. Vitron est plus mycorhizée en surface N1 (0-20) alors que Waha (03) est plus endophytée en surface et sa mycorhization est plus profonde N2 (20-40).

-le **groupe B** est représenté par Bidi 17 (locale) avec une très faible symbiose mycorhizienne (Arb 9% ; Ves 12%).

-le groupe AB est un groupe intermédiaire reflétant une large variabilité entre les niveaux de profondeur et formé par les variétés Vitron au niveau N2 et N3 (20-60 cm) et Bidi17 N3 (40-60 cm) et présentant une symbiose racinaire moyenne.

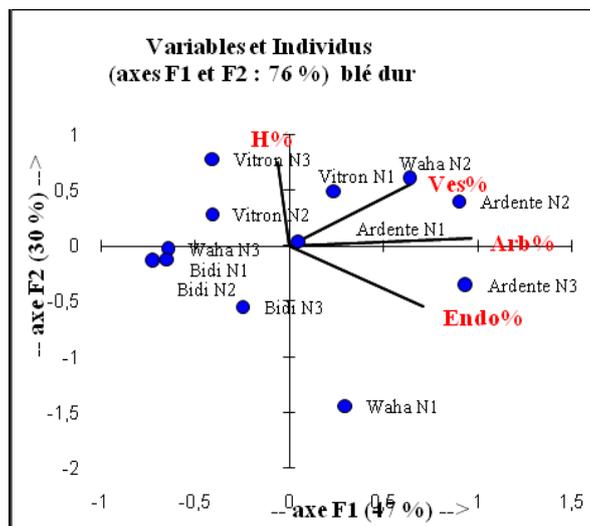


Figure 6. Présentation sur le plan (1,2) de l’ACP des paramètres symbiotiques pour tous les niveaux de profondeurs et variétés étudiés (n=18) — *Presentation on the CPA plan symbiotic settings for all levels and varieties studied depths*

Tableau 6. Matrice de corrélation chez le blé dur — *The correlation matrix at the durum wheat*

	H%	Arb%	Ves%	Endo%
H%	1	0,04	0,07	-0,19
Arb%	0,04	1	0,59	0,64
Ves%	0,07	0,59	1	-0,02
Endo%	-0,19	0,64	-0,02	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)

4. Discussion

La présence d’une infection mycorhizienne plus importante que celle liée aux champignons endophytes chez l’ensemble du matériel végétal étudié est une réponse au caractère d’aridité de la région (Nouaim et al., 1994) sachant que celle-ci est soumise à de faibles précipitations annuelles de l’ordre de 348 mm (Labani, 2005) et à la présence d’un taux de calcaire moyen à élevé (Taibi - Hadj Youcef, 2009). Ce résultat est en accord avec les données de la littérature où il est bien établi qu’au stade précoce (tallage), les mycorhizes permettent d’optimiser l’acquisition du phosphore par les racines dans des sols pauvres ou calcaires (Castillo et al., 2012). En outre, la priorité temporelle et spatiale exprimée par les variétés étudiées pour les champignons mycorhiziens au dépens des endophytes est confirmée par les travaux de Keenan et ses collaborateurs (2007) qui rapportent que la dominance des mycorhizes au début du cycle végétatif constitue une prédisposition du champignon à interagir avec son hôte pour assurer sa survie et affronter un éventuel stress d’ordre abiotique et même biotique lié à l’attaque des champignons endophytes pathogènes et même contre les nématodes (Jumponen . 2001 ; Castillo et al., 2012).

Le taux de mycorhization observé est basé principalement sur la présence des hyphes non septés à l’intérieur du cortex, lesquels constituent la principale source d’inoculum en présence des plantes hôtes quand le sol n’est pas perturbé (Kabir , 2005). Bien qu’élevé au sein de toutes les variétés et profondeurs énumérées, celui-ci n’est pas significativement corrélé avec les vésicules et/ou les arbuscules qui constituent les parties actives de ces hyphes assurant soit les échanges entre les partenaires (arbuscules) ou le stockage des nutriments pour le champignon (vésicules).

Le nombre de vésicules est supérieur à celui des arbuscules, elles sont présentes même à des niveaux de profondeurs racinaires où il y a absence d’arbuscules. Sachant que les vésicules sont des structures formées à l’extrémité ou au milieu des hyphes du cortex racinaire, elles peuvent être inter ou intracellulaires (Brundrett et al ., 1996). Elles contiennent des réserves lipidiques accumulées à la suite des échanges effectués avec les

arbuscules qui dégénèrent après quelques semaines et leur transfèrent également les assimilats carbonés issus des plantes hôtes. Ces produits de synthèse se révèlent abondants à des périodes où la plante ne les utilise pas, comme en début de cycle. C'est peut être ce qui justifie l'abondance des vésicules à ce stade ; cependant, si l'observation est réalisée au stade épiaison, les résultats seraient probablement différents (Al-Karaki et al., 2004).

La répartition aléatoire des vésicules et des arbuscules le long du prolongement racinaire est en relation avec l'itinéraire technique. En effet, les mycorhizes descendent aussi profondément dans le sol que les racines, à condition qu'il n'y ait pas de facteurs inhibant la stimulation de leurs propagules infectieuses (Douds, 2004). Ainsi, les pratiques culturales réalisées au niveau de la parcelle expérimentale peuvent avoir un impact négatif sur les communautés de champignons MVA (Gosling et al., 2006).

Il en ressort que la jachère travaillée ayant précédé l'installation de l'essai produit un impact négatif sur le nombre de propagules viables contenues dans le sol. Egalement, le labour pratiqué pour ses nombreux avantages (répression des adventices, nivellement du sol, incorporation des engrais, réchauffement plus rapide du sol) provoque la destruction perpétuelle du réseau d'hyphes et l'enfouissement des propagules en profondeur (Oehl et al., 2005). Kabîr (2005) suggère que ces pratiques ralentiraient la colonisation des plantes et l'exploration du sol par les champignons MVA. Selon Jasper et al. (1991), le travail du sol se traduit généralement par une perte globale de la diversité des champignons MVA dans l'horizon labouré ou un changement dans la structure des communautés des champignons mycorhiziens à vésicules et à arbuscules (Jansa et al., 2003). Ceci s'établit par élimination de certaines familles clés comme les Acaulosporaceae et les Gigasporaceae qui sont souvent plus abondantes en absence de perturbations (Daniell et al., 2001).

Dans le cas de cette expérimentation, les espèces et les variétés ont interagi différemment avec la flore mycorhizienne de leur rhizosphère, ce qui s'est traduit par une formation très variable de vésicules et d'arbuscules.

En effet, le facteur de dépendance mycorhizienne varie selon l'environnement, le champignon et la plante (Plenchette et al., 1983, Essiane Ondo 2014). Le comportement mutualiste contrasté des variétés peut être en relation avec plusieurs points tels que :

- la stratégie d'adaptation de la variété aux contraintes du milieu comme le cas de Saida 183 qui appartenant à la région d'étude, présente un caractère xérophyte. En effet, elle présenterait différents mécanismes d'adaptation au stress hydrique (Khalidoun et al., 1990 ; Fernandez, 1992). Son taux élevé d'arbuscules révèle sa capacité d'interagir avec les champignons mycorhizogène indigènes en dépit d'un taux élevé de calcaire (Taibi Hadj - Youcef, 2009). C'est cette caractéristique qui lui permet de faire face aux différentes contraintes climatiques et édaphiques contrairement à la variété syrienne Rihane 03 laquelle est précoce et échappe à la sécheresse en raccourcissant son cycle. L'indice de sensibilité à la sécheresse de cette dernière est élevé (Khalidoun et al., 1990 ; Taibi Hadj-Youcef et al., 2003) ce qui par conséquent, ne lui confère aucune aptitude à se prémunir contre le stress avant son installation.
- L'effet contrasté des variétés peut être en relation avec la morphologie de l'appareil souterrain par ce que la fréquence de l'infection suit le modèle de production de la biomasse racinaire (Castillo, 2012). Ceci se justifie chez le blé dur avec les variétés Ardente (française) et Waha (syrienne) qui présentent un long système racinaire (Taibi Hadj-Youcef et al 2003) et on observe un taux d'échange (arbuscules) très élevé sur une profondeur allant de 0- 60 cm pour Ardente, et 0- 40cm pour waha03.
- Il est à noter que Ardente est classée comme étant une variété sensible à la sécheresse (Taibi Hadj-Youcef et al 2003) car elle ne présente aucun critère d'adaptation (morphologique ou physiologique). Cependant, à travers cette étude, nous avons découvert sa grande capacité symbiotique ce qui lui confère une aptitude d'adaptation aux différents stress à condition qu'elle soit conduite selon un itinéraire lui permettant d'exprimer ses capacités (techniques culturales simplifiées).
- Quant à la variété algérienne Bidi17, elle présente un enracinement profond et c'est ce qui explique sa profonde cinétique de symbiose mycorhizienne mais cette dernière est faible (Arb 9% et Ves 12%). Elle se caractérise par un mécanisme de tolérance à la sécheresse basé sur l'accumulation de solutés servant à l'ajustement osmotique en cas de stress hydrique (Taibi Hadj - Youcef et al., 2003). Sachant que l'essai s'est déroulé dans des conditions humides, ceci n'a pas incité la variété à exprimer son caractère adaptatif et d'établir une réelle mycorhization (présence d'arbuscules).

- Pour ce qui est de Vitron (espagnole), Un nombre de racines principales élevé est enregistré (Taibi Hadj -Youcef et al., 2003). Sa mycorhization (arbuscules) superficielle [0- 20cm] serait en relation avec cette caractéristique rhizogène. Quant au stockage des réserves, il est localisé en profondeur (vésicules).

- L'interaction significative entre la symbiose endophytique et mycorhizienne vérifiée chez les variétés de blé dur montre que ces dernières réagissent simultanément avec les deux types de champignons à cause de leur sensibilité aux maladies et particulièrement waha, qui est très sensible à la rouille et qui se trouve dans le cadran des endophytes (Figure 06).

Les dark septa endophytes sont les plus présents ainsi que Néotyphodium dont la présence est corrélée à la tolérance à la sécheresse vérifiée chez deux espèces de graminées agronomiques ; la fétuque élevée et le ray-grass anglais (Belesky et Malinowski, 2000).

5. Conclusion

Cette étude a été menée dans un but de quantifier la symbiose racinaire de 6 variétés de céréales (quatre de blé dur et deux d'orge) largement cultivées en Algérie et ayant des origines et des comportements adaptatifs différents.

La méthode de quantification de McGonigle nous a permis de connaître le niveau et la dynamique des interactions de la plante hôte (blé et orge) avec ses partenaires fongiques, endophytiques et mycorhiziens.

Au stade précoce, c'est-à-dire 10 semaines après l'installation de l'essai, dans la station expérimentale de l'ITGC de Saida, les résultats révèlent un taux de mycorhization élevé pour l'ensemble du matériel végétal comparativement à un taux d'endophytisme plus faible. La comparaison entre espèces étudiées fait ressortir un taux d'endophytisme plus important chez le blé par rapport à l'orge. Notons également que ce résultat est corrélé positivement avec le taux d'arbuscules.

L'analyse des taux d'infection ainsi que de la cinétique de l'activité symbiotique réalisée à travers la profondeur racinaire, a permis de déceler une différence variétale qui est en relation avec le comportement adaptatif et le modèle racinaire de chaque variété, et ce, avec l'itinéraire technique suivi.

L'observation du comportement symbiotique a permis de déceler une aptitude adaptative de la variété de blé dur, Ardente connue pour sa sensibilité aux contraintes abiotiques, ce qui envisagerait de la reconduire dans un cadre d'intensification durable avec des conduites permettant de valoriser et d'améliorer les services écosystémiques.

Cette étude est préliminaire et devrait être complétée par d'autres qui viseraient à mieux valoriser le comportement symbiotique de la collection nationale des variétés de céréales cultivées, permettant de mettre au point un programme de sélection dans l'optique d'élaborer une stratégie appropriée de produire plus dans une agriculture respectueuse de l'environnement.

Références bibliographiques

- Al-Karaki G., McMichael B. & Zak, J. 2004. Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza*, 14, 263–269.
- Augé R., 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 11, 3–42.
- Baldy C., 1986. Comportement des blés dans les climats méditerranéens. *Ecol Mediterr* XII, fasc 3–4, 73–88.
- Belesky, D. P., and D. P. Malinowski. 2000. Abiotic stresses and morphological plasticity and chemical adaptations of Neotyphodium-infected tall fescue plants. In *Microbial endophytes*, eds. C. W. Bacon and J. F. White, Jr., pp. 455-485. New York: Marcel Dekker.
- Benlaribi M., Monneveux P. & Grignac P. 1990. Etude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf). *Agronomie*, 10: 305–322.
- Boufenar-Zaghouane F. & Zaghouane O. 2006. Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie, blé dur, blé tendre, orge et avoine. *ITGC*, Alger.
- Boyetchko S.M. & Tewari J. P. 1995. Susceptibility of barley cultivars to vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Can. J. Plant Sci*, 75, 269–275.
- Brundrett M., Bougher N., Dell B., Grove T. & Malajczuk N. 1996. Working with Mycorrhizas. In *Forestry and Agriculture*. *ACIAR, Monograph* 32, 374 + x p.
- Castillo C.G., Puccio F., Morales D., Borie F. & Sieverding E. 2012. Early arbuscular mycorrhiza colonization of wheat, barley and oats in Andosols of southern Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(3), 511–524.
- Clay K., 2004. Fungi and the food of the gods. *Nature* 427.PP: 401-402

- Daniell T.J., Husband R., Fitter A.H. & Young J P W. 2001. Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi colonising arable crops. *FEMS Microbiology Ecology*, 36, 203–209.
- Douds. 2004. Utilités des mycorhizes. *Centre de recherche régionale de l'Est* (USDA-AES). 5p
- Eberhart S.A et Russel W.A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop sc*, 6, 36-40.
- ESSIANE ONDO .O. 2014. Caractérisation d'une collection de variétés anciennes de blé pour leur réponse à la mycorhization et impact sur la qualité du grain. Thèse de Doctorat en Science de la vie Spécialité Biologie végétale ; Université de Bourgogne Unité mixte de Recherche 1347 Agroécologie.
- Fernandez G.C.J. 1992. Effective selection criteria for assessing stress tolerance. In Kuo,C.G, (Ed.) Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress, Publication, Tainan, 115–121.
- Finlay K.W., et Wilkinson E.N.1963. The analysis of adaptation in plant breeding program. *Aust.J.Agri Res*, 14, 742-754.
- Fortin J.A., Plenchette C. & Piché Y. 2013. Les mycorhizes. *La nouvelle révolution verte*. 138p
- Gosling P., Hodge A., Goodlass G. & Bending G.D. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture. Ecosystems and Environment*, 113, 17–35.
- Jansa J., Mozafar A., Kuhn G., Anken T., Ruh R., Sanders I. & Frossard E. 2003. Soil tillage affects the community structure of mycorrhizal fungi in maize roots. *Ecology Application* 13, 1164–1176.
- Jasper D A., Abbott L.K.. & Robson A.D. 1991. The effect of soil disturbance on vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in soil from different vegetation types. *New Phytologist*, p 471–476.
- Jumponen A. 2001. Dark septate endophyte – are they mycorrhizal. *Mycorrhiza*, 11, 207 – 211. Doi 10. 1007/S 005720100112.
- Kabir .Z., 2005. Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae. *Can. J. Plant Sci.* 85: 23–29. Arbuscularmycorrhizal (AM) fungi
- Keenen M.L., Mack A. & Rudgers A. 2007. Balancing multiple mutualists: asymmetric interactions among plants, arbuscular mycorrhizal fungi, and fungal endophytes. Publication Dept of Biology, Indiana Univ, Bloomington, IN 47405, USA.11p.
- Khaloun A., Chéry J. & Monneveux 1990. Étude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez l'orge (*Hordeum vulgare* L). *Agronomie*, 10, 369–379.
- Le Houérou H.N. 1995. Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique ; Diversité biologique, développement durable et désertisation. *Options méditerranéennes*, Série B, 10, 396 p.
- Labani A. 1999. Analyse de la dynamique de l'occupation de l'espace et perspectives d'écodéveloppement : cas de la commune de Ain El Hadjar (Saida, Algérie), Sidi Bel Abbes, Magister, université Djillali Liabes (UDL).
- Lahmar, R. 1993 . Intensification céréalière dans les Hautes Plaines Sétifiennes; quelques résultats. *Cahiers Options Méditerranéennes*, Vol. 2, n° 1.
- McGonigle T.P., Miller M.H. Evans D.G., Fairchild G.L. & Swan J. 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular arbuscular fungi. *New Phytologist* 115, 1569–1574.
- Nouaim R. & Chaussaud R. 1994. Mycorrhizal dependency of micropropagated argan tree (*Argania spinosa*). Growth and biomasse production. *Agroforesterie systems*, 27, 53–65.
- Oehl, F., Sieverding E., Ineichen K., Ris E. A., Boller T. & Wiemken A. 2005. Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi at different soil depths in extensively and intensively managed agroecosystems. *New Phytologist*, 273–283.
- Phillips J.M. & Hayman D.S. 1970. Improved proceeding for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans.Br. Mycol. Soc.*, 55(1), 158–161.
- Plenchette C., Fortin A. & Furlan, V. 1983. Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility. *Plant and Soil*, 199–209.
- Richards R.A. & Passioura J.B. 1981. Seminal root morphology and water use of wheat. II. Genetic variation. *Crop Sci* 21: 253-255.
- Rodriguez R.J., Redman R.S. & Henson J. 2004. The role of fungal symbioses in the adapt tion of plants to high stress environments. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 9, 261–272.
- Sieber T.J., 2007: Endophytic fungi in forest trees: are they mutualists? *Fungal Biology Review* 21. PP: 75-89.
- Smadhi & Zella. 2009. Céréaliculture en sec et précipitations annuelles ; le cas de l'Algérie du Nord. *Sécheresse* 20 (2), 199–203.
- Taibi Hadj-Youcef H., Khaldoun H. & Mekliche A. 2003. Étude comparative de la tolérance à la sécheresse de 08 variétés de blé dur et 04 variétés d'orge ; Analyse de la stabilité du rendement avec étude multilocale. *Revue Céréaliculture de l'ITGC* N° 38 1er Semestre 2003 ISSN 1011-9582.

Taibi Hadj-Youcef H., Khaldoun H., Mekliche A., Taleb F. & Khelloufi S. 2003. Étude comparative d'adaptation à la sécheresse des variétés de blé dur et d'orge. *Revue, Céréaliculture de l'ITGC* N° 39 2ème Semestre. ISSN 1011-9582.

Taibi Hadj- Youcef H. 2009. Contribution à l'étude de la tolérance à la sécheresse de quelques variétés d'orge (*Hordeum vulgare* L.) et de blé dur (*Triticum durum* Desf.) en évaluant leur capacité mycorhizogène sur des sols de la région humide du nord et de la région semi aride de la plaine intérieure de l'Algérie. Communication in meeting de Djerba Tunisie, Décembre 2009 sur la Gestion et la valorisation des ressources et applications biotechnologiques dans les agrosystèmes arides et sahariens.

Trouvelot A., Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S. 1982. Endomycorrhizae in agriculture: studies on wheat. *Les colloques de l'INRA* 5,6 mai à Dijon, 251-258.

Turner N.C. 1979. Drought resistance and daptation to water deficits in crops plants. *Stress Physiology in Crop Plants*, Mussell, H. et Staples,R.C. (éds). Wiley Intersciences, New York, 303-372.

Zeghouane O., Abdellaoui Z., El Mourid M. 2015. L'agriculture de conservation : introduction et perspectives de développement du semis directe dans les systèmes de production céréalières, une nouvelle expérience en Algérie.