

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للعلوم الفلاحية الحراش- الجزائر-

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AGRONOMIE
EL HARRACH –ALGER

THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT EN PRODUCTION VEGETALE
THÈME

Contribution à l'étude de la mycorhization du blé dur (*Triticum durum* Desf) : Impact des techniques culturales sur l'évolution de la mycorhization d'une variété locale conduite à long terme en zone semi-aride d'Algérie.

Présenté par : Hadj-youcef Taibi Hassiba

Devant le jury :

Président : MEKLIICHE Arezki (Professeur – ENSA El Harrach)

Directeur de thèse : SMAIL SAADOUN Noria (Professeur – UMMTO)

Examineurs : BOUREGHDA Houda (Professeur – ENSA El Harrach)

BENDIFALLAH Leila (Professeur – UM'BB)

22/02/2022

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail accompagné d'une profonde
reconnaissance à :*

*À la personne la plus chère à mes yeux Kafia, la femme qui m'a appris
le vrai sens de l'amour, qui m'a éduqué avec tout son amour, patience,
soutien conseils et appuis continuels, ma très chère maman ta présence
à mes côtés a toujours été ma source de force, quoique je fasse ou que je
dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit.*

*A mes chères enfants Bouchra, Aya et Moncef qui ont su patienter et
croire en moi je vous souhaite une très bonne réussite dans votre vie*

*A mon cher mari et compagnon de parcours, à toi Rachid pour tout
l'encouragement, le respect et l'amour que tu m'as offert, Je te dédis ce
travail, qui n'aurait pas pu être achevé sans ton éternel soutien et
optimisme.*

*A mon amie Karima Abdellaoui pour tout le chemin que nous avons
parcouru ensemble et les difficultés que nous avons su surmonter*

A toute ma famille.

Remerciements

Tout d'abord je remercie « Allah » le tout puissant et le miséricordieux qui m'a donné la santé, la volonté et la patience pour arriver à terme de ce long parcours pour accomplir et finaliser ce modeste travail.

Je commence par une pensée et un grand hommage à feu Mr Djemel Abderrahmane, enseignant à l'Ecole Nationale des Sciences Agronomiques qui nous a quitté le mois d'août 2021, pour sa valeureuse contribution à ce travail. Puisse Dieu Le Tout Puissant et Miséricordieux lui accorder sa Sainte Miséricorde et l'accueillir en Son Vaste Paradis.

Je remercie ma directrice de thèse Mme Smail Saadoun Noria professeur à l'UMMTO pour m'avoir orienté et initié au monde merveilleux des mycorhizes ainsi que pour la direction de cette thèse.

Mes remerciements les plus vives à madame Anissa L'ounès-Hadj Sahraoui, Maître de conférences-HDR à Université du Littoral Cote d'Opale (ULCO) pour m'avoir permis de faire un stage au sein de son équipe de recherche « Interactions Plantes- Champignons et Remédiation » à l'Unité de Chimie Environnementale et Interactions sur le vivant (UCEIV) à Calais. Egalement pour le long parcours que j'ai effectué avec elle jusqu'à l'aboutissement d'une publication scientifique, ses conseils et orientations ainsi que ses encouragements m'ont permis d'apprendre d'avantage et d'avancer dans mes travaux de recherches.

Je remercie madame Sonia Labidi Enseignant-Chercheur à l' Institut National Agronomique de Tunisie et post-doctorante à l'UCEIV pour m'avoir appris à extraire les lipides et pour toute sa collaboration et son soutien.

Je remercie le personnel des stations de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif et Saïda pour leur collaboration, sans oublier le personnel du laboratoire centrale des sols à leur tête Mme Dekkiche pour toute l'aide qu'ils nous ont fournie.

Les mêmes remerciements vont au personnel du laboratoire de pédologie de l'INRAA pour leur collaboration.

Je remercie très sincèrement Mr Mekliche Arezki professeur à l'Ecole Nationale des Sciences Agronomiques d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

De même, mes remerciements sont adressés à Mesdames Bendifellah Leïla et Boureghda Houda professeurs respectifs à l'université de M'Hamed Bougara et l'Ecole Nationale des Sciences Agronomiques d'avoir accepté d'examiner cette thèse doctorale.

Enfin, mes remerciements les plus sincères et les plus chaleureux vont à ma famille et mes collègues de l'UMMTO et l'UMBB qui m'ont encouragé, soutenu et ont crus en moi en toutes circonstances.

Enfin Par ces quelques lignes, j'espère être parvenue à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse, en espérant n'avoir oublié personne...

SOMMAIRE

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale.....	1
PARTIE 1 :SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre 1: le blé dur	6
1.1. Généralités.....	6
1.2. Caractéristiques biologiques	6
1.2.1. Morphologie de la plante.....	6
1.2.2. Evolution du grain : germination et développement de la plante.....	9
Chapitre 2 : conduite de la culture du blé dur	11
2.1. Notion d'itinéraire technique.....	11
2.1.1. Le choix variétal.....	11
2.1.2. La place du blé dur dans la rotation	12
2.2. L'itinéraire technique du blé dur dans l'agriculture conventionnelle	14
2.2.1. Le travail conventionnel du sol	15
2.2.2. Entretien de la culture.....	18
2.2.2.1. La fertilisation	18
2.2.2.2. Le désherbage.....	19
2.2.2.3. Protection phytosanitaire.....	19
2.3. Itinéraire technique du blé dur dans une agriculture de conservation.....	20
2.3.1. Le travail minimum et le non labour	21
Chapitre 3 : Étude comparative entre le labour et le non labour	22
3.1. La recherche d'une alternative au labour	22
3.2. Les spécificités de la technique du non labour.....	22
3.3. Effet du semis direct sur l'installation et la productivité de la culture du blé dur.....	24
3.4. Effet du semis direct sur les propriétés du sol.....	25
3.4.1. Les réserves hydriques du sol.....	25
3.4.2. Les caractéristiques physiques du sol.....	25
3.4.2.1. La structure du sol	26
3.4.2. 2. La densité apparente du sol	26
3.4.3. Les caractéristiques chimiques du sol	27
3.4.3.1. La matière organique.....	27
3.4.3.2. Les éléments nutritifs du sol.....	27
3.4.4. Les caractéristiques biologiques du sol	29
Chapitre 4 : la mycorhization du blé	30
4.1. Généralités sur la symbiose mycorhizienne	30
4.2. Symbiose endomycorhizienne à arbuscules et vésicules	31
4.2.1. Classification des champignons mycorhiziens à arbuscule (CMA)	31
4.2.2. Structures spécifiques aux endomycorhizes à arbuscules	33
4.2.2.1. Les hyphes fongiques	34
4.2.2.2. Les arbuscules	34
4.2.2.3. Les vésicules	35
4.2.2.4. Les spores	35
4.2.3. Établissement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules	36
4.2.3.1. Phase A- symbiotique.....	37
4.2.3.2. Phase pré-symbiotique	37
4.2.3.3. Phase symbiotique.....	37

4.3. Mycorhization du blé	38
4.3. 1. Différences génétiques des capacités de mycorhization	38
4.3.2. Développement de la mycorhization en fonction du cycle du blé	40
4.3.3. Rôles de la mycorhization du blé	41
4.3.3.1. Rôle dans l'absorption et le transfert des nutriments du sol.....	41
4.3.3.2. Rôle dans l'adaptation au stress abiotiques.....	42
4.3.3.3. Rôle dans l'adaptation au stress biotiques.....	46
4.3.3.4. Rôle dans la structuration du sol	46
4.3.4. Potentiel infectieux mycorhizogène (PIM) du sol.....	47
4.3.4.1. Gestion du potentiel mycorhizien infectueux endogène (PMI).....	48
2.3.4.1.1. Effet du précédent cultural sur le PMI	48
4.3.4.1.2. Effet des adventices des cultures sur le PMI.....	48
4.3.4.1.3. Effet des techniques culturales sur le PMI	49
4.3.4.1.4. Effet des conditions climatiques sur le PMI.....	50
4.3.4.1.5. Effet des caractéristiques édaphiques sur le PMI.....	50
4.3.4.2. Amélioration du PMI par les inoculum mycorhiziens.....	51
4.3.5. Interaction des champignons mycorhiziens avec les organismes microbiens du sol	52
4.3.5.1. Interaction des champignons mycorhiziens avec les Plant Growth-Promoting Rhizobacteria PGPR.....	53
4.3.5.2. Interaction des champignons mycorhiziens avec les Dark Septate Endophytes (DSE).....	54
4.3.5.2. 1. Définition :	54
PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES	
2.1. Caractéristiques de l'expérimentation	55
2.2. Localisation géographique des sites expérimentaux	55
2.2. 1. Station expérimentale de l'ITGC de Saida.....	55
2.2. 2. Station expérimentale de l'ITGC de Sétif	55
2.3. Caractéristiques climatiques des stations expérimentales	57
2.4. Caractéristiques pédologiques des sites expérimentaux.....	59
2.5. Conduite de l'expérimentation	59
2.5. 1. Matériel végétal.....	59
2.5. 2. Conduite de l'essai expérimental	61
2.6. Mode de prélèvement des échantillons	64
2.6. 1. Essai de Ain El Hadjar (Saida).....	64
2.6. 2. Essai R'Mada (Sétif)	64
2.7. Paramètres observés et méthodes utilisées	65
2.7. 1. Propriétés physico-chimiques du sol.....	65
2.7. 2. Colonisation racinaire	65
2.7.3 Biodiversité des espèces CMA.....	67
2.7.4. Dosage des bio-marqueurs du sol (analyses des acides gras)	67
2.7.5. Évaluation du rendement en grains	68
2.7.6. Analyses statistiques	68
PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	
3.1. Expérimentation de la station de Sétif.....	70
3.1.2. Résultats	70
3.1.2.1. Caractéristiques physicochimiques du sol de la parcelle expérimentale.....	70
3.1.2.2. Effet des techniques culturales sur la biomasse fongique du sol	71
3.1.2.3. Colonisation racinaire par les champignons mycorhiziens arbusculaires	73
3.1.2.4. Colonisation racinaire par les champignons Dark Septate Endophytes (DSE)	76

3.1.2.5. Effet des techniques culturales sur l'évolution des paramètres de mycorhization.....	77
3.1.2.5.1. Taux de mycorhization total (H %).....	79
3.1.2.5.2. Taux d'arbuscules (A %).....	80
3.1.2.5.3. Taux de vésicules (V %).....	80
3.1.2.6. Effet des techniques culturales sur la diversité des communautés mycorhiziennes arbusculaires.....	82
3.1.2.6.1. Densité et diversité des spores observées dans le sol rhizosphérique de la variété de blé Boussalem.....	82
3.1.2.6.2. Présence des espèces de CMA dans les traitements semis direct et semis conventionnel.....	86
3.1.2.7. Comparaison de la colonisation racinaire par les CMA et les DSE.....	88
3.1.2.7.1. Evolution du rendement en grains.....	88
3.1.2.7.2. Identification des caractères de covariables significatifs sur la production de rendement.....	89
3.1.2.7.3. Relation entre variables.....	90
3.1.3. Discussion.....	91
3.1.3.1. Effet des techniques culturales sur la composante organique du sol.....	91
3.1.3.2. Effet des techniques culturales sur la biomasse fongique du sol.....	92
3.1.3.3. Effet des techniques culturales sur l'évolution de la symbiose mycorhizienne.....	94
3.1.3.4. Effet des techniques culturales sur la structure des communautés mycorhiziennes arbusculaires.....	96
3.1.3.5. Interaction entre la symbiose mycorhizienne et endophytique.....	97
3.1.3.6. Rendements du blé.....	98
3.1.4. Conclusion.....	100
3.2. Expérimentation de Saida.....	101
3.2.1. Résultats.....	101
3.2.1.1. Caractéristiques pédologiques de la parcelle expérimentale.....	101
3.2.1.2. Quantification des paramètres symbiotiques racinaires avec les CMA et les DSE chez les variétés de blé dur et d'orge étudiées.....	102
3.2.1.3. Étude de la variation paramétrique.....	104
3.2.1.4. Etude de la cinétique symbiotique.....	107
3.2.1.5. Interaction entre la symbiose mycorhizienne et endophytique.....	109
3.2.2. Discussion.....	110
3.2.3. Conclusion.....	113
4. Conclusion générale et Perspectives.....	115
Références bibliographiques.....	142
Publications	
Annexes	
Résumés	

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Système racinaire fasciculé d'une céréale	7
Figure 2	La morphologie d'une plante de blé	8
Figure 3	Structure schématique d'un grain de blé	8
Figure 4	Cycle de développement du blé dur	10
Figure 5	Itinéraire technique du blé dur	14
Figure 6	Présence d'un couvert végétal en surface (Mulch ou paillage)	22
Figure 7	Structure d'un sol dans un système de non labour	25
Figure 8	Principaux types mycorhiziens	30
Figure 9	Classification des champignons mycorhiziens à arbuscules	31
Figure 10.	Illustration de la diversité de couleur et de forme des spores et des hyphes suspenseurs de CMA isolés	32
Figure 11	Représentation schématique d'un apex racinaire mycorhizé par un champignon arbusculaire	32
Figure 12	Aspect d'un arbuscule	34
Figure 13	Aspect d'une vésicule	34
Figure 14	principales étapes du développement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules	35
Figure 15	Biofertilisants	50
Figure 16	Mycorhization d'un essai de céréales	51
Figure 17	Observation microscopique de DSE <i>Acrocalymma vagum</i>	53
Figure 18	Structures de DSE observées dans les racines de blé	53
Figure 19	Localisation géographique des sites expérimentaux	56
Figure 20	Diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gaussen (1953) des zones d'étude (Période 1980-2009)	58
Figure 21.	Variation des conditions climatiques durant l'expérimentation au niveau des sites expérimentaux (Office National de météorologie)	59
Figure 22	Variété de blé dur Bousselam utilisée dans l'essai R'Mada (Sétif)	61
Figure 23	Dispositifs expérimentaux des essais de Ain El Hdjar à gauche et R'Mada à droite	61
Figure 24	Photos des deux semoirs utilisés dans l'expérimentation	62
Figure 25	Parcelles expérimentales de l'essai de R'Mada (Sétif)	63
Figure 26	Taux de mycorhization totale (H), arbuscules (A) et vésicules (V) (McGonicle et al., 1990).	66
Figure 27	Effet du semis direct sur les niveaux de matière organique du sol	71
Figure 28	Influence des traitements, semis conventionnel (SC) et semis direct (SD) à la fin de la troisième année d'essai, sur la teneur en bio-marqueurs lipidiques (C16:1w5) spécifiques des champignons mycorhiziens arbusculaires et (C18:2 w 6,9) spécifiques des champignons ectomycorhiziens et saprotrophes dans le sol après une culture de blé dur	73
Figure 29	Observations microscopiques des différentes structures mycorhiziennes (x400)	74
Figure 30	a) vésicules au stade épiaison (semis conventionnel (A4 /2012) (x400) b) vésicules au stade laiteux (semis direct (A3/2011) (x 400)	74
Figure 31	Cellules auxiliaires (O) stade laiteux (semis direct (A3 /2011) (x100)	75

Figure 32	a) et (b) sporocystes au stade épiaison (semis conventionnel (A4 /2012) (d) ; et (f) sporocystes au stade laiteux (semis conventionnel A3 /2011) (x400).	75
Figure 33	Mycorhization de type <i>Arum</i> sur prélèvements racinaires au stade laiteux semis direct (A2/ 2010)	76
Figure 34	microscélérotés et hyphes mélanisés de DSE observés au stade épiaison (A4/2012) (semis conventionnel); et au stade maturation (A2 /2010) (sur les deux traitements) (x400)	76
Figure 35	<i>Neotyphodium sp</i> au stade épiaison (semis conventionnel (A4 /2012) et maturation (semis direct (A2/2010) (x400)	77
Figure 36	<i>Torula sp.</i> au stade maturation (semis conventionnel (A2 /2010) (x400)	77
Figure 37	Influence des traitements semis conventionnel (SC) et semis direct (SD) sur l'évolution des paramètres de mycorhization (taux de mycorhization total, pourcentage d'arbuscules et pourcentage de vésicules) durant les trois dernières années de suivi de l'essai et à travers les différents stades de développement	81
Figure38	Spores isolées à partir du sol rhizosphérique de la variété Boussalem observées sous loupe binoculaire x 40.	82
Figure39 a	Structures morphologiques de spores de CMA isolées à partir du sol rhizosphérique de la variété de blé dur Boussalem observées au microscope optique	84
Figure39 b	Structures morphologiques de spores de CMA isolées à partir du sol rhizosphérique de la variété de blé dur Boussalem observées au microscope optique	85
Figure 40	Influence des traitements semis conventionnel (SC) et semis direct (SD) sur l'abondance relative des familles de Glomales	87
Figure 41	Effet du semis conventionnel (SC) et du semis direct (SD) sur la colonisation racinaire par les champignons mycorhiziens arbusculaires et les champignons endophytes septés foncés durant la cinquième année d'essai sur trois stades de croissance.	88
Figure 42	Evolution du rendement en grain du blé durant les années d'expérimentation dans les deux traitements (Semis direct et semis conventionnel	89
Figure 43	Fente de retrait plus importantes en semis conventionnel. Résidus de récolte en surface observés en semis direct	92
Figure 44	Anastomoses racinaires observées au niveau du semis direct en quatrième année d'essai A4	96
Figure 45	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)	105
Figure 46	Evolution variétale des paramètres de mycorhization et d'endophytisme par niveau de profondeur racinaire	106
Figure 47	Cinétique symbiotique racinaire moyenne des variétés d'orge (a) et de blé dur (b) sur les différentes profondeurs racinaires	107
Figure 48	Cinétique racinaire de la symbiose mycorhizienne et endophytique des variétés d'orge sur les différentes profondeurs racinaires	107
Figure 49	Cinétique racinaire de la symbiose mycorhizienne et endophytique des variétés de blé dur sur les différentes profondeurs racinaires.	108
Figure 50	Présentation sur le plan (1,2) de l'ACP des paramètres symbiotiques pour tous les niveaux de profondeurs et variétés étudiés (n=18)	110

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Variétés de blé dur recommandées en fonction de leurs zones d'adaptation nationale.	11
Tableau 2.	Variétés de blé dur algériennes les plus répandues et type de précocité	11
Tableau 3	Avantages et inconvénients des principaux précédents culturaux du blé en Algérie	12
Tableau 4	Principaux précédents culturaux recommandés pour le blé dur en fonction des zones de culture	14
Tableau 5	Facteurs du semis	16
Tableau 6	Exportations en éléments minéraux du blé dur	17
Tableau 7	Principales caractéristiques des zones expérimentales	57
Tableau 8	Caractéristiques du matériel végétal utilisé	60
Tableau 9	Conditions culturales appliquées aux parcelles de l'essai expérimental de Sétif	63
Tableau 10	Caractéristiques physicochimiques du sol de la parcelle expérimentale	70
Tableau 11	Evolution des composantes organiques du sol	72
Tableau 12	résultats de l'analyse de variance sur le dosage des marqueurs lipidiques des Phospholipides et neutrolipides des acides gras (nanomoles/g) de sol prélevé en fin de la troisième année.	72
Tableau 13a	Carrés moyens de l'analyse de la variance de la colonisation racinaire mycorhizienne totale H (%), pourcentage d'arbuscules A (%) et de vésicules V (%) estimé à trois stades de croissance sous deux systèmes de culture (sans labour et labour conventionnel).	78
Tableau 13b.	Carrés moyens de l'analyse combinée de la variance de la colonisation racinaire mycorhizienne totale H (%), pourcentage d'arbuscules A (%) et de vésicules V (%) estimé à trois stades de croissance sous deux systèmes de culture (sans labour et labour conventionnel).	78
Tableau 14	Effet du travail du sol conventionnel (SC) et du système de culture sans labour (SD) sur le taux de colonisation racinaire totale (H %), le pourcentage d'arbuscules (A %) et de vésicules (V %) estimés durant trois stades de croissance durant trois années de culture successives, régressions significatives ($b \pm s.e.$) et coefficient de détermination (R^2)	79
Tableau 15	Les espèces de CMA isolées des parcelles expérimentales des traitements du semis direct SD et du semis conventionnel SC durant la dernière année d'essai	86
Tableau 16	Carrés moyens de l'analyse combinée de la variance du rendement en grains	88
Tableau 17	Analyses de régressions multiples, en utilisant la procédure stepwise, pour chaque caractère sur le rendement dans les traitements semis direct et semis conventionnel. Seuls les coefficients significatifs (b) sont indiqués avec leurs coefficients de détermination cumulés (R^2)	90
Tableau 18	caractéristiques physicochimiques du sol de la parcelle expérimentale	102
Tableau 19	Variation des paramètres de mycorhization et d'endophytisme chez les variétés d'orge étudiées	102
Tableau 20	Variation des paramètres de mycorhization et d'endophytisme chez les variétés de blé dur étudiées	103
Tableau 21	Résultats des paramètres de mycorhization et d'endophytisme par niveau d'enracinement	104

Tableau 22	Résultats de l'analyse statistique des paramètres de mycorhization et d'endophytisme par niveau d'enracinement	104
Tableau 23	Matrice de corrélation entre les paramètres symbiotiques chez le blé dur	109

LISTE DES ABRÉVIATIONS

(SAU) : superficie agricole utile.

(VAM) : mycorhize à arbuscules et à vésicules.

(AV) : arbuscule et vésicule.

(PPA) : pre-penetration apparatus, appareil de pré-pénétration.

(CMA) : champignon mycorhizien arbusculaire.

(MA) : mycorhize arbusculaire.

(+MA) : mycorhizé.

(-MA) : non mycorhizé.

(LSU) : large sous unité.

(ETM) : éléments traces métallique.

(RIM) : résistance induite par les mycorhizes.

(PAL) : phénylalanine ammonia-lyase.

(LTP) : lipid transferprotien.

MADR : ministère de l'agriculture et du développement rural.

ONFAA : observation nationale des filières agricoles et agroalimentaires.

Introduction générale

Introduction générale

Les céréales occupent à l'échelle mondiale une place de choix parmi toutes les autres spéculations car elles constituent la base alimentaire qui fournit l'essentiel des apports énergétiques et protéiques. En effet, le blé dur a l'avantage de fournir une grande valeur nutritionnelle suite à sa richesse en protéine et la présence du gluten qui donne aux pâtes alimentaires une meilleure tenue à la cuisson (Rotocoli et *al.*, 2000). A cet effet la culture du blé dur requière une importance primordiale dans le monde avec une récolte annuelle 763 millions de tonnes (FAO , 2020), la Chine est le plus grand producteur de blé au monde avec 131 696 392 de tonnes de volume de production par an. L'Inde arrive en deuxième position avec 93 500 000 de tonnes de production annuelle et la France avec 29 504 454 de tonnes est classée 6ème ((AtlasBig.com.2020).

En Algérie le blé est à la fois la base de l'alimentation humaine et animale, ce qui explique son importance dans l'économie nationale. C'est une culture vivrière qui assure la survie d'une grande partie de la population algérienne, il est à la base du régime alimentaire de cette dernière avec une consommation moyenne de 526 kg de blé/habitant et par jour (excluant la consommation animale); ce niveau de consommation est supérieur à la consommation mondiale moyenne qui est de 183 kg per capita et par jour (Bencharif et *al.* 2010). Il représente un apport moyen équivalent à 1505,5 kcal/personne/jour, 45,53 gr de protéine /personne/j et 5,43 gr de lipide/personne /j (Bencharif et *al.* 2010). A cet effet le blé dur occupe en Algérie une place très importante dans la superficie emblavée avec plus d'1million d'hectares (1 042 849 ha) produisant une moyenne annuelle de 20,000,000 quintaux soit un rendement variant entre 15 et 17qx (MADR, 2020).

Le blé dur comme toute la céréaliculture algérienne est une culture essentiellement pluviale conduite en extensif principalement dans les hauts plateaux à l'Est et à l'Ouest du pays et dans les plaines intérieures, ces régions sont assimilées à l'étage bioclimatique semi-aride (Baldy, 1986) et sont soumises à l'insuffisance des précipitations qui provoquent des fluctuations du potentiel de production du blé dur (Smadhi et Zella, 2009). La période de sa croissance se trouve limitée par le déficit hydrique en début et en fin de cycle combiné la plupart du temps à un stress thermique (Chennafi et *al.*, 2008a; Bouzerzour et Benmahammed, 2009).

Pour atténuer les effets de ces contraintes climatiques, l'effort se porte essentiellement sur la gestion de la culture et de l'inter culture pour mieux valoriser les précipitations (Oweis et

Tavakoli, 2004; Lahmar et Bouzerzour, 2010 ; Chennafi, 2010). L'introduction de la fumure minérale et de produits phytosanitaires avec la mécanisation complète de la culture ont permis d'améliorer les rendements de cette dernière (Lahmar, 1993). Le volet sélection variétale a pris une grande importance dans le secteur de la céréaliculture ainsi nombreux sont les travaux dans ce domaine pour la recherche de variétés de blé dur adaptées au climat semi-aride (Latreche filali et *al.* 2006). L'adaptation variétale à ces contraintes est associée à des marqueurs phénologiques, morphologiques, physiologiques et biochimiques (Hamrick and Godt, 1997 ; Khodadadi et *al.*, 2011 ; Verma et *al.*, 2014 ; Kirouani et *al.*, 2018 ; 2019). D'autres études ont porté sur la modification de la dynamique de croissance racinaire en relation avec l'adaptation des variétés cultivées dans les zones céréalières semi arides (Benlaribi et *al.* 1990 ; Khaldoun et *al.* 1990). Les racines permettent, en effet, à la plante de s'adapter à certains facteurs abiotiques grâce à des modifications morphologiques (Richards et Passioura, 1981). Cette adaptation peut se faire également à travers une association symbiotique mutualiste avec des champignons mycorhiziens arbusculaires (MA). Ces symbiotes permettent d'améliorer 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) ont démontré en sols fertilisés, l'optimisation de l'absorption de l'eau par les racines d'un le blé mycorhisé (Fortin et *al.*, 2013). L'utilisation des mycorhizes en agriculture devient donc nécessaire afin de garantir les meilleures performances des plantes avec une moindre dépendance aux engrais chimiques et pesticides (Ganugi et *al.* 2019).

Bien que l'endomycorhization 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 (Castillo et *al.*,2012).

Le maintien d'un système de production agricole fiable et durable est devenu l'une des préoccupations majeures des producteurs des régions arides et semi-arides (Bruelle et *al.*, 2017). La productivité de la culture pluviale du blé dur étant dans ces régions tributaire de l'interaction ; climat x sol x matériel végétal x pratiques culturales adoptées (Latreche filali et *al.*,2006). Pour faire face aux diverses contraintes, dont la sécheresse, de nombreux pays du monde (États-Unis, Argentine, Chili, Brésil et Australie) ont donc adopté la simplification des techniques culturelles, en supprimant le labour et en utilisant les façons superficielles ou le semis direct (Freitas et *al.*, 2013; Bellotti et *al.*, 2014). En 2007, l'extension mondiale de ce

système était d'environ 95 millions d'hectares (Lal et *al.*, 2007), et a dépassé par la suite 125 millions d'hectares (Bruelle et *al.*, 2017).

Dans le but de transférer cette expérience en Afrique du Nord, un projet de coopération sur l'adaptation de l'agriculture de conservation a été élaboré entre l'Australie (l'ACIAR) (Australian Centre for International Agricultural Research) et les pays du Maghreb. Il s'agit du CANA (Conservation Agriculture North Africa) en collaboration avec l'ICARDA (International Centre for Agricultural Research in the Dry Areas – Syria).

Dans ce cadre, le programme entrepris en Algérie, par le biais du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR), a permis à la surface céréalière emblavée en semis direct d'atteindre 5 559 ha en 2011 (Zeghouane et *al.* 2015). Néanmoins, des efforts doivent être fournis quand on sait que 3 millions d'ha de céréales sont semés annuellement et en plus de leur aridité, les régions céréalières d'Algérie, sont majoritairement caractérisées par des sols calcaires peu profonds avec de faibles niveaux de matière organique (Batouche et Labiod, 1991). La céréaliculture y est habituellement menée selon le système conventionnel de travail du sol, basé principalement sur le labour pour lutter contre les mauvaises herbes, la préparation des semis, l'incorporation de résidus de cultures et d'engrais, et l'augmentation de l'infiltration d'eau. Ce système agricole conventionnel augmente les coûts de production céréalière et menace l'érosion du sol (environ 2000 à 4000 tonnes / km² de sol sont annuellement perdues) (Arabi & Roose, 1989; Kaci et *al.*, 2017) en particulier lorsqu'il est combiné avec le surpâturage. Le labour réduit ou la pratique du semis direct combinée à la couverture du sol avec un paillis organique et la rotation des cultures sont actuellement promus comme un moyen de réduction de la dégradation des sols dans les zones semi-arides méditerranéennes (Lahmar & Bouzerzour, 2010) et se présentent donc comme une alternative pour une agriculture durable.

Suite à cela un certain nombre d'expériences et de résultats de recherche en Espagne, au Maroc et en Tunisie soulignent le rôle prépondérant du paillis organique avec semis direct dans les améliorations qui se produisent dans le sol, et suggèrent que cette pratique est une alternative plausible au travail du sol conventionnel (Mrabet, 2001; Lahmar et Arrúe, 2007; Lahmar, 2010; Vega et *al.*, 2015). Parmi les avantages de ces pratiques, nombreux auteurs citent l'amélioration de l'activité biologique et la biomasse microbienne dans les sols (Labreuche et *al.*, 2007). Celik et coll. (2011) ont précisé également que les pratiques sans labour sous un climat semi-aride ont considérablement augmenté le nombre de spores de champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) dans le sol. En effet, pour les espèces de céréales cultivées, le semis direct favorise les interactions entre le système racinaire et les

champignons symbiotiques (Jansa et *al.*, 2006; Schalamuk et al., 2006; Dimitrios et al. 2010 ; Duponnois et *al.*, 2012).

Dans ce sens, les travaux de notre thèse ont eu comme premiers objectifs d'étudier le comportement symbiotique mycorhizien de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum*) comparativement à des variétés d'orge (*Hordeum vulgare*) à un stade précoce sous des conditions naturelles de plein champ, dans une zone semi aride, selon les conduites culturales les plus communément pratiquées.

Et en second objectif, il a visé à étudier l'effet du semis direct avec couvert végétal comparativement au système de semis conventionnel sur la mycorhization d'une variété locale de blé dur conduite en plein champ durant cinq ans.

L'organisation de la présente thèse et l'articulation des différentes parties qui la composent se feront comme suit:

La partie 1 de ce manuscrit consiste en une analyse bibliographique présentant l'étude de la biologie du blé dur et de sa conduite culturale, suivie de l'étude comparative entre labour et le non labour et enfin de la mycorhization du blé dur

La partie 2 décrit les méthodologies expérimentales utilisées lors de ce travail pour répondre aux questions posées.

La partie 3 présente les résultats obtenus et leurs discussions sous forme de trois publications :

La Publication 1. C'est une étude préliminaire en plein champs permettant de comparer à un stade précoce, la mycorhization de quelques variétés de blé dur et celle de deux variétés d'orge largement cultivées en Algérie ; cet article s'intitule. **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.** Taibi Hadj Youcef H., Smail Saadoun N., Hadj Ali D.2016. Revue Agriculture. 12 (73 – 85).

La Publication 2. C'est une étude qui s'est intéressée à suivre l'évolution de la mycorhisation racinaire d'une variété locale de blé dur durant les stades évolutifs de son cycle évolutif et à quantifier l'effet des techniques culturales appliquées durant cinq années d'essai en plein champs ; cet article s'intitule. **The Influence of No-till Farming on Durum Wheat Mycorrhization in a Semi-Arid Region: A Long-Term Field Experiment.** Hadj Youcef H Taibi, Smail-Saadoun N., Labidi S, Abdellaoui K, Makhoulouf M, Laouar A, TagmountC

Benouaret, Rezki-Sekhi L, Belkebir Boukais A & Lounès-Hadj Sahraoui A 2020: Journal of Agricultural Science; Vol. 12, No. 4; 2020. doi:10.5539/jas.v12n4p77 U

La Publication 3. Concerne l'étude de l'impacte de la colonisation racinaire par les mycorhizes dans les conditions contrastées de travail du sol sur le rendement en grains ; cet article s'intitule ; **Dynamics of wheat root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi under contrasting soil tillage systems and its impact on grain yield.** Hadj Youcef Taibi H. N. Smail-Saadoun, A. Djemel 2021 : J Fundam Appl Sci. 2021, 13(1), 468-483. doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v13i1.25>

Enfin cette thèse se termine par une conclusion générale qui débouche sur les perspectives envisagées pour la poursuite de ce travail.

Partie 1

Synthèse Bibliographique

Chapitre 1: le blé dur

1.1. Généralités

Le blé appartient à la famille des Graminées (Gramineae = Poaceae), qui comprend plus 10.000 espèces différentes (Mac key, 2005). Plusieurs espèces de ploïdie différentes sont regroupées dans le genre *Triticum*, qui est un exemple classique d'allo-ployploïdie, dont les génomes huméologues dérivent de l'hybridation inter espèces appartenant à la même famille (Levy et Feldman, 2002). Le blé dur (*Triticum turgidum*ssp. *durum* Desf.) est une espèce allo-tétraploïde ($2n=28$, AABB), qui a pour origine l'hybridation suivie par un doublement chromosomique entre *Triticum urartu* (génome AA) et une espèce voisine de *Aegilops speltoides* (génome BB) (Feuillet, 2000). La domestication du blé diploïde s'est produite dans le nord du croissant fertile au Proche Orient. Le blé tétraploïde a été domestiqué dans le bassin du Jourdain, plus au sud. Le blé tétraploïde s'est diversifié dans les centres secondaires représentés par les plateaux éthiopiens, le bassin méditerranéen et la Transcaucasie (Levy et Feldman, 2002).

1.2. Caractéristiques biologiques

1.2.1. Morphologie de la plante

Le blé est une plante herbacée annuelle appartenant à la classe des Monocotylédones, à l'ordre des Poales et à la famille des Poacées (Graminées) (Brouillet et al., 2006). Il développe un système racinaire de type fasciculé (Soltner, 2005) (Figure 1). Au cours de son développement, le blé dispose de deux types de systèmes racinaires successifs : le système de racines primaires ou séminales fonctionnel dès la germination, puis le système de racines secondaires ou de tallage qui se substitue progressivement au précédent (Boulal et al., 2007).

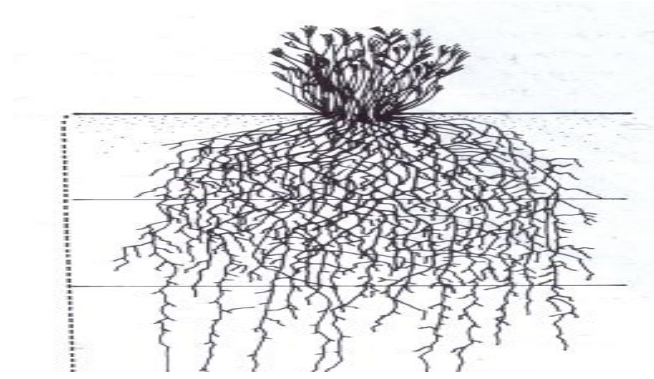


Figure 1. – système racinaire fasciculé d'une céréale (Raven et *al.*, 2007).

Chez les Monocotylédones, la structure primaire persiste durant toute la vie de la plante. Les racines primaires peuvent donc avoir un développement très important en volume et une différenciation poussée (Strullu, 1991).

Le blé dur développe en général plusieurs tiges dressées sous forme de talles, qui peuvent atteindre 1 à 1.5 m de hauteur (Nyabyenda, 2005). Ce sont des chaumes, cylindriques, contenant de longs et nombreux faisceaux conducteurs de sève. Ces faisceaux sont régulièrement entrecroisés et renferment des fibres à parois épaisses, assurant la solidité de la structure. Les chaumes sont interrompus par des nœuds, qui sont une succession de zones d'où émerge une longue feuille, qui s'allonge en un limbe comportant des nervures parallèles (Guignard et Dupont, 2004). Le limbe s'attache au nœud par une gaine cylindrique. Les oreillettes et la ligule sont des organes membranaires qui se forment à l'adjonction entre le limbe et la gaine (Boulal et *al.*, 2007) (Figure 2).

Les inflorescences du blé sont des épis, qui se forment à l'extrémité supérieure des tiges. L'épi comporte un axe central : le rachis, sur lequel sont insérés de part et d'autre des épillets. Un épillet comprend un axe très court protégé à sa base par deux bractées ; les glumes (inférieure et supérieure), sur lesquelles sont insérées les fleurs en nombre variable de (4 à 6), entourées de deux glumelles qui se terminent par une longue barbe colorée (Guignard et Dupont, 2004) (Figure 2).

Le grain de blé est un caryopse ovale avec une rainure centrale. Dur avec un albumen vitreux, le grain de blé dur est enveloppé par le palea et le lemma (Figure 2). Il est généralement de couleur brune (Grignacs, 1987). Les constituants du grain de blé se répartissent de manière inégale au sein des différentes fractions histologiques du grain. L'amidon qui est le principal constituant (environ 70%), se retrouve en totalité dans l'albumen amylicé. Les teneurs en protéines (10 à 15%) sont principalement réparties entre le germe et la couche à aleurone ; les

matières minérales abondent dans la couche à aleurone. Les pentosanes (8 à 10%) sont les constituants dominants de cette dernière et du péricarpe. La cellulose représente près de la moitié de celui-ci ; les lipides avoisinent ou dépassent les 10% dans le germe (le cotylédon) et dans la couche à aleurone. Enfin, le germe est riche en vitamine B1 et B6 (Surget et Barron, 2005)) (Figure 3).

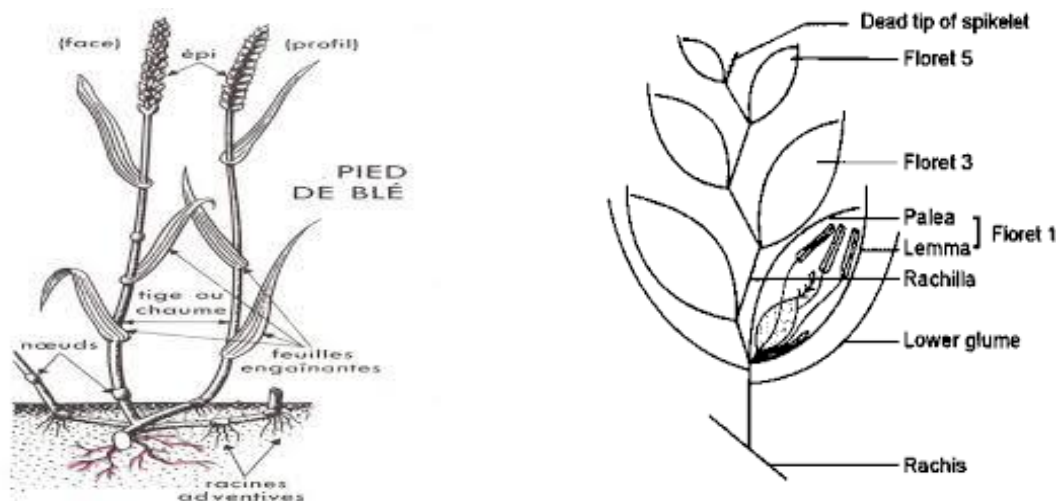


Figure 2. – la morphologie d'une plante de blé (web 2)

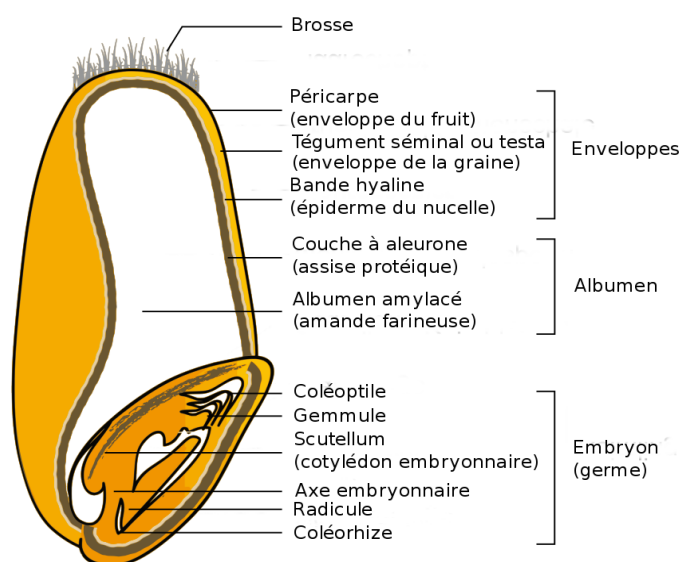


Figure 3. – structure schématique d'un grain de blé (Surget et Barron, 2005)

1.2.2. Evolution du grain : germination et développement de la plante

La période végétative démarre à partir de la germination de la graine permettant l'émergence du coléorhize, qui donne naissance à des racines séminales. La date de la levée est définie par l'apparition de la première feuille qui traverse le coléoptile, gaine rigide et protectrice enveloppant la première feuille (Figure 4). La levée se fait réellement dès la sortie des feuilles à la surface du sol (Soltner, 2005). Au sein d'un peuplement, la levée est atteinte lorsque la majorité des lignes de semis (50%) est visible (Gate, 1995). Les principaux facteurs édaphiques qui interviennent dans la réalisation de cette phase sont : la chaleur, l'aération et l'humidité (Eliard, 1979). Lorsque la plante possède 3 à 4 feuilles, une nouvelle tige, la talle primaire, apparaît à l'aisselle de la feuille la plus âgée (Figure 4). Après l'émission de la première talle, la plante va émettre des talles primaires, qui prennent naissance à l'aisselle du maître-brin (tige principale), puis, lorsque le maître-brin a 6 feuilles au moins, des talles secondaires dont les bourgeons sont alors situés à l'aisselle des feuilles des talles primaires, émergent. Le tallage herbacé s'arrête lorsque les apex de la formation d'ébauches foliaires se transforment en ébauches florales (futurs épillets) qui sont suffisamment avancées (Gate et Giban, 2003).

La fin de la phase végétative et le début de la phase reproductive est déclenché par la montaison (stade épi 1cm), caractérisée d'une part par le développement de l'épi et, d'autre part, par l'apparition des dernières feuilles, dont le rôle est primordial dans le remplissage des grains. La durée de cette phase est de 29 à 30 jours (Clément-Grandcourt; Prat, 1971). Le blé est une espèce de jours longs. Il faut que la durée d'éclairement soit d'environ 12 heures pour que l'épi commence à monter dans la tige (Simon et *al.*, 1989). Au dessous de cette valeur seuil de durée de jour, il n'y aura pas de formation de primordia d'épillets et les plantes continueront à différencier des talles (Boulal et *al.*, 2007).

L'épiaison est marquée par la méiose pollinique, l'éclatement de la gaine et l'émergence de l'épi. C'est au cours de cette phase que s'achève la formation des organes floraux et s'effectue la fécondation et la formation des grains (Soltner, 2005) (Figure 4). Durant la maturation des grains, l'embryon se développe et l'albumen se charge de substances de réserve. Du stade laiteux au stade pâteux, on observe une augmentation du volume et du poids des grains, alors que celui des tiges et des feuilles diminue. Les grains deviennent alors durs et leur couleur devient jaunâtre (Gate et Giban, 2003).

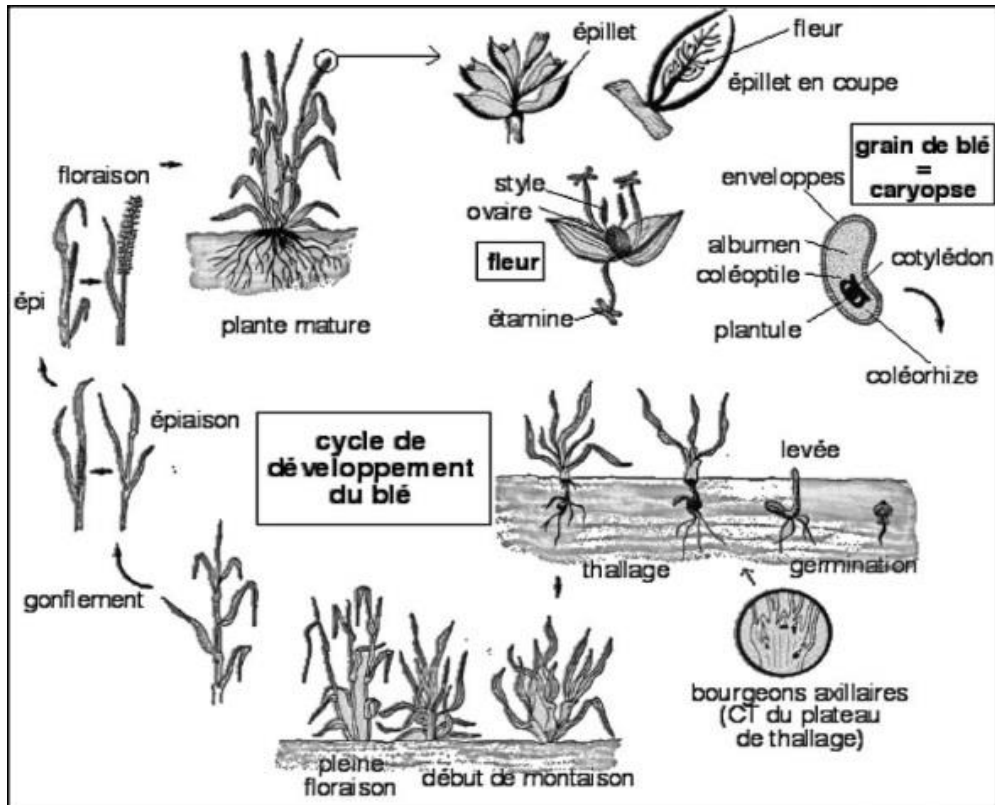


Figure 4. – cycle de développement du blé dur (Henry et De Buyser, 2000)

Chapitre 2 : conduite de la culture du blé dur

2.1. Notion d'itinéraire technique

L'itinéraire technique regroupe l'ensemble des interventions successives et des décisions d'apport de tel ou tel fertilisant ou pesticide, depuis la mise en place jusqu'à la récolte (Sebillote, 1990 ; Cedra, 1993). Il permet d'atteindre un objectif donné de rendement et son choix repose sur un certain nombre de critères tels que, les exigences du blé dur, le choix variétal et le précédent cultural (Prévoist, 2006).

2.1.1. Le choix variétal

Le choix variétal constitue un facteur primordial dans l'élaboration de l'itinéraire technique. La variété à cultiver doit être choisie en fonction de ses caractéristiques agronomiques, technologiques (rendement maximum et régulier en grains (et paille) et de son adaptation à la zone de culture (Tableau 1).

Tableau 1. – variétés de blé dur recommandées en fonction de leurs zones d'adaptation nationale (Ben Belkacem, 1993)

Zones de production	Variétés recommandées
Sub-aride 200-350 mm (Hauts Plateaux)	Waha, Sahel 77, Vitron, ZbxFg, Ofanto, Or jaune, Paggio, Mohamed Ben Bachir, Mexicali, ACSAD 65, Polonicum, Gta dur, Bidi 17, Oum Rabi09, Karim.
Semi-aride 350-450 mm (plaines telliennes)	Waha, Sahel 77, Vitron, ZbxFg, Chen « s », oued Zenati, Mexicali, Bidi 17, Gta dur, Hedba3, Ofanto, Or jaune, Paggio, Kebir, Polonicum, Oum Rabi 09, Simeto, Cirta, Karim.
Humide et sub-humide >450mm (littoral et sub-littoral)	Waha, Sahel77, Vitron, ZbxFg, Mexicali, Chen « s », Gta dur, Karim, Ardente, Belikh02, Eider, Oum Rabi09, Ofanto, Simeton Bidi 17, Carioca, Cirta, Or jaune, Paggio.

La précocité à l'épiaison est un caractère qui permet d'échapper au risque de sécheresse terminale. Une variété de blé dur qui présente une période végétative (levée-floraison) tardive ou longue et une période (floraison- maturité physiologique) courte est, pour certains auteurs, à rechercher pour les conditions des hauts plaines et les plaines littorales de l'ouest. L'amélioration génétique a permis de créer des variétés avec des précocités intermédiaires. Le

tableau 2 représente l'ensemble des variétés de blé dur ayant différentes précocités et cultivées à travers le pays.

Tableau 2. – variétés de blé dur algériennes les plus répandues et type de précocité (puisé catalogue officiel (CNCC, 2000))

Variété et type de précocité			
Précoce	Semi-précoce	Semi-tardive	Tardive
Capeiti	Bibans	Poloncium	Eider
Belikh 02	Bidi 17	Mohamed	Hebda 3
Cham 4	Sebaou	Ben	Oued
Chen «S»	Simeto	Bachir	Zenati
Gta dur	Ardente	Ofanto	
Vitron	Capeiti	Zibans	
Kebir	Karim		
Sahel	Or jaune		
Tassili	Poggio		
Waha «S»	Carioca		
Oum Rabi 09	Cirta		

2.1.2. La place du blé dur dans la rotation

La place du blé dans une rotation permet d'orienter son itinéraire technique en fonction du précédent cultural. Les rotations des cultures permettent l'amélioration de la fertilité, de la structure du sol et le contrôle des maladies, des pathogènes et des adventices. Pour le blé dur, le choix d'un précédent cultural est très important, car il permet à la culture de bénéficier des avantages apportés par son précédent. Il y a deux types de rotations ; une rotation simple de type jachère / blé ou blé /blé et une rotation plus longue (triennale ou quadriennale), impliquant diverses types de cultures (légumineuses alimentaires ou fourragères, pomme de terre ou autres) (Tableau 3 et 4).

Tableau 3. – avantages et inconvénients des principaux précédents culturels du blé en Algérie

Précédent culturale	Avantages et inconvénients
Jachère (jachère travaillée et jachère enherbée)	La jachère nue consiste à maintenir le sol sans culture durant au moins une année. La jachère est pâturée ou fauchée et le labour est fait en début d'été, ou juste avant le semis de la céréale (Sebillotte et <i>al.</i> , 1993). La jachère travaillée (labourée) vise la production de céréales sans irrigation, dans des régions recevant annuellement plus de 250 mm et moins de 500 mm de pluie (Bensid et Lahmar, 1990)
Légumineuses (alimentaires, fourragères)	Permet l'enrichissement du sol en azote, et l'amélioration de la structure du sol par le travail en profondeur des systèmes racinaires. La dose d'azote préconisée sur le blé suivant un pois par rapport à un blé sur blé est réduite de 20 à 50 kg/ha. (Dubois, 2007)
Maïs	Considéré comme une culture nettoyante, car pendant sa culture, il subit le désherbage manuel et mécanique, en plus des labours pratiqués avant son installation. Ceci, permet au blé d'être installé sur un bon lit de semis.
Betterave	Considérée comme une plante nettoyante car elle exige de nombreuses façons culturales, binages et sarclages.

Tableau 4. – principaux précédents culturels recommandés pour le blé dur en fonction des zones de culture (Mazhar, 1986 ; Benyassine, 1991)

Zone semi-aride	Zone favorable potentielle	Irrigué
- Jachère travaillée - Légumineuses	- Légumineuses alimentaires - Oléagineux - Cultures fourragères (vesce/avoine ; Bersim) - Maïs	- Betterave - Légumineuse alimentaire - Maïs grain ou fourrager - Bersim

Dans les zones semi-arides, la rotation blé-jachère reste le système le plus dominant (Smith et Young, 2000). Au niveau des zones céréalières de l'étage bioclimatique semi-aride (200 à 400 mm) qui sont caractérisées par une grande variabilité du rendement du blé et une dégradation du sol (Bouzerzour, 2011), le blé cultivé sur précédent jachère donne de meilleurs rendements comparativement au précédent blé (Bouzerzour 2011, Hamadache, 2001). Durant la jachère travaillée, deux labours sont pratiqués en automne. Le premier : profond, ouvre le sol pour

laisser s'infiltrer les eaux de pluie ; le second labour est fait de façon superficielle (Lahmar, 1989). Au printemps, le labour profond est dit d'ouverture. Il est suivi de croisements légers, réalisés avec le cover crop (Monneveux, 1989). Cette pratique de la jachère a été codifiée dans les « règles » du « dry farming ». Les résultats des travaux divergent quant à l'effet de cette technique sur le bilan hydrique. Selon certains travaux, la durée de la jachère est suffisante pour permettre la dégradation et le recyclage des chaumes dans le sol, assurant ainsi, une très bonne teneur en éléments nutritifs essentiels pour le développement de la prochaine culture (Vivier et Leconte, 1994). Les pièces travaillantes des outils provoquent la fragmentation de la terre et l'enfouissement des résidus organiques, ce qui améliore la porosité et la conductivité hydrique du sol (Boiffin et al., 1990). La jachère dans le système de rotation améliore la capacité de stockage de l'eau. Le supplément en eau relevé sur une rotation jachère est de 75 mm, comparativement au précédent blé (Bouzerzour, 2011). D'autres auteurs remettent en cause ces données et signalent la non efficacité de ce système pour la constitution des réserves hydriques (Monneveux, 1989). En plus, cette technique expose le sol pendant toute l'année à l'érosion pluviale et éolienne. C'est ainsi que la jachère cultivée fut entreprise et correspond à une période de mise en repos de terre sans la cultiver avec la même espèce. L'utilisation d'espèces végétales caractérisées par une croissance rapide pour assurer le couvert végétal du sol avec, un système racinaire profond, fixant l'azote d'une façon naturelle, résistant aux maladies peut réduire risques d'érosions (Boiffin et Marin-Lafleche, 1990). De même, Machado et al. (2008) signalent que la couverture végétale sur le sol réduit l'évaporation, augmente l'infiltration et le stockage de l'eau et par conséquent augmente l'évapotranspiration de la culture.

2.2. L'itinéraire technique du blé dur dans l'agriculture conventionnelle

L'itinéraire technique se résume en quatre principales étapes (Figure 5). Dans le système conventionnel, les opérations d'installation se basent principalement sur le travail du sol, suivi d'une fertilisation de fond. Pour la préparation du sol en céréaliculture, Prévost (1999) souligne que les façons culturales concernent le déchaumage, le labour et les façons superficielles. Les charrues, les cultivateurs et les herses assurent le travail du sol en profondeur et la préparation du lit de semis.

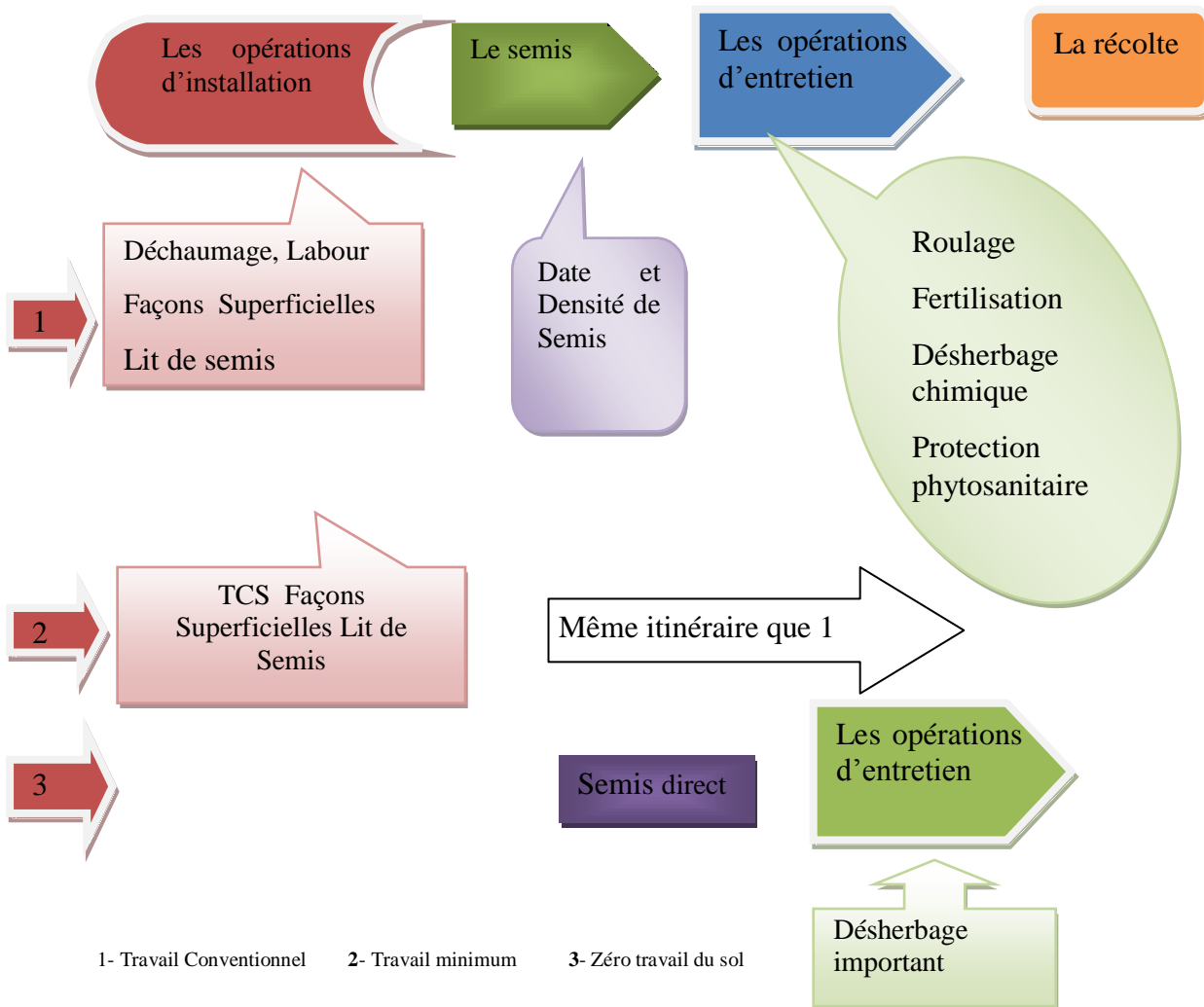


Figure 5. – itinéraire technique du blé dur

2.2.1. Le travail conventionnel du sol

Le travail du sol est une étape importante pour la réussite de la culture du blé dur. C'est l'opération la plus mécanisée et elle est basée sur l'utilisation d'outils (charrues, cover crop, chisel, etc...), en traction mécanique principalement et traction animale pour l'araire dans certains conditions. Il comprend à la fois le labour et les travaux superficiels de préparation du lit de semis. La qualité du travail du sol dépend de la nature des outils utilisés et de la période d'intervention de chaque outil. Une bonne préparation du lit de semence est donc nécessaire pour assurer une bonne germination des graines et un meilleur contact entre le sol et la graine. Parmi les avantages du travail du sol, il faut souligner son rôle à diminuer la résistance du sol à la pénétration des racines par une amélioration de sa structure et parfois de son humidité. Il améliore aussi l'aération du sol, facilite les échanges gazeux au niveau de la racine, et constitue un bon moyen de désherbage mécanique (Hamadache 2001).

Le labour constitue la principale étape du travail du sol pour l'installation de la culture. Il s'effectue à une profondeur variant entre 12 et 25 cm. Il est recommandé d'éviter les labours trop profonds, qui demandent beaucoup de puissance et qui ont pour effet de diluer la matière organique et les éléments minéraux (Simon et al., 1989). L'orientation du labour peut être réalisée dans n'importe quelle direction sur les terrains plats, mais sur les terrains en pente, il est recommandé de travailler le sol perpendiculairement au sens de la pente, ceci afin d'éviter les problèmes d'érosion.

La période du labour dépend du type du précédent cultural. Ainsi, cette période diffère en fonction de plusieurs facteurs et caractéristiques des systèmes de cultures pratiqués au niveau de chaque région (Tableau A1 Annexe)1. Dans les zones où la jachère se pratique en rotation avec le blé, les premiers travaux du sol peuvent être pratiqués dès la fin de l'hiver (février, mars), avec une charrue à socs ou à disques. Le premier recroisement est réalisé avec un cover-crop juste après et un second, en automne où des fois seules des façons superficielles en sont recommandées avant le semis (Ould Said, 2004). Le labour du précédent blé est effectué à la mi-novembre, suivi de passage de cover-crop, fin novembre et en décembre (Chennafi et al., 2011).

Les pseudo-labours sont préconisés en zones arides et semi-arides où le labour avec retournement du sol est à éviter, Carr et al. (2003) considèrent que la réduction du labour dans le cas du blé sur jachère favorise l'augmentation de la disponibilité en eau dans le sol. En effet, par souci de conservation de l'eau dans le sol, les outils à dents tel que le chisel sont les mieux conseillés. Le chisel est un outil qui permet une préparation du sol sans retournement complet de la terre et sans enfouissement systématique de tous les débris végétaux maintenus en surface on parle alors de pseudo-labours. Ils sont préconisés en zones arides et semi-arides exposées à la sécheresse et à l'érosion éolienne (Tableau A1 Annexe1).

Les façons superficielles permettent de finaliser la préparation du lit de semis qui s'avère fondamentale pour assurer les meilleures conditions de température, d'humidité et d'aération aux semences en germination. Pour la préparation du lit de semences, on distingue trois types d'outils : les cultivateurs, les cover-crop et les herses. Ces outils permettent un bon émiettement des mottes. Le travail superficiel (5-10cm) réalisé par ces outils en affinant le sol, en répartissant et en enfouissant partiellement les résidus, facilite le travail du semoir et améliore la qualité du lit de semences. Cependant, il faut souligner que leur utilisation dans un sol trop humide entraîne la formation de semelles superficielles, limitant la propagation des

racines (Simon et *al.*, 1989). Cette opération doit être réalisée le même jour ou la veille du semis.

Le semis consiste à placer les graines dans le lit de semences à une profondeur régulière de 4 à 6 cm pour faciliter la levée des plantules (Jouve et Berrada, 1993; Benaouda, 1994). Au moment de semer, il faut intégrer plusieurs facteurs, tel que la période, la densité, le mode et la profondeur de semis, afin de réussir cette opération (Tableau 4).

Tableau 5. – facteurs du semis (Hamadache et *al.* 2002).

La période de semis	Densité de semis	Mode et profondeur de semis
Elle varie en fonction du type de la variété et de la zone de culture*. La période de semis optimale se situe entre mi-novembre et mi-décembre. Les variétés tardives sont semées plus tôt que les variétés précoces. Les semis sont relativement précoces en zones littorales et sub-littorales (15 et le 30 novembre) et relativement tardifs en zones des Hauts Plateaux.	Elle est calculée en fonction du poids de 1000 grains et de la faculté germinative des semences utilisées. Il est recommandé de semer à une densité de 300 à 400 grains/ m ² , correspondant à une dose de semis de 120 à 140 kg par hectare. L'écartement entre les lignes de semis est de 18 à 20 cm.	Il est recommandé de réaliser un semis en lignes avec un semoir mécanique, équipé de ses tubes de descente préalablement bien réglé.

*Dans les **hautes plaines algériennes** où la céréale est cultivée en pluvial, les pratiques agricoles de **semis** sont ancestrales et débutent dès l'apparition des premières pluies, pendant les périodes traditionnelles du 10 novembre au 15 décembre, si la variété est précoce et entre le 25 octobre et le 30 novembre si elles sont tardives (ITGC, 2001).

Le roulage du sol est une technique culturale qui permet de faire passer un rouleau sur le sol, juste après le semis du blé, pour améliorer le contact semences-terre et avoir un bon nivellement de la surface du sol. Cette opération permettra une levée rapide et homogène et un bon développement racinaire par un meilleur contact sol-racines. Le roulage est réalisé, de préférence avec un rouleau lisse ou croskill (Annexe 1), dans le sens du semis avec une vitesse d'avancement de 6 à 8 km/h.

2.2.2. Entretien de la culture

2.2.2.1. La fertilisation

La fertilisation phospho-potassique

Les cultures annuelles telles que les blés craignent la carence en phosphore (P) et en Potassium (K), quand elles sont jeunes, car leurs racines n'exploitent qu'une faible partie du sol. L'engrais doit donc être apporté en début de cycle et au plus près des jeunes racines, les doses sont apportées en fonction des exportations du blé dur (Tableau 6).

Le phosphore est un élément fondamental parmi les trois éléments majeurs (N, P, K) apportés par les engrais. Il permet la stimulation de la croissance racinaire et intervient dans la formation et la maturation des grains (Moughli, 2000). Selon ce dernier auteur, l'engrais phosphaté doit être apporté lorsque des teneurs en phosphore assimilable du sol sont inférieurs à 12ppm.

Tableau 6. – exportations en éléments minéraux du blé dur

Eléments minéraux Culture	N (kg /q)	P2O5 (kg/q)	K2O (kg/q)
Blé dur	2,8-3,2	1-1,6	1,8

La fertilisation azotée

L'azote est un élément indispensable à la culture et la croissance du blé. En effet, c'est le pivot de la production de biomasse, du rendement et de la qualité des produits récoltés (Mazliak, 1998). Les besoins de la culture sont essentiellement azotés (Tableau 5). Ainsi pour les satisfaire au mieux, il est conseillé de semer une culture de blé après un précédent cultural du type légumineux. Car la légumineuse laisse au sol une grande quantité d'azote sous forme organique. En général, il est recommandé d'apporter 92 unités/ha d'azote en zone de plus de 600 mm de pluviométrie et 46 unités/ha en zone de 400 à 600 mm. La dose totale est fractionnée en deux temps, 1/3 au semis et 2/3 au tallage (stade épi 1cm du blé) (Grignac, 1965).

2.2.2.2. Le désherbage

Le désherbage est une opération culturale importante pour le contrôle des principales adventices rencontrées dans la culture du blé, telles que les Monocotylédones (folle avoine, Phalaris, ray-grass et brome...) et les Dicotylédones (coquelicot, moutarde, faux fenouil...).

L'application des produits herbicides est raisonnée en fonction de la nature et de l'importance des infestations en mauvaises herbes (Monocotylédones et /ou Dicotylédones) dans la culture du blé dur.

Il existe une gamme de produits herbicides spécifiques à la culture du blé ; certains herbicides simples pour le contrôle des adventices Monocotylédones ou Dicotylédones, d'autres polyvalents. La période optimale du désherbage chimique correspond au stade jeunes plantules des adventives ou au stade 3-4 feuilles du blé. L'infestation par les mauvaises herbes peut être atténuée dans la culture du blé dur par les opérations de travail du sol effectuées, notamment dans le cas d'un précédent jachère (lutte mécanique).

2.2.2.3. Protection phytosanitaire

Tout programme de traitement doit prendre en compte la nuisibilité des différentes maladies. Il existe deux grands groupes de maladies qui peuvent affecter le rendement du blé sont classées dans l'ordre de leur nuisibilité (INPV, 2013):

Les maladies foliaires tels que : la rouille brune et la rouille jaune qui peuvent entraîner des pertes de rendement de 50% ; les septorioses causant jusqu'à 40% de pertes, oïdium avec 5 à 15% de pertes.

Le deuxième groupe comprend les pourritures racinaires, le piétin verse pertes évaluées de 5 à 10% du rendement. et les fusarioses de l'épi.

La lutte contre ces maladies repose sur la combinaison de méthodes culturales (rotation et labour d'été), méthodes génétiques (résistance et tolérance variétale) et traitements chimiques foliaires. Les recommandations relatives à la lutte contre les maladies du blé prennent en considération l'effet du climat sur les risques de maladies, en particulier les maladies aériennes du feuillage et de l'épi. Le raisonnement de la lutte contre les maladies du blé intègre donc des facteurs régionaux, et des facteurs parcellaires (précédent, date de semis). Les « programmes de base » proposés par les organismes de développement contiennent de 1 à 3 traitements en végétation en fonction de la région (Moreau, 2011).

L'utilisation intensive et systématique de fongicides pose des problèmes environnementaux: pollution des nappes phréatiques et pollution aérienne, présence de résidus dans les sols et les débris végétaux; elle pose également des problèmes de santé pour l'utilisateur des fongicides et pour le consommateur. Par exemple : le Mancozèbe (un fongicide systémique appartenant à la famille des carbamates) et l'éthylène thiourée sont cancérigènes (Kumar et *al.*, 2013 Mustapha, 2017). L'application de stimulateurs de défense des plantes (SDP) constitue une alternative potentielle pour protéger les cultures contre les agents pathogènes (Benhamou et Picard 1999). Il s'agit de produits contenant des matières actives d'origine naturelle ou de synthèse destinés à induire les mécanismes de défense naturelles de la plante.

Parmi les parasites animaux, les pucerons et les cicadelles sont les principaux ravageurs des cultures de blé tendre. Leur nocivité est accrue par la possibilité qu'ils ont de transmettre des virus aux plantes-hôtes. En effet, la jaunisse nanisante de l'orge est transmise au blé par les pucerons des céréales. Le nanisme du blé (Wheat Dwarf), est transmis par une cicadelle. Ceci nécessite une protection insecticide à l'automne en cas d'attaques de pucerons. Les semis précoces sont généralement les plus exposés aux pucerons à l'automne. L'infection de la jeune céréale peut se réaliser dès la levée et pendant toute la durée des jeunes stades. Cette période doit être surveillée tout particulièrement car elle correspond à une période de grande sensibilité des plantes (Milaire ,1995).

2.3. Itinéraire technique du blé dur dans une agriculture de conservation

L'avènement de la notion de durabilité des systèmes de production a conduit à l'émergence de la notion de l'agriculture de conservation (AC), qui se fixe pour objectif de pallier aux effets néfastes liés au travail du sol conventionnel, notamment en matière de protection de l'environnement (Mrabet, 1993 ; Jouy, 2001). Le concept de l'agriculture de conservation a incité l'abandon du retournement du sol et a encouragé l'apparition des techniques culturales sans labour (TCSL), qui représentent les techniques de travail du sol allant du pseudo-labour au semis direct, en passant par le travail superficiel (Labreuche et *al.*, 2007).

Ces techniques se sont d'abord et surtout développées aux Etats-Unis et ont rapidement gagné l'Amérique du Sud, notamment le Brésil, l'Argentine et le Chili, ainsi que l'Australie où les risques d'érosion éolienne sont élevés (Köller, 2003).

Dans ce contexte l'itinéraire technique est modifié, dans le sens de la charge du calendrier cultural.

2.3.1. Le travail minimum et le non labour

Le TM ne retourne pas l'horizon de surface et assure une préparation superficielle du sol en utilisant le chisel, suivi d'une herse ou un cultivateur à dent ou bien d'un cover crop (Sabert et Mrabet, 2002; Taha et Nezar, 2006).

Dans le cas du non labour, les modalités de mise en œuvre du semis direct sont très diverses, et dépendent en premier lieu des conditions climatiques de la zone concernée. Plus la pluviométrie est importante et plus les modalités sont nombreuses et diversifiées. Selon Raunet et *al.* (1999), du point de vue agronomique, le système du semis direct obéit à des principes agro-écologiques :

- Limiter la modification mécanique du sol à l'endroit du dépôt de la semence et couvrir le sol en permanence avec de la matière végétale, pour stopper totalement les processus d'érosion et réduire les amplitudes thermiques et hygrométriques d'une part, et reconstruire un écosystème stable, favorable à l'activité biologiques et à la préservation de la matière organique du sol d'autre part ;
- Faire travailler la nature, c'est-à-dire le système sol-biomasse, en tirant partie le plus possible de ses propres ressources (photosynthèse, macro et mésofaune, microflore, recyclage ou libération d'éléments minéraux lessivés en profondeur ou bloqués), grâce à l'action des plantes de couverture annuelles ou vivaces installées en association, ou en rotation avec la culture principale.

Chapitre 3 : Étude comparative entre le labour et le non labour

3.1. La recherche d'une alternative au labour

Le labour permet surtout de contrôler le développement des adventices. Il permet ensuite d'enfouir les résidus de cultures et de fragmenter la structure du sol, avant l'implantation des cultures pour améliorer l'enracinement. Cette technique a permis d'augmenter la productivité des cultures, mais elle reste une technique consommatrice de temps, de main d'œuvre, de puissance tractrice et d'énergie (Monnier, 1994). Les problèmes de fertilité des sols communs aux sols labourés ont conduit au développement des techniques alternatives au labour, regroupées sous le terme de travail du sol de conservation (Köller, 2003).

Les agriculteurs cherchent, de plus en plus, à réduire le temps de travail nécessaire à la préparation du sol, essentiellement en réduisant les charges, tout en améliorant la stabilité structurale des sols et en maintenant la matière organique en surface, ce qui permettra de diminuer l'érosion et d'améliorer l'activité biologique du sol (Girard et al., 2005 ;Viglizzo & Jabbagy, 2010).

Le non retournement de la terre et l'absence de fragmentation mécanique par la charrue modifient profondément le fonctionnement de l'agrosystème (Hamadache, 2001). Il en résulte une accumulation de la matière organique en surface qui joue le rôle de paillis, protégeant la surface du sol des aléas climatiques et servant d'abri et de nourriture aux organismes du sol (Martin et al., 2009). Ces modifications affectent le cycle des éléments C et N, le transfert d'eau et des polluants, la fertilité du milieu, l'activité biologique et la biodiversité (Labreuche et al., 2007). La présence du couvert végétal en surface du sol permet une réduction de l'érosion d'un facteur 1 à 10 (Heddadj et al., 2005). En l'absence de couvert végétal du sol, l'efficacité des techniques culturales sans labour (TCSL) est controversée (Heddadj, 2005).

3.2. Les spécificités de la technique du non labour

Le semis direct doit être considéré comme un système et non pas comme une simple technique de préparation du sol. Pour que ce système soit efficace, il faut introduire la rotation des cultures, qui contribue à l'optimisation des résidus intervenant comme mulch sur le sol. Il y a également des résidus de plantes adventices associés à des résidus de culture qui contribuent également à la couverture du sol, en particulier au début du semis direct. La quantité de résidus de cultures produite est un facteur de réussite de ce système. Elle varie considérablement selon le type de culture, la variété et le rendement. De grandes quantités de

résidus de récolte sont généralement obtenues à partir du sorgho, du maïs, du riz, du coton et du tournesol, alors que le soja, le blé et les haricots produisent généralement de petites quantités (Barber, 1995). Les variétés traditionnelles produisent souvent de plus de résidus que les variétés améliorées, en particulier celles de petite taille et d'indice de récolte élevé.

La plupart des informations sur la quantité optimale de résidus de culture laissés en surface du sol sont basées sur les quantités nécessaires pour réduire les pertes érosives du sol sur différents gradients de pente, plutôt que sur les quantités nécessaires pour maximiser l'infiltration des eaux de pluie (Barber et Thomas, 1981 ; Lal, 1994). Habituellement, une valeur minimale de 70 pour cent de couverture de surface - équivalente à 4-6 t / ha de paille de maïs par exemple - devrait être adoptée (FAO, 2001).

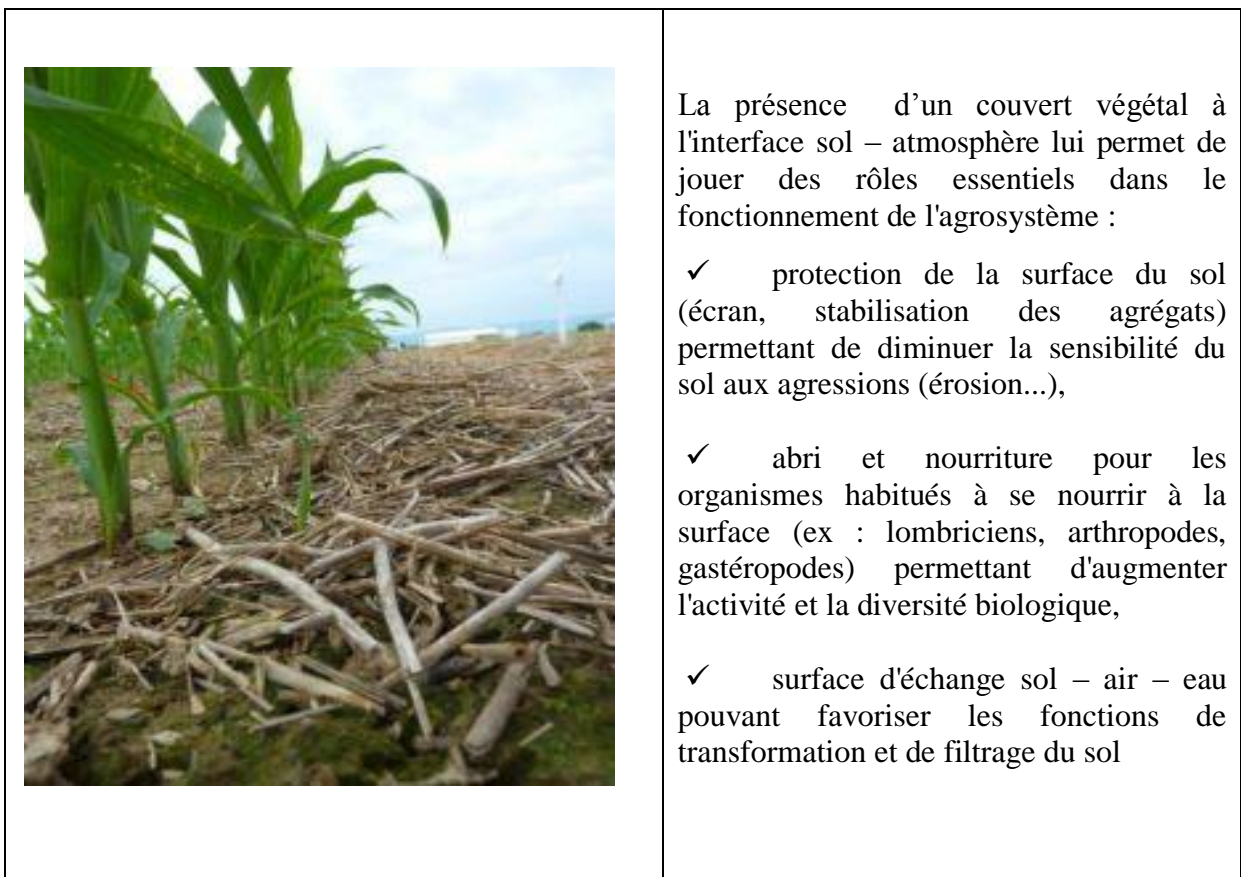


Figure 6. – présence d'un couvert végétal en surface (Mulch ou paillage)

Source web3: <https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/ACetMo.html>

En plus du problème des résidus, la présence des plantes adventices constitue une contrainte majeure au succès du semis direct. Le système détient la plus forte infestation comparativement aux autres techniques culturales (Fortas et al. 2013). Une mauvaise gestion des adventices peut causer des pertes allant jusqu'à 75% du rendement (Pratap Singh, 2016).

La lutte chimique constitue le principal moyen de gestion des infestations dans ce système. Cependant, l'utilisation des herbicides remet en cause la durabilité du semis direct en plus de l'aspect pollution et menace la biodiversité du sol ; la résistance des mauvaises herbes est un autre aspect cité par plusieurs auteurs (Labrada , 2005). Différentes approches de gestion des plantes adventices ont été développées, à savoir la gestion des mauvaises herbes à travers le paillis du lit de semence avec des résidus de culture, l'utilisation des cultivars appropriés et en modifiant la densité de semis, l'espacement des rangs et la gestion des nutriments et de l'eau, on peut améliorer la compétitivité des cultures (Pratap Singh, 2016 ; Shekhawat, 2020), ainsi que l'utilisation d'inhibiteurs naturels de la germination des graines d'adventices (Kouadria, 2019).

3.3. Effet du semis direct sur l'installation et la productivité de la culture du blé dur

Les conditions d'implantation du blé dur déterminées par l'état hydrique du sol et la qualité du lit de semis, expliquent 60 à 65 % de la variabilité inter annuelle des rendements (Couvreur, 1985). La plupart des auteurs expliquent que la densité apparente du sol ainsi que la teneur en humidité et la température, sont des facteurs qui présentent une interaction significative (Année x Travail du sol) (Adekiya et al.2011 ; Agbede et Adekiya ; 2018) ce qui explique leur impact sur l'installation des cultures. Dans ce sens, la croissance et la distribution des racines sont influencées par le labour et la fertilisation azotée. La profondeur d'enracinement dépasse quelquefois le mètre, mais dans les conditions du semis direct l'enracinement est plus superficiel ; en effet, Li (2016) rapporte que la stratification de N, P, et K dans ce système de culture sont à l'origine de cette distribution. Ce même auteur explique qu'après 23 et 24 années d'essai, il y avait tendanciellement moins de racines du maïs sous semis direct (-14%) que sous le labour, probablement à cause de la présence plus importante d'adventices sous ce système. Pour le soja, il y avait beaucoup plus de racines dans la couche 0-10 cm sous semis direct (44% de longueur total), que sous labour (21%) et inversement dans la couche 10-20cm.

Le rendement en blé dur conduit en semis direct a permis des gains de 9,45 q/ha, comparativement au semis conventionnel (Mrabet ,2001). De même, Tarkalson (2006) signale un gain de rendement de 3q/ha et 10,63q/ha respectivement pour le blé et le maïs, conduits à long terme en semis direct et précise que ce gain est en relation avec la rétention de l'humidité du sol, suite à l'augmentation de résidus de couverture du sol. Certaines études ont montré par

contre la supériorité du rendement en système conventionnel, comparativement au système du semis direct (Carama et *al.*, 2003; Triplett et Dick, 2008 ; Garane et *al.*, 2017). Cette supériorité est le plus souvent le résultat d'un fort taux de levée, d'un peuplement plus important, d'un nombre d'épis et d'un poids de grains par mètre carré plus important dans ce traitement, dans ces mêmes conditions. Trottet et *al.* (2002) et Sinclair et *al.* (2006) ont noté que le rendement était souvent très bien corrélé au nombre de grains formés, alors qu'il est moins corrélé au poids individuel d'un grain.

3.4. Effet du semis direct sur les propriétés du sol

3.4.1. Les réserves hydriques du sol

Le labour accroît la perméabilité du sol (Fortas et *al.* 2013) ; ce qui par conséquence augmente l'infiltration et l'emmagasinement des eaux de pluies. Cependant, il favorise l'évaporation en augmentant la surface du sol exposé au soleil. Le semis direct et les travaux simplifiés permettent une meilleure rétention en eau comparativement au labour conventionnel avec la charrue à soc ou à disque (Abdellaoui et *al.* 2011). Amara et *al.* (2015) signalent un gain de la teneur en eau du sol, enregistré au stade épiaison pour les parcelles conduites en semis direct comparativement à celles labourées (18,27% / 16,52%). L'augmentation de la teneur en eau du sol au stade épiaison est décisive pour le cycle de la culture du blé, dont les besoins en eau s'accroissent durant la période critique en eau, se situant entre 20 jours avant l'épiaison jusqu'à 30 à 35 jours après la floraison (Gate, 2003). Ce gain d'humidité est lié à la non-manipulation du sol et au maintien d'un couvert végétal en surface, ce qui retarde le dessèchement (Mrabet, 1993). Cette humidité plus élevée du sol sous semis direct le rend plus frais, en raison d'une plus grande capacité thermique spécifique de l'eau (Fernandez and White 2012).

3.4.2. Les caractéristiques physiques du sol

Les propriétés édaphiques sont très sensibles aux changements de gestion du sol et pourraient être utilisés comme indicateurs de qualité pour déterminer l'état de dégradation ou de conversion d'un sol, dans le cadre d'une pratique de gestion spécifique (Sokolowski et *al.* 2020). Dans ce sens, certains paramètres physiques et puis chimiques sont observés pour rendre compte de l'impact des techniques culturales.

3.4.2.1. La structure du sol

Dans les systèmes labourés, la structure du sol est principalement créée par les opérations de travail du sol, tandis que dans les systèmes de non labour (semis direct), la structure est principalement créée par l'action du climat (en surface dans les régions tempérées) et par des processus biologiques (Oorts, 2006). Sous un labour, la structure d'un sol est composée de l'assemblage de particules fines du sol et de mottes compactées ou non, en plus de résidus de cultures répartis le long de la bande de labour. Les vides et les fissures sont répartis de manière hétérogène (Roger-Estrade et al., 2004). A l'inverse, la structure d'un sol non travaillé est plus homogène et présente souvent une structure plus massive, composée de macropores d'origine biologique (lombrics, développement racinaire) (Figure 7). La présence des fissures et des vides est moindre (Mühlbachová et al. 2015).

3.4.2. 2. La densité apparente du sol

Une densité apparente élevée des 20 premiers centimètres est observée et diminue après 10 ans de semis direct (Lampurlanes et Cantero-Martinez, 2003 ; Gajda et al., 2017). Dans ce sens, Agbede et Adekiya (2018) signalent que la densité apparente d'un sol passe de 1,35 à 1,24 Mg m⁻³ après trois années de traitement, sous semis direct. Cette réduction est en relation avec la conservation de la bioporosité, avec des canaux continus plus efficaces pour l'entrée d'eau dans le sol (Blason et al., 2014). Par ailleurs dans ce dernier système, les résidus de cultures ne sont pas enfouis en profondeur et sont concentrés en surface ou dans les premiers centimètres de sol, améliorant ainsi la stabilité structurale du sol (Blanco et Lal, 2007).



Figure 7. – Structure d'un sol dans un système de non labour
Web4. (<http://www.fao.org/3/y4690e/y4690e0a.htm>)

3.4.3. Les caractéristiques chimiques du sol

3.4.3.1. La matière organique

La nature du travail du sol détermine les modalités d'incorporation et de décomposition des matières organiques retournant au sol. Selon Gajda et *al.*, (2017), l'effet majeur du changement de pratiques de travail du sol est principalement lié à une modification dans la localisation du carbone organique, avec un gradient très prononcé dans les situations sans travail du sol. En effet, pendant que la charrue à socs permet un enrichissement du sol en matière organique en profondeur (Amara, 2006), dans le cas du non labour, plus de 50% du carbone récent se trouve dans les 4 premiers centimètres et seulement 20% se trouvent en dessous de 25 cm. Cette dernière répartition est en relation avec la présence du mulch en surface (Thébeau et *al.*, 2011).

Ce changement dans la répartition des résidus de cultures au sein du profil de sol va avoir des conséquences à plus ou moins long terme, sur les teneurs et stocks de carbone et des éléments nutritifs du sol (Derpsch, 2010). Selon Gál et *al.*, (2007) dans les systèmes de non labour, les stocks du carbone organique ($t \cdot ha^{-1}$) sont supérieurs dans les 10 premiers centimètres du sol, par rapport à un sol labouré et décroissent fortement dans les horizons sous-jacents.

Lal et *al.*, (2003) signalent que l'adoption du No Tillage aux États-Unis pourrait séquestrer 24 à 40 Mt de C par an. Ce carbone séquestré sous NT peut également être minéralisé et rejeté dans l'atmosphère, mais à une vitesse beaucoup plus réduite que dans un sol labouré (Baker et *al.*, 2007).

L'amélioration de la quantité de carbone organique dans le sol est également en relation avec les caractéristiques morphologiques des différentes cultures et le type de résidus qui vont constituer le mulch (Dinel & Gregorich, 1995). Saber et Mrabet (2002) ont montré que la rotation blé / blé a permis une accumulation de carbone organique plus importante dans les couches de surface allant de (0-2,5) à (2,5-7cm), comparativement aux rotations jachère/blé et jachère/blé/lentilles. Wang et *al.* (2015) signalent que les résidus de paille immobilisent l'azote minéral et diminuent ses pertes dans le sol.

3.4.3.2. Les éléments nutritifs du sol

Le semis direct conduit à la stratification de la distribution des nutriments le long du profil du sol, comparativement au labour qui les répartie uniformément à travers le profil cultural. La stratification verticale des stocks de C et N engendrée par les techniques de semis direct se

fait rapidement après leur adoption et les principaux changements apparaissent au cours des trois premières années de leur application (Attard et *al.*, 2011). Thomas et *al.* (2007) signalent 18% plus de C organique et 21% plus de N total sous semis direct, que sous labour à une profondeur de 0-10 cm pour un sol semi-aride subtropical.

Le semis direct ralentit la vitesse de décomposition de la matière organique par le maintien des résidus végétaux en surface et limite le contact sol-résidus. Dans ces mêmes conditions, la densité élevée du sol diminue la perméabilité à l'air et donc au taux d'oxygène dans le sol, ce qui affecte également la minéralisation de la matière organique. Les températures plus faibles du sol, observées en semis direct (notamment au printemps en zone tempérée), peuvent également expliquer une réduction de la minéralisation (Recous et *al.*, 2015). Ceci montre donc que la dynamique de minéralisation des composés organiques est modifiée en semis direct (Zihlman et *al.*, 2001).

Tous ces mêmes facteurs cités ci dessus (quantité et nature des résidus de récolte ou litières végétales, modalités de travail du sol et stratification des matières organiques et des activités biologiques en résultant), ont des conséquences sur le cycle de l'azote, comme celui des autres éléments minéraux (Recous et *al.*, 2015). La minéralisation de l'azote est plus lente, mais se déroule d'une manière plus continue et dure plus longtemps qu'avec le labour ; le pic de minéralisation obtenu en travail du sol est remplacé par une immobilisation de l'azote au détriment de sa minéralisation (Carter et Renne, 1987).

L'effet de stratification des éléments chimiques, tels que P, K et Ca échangeables, avec une accumulation en surface à une profondeur de 0 à 10 cm dans la MO, ont également été rapportés par plusieurs auteurs (Julca-Otiniano et *al.*, 2006 ; Castillon, 2011 ; Powlson et *al.*, 2014). Agbede et Adekiya (2018) signalent également que sur un essai conduit durant trois années, le semis direct a permis d'avoir sur une profondeur de 15cm, des teneurs moyennes du sol en MO, N, P, K, Ca et Mg plus élevées que celle du sol labouré, avec des valeurs respectives : MO : 2,43% / 2,04% ; N : 0,146 / 0,113% ; P : 8,7 / 6,36 mg kg⁻¹ ; K : 0,13 / 0,09 cmol⁺ kg⁻¹ ; Ca : 1,45 / 1,09 cmol⁺ kg⁻¹ ; Mg 0,33 / 0,22 cmol⁺ kg⁻¹).

Les faibles valeurs des éléments nutritifs observées sous labour peuvent avoir pour origine le retournement de la couche arable du sol, qui provoque une dilution de la matière organique, avec une minéralisation accentuée libérant les éléments nutritifs avec un risque de lessivage (Ali et *al.*, 2006). Ceci peut être à l'origine de la dégradation de la fertilité des sols ; des

exemples de sols fragiles des tropiques sont cités pour avoir perdu leur fertilité après trois années de culture sous labour (Agbede et Adekiya, 2018).

3.4.4. Les caractéristiques biologiques du sol

La biomasse microbienne du sol (SMB) est très sensible aux altérations engendrées par la gestion des sols et est souvent utilisée comme indicateur biologique de la santé des sols (Balota et *al.*, 2004, Soane et *al.*, 2012). Différentes études ont montré que le travail du sol a un impact négatif sur la biomasse microbienne, la structure communautaire et les activités enzymatiques (Willekens et *al.*, 2014). De nombreuses études montrent que dans les systèmes de non tillage, la biomasse microbienne présente une forte stratification verticale, tandis qu'elle est répartie de façon homogène sur la profondeur de la couche de sol labourée (Andrade et *al.*, 2003 ; Garane et *al.*, 2017). L'augmentation de la matière organique en surface grâce au semis direct favorise la biomasse et la diversité microbienne dans la partie superficielle du sol. En effet, la zone 0-5 cm voit une augmentation significative des bactéries, mais aussi l'apparition de nouvelles espèces non présentes en labour. Les champignons, aussi favorisés sous semis direct, participent activement à l'agrégation des sols ; ce qui a pour conséquence une meilleure stabilisation. Scopel et *al.*, (2013) ont observé une plus grande masse de la macrofaune (gastéropodes, micromammifères, coléoptères, araignées, nématodes, vers de terre, etc...), dans des conditions tropicales sous semis direct. Linn et Doran (1984) ont observé que les microorganismes aérobies et anaérobies se trouvant en surface des sols sans labour, étaient respectivement de 1,35 à 1,41 et de 1,27 à 1,31 fois plus abondants que dans les sols labourés. Alors que Feng et *al.* (2003) ont rapporté que la teneur en C de la biomasse microbienne en semis direct était de 60, 140 et 75% plus élevée, que sous labour conventionnel en février, mai et octobre, respectivement. Stanek et *al.*, (2018) signalent que le sol sous semis direct présentait une plus grande diversité de diatomées (139 taxons), que celui sous labour traditionnel (102 taxons). En plus de la masse et de la biodiversité, le semis direct stimule l'activité des communautés microbiennes du sol identifiées par l'activité de la déshydrogénase du sol, qui est très importante dans les processus de libération des nutriments pour les plantes (Gajda et *al.*, 2017).

Chapitre 4 : la mycorhization du blé

4.1. Généralités sur la symbiose mycorhizienne

Parmi les composantes telluriques particulièrement impliquées dans les processus biologiques régissant le fonctionnement des principaux cycles biogéochimiques et, en conséquence, la fertilité des sols, figurent les champignons mycorhiziens. Ces microorganismes ubiquistes évoluent en association symbiotique stricte avec diverses plantes hôtes et optimisent le développement du végétal via deux voies principales, à savoir (i) une stimulation de la nutrition minérale (plus particulièrement pour le phosphore, considéré comme une des principales carences minérales dans les sols méditerranéens et tropicaux) et (ii) une meilleure tolérance ou résistance de la plante vis-à-vis de stress biotiques (impacts de microorganismes pathogènes fongiques, bactériens ou de nématodes phytoparasites) et/ou abiotiques (stress salin, hydrique, métaux lourds) (Duponnois et *al.*, 2013). Ces champignons étant des organismes hétérotrophes, ils reçoivent de leurs plantes hôtes des éléments carbonés issus de la photosynthèse, ainsi que certains acides aminés et vitamines qu'ils sont incapables de synthétiser (Fortin et *al.*, 2013).

Les mycorhizes (du grec *myco*, champignon et *rhiza*, racine) sont des organes mixtes résultant de cette symbiose mutualiste existant entre une grande majorité des espèces de plantes et une diversité d'espèces de champignons mycorhiziens (Davet, 1995). Presque toutes les cultures agricoles sont capables de ce type d'association, mise à part les plantes de certaines familles qui forment peu ou pas ce type d'association tels que les Brassicaceae, les Chenopodiaceae et les Urticaceae, sans oublier le genre *Lupinus*, une exception de la famille des Fabaceae habituellement mycotrophe ((Strullu, 1991 ; Brunel, 2011). Il existe plusieurs types de mycorhizes, distincts par leur morphologie et le type de champignons qui les engendrent (Duhoux et Nicole, 2004).

La classification des mycorhizes est basée sur le type du champignon associé, selon que celui-ci est asepté, c'est-à-dire les Zygomycètes, ou septé, comme les Ascomycètes ou Basidiomycètes (Smith et Read, 2008). Différents types de mycorhizes sont ainsi distingués ; les mycorhizes à arbuscules, les mycorhizes orchidoïdes et les ectomycorhizes sont les plus fréquentes et les plus étudiées.

Les champignons des ectomycorhizes se développent autour des racines en formant un manchon feutré de filaments très abondants (le manteau) à partir duquel, des filaments

mycéliens progressent dans le sol pour former le réseau extra-matriciel et d'autres hyphes pénètrent au niveau de la lamelle moyenne de la racine en séparant les cellules formant ainsi le réseau de Hartig (Strullu, 1991), alors que pour les endomycorhizes, les hyphes des champignons se développent dans le cortex racinaire, où ils forment des arbuscules et des vésicules intracellulaires (Figure 8). Pour cela, on parle de mycorhizes à arbuscules et à vésicules (VAM) ou de champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) (Fortin et *al.*, 2013)

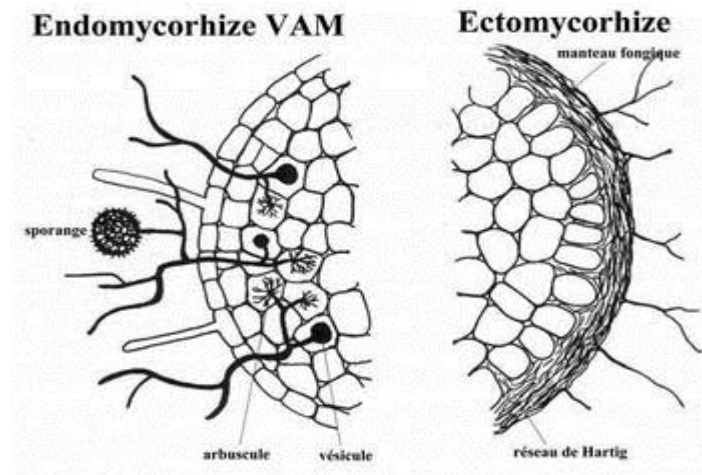


Figure 8. – principaux types mycorhiziens (Le Tacon, 1985).

4.2. Symbiose endomycorhizienne à arbuscules et vésicules

Les mycorhizes à arbuscules sont les plus primitives et les plus répandues dans les écosystèmes naturels et cultivés (Tedersoo et *al.*, 2010). Elles seraient à l'origine des autres types de symbiose mycorhizienne et coïncideraient avec celles des végétaux terrestres, il y a 450 millions d'années. Elles sont induites par les champignons mycorhiziens à arbuscule (CMA) (Wang et Qiu, 2006).

4.2.1. Classification des champignons mycorhiziens à arbuscule (CMA)

Les études morphologiques et phylogénétiques ont permis de regrouper toutes les espèces de champignons mycorhiziens à arbuscules dans le phylum monophylétique des Gloméromycota (Schwarzott et *al.*, 2001 ; Hibbett et *al.*, 2007). La classification morphologique de ces champignons arbusculaires basée principalement sur la morphologie des spores (couleur, forme et taille des sporocarpes ; couleur, nombre, épaisseur et types d'ornementation des membranes sporales ; structures des hyphes associées ; forme et type d'occlusions) (Figure

10) a permis de décrire et de distinguer quatre ordres : les Glomérales, les Paraglomérales, les Archéosporales et les Diversisporales (Oehl *et al.*, 2011; Redecker *et al.*, 2013) (Figure 9).

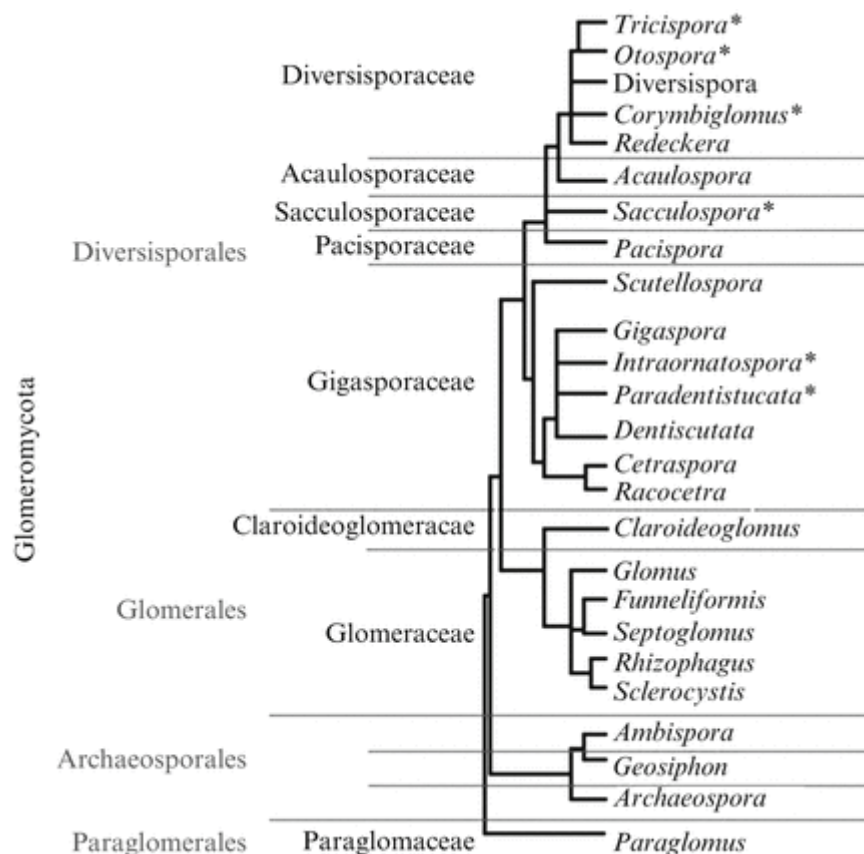


Figure 9. – Classification des champignons mycorhiziens à arbuscule. Tancredo (2015) et HKaur Kehri *et al.*, (2018)

On dénombre environ 18 genres comprenant 250 espèces. Cette estimation pourrait s'avérer largement en dessous de la réalité, puisque la taxonomie actuelle repose sur des espèces isolées à partir de spores, alors que des techniques moléculaires émergentes permettent d'obtenir des séquences à partir de racines ou du sol, donnant ainsi accès à des espèces non-sporogènes ou difficilement détectables (Öpik *et al.*, 2013, Redecker *et al.*, 2013 ; HKaur Kehri *et al.*, 2018). Ainsi, 204 groupes phylogénétiques de CMA ont été trouvés, augmentant le nombre de taxons virtuels des glomérromycètes à 341 (Öpik *et al.* 2013, HKaur Kehri *et al.*, 2018).

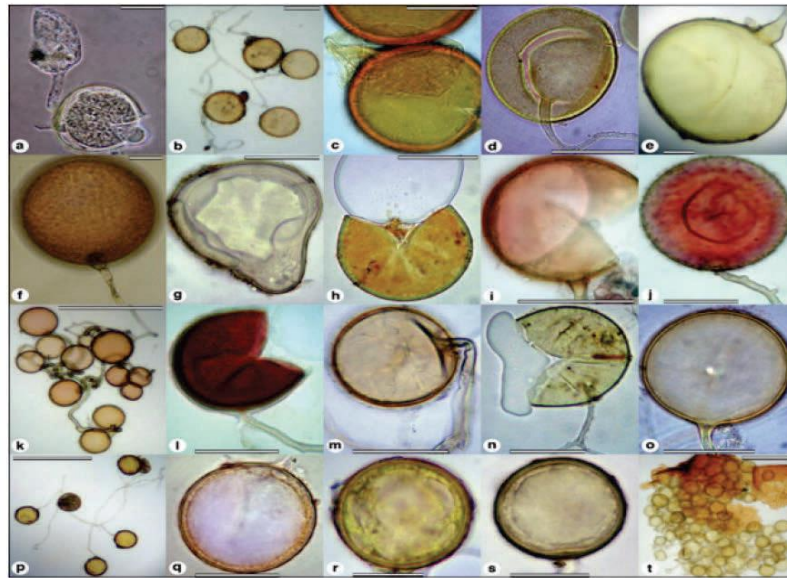


Figure 10. – illustration de la diversité de couleur et de forme des spores et des hyphes suspenseurs de CMA isolés (Stover et al. 2012). Barres d'échelle : 60 μm sauf pour r : 25 μm et k, p, t : 250 μm .

4.2.2. Structures spécifiques aux endomycorhizes à arbuscules

Les mycorhizes arbusculaires sont formées par trois composantes essentielles : (i) les racines de la plante hôte, (ii) les structures fongiques formées dans et entre les cellules du cortex racinaire et (iii) le mycélium extra-racinaire qui se développe dans le sol (Smith et Read, 2008).

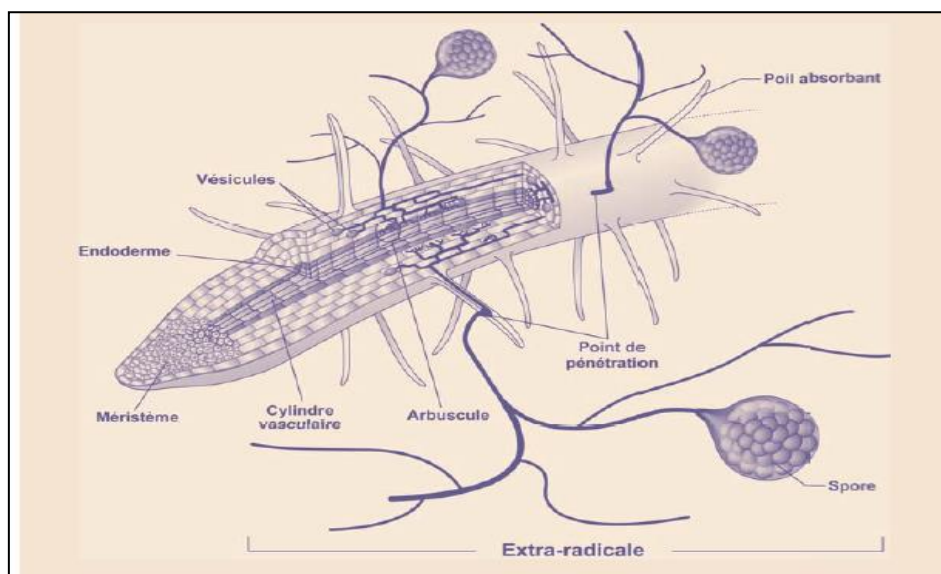


Figure 11. – représentation schématique d'un apex racinaire mycorhizé par un champignon arbusculaire (Fortin et al., 2013)

4.2.2.1. Les hyphes fongiques

Selon Dalpé (2005), les hyphes sont des filaments coenocytiques (hyphes dépourvus de septa), qui colonisent à la fois le sol et les racines en établissant un pont entre la rhizosphère et la plante. Le développement d'un mycélium intra-racinaire permet la croissance simultanée dans le sol du mycélium extra-racinaire (Figure 11). À partir d'un point d'ancrage dans la racine, le champignon développe dans le sol une phase extra-racinaire qui s'étend en un réseau mycélien et envahit le sol adjacent dans toutes les directions. Le mycélium du CMA qui pousse dans le sol peut atteindre des longueurs importantes allant de 10 à 100 m par gramme de sol (Fortin et *al.*, 2008). Constituant ainsi une biomasse d'hyphes mycorhiziens variant entre 54 à 900 kg par hectare (Zhu et Miller, 2003).

Les fonctions de ce réseau sont multiples : le recrutement des nutriments dans les micro-infractuosités du sol, la formation de nouvelles mycorhizes avec les racines de plantes voisines (infections secondaires) et enfin, la production chez la plupart des espèces, de nouvelles spores (Paszkowski, 2006a ; Requena et *al.*, 2007)

4.2.2.2. Les arbuscules

Les arbuscules sont formés à partir des hyphes qui progressent dans les méats des cellules corticales et constituent un lieu d'échange entre les deux partenaires symbiotiques. Le développement de l'arbuscule se déroule dans un compartiment résultant de l'invagination de la membrane hôte appelée membrane périarbusculaire (Bonfante et Genre, 2010) ou symbiosome (Parniske, 2000). Celui-ci représente un nouveau compartiment, caractérisé par une grande surface d'échange entre les deux partenaires symbiotiques et comportant de nombreux transporteurs, tels que les transporteurs spécifiques de phosphate et des H⁺-ATPases génératrices d'énergie (Bucher, 2007) (Figure 12).

L'arbuscule est donc défini comme un lieu d'échange privilégié entre la plante et le champignon. La mise en place d'un arbuscule s'accompagne de profonds réarrangements dans les cellules corticales. Ces dernières contiennent d'avantage de plastides et de mitochondries et leur noyau devient enflé et multilobé (Genre et *al.*, 1998 ; Fester et *al.*, 2001). Les arbuscules ne sont pas des structures permanentes. Leur sénescence se fait après 4 à 10 jours de symbiose. Elle semble être fortement sous le contrôle de la plante, peut-être pour limiter l'extension du champignon MA dans les racines (Strack et *al.*, 2003).

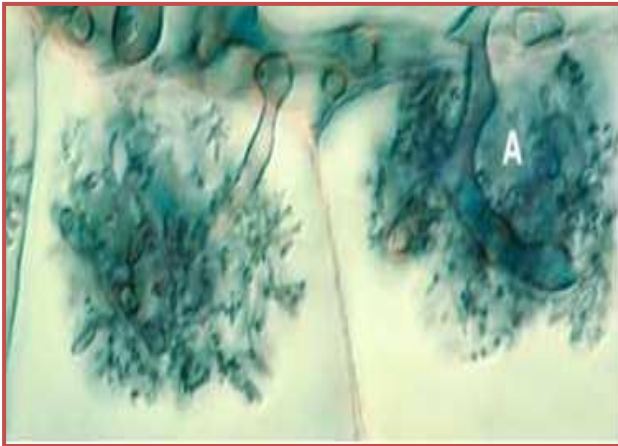


Figure 12. – aspect d'un arbuscule A (Martin, 2008 ; Brundrett, 2008).

4.2.2.3. Les vésicules

Les vésicules sont formées en général dans les couches superficielles de la racine. Elles sont localisées à l'intérieur ou entre les cellules corticales. Elles ont des parois épaisses, de forme variée, selon l'espèce fongique ; elles renferment en abondance des lipides et de nombreux noyaux. Elles jouent probablement un rôle dans le stockage des réserves et dans la propagation du champignon (Duhoux et Nicole, 2004). Certains genres de champignons décrits que comptent les CMA ne forment pas de vésicules.

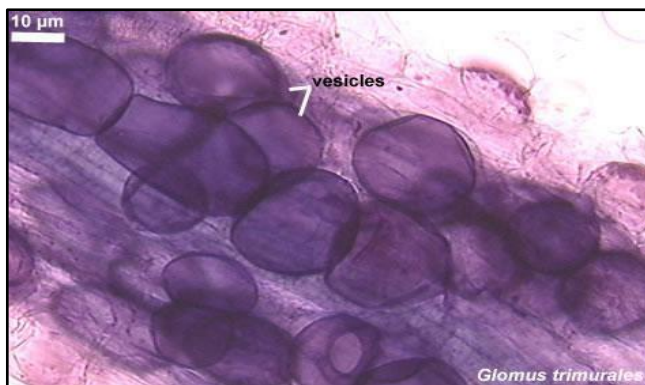


Figure 13. – aspect d'une vésicule (Blaszkowski, 2003).

4.2.2.4. Les spores

La reproduction des CMA est de type asexué (Reinhardt, 2007). Les spores asexuées formées dans le sol à partir des hyphes extra-racinaires sont des structures unicellulaires, de forme généralement globoïde, à paroi épaisse formée de plusieurs couches de différentes textures, reliées au réseau filamenteux par un hyphe suspenseur, elles sont formées de manière individuelle, en grappe ou en amas et entourées par des structures mycéliennes ou des membranes appelées sporocarpes (Blaszkowski, 2003). Elles peuvent contenir, selon les espèces, de plusieurs centaines à plusieurs milliers de noyaux. Un polymorphisme génétique important a été détecté dans ces spores polynucléées. Ceci a permis de faire une première

classification des champignons CMA basée principalement sur la morphologie des spores (morphotypes) (Redecker and Raab, 2006 ; Schwarzott, et *al.*, 2001).

4.2.3. Établissement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules

Les champignons mycorhyziens à arbuscules (CMA) sont des biotrophes obligatoires, non cultivables en l'absence de la plante hôte, de laquelle dépendent entièrement leur nutrition carbonée et l'accomplissement de leur cycle de développement qui se divise en cinq stades (Figure 14) (Tisserant, 2011).

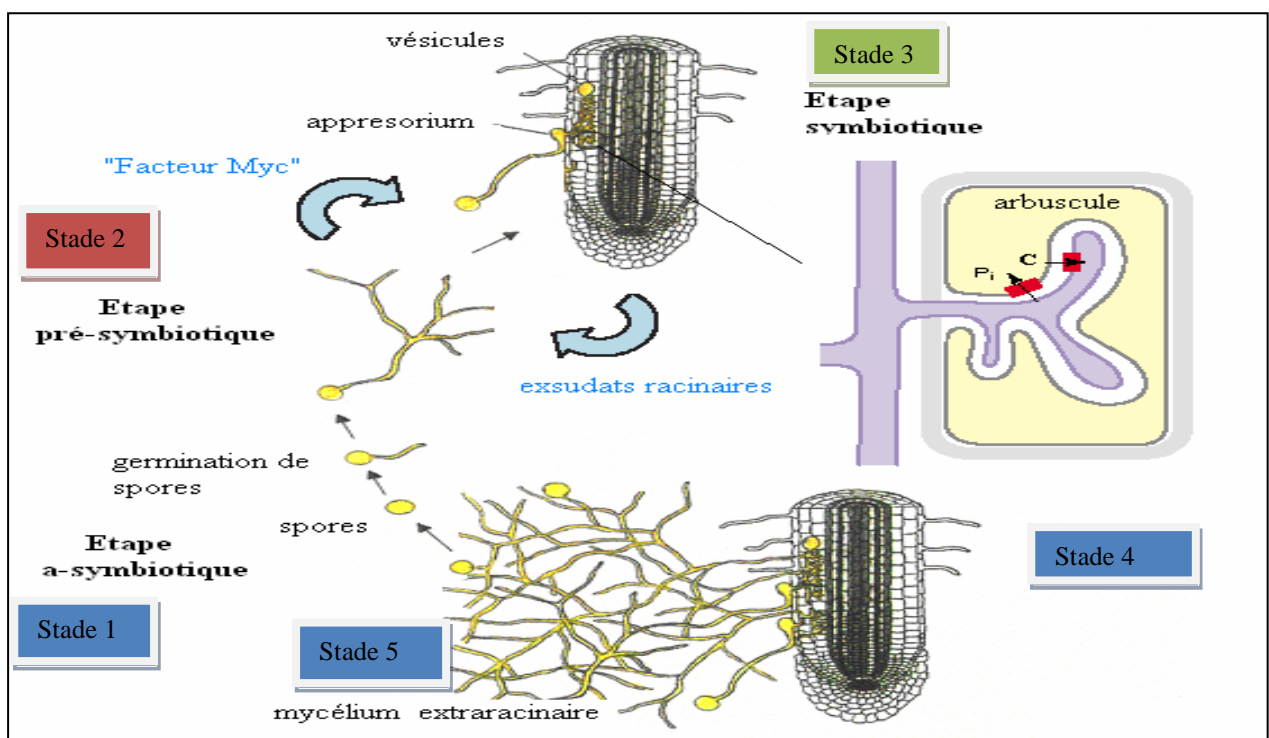


Figure 14. – principales étapes du développement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules. (Balestrini et Lanfranco, 2006)

Stade 1 : germination des spores et émergence d'un mycélium primaire ou promycélium. **Phase a-symbiotique**

Stade 2 : contact racinaire et développement d'un appressorium. **Phase pré-symbiotique**

Stade 3 : pénétration du CMA dans la racine et mise en place de la forme intraracinaire du champignon.

Le mycélium pénètre à l'intérieur du système racinaire, se renfle en vésicules et forme des arbuscules permettant une interface entre la plante et le champignon où les échanges nutritionnels auront lieu.

Stade 4 : la mycorhize ainsi formée produit un réseau extra-racinaire le long duquel sont différenciées de nouvelles spores.

Stade 5 : après leur maturation, ces spores seront à l'origine du promycélium de départ (stade 1).

4.2.3.1. Phase A- symbiotique

Les spores peuvent germer en absence d'une plante hôte (Smith et Read , 2008). La croissance du tube germinatif du champignon en absence de plante hôte (Figure 13) est limitée dans le temps (1 à 3 semaines selon les espèces de champignons MA) et est caractérisée par une faible utilisation des réserves du champignon (Bécard et Piché, 1989). Les spores des CMA sont capables de germer et d'entrer à nouveau en dormance de nombreuses fois, si des signaux racinaires ne sont pas perçus (Koske, 1981).

4.2.3.2. Phase pré-symbiotique

Durant cette phase, le champignon détecte la présence d'une racine hôte grâce à des molécules présentes dans les exsudats racinaires. Les hyphes les plus proches des racines (le promycélium) vont alors se ramifier de façon plus intense, ce qui engendre une utilisation accrue des réserves principalement lipidiques du champignon. Cette phase constitue une étape de reconnaissance et de dialogue entre les partenaires symbiotiques. En effet, la présence d'une plante hôte est détectée par les CMA grâce à des composés diffusibles, sécrétés dans ses exsudats racinaires tels que les strigolactones (Akiyama et *al.*, 2005); les flavonoïdes (Gianinazzi-Pearson et *al.*, 1989). Ces molécules activent en quelques minutes le métabolisme énergétique du champignon, la multiplication de ses mitochondries et sa prolifération cellulaire (ramification) (Besserer et *al.*, 2006). A son tour, le champignon libère les molécules signal (appelés facteurs Myc) qui induisent, avant le contact avec la racine, des réponses spécifiques de la racine-hôte, via l'activation transcriptionnelle de gènes de la plante associés au processus symbiotique (Lenoir, 2016). Outre le fait que les facteurs Myc sont des composés diffusibles qui suscitent des réponses symbiotiques des plantes, on n'avait pas d'idée précise sur leur structure, jusqu'à récemment. En effet, la structure de la molécule libérée par *Rhizophagus irregularis* a été identifiée. Le champignon MA sécrète un mélange de lipochitooligosaccharides sulfatés et non sulfatés (LCOS), qui ont des similitudes structurelles avec des facteurs Nod de *Rhizobium* (Maillet et *al.*, 2011).

4.2.3.3. Phase symbiotique

Les hyphes adhèrent ensuite aux parois externes des cellules de la racine, formant un hyphopodium, qui n'est pas totalement similaire à l'appressorium des champignons et des Oomycètes pathogènes. Pour l'appressorium, l'hyphe au contact des tissus de l'hôte enfle ; le cytoplasme se rétracte et un septum se forme. La pénétration dans les tissus de l'hôte se fait par dégradation enzymatique des surfaces épidermiques et augmentation de la pression de

turgescence dans l'appressorium. Chez les CMA, il n'y a ni septation, ni augmentation de la pression de turgescence, ni libération importante d'enzyme de lyse de la paroi de l'hôte (Genre & Bonfante, 2007 ; Lenoir, 2016). Le champignon pénètre par un mécanisme encore inconnu. La formation d'un hyphopode est hautement contrôlée par la concentration en phosphates et, plus cette concentration est grande, moins d'hyphopodes sont formés (Balzergue *et al.*, 2011). Lorsque les conditions sont favorables, notamment avec un taux réduit de phosphates et l'hyphopode fixé, la plante se prépare à la pénétration du champignon en développant un appareil de pré-pénétration (PrePenetration Apparatus - PPA) (Genre *et al.*, 2005). Cet appareil forme un "tunnel" où les hyphes du champignon peuvent alors y pénétrer et atteindre le cortex racinaire. Une fois à l'intérieur de la cellule, les hyphes se ramifient par dichotomie en donnant des hyphes ayant un diamètre de plus en plus petit ; à partir d'un hyphe initial de 10 µm de diamètre, les dernières ramifications peuvent atteindre moins de 1µm de diamètre. L'ensemble de ces ramifications prend une forme de petit arbre : les arbuscules, lieux des échanges symbiotiques, qui donnent le nom à ces champignons (Gavériaux, 2012 ; Garbaye, 2013). L'arbuscule est isolé du cytoplasme de l'hôte par une membrane périarbusculaire dérivée de la plante, sur une surface accrue par la ramification importante du champignon, favorisant ainsi les échanges. Les arbuscules et les cellules les abritant sont des lieux d'aménagements cellulaires spécifiques à la symbiose (Fester *et al.*, 2001), donnant lieu à des régulations géniques présentes exclusivement dans ces cellules de l'interface champignon plante (Gaude *et al.*, 2012), comme par exemple le transporteur de phosphate MtPt4, qui est essentiel au maintien de la symbiose (Harrison *et al.*, 2002). La majorité des CMA forment également des vésicules (Jabaji-Hare *et al.*, 1984). Ces structures peuvent devenir des propagules capables de coloniser une autre plante (Smith & Smith, 1997 ; Declerck *et al.*, 1998).

4.3. Mycorhization du blé

Les espèces graminées céréalières (blé, orge, maïs, sorgho, millet) sont considérées comme des plantes mycophile et sont utilisées dans la multiplication des champignons mychoriziens. Ces espèces forment des endomycorhizes à arbuscules (CMA) (Trouvelot *et al.*, 1982).

4.3. 1. Différences génétiques des capacités de mycorhization

La sélection variétale est le plus souvent orientée vers le choix de variétés modernes répondant à une culture intensive, consommatrice de produits phytosanitaires. Dans cet objectif, certaines variétés de blé très anciennes sont marginalisées. Ces dernières (variétés

populations) ont tendance à plus mycorhizer que les variétés modernes. Ce constat serait en relation avec l'histoire de la sélection de ces différents types de blés (Hetrick et al., 1993). En effet, les blés modernes présentant une "dépendance" aux intrants chimiques. Elles développent un système racinaire peu profond, car tous leurs besoins venant des intrants sont situés en surface. Cela peut réduire leur capacité à mycorhizer et à s'adapter aux milieux. En revanche, les blés populations ayant subi une pression de sélection naturelle s'adapteraient plus facilement aux milieux et pourraient donc mycorhizer davantage, lors du besoin notamment en phosphore (Devineau, 2015). Ce qui permet de conclure que malgré les innovations importantes du point de vu génétique sur les blés "modernes", il existe un réel manque de variétés en agriculture biologique ou adaptées à une agriculture à faible intrants (Ferrand, 2013).

Selon Essiane Ondo (2014), l'expression de la symbiose mycorhizienne dépendrait du génotype de la plante hôte et de celui du champignon considéré. Dans l'optique d'optimiser l'utilisation des mycorhizes, il est important donc de choisir la bonne combinaison plante champignon. Car même si la relation plante- champignon mycorhizien semble peu spécifique, de fortes variabilités existeraient dans la réponse de cette association en regard de la diversité des symbiotes (Hart et *al.*, 2003). Certains auteurs parlent donc de « spécialisation » de souches fongiques dans les diverses fonctions des mycorhizes (Bever et *al.*, 1996). A cet effet, les efforts de sélection de cultivars ou écotypes de blé compatibles avec des espèces de CMA bénéfiques pourraient améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des nutriments du blé (Daei et *al.* 2009).

Une variation génétique dans le blé dur pour la compatibilité avec les CMA existe (Xavier et Germida, 1997 ; Singh et al., 2012). Il est par conséquent, possible de sélectionner des génotypes de blé dur avec une compatibilité améliorée pour les CMA. La réactivité à la symbiose CMA seule n'est pas une cible de sélection appropriée, car le rendement d'une variété dépendante des CMA peut être vulnérable aux conditions où les ressources fongiques MA du sol sont inhibées ou limitées. La sélection de génotypes avec un développement de bonne et rapide symbiose CMA apparaît comme une meilleure stratégie pour le développement de variétés optimisant la contribution de CMA dans les systèmes de culture (Singh et *al.*, 2012). Davantage de génotypes doivent être criblés pour échantillonner la variation génétique présente dans le blé dur pour la symbiose et la réactivité CMA. Les gènes responsables de cette compatibilité doivent maintenant être identifiés et utilisés comme cibles

dans la sélection assistée par marqueurs de géotypes de blé dur, qui améliorent les ressources fongiques MA du sol et la durabilité des agro-écosystèmes (Lehnert et *al.*, 2017).

4.3.2. Développement de la mycorhization en fonction du cycle du blé

Pour comprendre les fonctions des CMA dans une culture annuelle, ainsi que leur biologie de base, il est essentiel de suivre la variation saisonnière de ces champignons et les divers facteurs qui les affectent. La colonisation des racines et la production de spores fongiques sont importantes pour élucider le cycle biologique des champignons (Li et *al.*, 2005). Leurs schémas saisonniers varient d'une espèce végétale à l'autre, ce qui concorde avec l'idée que la symbiose AM est considérée comme probablement spécifique à chaque espèce de plante hôte. Bohrer et *al.*, (2004) concluent que les facteurs abiotiques ont une influence minime sur la variation de la colonisation AMF, donc la dynamique saisonnière des AM est liée à la phénologie végétale. Il a été bien établi dans la littérature que le développement des CMA dans les racines des plantes suit une fonction sigmoïdale avec typiquement 3 phases : un retard, une phase exponentielle et une phase d'infection en plateau (Allen, 2001).

Cependant, une grande attention a été donnée à la mycorhization précoce du blé, car elle permet d'optimiser l'acquisition du phosphore par les racines dans des sols pauvres ou calcaires (Castillo et *al.*, 2012). Dans une expérience en chambre de croissance avec des conditions idéales de température (22°C) et d'humidité, après une MA inoculation du blé, la mycorhization racinaire est observée 5 semaines après le semis au stade de six à huit feuilles (Mohammad et *al.*, 1995), alors qu'en plein champ, la mycorhization est plus tardive ; elle démarre au printemps pour les blés d'hiver et atteint un pic au stade montaison (Hetrick et *al.*, 1984 ; Mohammad et *al.*, 1998 ; Bohrer, 2004). Une faible infection pendant l'hiver est liée à des températures du sol plus basses (inférieures à 10°C), qui peuvent empêcher la germination des spores qui se produit plus lentement ou est entièrement inhibée à des températures du sol inférieures à 18°C et réduire la colonisation (Hetrick et *al.*, 1993 ; Brundrett et *al.*, 1985).

En revanche, d'autres chercheurs ont observé que la colonisation peut varier de 1 à 40% dans les 2 mois suivant l'ensemencement du blé d'hiver, ce qui correspondrait au stade tallage. Saif et Khan (1975), Buwalda et *al.* (1985), ainsi que Dodd et Jeffries (1986) ont rapporté que plus de 50% des segments racinaires du blé d'hiver étaient mycorhizés un mois après le semis. Il semble donc que la réponse du blé d'hiver aux CMA soit affectée par des facteurs environnementaux et agricoles propres au site (Schalamuk, 2004).

Durant le stade remplissage du grain, la colonisation racinaire se stabilise (Jakobsen et Nielsen, 1983) ou diminue (Cade-Menun et *al.*, 1991), mais reste plus élevée que l'infection aux premiers stades de croissance (Mohamad et *al.*, 1998). Ceci s'explique par le fait qu'au fur et à mesure que le grain mûrit, la photosynthèse est ralentie et les nutriments sont transférés des feuilles vers le grain (Karlen et Whitney, 1980). Par conséquent, le niveau d'apport de la photosynthèse aux racines peut correspondre à la baisse de colonisation observée lors du remplissage des grains (Mohamad et *al.*, 1998).

D'autre part, une étude sur la mycorhization précoce des céréales (30JAS) a montré que le blé avait le plus petit rapport entre la biomasse des racines non mycorhizées et mycorhizées, comparativement à celui de l'orge et de l'avoine. Les variétés de blé avec plus de racines produisent en général également plus de biomasse de racines mycorhizées. Il est supposé que la biomasse racinaire est corrélée à la longueur des racines et que grâce à une exploration plus intensive du sol, davantage de racines ont été infectées par des propagules fongiques AM réparties dans le sol. Ainsi, les génotypes de céréales avec plus de racines peuvent théoriquement utiliser plus efficacement les populations mycorhiziennes indigènes. (Castillo *al.*, 2012 ; Sieverding, 1991). La mycorhization précoce du blé a des répercussions sur la santé des racines, car lorsque la symbiose mycorhizienne s'établit en premier, avant que les racines ne soient attaquées par les agents pathogènes ou les nématodes, elle favorisera la «santé de la rhizosphère». Elle a également un effet sur la nutrition en phosphore, surtout dans les sols pauvres. Li et *al.*, (2006) ont montré que plus de 50% de l'acquisition de P au cours des 36 premiers jours de la culture du blé était due à des mycorhizes. Il y a lieu de noter qu'une carence en P dans les 15 jours suivant le semis aura un impact sur la hauteur des plants, la longueur racinaire, le tallage et enfin sur la productivité en grains (Snyder et *al.*, 2003).

4.3.3. Rôles de la mycorhization du blé

4.3.3.1. Rôle dans l'absorption et le transfert des nutriments du sol

De nombreuses études ont examiné le rôle clé des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) dans l'optimisation de l'absorption et la translocation des nutriments, en augmentant la surface racinaire des plantes. En effet, les hyphes mycorhiziens ont la capacité de s'étendre et d'explorer une plus grande surface du sol, comparativement au système racinaire de la plante hôte (Smith et Smith, 2011). En absence de ce partenariat symbiotique, l'absorption rapide des micro et macroéléments du sol par la plante seule crée une zone d'appauvrissement

à proximité de son système racinaire (Bucher, 2007) et un approvisionnement en éléments nutritifs est transféré à la plante (Javaid, 2009). De même, le diamètre fin des hyphes mycorhiziens (2–20 µm) permet d'accéder aux interstices du sol, inaccessibles pour les racines des plantes (Smith et Read, 2007). Drew et al. [2003] ont mis en évidence une capacité des CMA à ajuster le diamètre de leurs hyphes, en fonction de la taille des pores du sol et de pouvoir de cette manière, assurer la nutrition hydrique et minérale des plantes indépendamment de la texture du sol. D'autres auteurs ont mis l'accent sur la production des CMA de certaines enzymes et acides organiques, qui représentent respectivement une source de phosphore et un moyen pour dépolymériser les polymères azotés organiques, afin de fournir à la plante une source secondaire d'azote, comme celle de la biomasse microbienne morte (García et al., 2000 ; Leigh et al., 2008).

L'effet positif de la symbiose mycorhizienne sur la réponse des plants de blé à l'absorption des nutriments a été récemment bien documenté par de nombreux chercheurs. Une méta-analyse menée sur 38 essais, avec 333 observations ont mis en évidence l'effet bénéfique de l'inoculation de CMA en plein champ, sur le poids sec du blé et l'absorption de P, N et Zn (Pellegrino et al., 2015). Dans ce sens, Ma et al. (2019) ont révélé une concentration de Zn de 1,13 à 2,76 fois plus élevée dans les plants de blé traités avec *Funneliformis mosseae* et *Rhizophagus intraradices*. Ryan et Angus (2003) ont montré une augmentation de l'absorption de Zn avec *Rhizophagus irregularis* et l'administration de *Scutellospora calospora* aux plants de blé. De plus, une corrélation positive entre la concentration de Zn dans les grains de blé et le niveau de colonisation par les CMA a été suggérée dans une étude de Ryan et al. (2008).

Al-Karaki (2002) et (Li et al., 2006) montrent à travers l'inoculation avec *Rhizophagus irregularis* une dépendance des plantes de blé de printemps aux mycorhizes pour l'absorption de P, avec une contribution des champignons mycorhiziens de plus de 50%. Un effet bénéfique de la phosphatase minéralisante (P-ase) des racines de blé colonisées par *Claroideoglossum etunicatum* sur l'acquisition des plantes en P a été également observé (Al-Karaki, 2002).

4.3.3.2. Rôle dans l'adaptation au stress abiotiques

Plusieurs études sur les stress abiotiques ont montré comment les activités humaines liées à l'agriculture (utilisation excessive de pesticides et d'engrais, irrigation) et à la construction (déforestation, diffusion de déchets) ont eu des effets négatifs sur la croissance, la santé et le rendement des plantes, entraînant des pertes de production importantes et catastrophiques (Plouznikoff et al., 2016 ; Kulkarni et al., 2019). Les réponses des plantes aux stress

impliquent une voie générique qui commence par l'acquisition du signal de stress par le récepteur membranaire et se termine par l'expression de gènes, dont les produits peuvent assurer la défense des plantes, directement ou indirectement (Rejeb et *al.* 2014). Néanmoins, de nombreuses études sur la symbiose AM ont confirmé la contribution du champignon impliqué pour aider la plante à résister aux stress abiotiques, tels que la sécheresse, la salinité et la contamination par les métaux lourds, par la mise en œuvre de divers mécanismes.

Dans le cas du stress salin, de nombreux travaux scientifiques récents ont mis en évidence l'existence d'espèces d'AMF tolérantes au sel qui, étant capables de maintenir une bonne efficacité dans la colonisation des racines et la formation de symbiose, aident les plantes à surmonter le problème de salinité. En particulier, les scientifiques font référence à quatre capacités différentes de l'AMF pour atténuer le stress salin.

- a) Augmentation de la consommation d'eau : les hyphes mycorhiziens peuvent mieux se répandre dans le sol, en absorbant plus d'eau et en évitant la déshydratation des plantes et la perte de turgescence, qui sont deux conséquences de la salinité compromettant l'état hydrique de la plante (Latef et Miransari, 2014).
- b) Augmentation de la nutrition minérale liée au maintien d'un rapport K/Na élevé : l'association des plantes avec l'AMF, grâce à leur plus grande capacité d'exploration du sol, a montré une augmentation de la nutrition minérale totale (P, K, Fe, Cu et Zn), avec une grande accumulation de K^+ , aidant les plantes à maintenir un rapport Na^+ / K^+ plus bas et ainsi éviter d'endommager leur fonctionnement biologique (Evelin et *al.*, 2019).
- c) Production intense de solutés organiques compatibles : ce sont des composés de faible poids moléculaire et hautement solubles, tels que la proline, la glycine, la bêtaïne et les sucres solubles, qui s'accumulent à des niveaux plus élevés dans les plantes mycorhizées et semblent être positivement corrélés à la colonisation des plantes par les champignons. La production de ces solutés peut contribuer à l'ajustement osmotique cellulaire, grâce à leur rôle clé dans la détoxification des ROS (*reactive oxygen species*), la protection de l'intégrité membranaire et la stabilisation des enzymes/ protéines (Sanchez, 2007).
- d) Amélioration de l'activité enzymatique antioxydante : plusieurs études ont suggéré que la symbiose AM intensifie l'activité du système enzymatique, comme la superoxyde dismutase, la catalase et la peroxydase dans la désintoxication ROS, tels que les superoxydes, le peroxyde d'hydrogène et les radicaux hydroxyle. Les plantes mycorhizées présentent des niveaux généralement inférieurs de dommages oxydatifs (Ruiz-Lozano, 2003).

Presque toutes les recherches concernant le rôle de la symbiose mycorhizienne dans l'amélioration de la tolérance, de la croissance et du rendement des plants de blé sous un stress salin ont été menées dans des conditions de chambre de culture ou en serre, en utilisant un sol stérilisé et de l'eau salée ou un sol salé. Les expériences de Abdel-Fattah et Asrar (2012) et de Talaat et Shawky (2014) en Egypte ont montré le rôle clé des CMA dans la protection de certains cultivars de blé locaux contre l'effet néfaste de salinité, par inoculation mycorhizienne arbusculaire (en particulier *Funneliformis mosseae*), qui a atténué de manière significative les effets néfastes du stress salin sur les plants de blé, en réduisant l'absorption de Na et l'augmentation des teneurs en P, N, K et Mg, stimulant ainsi les pigments photosynthétiques et certains contenus métaboliques des plants de blé (Ibrahim et al., 2011 ; Mathur et al., 2018). Des expériences ont été menées en plein champ en Iran pour tester et vérifier le rôle de *Glomus etunicatum*, *Glomus mossae* ou *Glomus intraradices* dans l'augmentation significative de la croissance et de l'absorption des nutriments d'une lignée de blé à partir d'un sol salin (Daei et al., 2009 ; Mardukhi et al., 2011).

L'inoculation avec des champignons mycorhiziens à arbuscules a été bien connue pour stimuler la croissance du blé dans des conditions de stress dû à la sécheresse (Bernardo et al., 2019). L'inoculation avec *Funneliformis mosseae* a considérablement amélioré la production de biomasse des plants, en augmentant l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) et réduit les dommages oxydatifs, par une accumulation racinaire de composés connus pour jouer un rôle antioxydant, en réagissant directement avec les ROS. Des expériences conduites sur blé d'hiver en plein champ au Texas dans des conditions de stress hydrique ont montré que l'inoculation avec *Funneliformis mosseae* ou *Claroideoglomus etunicatum* a permis une amélioration importante du rendement (Al-Karaki et al., 2004).

La contamination des sols en divers polluants, dont les éléments trace métalliques (ETM) constitue un autre stress abiotique, qui peut être atténué par les champignons mycorhiziens arbusculaires, qui semblent jouer un rôle clé pour aider les plantes dans les zones contaminées par les métaux lourds (Leyval et Jonard, 2002). Ils représentent un excellent site d'adsorption pour l'accumulation de cations au niveau du mycélium extraradiculaire et empêchent leur passage dans les parties aériennes de la plante (Ghori , 2019). Dans les hyphes extra-radicaux, les métaux lourds sont fréquemment précipités par des protéines appelées glomalines, produites par les MA qui peut séquestrer les métaux dans les sols et ainsi réduire leur phytodisponibilité. Un autre effet positif de cette symbiose est localisé dans le sol, où les champignons AM libèrent des exsudats contenant des acides organiques (acide citrique,

malique, lactique, etc...), qui forment des complexes qui immobilisent les métaux lourds (Gomathy et al., 2011). Cette protection conférée par les champignons MA serait ainsi utilisée par les plantes métalphytes pour mieux se développer et coloniser les sols fortement pollués en métaux (Hildebrandt et al., 2007). De plus, les souches de champignons MA isolées de sites contaminés et donc tolérantes aux métaux auraient un meilleur effet protecteur pour la plante hôte, que des isolats fongiques non-tolérants (Hildebrandt et al., 2007).

L'effet positif du champignon sur la croissance de la plante est souvent lié à une augmentation du prélèvement du phosphore, en même temps qu'une diminution de la concentration en métaux dans les parties aériennes des végétaux (Heggo et al., 1990 ; Lee et George, 2005). C'est principalement la baisse de la concentration en métaux dans les parties aériennes des plantes mycorhizées, en partie due à l'augmentation de biomasse («effet dilution»), mais aussi à l'immobilisation des métaux dans la rhizosphère, qui permet d'atténuer l'effet toxique des métaux pour la plante (Kapoor et Bhatnagar, 2007). Une culture sous serre de blé inoculé par *Funneliformis mosseae* sur un sol artificiellement contaminé par de fortes concentrations de zinc, de cuivre, de plomb et de cadmium a montré comment la symbiose mycorhizienne a entraîné une augmentation significative du poids sec des racines et des pousses, de la teneur en chlorophylle et des lipides totaux (Rabie, 2005). La localisation ultrastructurale de métaux tels que Zn, Cd et Cu dans le mycélium fongique a permis de montrer que l'accumulation de ces ETM se fait surtout dans les parois cellulaires des hyphes extra-radicaux et dans les vacuoles des champignons MA (González- Guerrero et al., 2008). Ceci réduit leur teneur dans les racines de blé (Shahabivand, 2012).

Des effets positifs de la mycorhization sur le blé a été également observé sur l'absorption de bore (B) (Sonmez et al., 2009), dans l'amélioration du stress produit par l'arsenic (As) (Sharma et al., 2017). Ces derniers ont montré que la formation de MA a aidé la plante hôte à surmonter la carence en P induite par l'As, à maintenir un rapport P/As favorable et à réduire le stress oxydatif induit par l'arsenic (génération de H₂O₂ et peroxydation lipidique), avec des effets plus importants sous une concentration élevée d'As. De plus, la colonisation par l'AMF a entraîné des niveaux d'activité plus élevés des enzymes antioxydantes (superoxyde dismutase, catalase et guaiacol peroxydase), des concentrations plus élevées de molécules antioxydantes (caroténoïdes, proline et α -tocophérol) et une activité accrue des enzymes glyoxalase I et glyoxalase II, révélant le rôle multiforme de l'AMF dans l'atténuation de l'As toxicité (Sharma et al., 2017).

4.3.3.3. Rôle dans l'adaptation au stress biotiques

Les champignons AM peuvent être utilisés comme agents de lutte biologique potentiels contre les maladies des plantes (Bagy et *al.*, 2019 ; Nguvo et Gao, 2019), représentant dans le monde agricole, une alternative valable aux pesticides chimiques, utile pour promouvoir la durabilité et limiter les risques pour la santé publique. En effet, la symbiose AM est reconnue pour réduire les dégâts causés par un large éventail d'agents pathogènes du sol, y compris les champignons et les nématodes, qui causent souvent de grandes pertes de rendement (Sharma and Sharma, 2018). De plus, la plus grande tolérance des plantes mycorhizées contre les agents pathogènes des racines pourrait compléter une résistance quantitative innovante à allèles multiples obtenue par la sélection végétale, assurant une tolérance élevée des plantes aux agents pathogènes (Gianinazzi, 2010).

Cette protection des champignons MA contre les pathogènes est certainement liée à un ensemble de processus, tels qu'une compétition pour la colonisation des racines et pour l'absorption des nutriments (Jung et *al.*, 2012), une activation par le champignon des mécanismes de défense de la plante (Mustafa et *al.*, 2016), ou encore la production de substances fongiques perturbant le développement des pathogènes (Lucini et *al.*, 2019).

De nombreux auteurs ont rapporté que la symbiose mycorhizienne arbusculaire peut atténuer chez le blé les maladies des racines, causées par plusieurs agents pathogènes. L'inoculation du blé avec une espèce de champignon mycorhizien *Funneliformis mosseae* a montré une incidence plus faible de l'agent pathogène racinaire *Gaeumannomyces graminis* responsable de la maladie du piétin-échaudage, entraînant une augmentation de la masse sèche des pousses et du rendement en grains (Fiorilli et *al.*, 2018). Ces derniers ont rapporté qu'une telle inoculation a permis une réponse de défense à large spectre (broad-spectrum defense BSD) contre *Xanthomonas translucens*, où les gènes et les protéines ont joué un rôle régulateur dans le système immunitaire de l'hôte. De même, Mustafa et *al.* (2017) ont confirmé la capacité de contrôle biologique de *F. mosseae* contre *Blumeria graminis* agent pathogène de l'oïdium des céréales en induisant une résistance au blé inoculé.

4.3.3.4. Rôle dans la structuration du sol

Un autre effet des champignons MA est leur action sur la structure du sol. Les hyphes fongiques ont la propriété d'agir sur la macro-agrégation des constituants du sol et donc sur la stabilité du sol (Rillig et *al.*, 2003). La stabilité des sols est très importante dans la lutte contre

l'érosion, la perte des nutriments et de la matière organique par lixiviation, qui entraînent une baisse de la productivité en agriculture (Rillig *et al.*, 2003).

L'enchevêtrement des racines fines et du mycélium fongique joue un rôle physique dans la liaison des micro-agrégats (diamètre < 250 µm) entre eux, pour former des macro-agrégats (> 250 µm) stables ; la stabilité de ces macro-agrégats étant corrélée à la longueur des hyphes dans le sol (Bai *et al.*, 2009). La liaison des microaggrégats est due à la production en grande quantité de polysaccharides par le mycélium extraradriculaire. Les champignons MA produisent en effet une glycoprotéine : la glomaline (Bai *et al.*, 2009), qui influence la stabilité du sol et dont la concentration dans les sols dépend de la plante hôte et du champignon associé (Rillig et Steinberg, 2002). Cette protéine fongique a été identifiée comme étant un homologue d'une « heat shock protein », qui est une protéine de réponse au stress (Wu *et al.* 2012). Les conditions de stress seraient en effet un facteur influençant la production de glomaline, car celle-ci est produite en plus grande quantité lorsque la croissance du mycélium est limitée (Rillig et Steinberg, 2002).

Cependant l'effet de la promotion de l'agrégation n'est pas toujours le même et dépend de la morphologie des racines de la plante hôte et du type d'association avec le champignon. L'effet le plus fort sur la macro-agrégation a été observé avec les fines racines d'une plante hôte (0,2 à 1 mm de diamètre) (Ganugi *et al.*, 2019).

4.3.4. Potentiel infectieux mycorhizogène (PIM) du sol

Le potentiel infectieux mycorhizogène (PIM) d'un sol représente ainsi sa richesse en propagules mycorhiziennes sous forme de spores, de mycélium et de fragments racinaires portant des structures mycorhiziennes et susceptibles d'initier chez les plantes, la formation d'associations mycorhiziennes (Plenchette *et al.*, 1989). Le PIM₅₀ caractérise la quantité de sol nécessaire pour mycorhizer 50% d'une population de plantes, il varie en fonction des types de sols. Une faible valeur de PIM₅₀ correspond à un potentiel infectieux élevé. Selon Bouazza Marouf (2016), il faut 100g de sol nu non stérilisé pour mycorhizer 50% des plantes, alors qu'une quantité de 16,22g et 29,50g de sols rhizosphériques sous des espèces végétales respectives *A. saligna* et *R. monosperma* est suffisante.

La restauration d'un PIM acceptable dans un sol passe par deux principales stratégies :

- (i) la gestion du potentiel mycorhizien endogène au travers d'espèces végétales très mycotrophes ;

- (ii) l'inoculation préalable des plants par des symbiotes fongiques sélectionnés avant leur mise en terre.

4.3.4.1. Gestion du potentiel mycorhizien infectueux endogène (PMI)

2.3.4.1.1. Effet du précédent cultural sur le PMI

L'amélioration du PMI peut se faire par la culture d'espèces végétales, capables d'accroître le stock endogène de propagules mycorhiziennes (Allen et al., 2001 ; Jansa et al., 2006). Dans les agro-écosystèmes, ceci se fait par le choix d'une culture mycotrophe et surtout par le choix d'un bon précédent cultural. Contrairement à la fertilisation, le choix du précédent cultural doit être en faveur de la colonisation racinaire en CMA de la culture suivante. A titre d'exemple, le cas du précédent pois chiche a été cité comme étant favorable à la colonisation racinaire du blé et a permis d'augmenter son rendement (Bakhshandeha et al., 2017). Les densités de spores et d'hyphes de CMA, ainsi que leur infectivité, sont généralement plus faibles dans un sol nu ou dans des sols plantés de cultures non mycorhiziennes, comme le colza (Jansa et al., 2006). Une rotation culturale diversifiée favorise mieux l'installation d'un inoculum mycorhizien naturel, qu'une monoculture (Oehl et al., 2003). La colonisation des racines de sorgho au Niger et au Burkina Faso était de 10 à 15% plus élevée en rotation avec le niébé ou l'arachide, que s'il était cultivé en monoculture (Alvey et al., 2001). La colonisation des racines de coton irrigué en Australie était plus élevée en culture associée avec du pois ou du blé qu'en culture seule (Hulugalle et al., 1999). Une plus grande diversité de CMA est généralement rencontrée dans les cultures en rotation que dans les monocultures (Oehl et al., 2003), car pour chaque espèce cultivée, il y a une dominance de cortège d'espèces de champignons mycorhiziens. Les espèces *Gigaspora gigantea*, *Glomus albidum*, *G. mosseae* et *G. etunicatum* dominaient la communauté de CMA cultivés sous maïs, alors que *G. caledonium* et *G. microcarpum* étaient abondants sous le soja et *Glomus occultum* était le plus abondant sous le blé et orge (Douds et Millner 1999 ; Troeh et Loynachan, 2003). De même, la rotation des cultures de maïs avec le soja a également changé la composition de la communauté de CMA, par rapport à la monoculture de maïs au Nigéria (Sanginga et al., 1999).

4.3.4.1.2. Effet des adventices des cultures sur le PMI

Dans un agro-écosystème les espèces cultivées interagissent avec les espèces d'adventices, qui peuvent aider à maintenir une forte diversité de population de champignons MA (Baumgartner et al., 2005). L'utilisation des herbicides n'a pas d'effet direct sur la

communauté de CMA (Mujica et *al.*, 1999), mais en détruisant la plante hôte (adventice), ces pesticides réduisent la colonisation des racines des plantes voisines, ainsi que la densité d'hyphes et de spores (Jansa et *al.*, 2006).

D'autre part, des études suggèrent avec des preuves considérables que les CMA peuvent influencer sur la nature des communautés d'adventices dans les agro-écosystèmes de diverses manières, y compris en modifiant l'abondance relative des espèces mycotrophes (hôtes de CMA) et des espèces non mycotrophes (non-hôtes) (Sanders et Koide, 1994). Ces effets peuvent simplement changer la composition des communautés d'adventices, sans affecter les dommages que ces communautés provoquent. Cependant, il est tout à fait plausible que les interactions avec les CMA puissent augmenter les effets bénéfiques des adventices sur le fonctionnement des agro-écosystèmes. Grâce à une variété de mécanismes, les interactions adventices /CMA peuvent réduire les pertes de rendement des cultures dues à ces plantes, limiter les changements d'espèces de ces dernières et augmenter leurs effets positifs sur la qualité du sol et les organismes bénéfiques (Gosling et *al.*, 2006). Si les effets bénéfiques des CMA sur la composition et le fonctionnement des communautés d'adventices peuvent être confirmés par des preuves plus directes, alors les CMA pourraient fournir un nouveau moyen de gestion écologique de ces plantes dans le cas par exemple du travail de conservation du sol et la protection des cultures, de couverture et d'engrais vert (Gosling et *al.*, 2006).

4.3.4.1.3. Effet des techniques culturales sur le PMI

Dans les sols non labourés, la proportion de biomasse fongique est plus élevée que celle de la biomasse bactérienne, comparativement aux sols labourés conventionnellement (Spedding et *al.*, 2004). Les analyses de profils d'acides gras montrent que cette augmentation est attribuée à un développement prononcé des CMA dans les sols sans labour (Drijber et *al.*, 2000). Le non labour des sols améliore la longueur des hyphes et la densité des spores, ce qui a un effet positif sur le taux de colonisation racinaire. Une colonisation plus rapide et plus précoce par les CMA est généralement observée dans les sols non labourés par rapport aux sols labourés (Mozafar et *al.*, 2000). Ceci permet une absorption plus élevée et précoce du P et du Zn par les plantes mycorhizées (Miller, 2000), avec éventuellement des augmentations de rendement, comme dans le cas du maïs (Grant et *al.*, 2001). Il peut aussi ne pas avoir d'impact sur le rendement (Galvez et *al.*, 2001). Cependant, l'effet du non tillage n'apparaît qu'après une certaine durée de changement de travail du sol. Aucun résultat n'est observé avant trois années (Berruti et *al.*, 2018).

La composition et la diversité des communautés de spores de CMA sont également affectées par le travail du sol (Kabir, 2005). Par exemple, les spores de *Glomus etunicatum* et *G. caledonium* sont plus abondantes dans les sols tempérés labourés, tandis que d'autres espèces (par exemple *Glomus occultum*, *Scutellospora pellucida*, *Acaulospora paulinae* et *Entrophospora infrequens*) sont plus abondantes dans les sols non labourés (Galvez et al., 2001; Jansa et al., 2002). La destruction du réseau de mycélium préétabli réduit la colonisation des racines par *Gigaspora rosea* et augmente celle par *Glomus manihotis* (Boddington et Dodd, 2000b). Ce mécanisme explique également la faible abondance de *Scutellospora* spp. et la dominance de *Glomus* spp. dans les sols labourés (Jansa et al., 2002, 2003).

4.3.4.1.4. Effet des conditions climatiques sur le PMI

Des corrélations positives entre les précipitations et les variables mycorhiziennes (colonisation par les hyphes et /ou les arbuscules) sont rapportés par Li et al., (2005) et He et al., (2002). Par contre, des corrélations négatives sont rapportées par Muthukumar et al., (2002).

Il est généralement considéré que les niveaux de lumière sont positivement corrélés avec la colonisation mycorhizienne (Koide et Mosse, 2004). Des niveaux de lumière plus élevés peuvent améliorer l'efficacité de la photosynthèse, ce qui peut contribuer à la croissance des CMA. Li et al., (2005) ont trouvé que les heures d'ensoleillement étaient négativement corrélées à la colonisation par les hyphes et les arbuscules. Ceci implique que la relation entre les conditions climatiques et la colonisation des CMA ne semble pas être simple et que son mécanisme reste encore inconnu.

4.3.4.1.5. Effet des caractéristiques édaphiques sur le PMI

Les caractéristiques édaphiques influencent également les variables mycorhiziennes. Dans ce sens, les travaux de Li et al., (2005) rapportent que la colonisation par les CMA est corrélée négativement avec la présence du P dans le sol (P total et P soluble). Des niveaux extrêmement bas de P pourraient inhiber cette colonisation et l'augmentation des niveaux de P pourrait la favoriser (Koide et Mosse, 2004). En effet, cette corrélation ne se produirait pas lorsque la quantité de P limite la croissance des plantes (Bohrer et al, 2004). Une corrélation négative entre la sporulation des CMA et le P du sol a également été signalée (Mohammad et al., 2004; Panwar et Tarafdar, 2006). En revanche, Mohammad et al. (2004) ont rapporté une corrélation très faiblement positive entre la densité des spores de CMA avec le pH et la

matière organique du sol, dans un agro-écosystème semi-aride du nord de la Jordanie. On rapporte généralement que le K du sol a un effet stimulant sur les attributs de CMA (Ouimet et *al.*, 1996) et qu'un niveau minimum de K dans le sol a été suggéré comme une condition préalable à la colonisation AM chez certaines espèces végétales (Ouimet et *al.*, 1996). Dans d'autres études, cette corrélation n'est pas vérifiée (Oliveira et Oliveira, 2010; Panwar et *al.*, 2011).

Un système racinaire étendu du blé d'hiver le rend généralement moins dépendant de la symbiose mycorhizienne (Mosse, 1986). Cependant, certaines études rapportent des indices de colonisation racinaire en CMA variant entre 54 et 95% (Kumar, 1992 ; Panwar et *al.*, 2011) en relation avec les faibles teneurs en phosphore (P) du sol. Elle peut être en relation avec la densité des spores, qui augmente avec le réchauffement du sol. Dans ce sens, Panwar et *al.* (2011) signalent que les valeurs maximales de colonisation et de sporulation des CMA sont observées respectivement durant les périodes (février - mars) et (mars - avril). Le degré de mycorhization du blé varie également en fonction des conditions environnementales et des pratiques agricoles propres au site cultivé (Oehl et *al.*, 2009).

4.3.4.2. Amélioration du PMI par les inoculum mycorhiziens

La diversité fonctionnelle des champignons mycorhiziens et leur non spécificité d'hôtes a facilité la fabrication des inoculum mycorhiziens. Un inoculum comprenant une ou deux souches de CMA peut être utilisé sur plusieurs espèces de cultures ; ce qui explique le succès de l'inoculation des racines des plantes d'orge et de blé par les spores provenant du palmier dattier (Akiyama, 2007). Les biofertilisants sous forme liquide, poudre fine ou granulaire à base des inoculum mycorhiziens ont fait leurs preuves dans le secteur des grandes cultures, depuis trois ans, près de 200 producteurs de maïs et soya canadiens testent les inoculants mycorhiziens (Faucher et Perreault, 2013).



Figure 15. – biofertilisants (Faucher et Perreault, 2013).

Les inoculums mycorhiziens permettent d'améliorer la survie et la croissance des plantes par une meilleure nutrition hydrique et minérale, et de reconstituer le PMI du sol (Duponnois *et al.*, 2005b; Hemissi *et al.*, 2019 ; Haro, 2020). En effet une augmentation de rendement moyen obtenue à travers le Canada dans les essais de cultures de blé bio fertilisées avec l'inoculant mycorhizien Myke Pro est de 10,1 %. Le cultivar avec mycorhizes semble avoir passé plus facilement à travers les stress hydriques de l'été, son feuillage est vert par rapport à celui du cultivar sans inoculum (Faucher et Perreault, 2013).



Figure 16. – mycorhization d'un essai de céréales (à droite blé inoculé à gauche blé non inoculé) (Faucher et Perreault, 2013).

Cela dit certains auteurs signalent un effet négatif d'un inoculum mycorhizien commercial altère la communauté microbienne rhizosphérique (Mummey *et al.*, 2009). Comme il peut également altérer les exsudats racinaires quantitativement et qualitativement (Vierheilig *et al.*, 2000; Scervino *et al.*, 2005). Srivastava *et al.* (2007) suggèrent que les inoculants mycorhiziens peut altérer communautés microbiennes rhizosphériques en changeant les conditions rhizosphériques.

4.3.5. Interaction des champignons mycorhiziens avec les organismes microbiens du sol

Il est parfaitement démontré que la symbiose mycorhizienne conditionne le fonctionnement microbien des sols, en exerçant une pression sélective sur les microorganismes saprophytes du sol, tant au niveau de leur diversité génétique que de leur diversité fonctionnelle (Frey-Klett *et al.*, 2005), afin de constituer un complexe trophique associant le symbiote fongique, la microflore mycorhizosphérique et la plante.

4.3.5.1. Interaction des champignons mycorhiziens avec les Plant Growth-Promoting Rhizobacteria PGPR

Des interactions synergiques ont été décrites entre le développement des symbiotes mycorhiziens et celui d'autres microorganismes, également importants par leur rôle dans l'amélioration de la croissance des plantes et communément appelés **Plant Growth-Promoting Rhizobacteria** (PGPR) (Bilgo et al., 2013). Une preuve des interactions positives entre les CMA et les bactéries isolées de leurs spores a été fournie par Battini et al. (2017), qui ont montré une absorption accrue de P, via une voie mycorhizienne chez les plants de maïs en présence d'une souche particulièrement efficace : *Streptomyces sp.* En conditions de plein champ, un effet synergique entre des rhizobactéries et des CMA stimulant la croissance des plantes a été observé. Ceci a été corrélé à une teneur plus élevée en P ($67,8 \text{ mg plante}^{-1}$), suite à la co-inoculation d'*Azotobacter chroococcum* avec *Bacillus spp.* et *Rhizophagus fasciculatus* de plants de blé (Khan et Zaidi, 2007). De même, l'inoculation avec *G. intraradices* et *Pseudomonas sp.* a montré une efficacité dans la solubilisation du phosphore naturel et a amélioré la biomasse et le contenu total en phosphore de la paille de blé ; ce qui a permis la mise au point d'un inoculant biologique pour le blé irrigué du Mali (Amadou Hamadoun, 2003).

Les meilleurs résultats en matière de réduction de l'impact des agents pathogènes ont été trouvés à 4 semaines après l'administration combinée de la souche RA56P de *Pseudomonas fluorescens* (PGPR) et d'un champignon mycorhizien arbusculaire (Behn, 2008).

Une teneur accrue en sélénium (Se) dans le grain de blé par inoculation mycorhizienne a été rapportée par Luo et al. (2019) et Durán et al., (2015), en parallèle des co-inoculations avec des souches de sélénobactéries. Elles ont entraîné une teneur en sélénium 23,5% plus élevée (725 mg kg^{-1}) que celle des plantes non mycorhizées (587 mg kg^{-1}).

Une étude récente de Blackwell et al., (2015) a montré que l'inoculation mycorhizienne combinée à un traitement de biochar a amélioré la nutrition minérale du blé. Cette recherche a montré comment les complexes biochar-minéraux (BMC), associés au champignon AM, augmentent l'absorption des nutriments du blé (*Triticum aestivum*, cv. *Wyalkatchem*), en particulier pour N, P, K, S et Zn. Ces résultats confirment l'explication de Saito et Marumoto (2002), selon laquelle le biochar influence l'activité microbienne en fournissant un microhabitat faiblement alcalin dans les espaces poreux.

4.3.5.2. Interaction des champignons mycorhiziens avec les Dark Septate Endophytes (DSE)

4.3.5.2. 1. Définition :

Les endophytes brun septés (DSE) sont un groupe de champignons qui habitent les racines des plantes hôtes ([Jumpponen and Trappe, 1998](#) ; Rodriguez et al., 2009). Ils sont caractérisés par des pigments bruns et des hyphes septés formant des microsclérotés localisés dans les zones intracellulaires des racines ([Piercey et al., 2004](#)) (Figure 17 et 18).

Ils ont été isolés des racines de plantes au début de 20^{ème} siècle par Gallaud and Peyronel (Jumpponen & Trappe, 1998), ces champignons ont été appelé Mycelium radiceis atrovirens (MRA) littéralement traduit par “dark root mycelium”; ce nom a été utilisé jusqu’en 1991 lorsqu’il a été remplacé par Dark septate endophyte (Stoyke & Currah, 1991). Ils appartiennent aux ascomycètes et à la classe des endophytes non clavicipitacées. Ils forment environ 114 familles, 320 genres et près de 600 espèces.

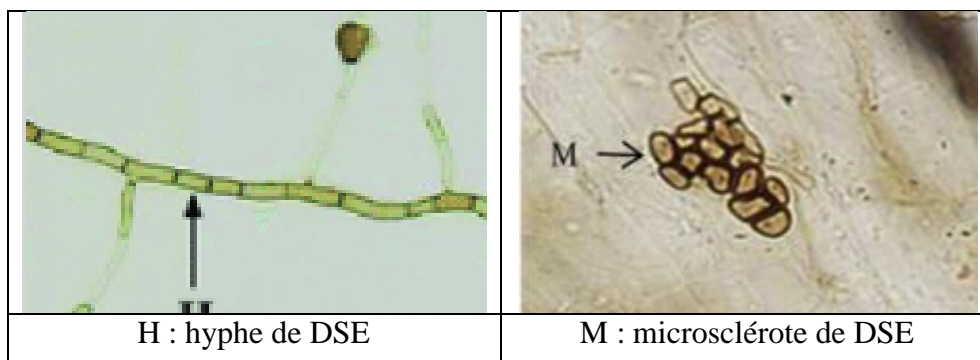


Figure 17. – observation microscopique de DSE *Acrocalymma vagum* (He et al., 2020)

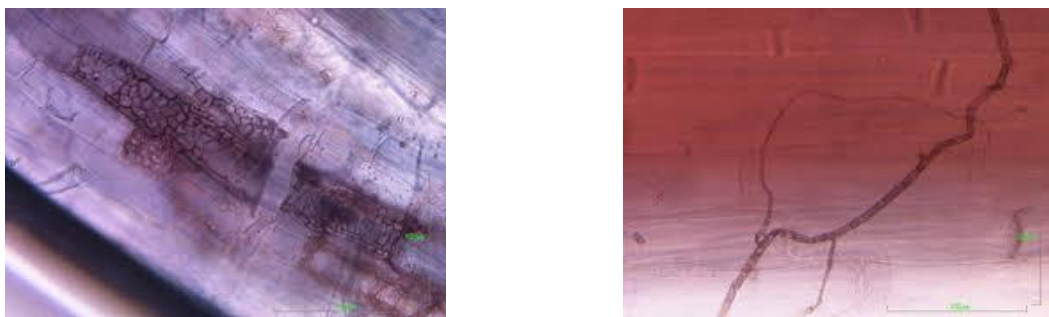


Figure 18. – structures de DSE observées dans les racines de blé (à gauche microsclérote mélanisé ; à droite hyphes de DSE mélanisés) (Navarro-Borrell et al., 2012).

À ce jour, il existe un nombre limité d'études décrivant les DSE dans les cultures céréalières mais des travaux récents ont montré que l'inoculation de plants par des champignons DSE permet :

- L'amélioration de la physiologie du végétale;
- l'amélioration de la croissance des plantes en facilitant l'absorption de C, N et P (Surono and Narisawa, 2017) ;
- Protection des plantes contre les stress biotiques (pathogènes) en produisant des métabolites secondaires (Zhang et al., 2017) et abiotiques (métaux lourds et sécheresse)(Santos et al., 2017).
- Ils sont considérés aussi comme des alternatives prometteuses pour remplacer les fertilisants chimiques dans les systèmes d'agriculture durable et biologique (Derkaoui, 2015).

Une co-colonisation racinaire des CMA avec les DSE est rapportée par plusieurs auteurs (Jumpponen et Trappe, 1998 ; Liu et *al.*, 2011 ; Zubek et al., 2011) chez les Graminées (Lugo et *al.*, 2018). L'extension de la colonisation des CMA et celle des DSE étaient positivement corrélées. Les auteurs précisent que ces deux organismes symbiotiques peuvent avoir établi des associations synergiques et bénéfiques avec les Graminées dans ces écosystèmes distinctifs et difficiles

Partie 2

Matériel et méthodes

2.1. Caractéristiques de l'expérimentation

Deux expérimentations en plein champ ont eu lieu au niveau des stations expérimentales de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif et Saida, qui correspondent à deux zones agro-climatiques différentes. Les expérimentations ont visé deux objectifs différents.

Expérimentation de Saida : étude du comportement symbiotique racinaire mycorhizien et endophytique de quatre variétés de blé dur (*Triticum durum*) et deux variétés d'orge (*Hordeum vulgare*), à un stade précoce, sous des conditions naturelles de plein champ, dans une zone semi aride de l'Ouest algérien, selon les conduites culturales les plus communément pratiquées.

Expérimentation de Sétif : étude de l'effet des techniques culturales (semis direct et semis conventionnel) sur le comportement symbiotique racinaire mycorhizien et endophytique d'une variété de blé dur dans une zone semi aride de l'Est algérien, sur une durée de cinq années.

2.2. Localisation géographique des sites expérimentaux

2.2. 1. Station expérimentale de l'ITGC de Saida

La station expérimentale de Saida est située à Ain El Hadjar, qui se trouve à 11 km au sud de la ville de Saïda à l'entrée des Hauts Plateaux de l'Ouest algérien. Elle est située à une altitude de 1050 m, avec une longitude de 2°20'Ouest et une latitude de 34°30'Nord (Figure 19).

2.2. 2. Station expérimentale de l'ITGC de Sétif

La station expérimentale de Sétif est située au lieu dit R'MADA, à 4 km au sud-ouest de la ville de Sétif dans la région des Hauts Plateaux de l'Est algérien. Le site expérimental est situé à une altitude de 962 m, avec une latitude de 36° 09'Nord et une longitude de 5° 22'Est (Figure 19).

SITUATION GEOGRAPHIQUE DES SITES EXPERIMENTAUX

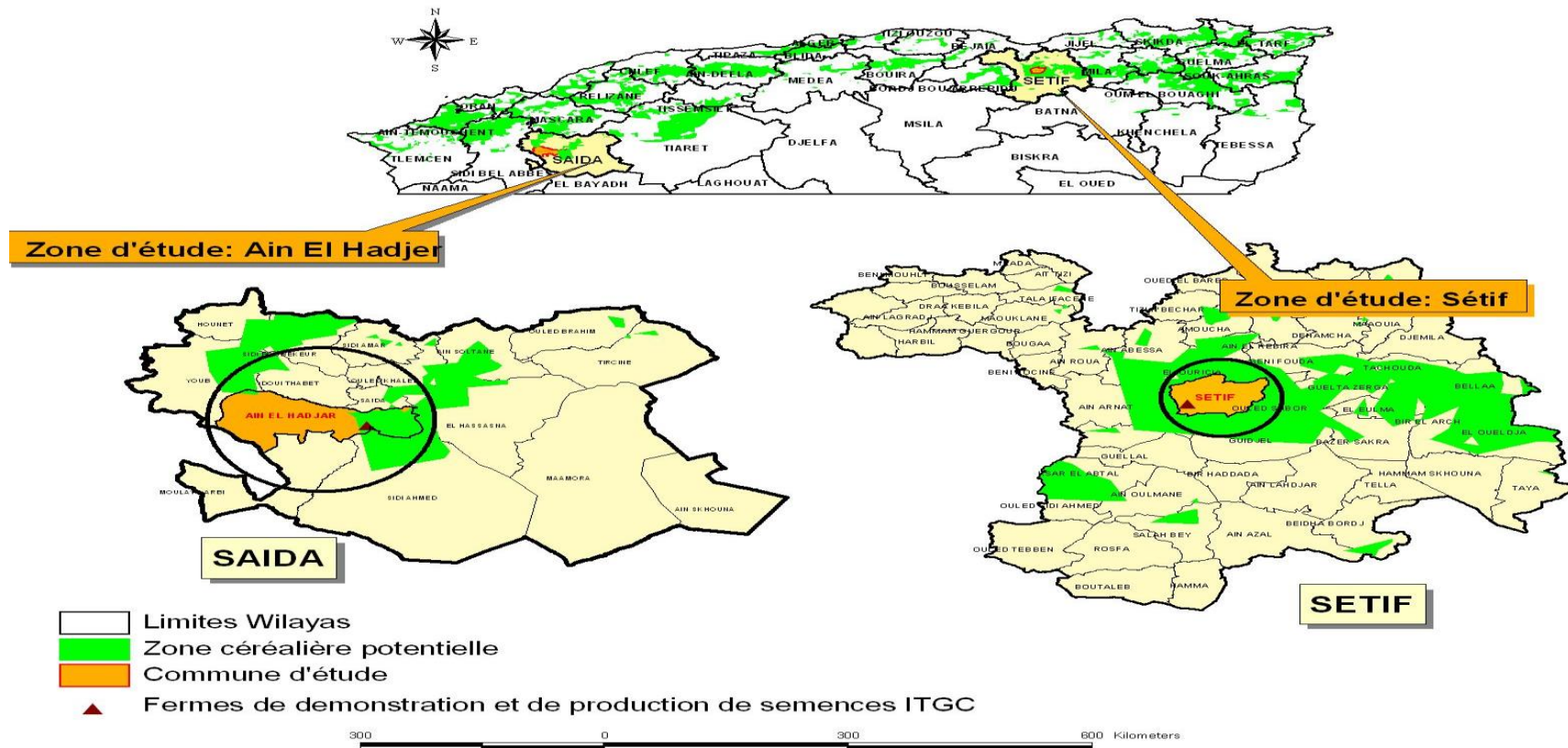


Figure 19. – localisation géographique des sites expérimentaux.

2.3. Caractéristiques climatiques des stations expérimentales

Les zones d'étude se situent dans l'étage bioclimatique semi-aride inférieur à hiver froid. Cette classification est faite selon l'indice d'aridité de Martonne (1952) (Tableau 7) et la méthode de Le Houérou (1995), réalisée à partir des données climatiques de la zone d'étude durant la période (1980-2009) (Annexe 2). Ces régions sont soumises au régime climatique des Hauts Plateaux (Baldy, 1986), qui se caractérise par des hivers froids, une pluviométrie annuelle faible (moins de 450 mm) et irrégulière, des gelées printanières et des vents chauds et desséchants en fin de cycle de la céréale.

Tableau 7. – principales caractéristiques des zones expérimentales.

Station	Coordonnées Géographiques	Caractéristiques Climatique		Périodes d'essai
		Indice de Martonne	Etage bioclimatique	
Saida AinEl Hadjar	Latitude 34°30' N Longitude 2°20' O Altitude 1050 m	15,95	semi-aride inférieur à hiver froid	2009 - 2010
Sétif Mezloug	Latitude 36 ° 08 ' N Longitude 5 ° 20 ' E Altitude 962 m.	16,65		2008 - 2013

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1953) montre une période sèche qui s'étale de Mai à Octobre à Saida et de Juin à Septembre à Sétif (Figure 20).

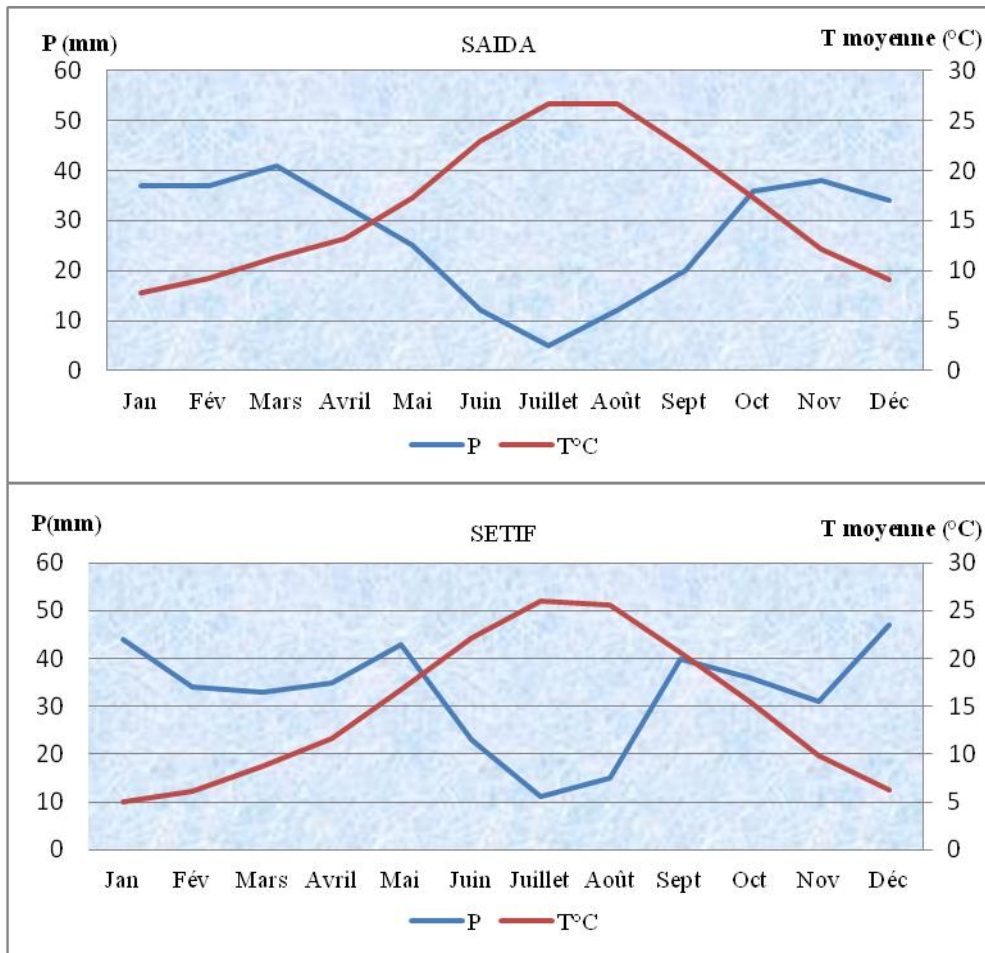


Figure 20. – diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gausson (1953) des zones d'étude (Période 1980-2009).

Durant les périodes expérimentales les pluviométries annuelles enregistrées au niveau des sites expérimentaux ont varié entre 373 mm enregistrés à la station de Ain El Hadjar de Saida et 411 mm enregistrés durant la campagne 2012/2013 à la station de R'Mada de Sétif et les amplitudes thermiques atteignent les 15°C (Figure 21).

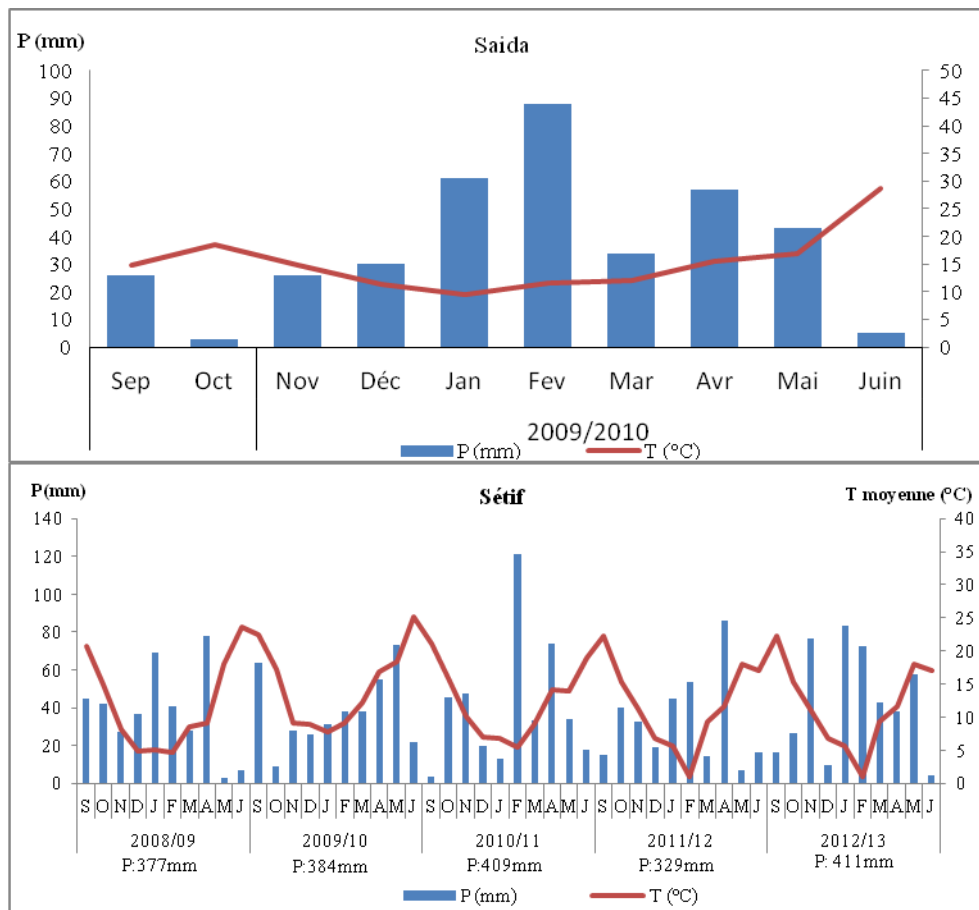


Figure 21. – variation des conditions climatiques durant l’expérimentation au niveau des sites expérimentaux (Office National de météorologie).

2.4. Caractéristiques pédologiques des sites expérimentaux

Les parcelles expérimentales présentent des sols châtaîns et bruns isohumiques, souvent avec des accumulations calcaires en profondeur. Ils appartiennent à la grande catégorie des sols steppiques de la classification française (Perrier et Soyer, 1970). Les analyses physico-chimiques ont permis de déterminer les caractéristiques de chaque parcelle (Saida et Sétif).

2.5. Conduite de l’expérimentation

2.5. 1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans l’expérimentation provient de la collection de l’institut technique des grandes cultures (ITGC) et comprend pour l’essai expérimental de Ain El Hadjar, deux variétés d’orge (*Hordeum vulgare* L.) et quatre de blé dur (*Triticum durum* Desf.), ayant des origines distinctes et présentant des comportements contrastés quand à leur adaptation aux différentes zones de productions céréalières du pays (Taibi Hadj-Youcef et al., 2003). Alors qu’une seule variété de blé dur locale a été conduite dans l’essai de R’Mada

(Figure 22). Les principales caractéristiques du matériel végétal retenu sont indiquées dans le tableau 8 .

Tableau 8. – caractéristiques agronomiques du matériel végétal utilisé

	Espèces Céréalières	Variétés	Origine	Caractéristiques	Rendement et adaptation ¹
Ain El Hdjar (Saida)	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
R'Mada (Sétif)		Bousselam	ICARDA (Syrie)	Précoce tolérante à la sécheresse	Large adaptation



Figure 22. – variété de blé dur Bousselam utilisée dans l'essai R'Mada (Sétif).

2.5. 2. Conduite de l'essai expérimental

L'essai expérimental a eu lieu en plein champ pour les deux stations expérimentales.

Au niveau de Ain El Hdjar (Saida), la parcelle a été semée à partir d'épis lignes sur un mètre linéaire, selon quatre épis lignes de chaque variété (Figure 24). L'essai a été installé le 10 février 2009, sur une jachère travaillée par un labour profond, avec une charrue à disques suivi de 3 recroisages. La fertilisation a porté sur une fumure de fond, avec 100kg de TSP et une fumure de couverture avec 50kg d'Urée.

A Sétif, l'essai de R'Mada a été conçu sur six parcelles de 180m² chacune, avec trois répétitions pour chaque traitement, selon un dispositif expérimental de bloc aléatoire complet (BAC) (Figure 23).

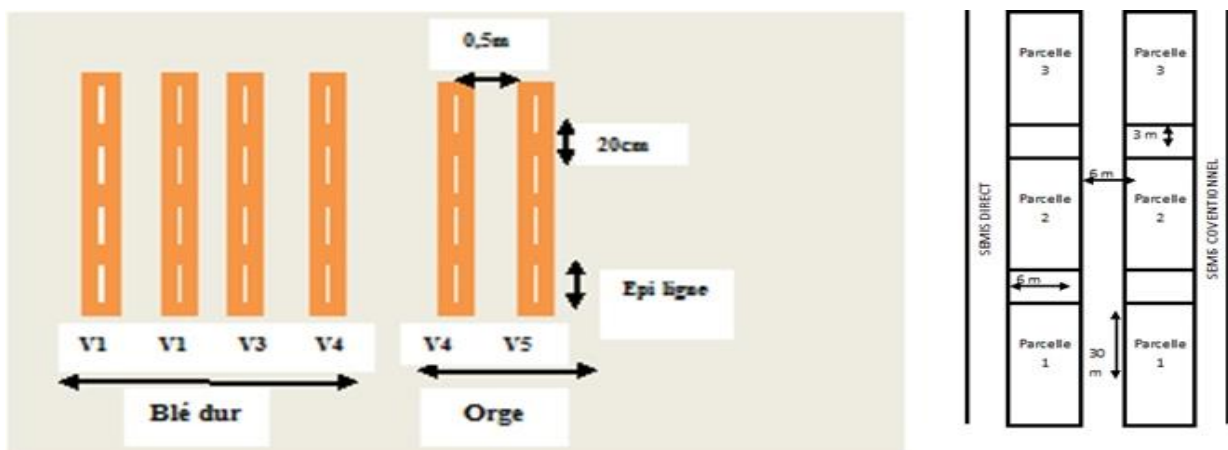


Figure 23. – dispositifs expérimentaux des essais de Ain El Hdjar à gauche et R'Mada à droite.

Durant les cinq années expérimentales à Sétif, l'essai est conduit selon deux pratiques de travail du sol :

1) Sans labour avec semis direct (SD), réalisé directement sur les résidus de la culture précédente, en utilisant un semoir combiné (SEMEATO), qui n'a ouvert qu'une ligne de semis avec 2 cm de largeur (Figure 24 A) ;

2) Semis conventionnel (CS), où le sol a été préparé avec une charrue à versoir, suivi d'un cover cropage et d'un pulvérisateur à disques ; le semis a été effectué au moyen d'un semoir conventionnel (Figure 24 B).

La dose de semis est de 130 kg/ha. L'itinéraire technique de l'essai expérimental de Sétif est résumé dans le tableau 8.

Une présence intense de plantes adventices au niveau du traitement semis direct a nécessité un désherbage total avec le glyphosate, avant semis et après levée avec Grand star (anti dicotyledons), mélangé avec Brumby (anti monocotyledons) ou avec Pallas OD (anti dicotyledons and monocotyledons). Le changement du produit herbicide est justifié durant les deux dernières campagnes par la présence des plants de Brome (*Bromus rubens*), qui sont contrôlés par l'herbicide Pallas OD. Le semis conventionnel a été désherbé uniquement au stade après levée (Tableau 9).



A. Semis direct



B. Semis conventionnel

Figure 24. – photos des deux semoirs utilisés dans l'expérimentation.

Note. Le précédent cultural est un blé dur, deux traitements sont conduits comme suit: Semis direct (A) : Aucun travail du sol et Semis conventionnel (B): Charrue à versoir + Cover Crop + Hersage

Tableau 9. – conditions culturales appliquées aux parcelles de

l'essai expérimental de Sétif.

Années	Travail du sol		Traitement Herbicides		Fertilisation		dates Semis	
	SD	SC	SD	SC	SD	SC	SD	SC
A1 (2008/09)	Semis direct	Charrue à versoire + Cover Crop + Hersage	Topic 0.75 l/ha		*TSP (46%) 100 kg/ha	Avant semis	10/11/2008	
A2 (2009/10)			Grand star 15 g/ha Glyphosate 2 l/ha				03/11/2009	
A3 (2010/11)			Glyphosate 2 l/ha Rymbi 0.75 l/ha Grand star 15 g/ha		28/11/2010			
A4 (2011/12)			Glyphosate 3 l/ha Pallas OD		12/01/2012			
A5 (2012/13)			(Pyroxilam 45 g/l) 0.5 l/ha		09/01/2013			

Note. SD: semis direct sans travail du sol; SC: Semis Conventionnel; TSP: Super Phosphate Triple.



Semis conventionnel



Semis direct

Figure 25. – parcelles expérimentales de l'essai de R'Mada (Sétif)

2.6. Mode de prélèvement des échantillons

2.6. 1. Essai de Ain El Hadjar (Saida)

Pour des études physico-chimiques du sol, trois échantillons de sol ont été prélevés à 10 cm de profondeur sur la diagonale de la parcelle des épis lignes.

Pour la colonisation mycorhizienne, le prélèvement de plants a eu lieu au stade début tallage (45 jours après semis), à raison de deux plants par épi ligne, répétés quatre fois pour chaque variété. Le prélèvement des plants est réalisé avec une tarière allant jusqu'à 60cm de profondeur. Les racines sont ensuite 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.

2.6. 2. Essai R'Mada (Sétif)

Les prélèvements de sol ont été réalisés à 10 cm de profondeur, à raison de deux échantillons par répétition au niveau de chaque traitement (semis direct et semis conventionnel). Ces prélèvements ont eu lieu avant l'installation de l'essai en 2008 et ont servi à la détermination des caractères physico-chimiques de la parcelle d'essai. Par la suite, les mêmes prélèvements ont eu lieu chaque année, après la récolte des essais et ont servi à déterminer l'évolution de l'azote et de la matière organique du sol. Les prélèvements de sol réalisés en début d'année 2012 ont servi au dosage des bio-marqueurs lipidiques.

Pour estimer les composantes de la colonisation mycorhizienne, un prélèvement de 6 plants par parcelle et par stade (tallage, remplissage et maturité des grains) du cycle de croissance végétative du blé ont été prélevés durant les cinq années d'étude (2008/2013). Au total, 540 plants ont été ainsi collectés, le système racinaire est prélevé entièrement sur toute sa longueur. En troisième année et en cinquième année d'essai, le sol rhizosphérique prélevé avec les plants au stade épiaison a servi à l'étude de la biodiversité des champignons mycorhiziens.

2.7. Paramètres observés et méthodes utilisées

2.7. 1. Propriétés physico-chimiques du sol

Les caractéristiques granulométriques du sol ont été déterminées selon la méthode de la Pipette Robinson- KÖHN permettant de déterminer les différentes fractions du sol. La teneur en matière organique (MO) a été calculée à partir de la mesure du carbone organique (OC), en utilisant la méthode ANNE (Aubert, 1978), l'azote total (N) par la méthode Kjeldahl (Bremner et *al.*, 1982), le pH du sol (pH de l'eau) mesuré avec un pH-mètre (Aubert, 1978). Le phosphore disponible (Olsen Phosphorus) a été déterminé par la méthode Olsen (1954). Les mesures de carbonate de calcium total et actif ont été effectuées respectivement par les méthodes du calcimètre Bernard et Drouineau (Aubert, 1978).

2.7. 2. Colonisation racinaire

Colonisation par les CMA

Au laboratoire le tri des racines s'est fait sur le critère du diamètre [0,1]cm, les racines sont alors nettoyées et conservées dans de l'alcool à 70°. La coloration racinaire a été faite par la suite selon la technique de Phillips et Hayman (1970) qui permet de mettre en évidence au microscope photonique l'infection mycorrhizogène.

Le traitement de ces racines consiste à les mettre dans une solution de KOH (10%) et les placer à l'étuve à une température de 90 °C pendant 1heure. Ensuite, ils subissent plusieurs rinçages, à l'issue du dernier, ils sont transférés dans une solution d'H₂O₂ (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 (0,5g l⁻¹)(Annexe 4) 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 coupées en fragments d'1cm de long et montées entre lame et lamelle dans une solution de PVLG (Annexe 4) à raison de 12 fragments par lame (9 lames par traitement et par stade)(Annexe 4).

Deux milles fragments sont ainsi observés au microscope photonique Olympus YS100 grossissement (100 et 400). L'observation porte sur des structures spécifiques aux champignons mycorrhiziens arbusculaires (CMA) qui sont les hyphes, les arbuscules et les vésicules au niveau du cortex racinaire.

Le pourcentage de racines colonisées par les structures spécifiques aux champignons mycorhiziens (hyphes, arbuscules et vésicules) est calculé selon la méthode de McGonigle et *al.*, (1990) variant entre les différents stades végétatifs. Selon cette méthode les taux de mycorhization racinaire sont calculés à travers les observations microscopiques aux points d'intersection où sont comptées les catégories suivantes : négatif (pas de matière fongique dans la racine), arbuscules, vésicules et hyphes (Figure 26). Cela a permis de quantifier les taux suivants :

$$H\% = (G - p) / G \times 100 ; \quad Arb\% = (q + s) / G \times 100 ; \quad Ves\% = (r + s) / G \times 100$$

G: nombre total d'intersections; **p**: nombre d'intersection avec aucune structure fongique ;

q: présence d'arbuscules; **r**: présence de vésicules; **s**: présence d'arbuscules et de vésicules ;

t: présence d'hyphes mycorhiziennes et absence d'arbuscules et de vésicules.

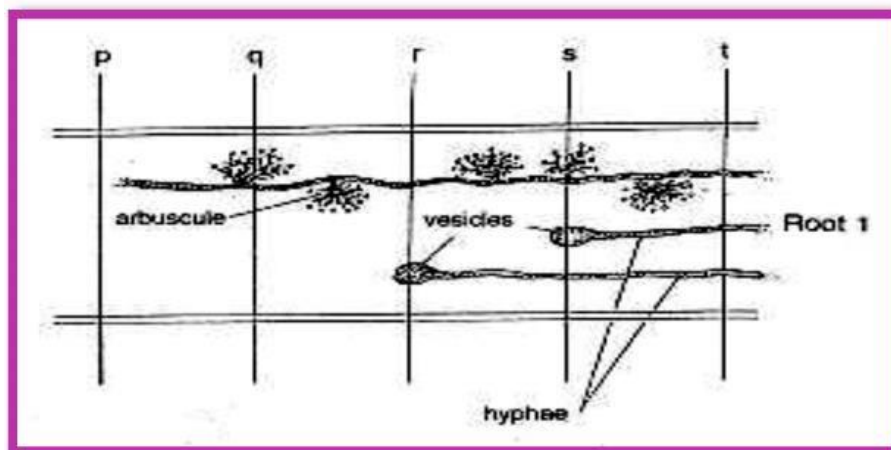


Figure 26. – taux de mycorhization totale (H), arbuscules (A) et vésicules (V) (McGonigle et *al.*, 1990) .

Colonisation par les champignons endophytes bruns septés (DSE)

En cinquième année d'essai, l'observation des lames microscopiques a porté également sur les structures spécifiques aux champignons endophytes bruns septés (DSE), tels que les hyphes cloisonnés sombres et les microsclérotés dans le cortex racinaire et le cylindre central. Le taux de DSE a été calculé selon la formule :

$$(1) DSE\% = E / G \times 100 \quad (2) \quad \text{McGonigle et } al., (1990).$$

E: présence de structures DSE ; **G**: nombre total d'intersections.

2.7.3 Biodiversité des espèces CMA

L'analyse est réalisée sur un échantillon homogénéisé mixte de chaque parcelle (trois échantillons par traitement). Les spores de CMA sont extraites de 100 g de sol, en utilisant la méthode de tamisage humide (Gerdemann et Nicolson, 1963) avec des tamis à maille de 280µm, 125 µm et 80 µm. Les racines et les débris grossiers sont récupérés par le tamis 1,60µm. Les tamisats sont ensuite placés dans des tubes et sont centrifugés pendant 4 minutes à 2000 RPM. Une seconde centrifugation est faite après addition d'une solution de saccharose à 50% pendant 5 minutes à 2000 RPM (Dalpé, 1993). Les spores sont par la suite isolées du surnageant sur un papier filtre et lavées du sucre et sont comptées à l'aide d'une loupe binoculaire, pour déterminer la densité totale des CMA (densité de spores pour 100 g de sol collecté dans chaque parcelle étudiée). Les spores sont par la suite classées par morphotype de spores (taille, couleur, hyphes) (Gerdemann et Trappe, 1974), puis montées sur alcool polyvinylique-lacto-glycérol (PVLG)(Annexe 4), avec ou sans réactif de Melzer (Annexe 4) sur des lames microscopiques. Les observations sont réalisées au microscope optique (x 20, 40 et 100). L'identification, basée sur les caractères morphologiques, est réalisée à l'aide du site Web INVAM: <http://invam.wvu.edu>. Suite à l'identification, la richesse en espèces de CMA est évaluée en fonction du nombre d'espèces présentes dans chaque traitement.

L'abondance relative de chaque espèce dans chaque traitement a été calculée selon la méthode fournie par Johnson et *al.* (1991) :

$$RA\% = (n/N) \times 100 \quad (3) \quad n = \text{nombre des spores identifiées}, \quad N = \text{nombre total de spores.}$$

Ceci a permis de déterminer l'abondance relative de chaque famille d'espèce de CMA.

2.7.4. Dosage des bio-marqueurs du sol (analyses des acides gras)

Le dosage des bio-marqueurs lipidiques a permis de quantifier la biomasse microbienne. Les analyses ont eu lieu sur les échantillons (6éch/traitement) de sol prélevés à une profondeur de 20cm après la récolte de la troisième année d'essai (2010/2011). Après avoir retiré les débris végétaux des échantillons de sol, quatre répliques de 3g de sol lyophilisé (de chaque échantillon de sol) ont été analysées pour mesurer la teneur en acides gras phospholipidiques (PLFA). Les quantités de PLFA et d'acide gras neutre (NLFA) spécifiques des CMA (C16: 1165) et des champignons saprotrophes/ectomycorhiziens (C18: 2 ω 6,9) ont été mesurées.

L'extraction des lipides a été réalisée selon la méthode suggérée par Frostegård et *al.* (1991). Les lipides extraits ont été fractionnés en lipides neutres, glycolipides et lipides polaires sur une colonne d'acide de silice, en éluant successivement avec du chloroforme, de l'acétone et

du méthanol (1: 2: 1, V: V: V). La fraction chloroforme (contenant les lipides neutres) et la fraction méthanol (contenant les phospholipides) ont été soumises à une transestérification à l'aide d'une solution basique (KOH 0,2 M), préparée dans le méthanol pour transformer le PLFA et le NLFA en esters méthyliques d'acides gras libres. Les extraits finaux ont été analysés en utilisant un chromatographe en phase gazeuse (GC) du système PerkinElmer, auto-équipé d'un détecteur à ionisation de flamme (Norwalk, CT) et d'une colonne capillaire EC-1000 (Alltech) (30 m × 0,53 mm id), avec de l'hydrogène comme support gaz (3,6 ml min⁻¹). Le programme de température comprenait une augmentation rapide de 50°C à 150°C à 15°C min⁻¹, puis une augmentation de 150 à 220°C à 5°C min⁻¹. La quantification des acides gras a été effectuée en utilisant de l'ester méthylique d'acide non adécanoïque (C19: 0) comme étalon interne. Leur identification s'est appuyée sur les temps de rétention d'une large gamme d'étalons (mélanges d'ester méthylique d'acides gras C4-C24: 1, Sigma Aldrich) et l'analyse de masse. Le système fonctionnait à une vitesse linéaire constante (70 cm s⁻¹), en utilisant de l'hélium comme gaz porteur. Les acides gras ont été identifiés en comparant leurs spectres de masse avec les spectres de masse standard dans la bibliothèque NIST MS.

2.7.5. Évaluation du rendement en grains

Le rendement en grains a été déterminé après la récolte de chaque parcelle, pendant les cinq années d'expérimentation à Sétif (Grignac, 1986).

2.7.6. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statbox 2012. Nous avons également vérifié la normalité de la distribution des données, transformé les données par une procédure de racine carrée si nécessaire. L'analyse de variance avec un p-niveau à 0,05 a été réalisée, y compris des comparaisons de moyennes, selon le test de NEWMAN et KEULS. Les coefficients de corrélation de Pearson entre la colonisation des racines mycorhiziennes, le pourcentage d'arbuscules et de vésicules estimés à trois stades de croissance sous deux systèmes d'exploitation (semis direct et semis conventionnel) et le rendement ont été estimés. De plus, les coefficients de régression ont été utilisés pour estimer l'effet du travail du sol conventionnel (SC) et du semis direct (SD) sur la colonisation totale des racines mycorhizées. L'évolution du pourcentage des arbuscules et des vésicules au fil des années d'expérimentation. Pour identifier les caractères qui étaient des co-variables significatives sur la production de rendement, des analyses de régression multiple, utilisant la méthode de sélection par étapes, ont été effectuées. Le rendement était la variable dépendante, alors que la

colonisation totale des racines mycorhiziennes, le pourcentage d'arbuscules et de vésicules étaient les variables indépendantes.

Partie 3

Résultats et Discussion

3.1. Expérimentation de la station de Sétif

3.1.2. Résultats

Les résultats de comparaison des deux traitements (semis direct et conventionnel) ont montré que l'effet du semis direct est apparu à partir de la troisième année expérimentale où une différence de teneur en matière organique du sol (MOS) est apparue en relation avec une présence continue du paillis. L'évolution de la teneur en MO des deux traitement est alors suivie sur les trois dernières années d'étude (Tableau 11).

3.1.2.1. Caractéristiques physicochimiques du sol de la parcelle expérimentale

La topographie de la parcelle expérimentale est plate, exposée Nord-Sud. Son sol est de texture argilo-limoneuse, d'une profondeur de plus d'un mètre, avec une forte présence de calcaire, justifiant son alcalinité (pH 8,26), sa teneur en phosphore soluble est très faible: 7,33 ppm (Tableau 10).

Tableau 10. – caractéristiques physicochimiques du sol de la parcelle expérimentale.

Caractères physiques (%)	Limons	Argiles	Sables	(CEmmho/cm)
	34.66	34.66	30.66	0.175
Caractères chimiques	pH (water)	CaCO ₃ (%)	CaCO ₃ Acif (%)	P ₂ O ₅ Soluble (ppm)
	8.26	51.58	21.25	7.33

Le tableau (11) montre l'évolution des composantes organiques du sol de la parcelle, la différence entre les deux traitements est apparue en troisième année d'essai, le semis direct a amélioré la teneur en matière organique du sol (SD 2,6% ; SC 1,9%), alors que la teneur en azote est restée similaire pour le sol des deux traitements.

Tableau 11. – évolution des composantes organiques du sol.

Caractères organique		MO (%)	N (%)	C/N
A3 2011	SD	2.6	0.13	11.62
	SC	1.9	0.12	9.25
A4 2012	SD	3.15	0.16	11,44
	SC	2.12	0.155	7,94
A5 2013	SD	3.72	0.175	12.34
	SC	2.62	0.17	8.94

MO : matière organique SD : Semis direct SC : Semis conventionnel

Après cinq années d'essai, la quantité de matière organique du sol est de 156,24 et 110,04 t/ha, respectivement pour le traitement semis direct et semis conventionnel. Le semis direct a permis donc d'augmenter la teneur en MO de 41,9% comparativement au semis conventionnel. La vitesse d'accumulation de la matière organique est plus importante en semis direct. En effet, un gain en matière organique variant entre 23,1t/ha et 23,94 t/ha a été respectivement enregistré en 2012 et 2013, après respectivement quatre et cinq années d'expérimentation, alors que dans les parcelles de travail du sol conventionnel, le gain en matière organique du sol a varié entre 9,24t/ha et 21 t/ha au cours de la même période d'étude (Figure 27).

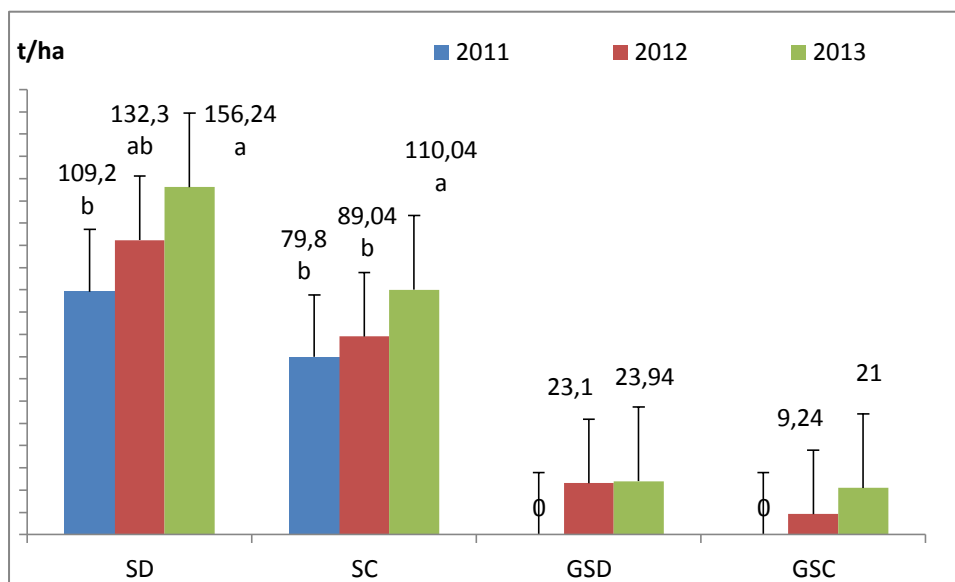


Figure 27. – effet du semis direct sur les niveaux de matière organique du sol.

SD: semis direct; SC: semis conventionnel; GSD: gain en MO en semis direct; GSC: gain en MO en semis conventionnel. Les Moyennes sont obtenues sur 3 répétitions durant les trois années d'essai 2011, 2012 et 2013. Des différences significatives entre SD et SC sont reportées selon le test de Newman et Keuls ($P < 0.05$).

3.1.2.2. Effet des techniques culturales sur la biomasse fongique du sol

A la fin de la troisième année d'essai, le dosage des marqueurs lipidiques dans les échantillons du sol a montré que sur les parcelles expérimentales du semis direct, la quantité de l'acide gras C16:1 ω 5 lié aux phospholipides (AGPL) permettant de quantifier la biomasse des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA), a augmenté de 52% et celle de l'AGPL C18:2 ω 6,9 permettant de quantifier les champignons saprotrophes et ectomycorhiziens a augmenté de 159 %, par rapport aux quantités trouvées dans les parcelles du système conventionnel. De même, les résultats montrent également que la quantité d'AGPL de l'acide

gras C16:1 ω 5 est supérieur à celle de C18:2 ω 6, 9 dans le semis direct et conventionnel, avec des valeurs respectives de 1,07/0,96 et 0,70 /0,37 nanomoles g⁻¹ de sol (Figure 28). Ces analyses montrent donc que la communauté des champignons CMA est plus importante que celle des champignons saprotrophes au niveau des deux traitements, avec une nette différence au niveau du SC, où la présence des CMA représente pratiquement le double de celle des saprotrophes.

L'analyse des résultats de dosage de marqueurs lipidiques montre une différence hautement significative à très hautement significative entre les deux traitements par rapport à la quantité trouvée de phospholipides (PLFA) des acides gras C16 :1 ω 5 (Pr=0,01) et C18 :1 ω 7 (Pr=0,00). Contrairement à cela la quantité de neutrolipides (NLFA) ainsi que le rapport (NLFA/ PLFA) dosés au niveau des deux traitements n'a pas présenté de différences significatives (Pr \geq 0,05) (Tableau 12)

Tableau 12. – résultats de l'analyse de variance sur le dosage des marqueurs lipidiques des Phospholipides et neutrolipides des acides gras (nanomoles/g) de sol prélevé en fin de la troisième année.

Acides gras	Variables	traitement	Moyennes	F	Pr > F	E.T.R
C16 :1 ω 5	PLFA	SC	0,70	13,75	0,01	0,17
		SD	1,07			
	NLFA	SC	1,63	0,00	0,95	1,79
		SD	1,69			
	NLFA/PLFA	SC	1,71	0,19	0,68	2,59
		SD	2,37			
C18 :2 ω 6,9	PLFA	SC	0,37	35,25	0,00	0,17
		SD	0,96			

La teneur en acide gras C16 :1 ω 5 lié aux lipides neutres (AGNL) représentant les lipides de stockage ou de conservation des CMA (vésicules et spores) est la même au niveau des deux traitements : 1,6 nanomoles g⁻¹ de sol. Le rapport NLFA/PLFA du C16 :1 ω 5 augmente de 38% en semis conventionnel, mais cette augmentation reste statistiquement non significative (P \geq 0,05).

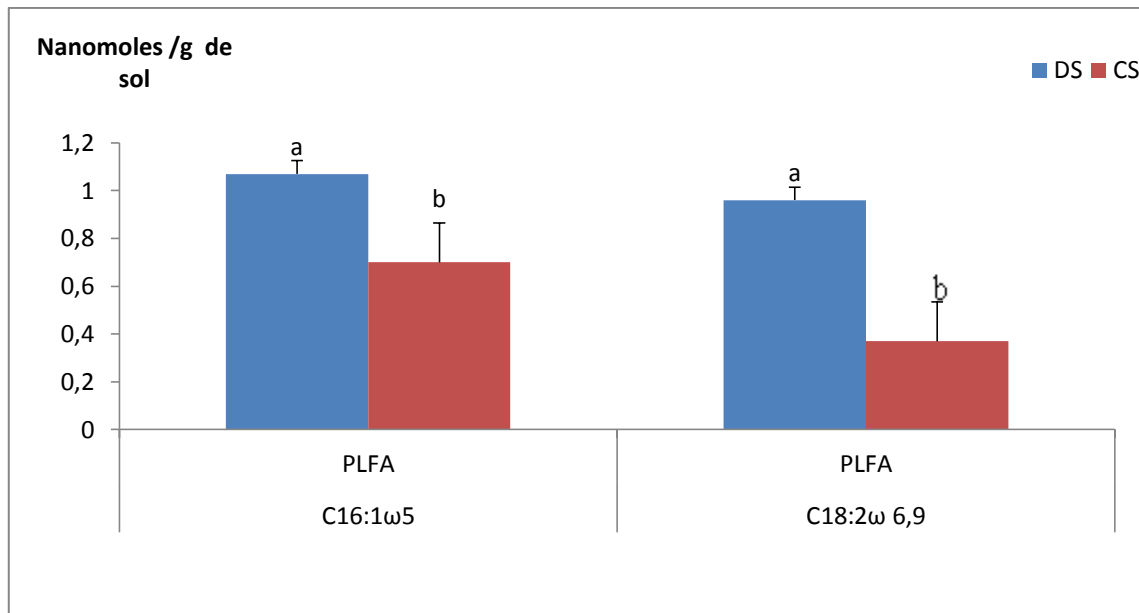


Figure 28. – influence des traitements, semis conventionnel (SC) et semis direct (SD) à la fin de la troisième année d’essai, sur la teneur en bio-marqueurs lipidiques (C16.1ω5) spécifiques des champignons mycorhiziens arbusculaires et (C18:2 ω 6,9) spécifiques des champignons ectomycorhiziens et saprotrophes dans le sol après une culture de blé dur. Les moyennes ont été obtenues à partir de 6 répétitions. Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre SD et SC selon le test LSD ($P < 0,05$).

3.1.2.3. Colonisation racinaire par les champignons mycorhiziens arbusculaires

Les observations microscopiques des écrasements des fragments racinaires de 1cm, prélevés à différents stades du cycle végétatif, de la variété de blé dur Bousselem conduite en semis direct (SD) et en semis conventionnel (SC), sur (05) campagnes agricoles (2008/2013) ont montré des structures fongiques telles que les arbuscules, les vésicules et les hyphes internes et externes. Ces structures sont observées dans tout le parenchyme cortical (cortex) de pratiquement tous les échantillons observés (Figures 30, 31, 32 et 33).

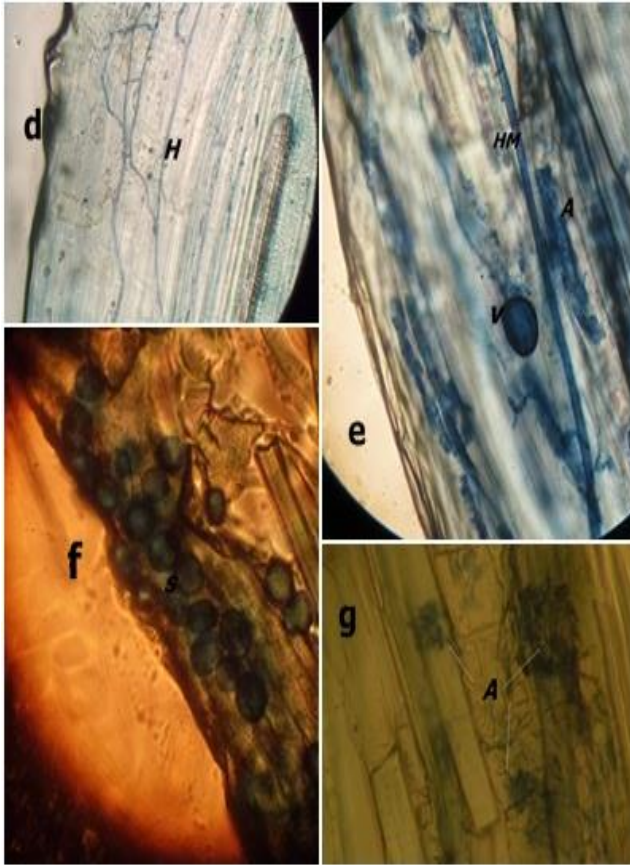


Figure 29. – Observations microscopiques ($\times 400$) des différentes structures mycorrhiziennes aux stades :

- Remplissage du grain (semi direct) en A3; **e**) hyphes (H), vésicules (V), arbuscules (A) et **f**) spores.

- Remplissage du grain (semis direct) en A4; **d**) hyphes (H).

- Maturité du grain (semis direct) en A2 ; **g**) arbuscules.

(A2, A3 et A4, deuxième, troisième et quatrième année d'essai).

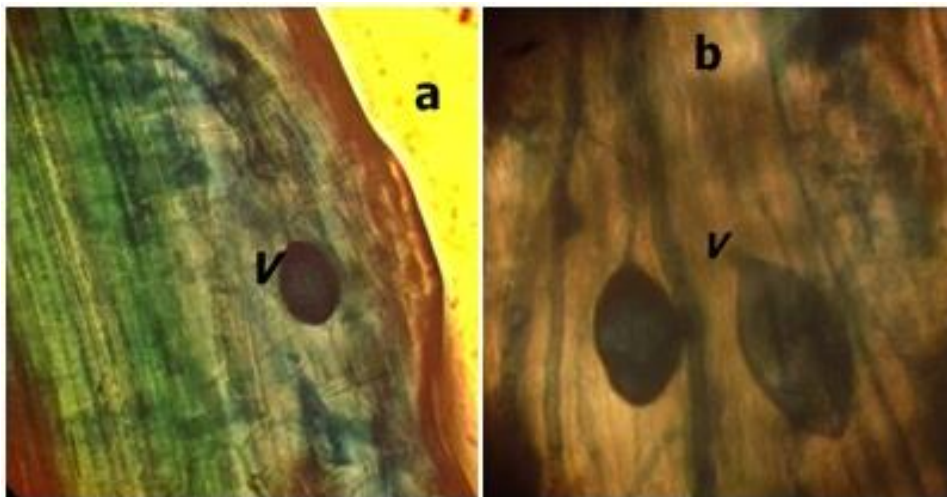


Figure 30. – **a**) vésicules au stade épiaison (semis conventionnel (A4 /2012) ($\times 400$)).

b) vésicules au stade laiteux (semis direct (A3/2011) (x 400)).

Les observations ont montré également des sporocystes et des cellules auxiliaires (Figures 31 et 32);

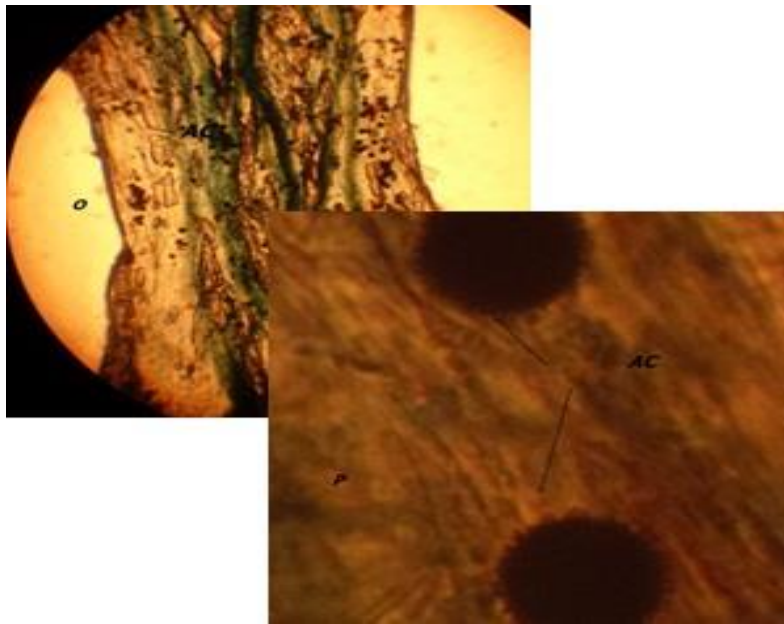


Figure 31. – cellules auxiliaires (O) stade laiteux (semis direct (A3 /2011) (x100) ;(P) au stade maturation (semis conventionnel) (A2 /2010) (x400)

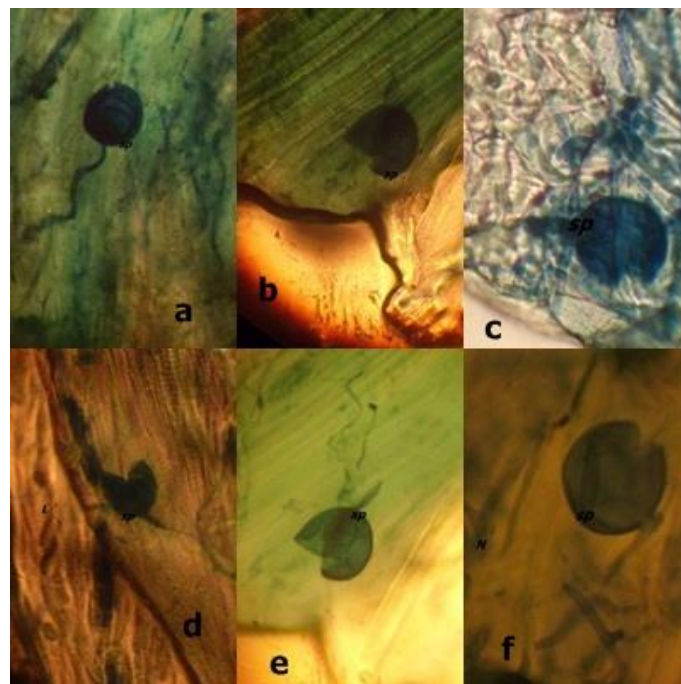


Figure 32. – a) et (b) sporocystes au stade épiaison (semis conventionnel (A4 /2012) ; (d) ; et (f) sporocystes au stade laiteux (semis conventionnel A3 /2011) (×400).

L'observation des fragments racinaires examinés a montré la présence de mycorhizes de type *Arum* par contre le *Paris-type* est totalement absent pour les différents échantillons observés (Figure 33).

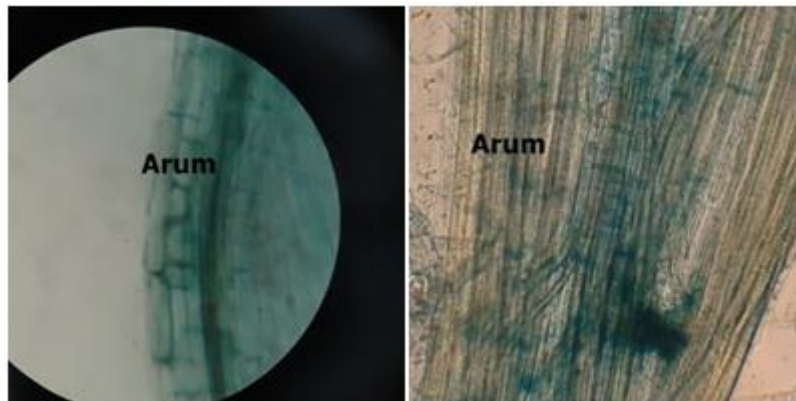


Figure 33. – mycorhization de type *Arum* sur prélèvements racinaires au stade laitex semis direct (A2/ 2010).

3.1.2.4. Colonisation racinaire par les champignons Dark Septate Endophytes (DSE)

L'observation microscopique des fragments racinaires examinés a montré l'existence de structures fongiques endophytiques, telles que microsclérotés et hyphes septés mélanisés spécifiques des dark septate endophytes (Figure 34), des conidies de *Torula* sp. (Figure 36) et de *Neotyphodium* sp. (Figure 35). Ces espèces ont été observées au stade épiaison et maturation, ceci au niveau des deux traitements.

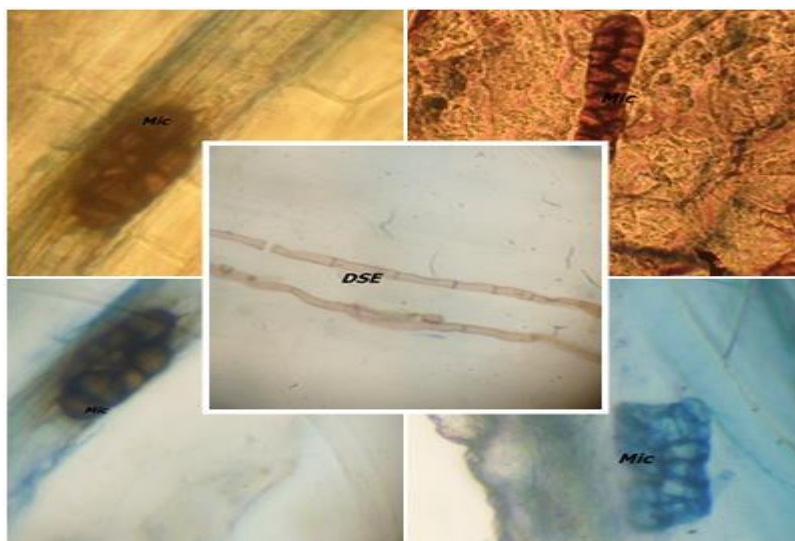


Figure 34. – microsclérotés et hyphes mélanisés de DSE observés au stade épiaison (A4/2012) (semis conventionnel) ; et au stade maturation (A2 /2010) (sur les deux traitements) (x400).

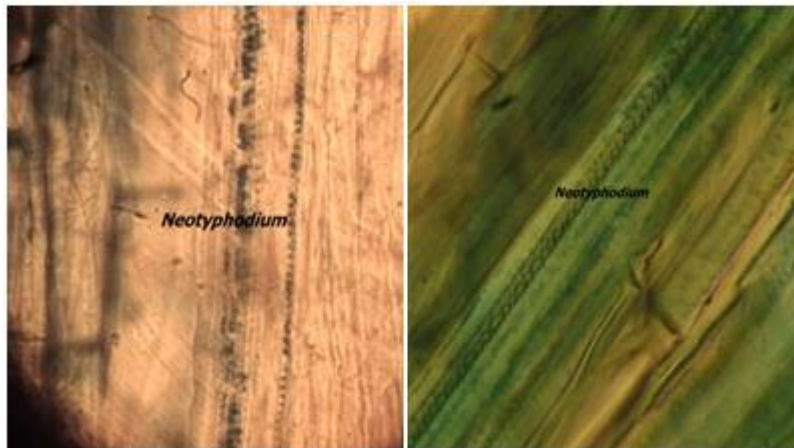


Figure 35. – *Neotyphodium* sp au stade épiaison (semis conventionnel (A4 /2012) et maturation (semis direct (A2/2010) (x400).

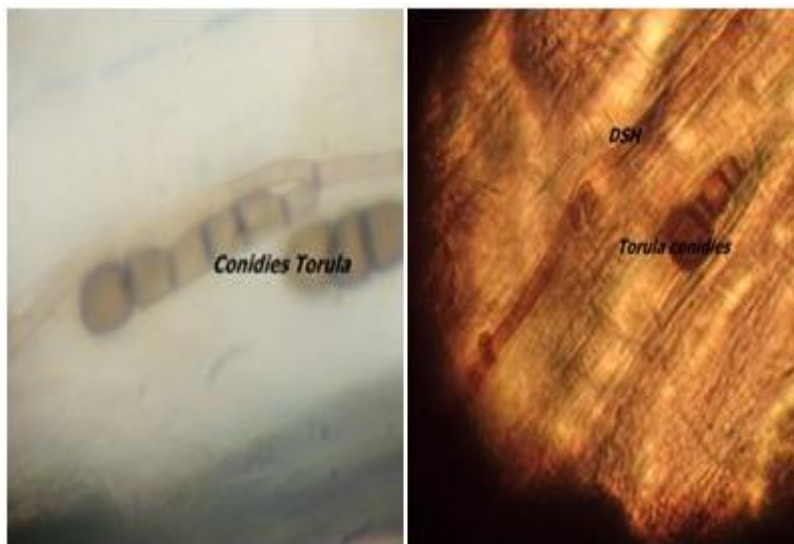


Figure 36. – *Torula* sp. au stade maturation (semis conventionnel (A2 /2010) (x400).

3.1.2.5. Effet des techniques culturales sur l'évolution des paramètres de mycorhization

La quantification des composantes symbiotiques CMA (H %, A % et V %) à partir de la troisième année d'essai, a permis d'illustrer l'évolution du comportement symbiotique, à travers les années et les stades végétatifs étudiés. L'analyse statistique a montré un effet année, en relation avec la durée du test et un effet stade de croissance, qui s'est avéré statistiquement très significatif pour l'ensemble des paramètres étudiés dans les deux traitements (Tableau 13a). il y a une interaction significative à très hautement significative entre l'effet année et le stade de croissance (Tableau 13a).

Tableau 13. – a : Carrés moyens de l'analyse de la variance de la colonisation racinaire mycorhizienne totale H (%), pourcentage d'arbuscules A (%) et de vésicules V (%) estimé à trois stades de croissance sous deux systèmes de culture (sans labour et labour conventionnel).

	Semis direct				Semis conventionnel		
	Df	H (%)	A (%)	V (%)	H (%)	A (%)	V (%)
Année(Y)	2	524.48***	1354.93***	6137.07***	1151.22**	4735.66***	3331.44***
Rep (E)	6	6.26 ^{ns}	24.45 ^{ns}	76.30 ^{ns}	26.23 ^{ns}	191.69 ^{ns}	30.85 ^{ns}
Stade (G)	2	1984.50***	1015.52***	2878.12***	4572.181***	776.09**	1841.59***
Y x G	4	428.01***	1648.82***	1377.62***	631.54**	1105.72***	747.21**
Erreur	12	9.80	45.70	49.73	76.30	69.12	87.37

ns, *, ** = effet non significatif, effet significatif respectivement à ($P < 0.05$) et ($P < 0.01$)

Le tableau (13b) montre un effet travail du sol statistiquement très significatif, une interaction entre l'effet du travail du sol et celui du stade de croissance (FxG) est significative ($P < 0.05$) pour le taux de colonisation totale (H (%)) et très hautement significative ($P < 0.01$) pour le pourcentage de vésicules V(%) mais pas au niveau du pourcentage d'arbuscules A (%). Une interaction entre l'effet, année, stade de croissance et celui du travail du sol est observée avec un grand niveau de signification ($P < 0.01$), cette interaction n'est pas vérifiée au niveau de la colonisation racinaire mycorhizienne totale H (%),

Tableau 13. – b. Carrés moyens de l'analyse combinée de la variance de la colonisation racinaire mycorhizienne totale H (%), pourcentage d'arbuscules A (%) et de vésicules V (%) estimé à trois stades de croissance sous deux systèmes de culture (sans labour et labour conventionnel)

	H (%)	A (%)	V(%)
Year (Y)	1581.62***	3466.83***	7677.47***
Rep (E)	16.40 ^{ns}	82.45 ^{ns}	69.67 ^{ns}
Farming system (F)	609.18***	688.74**	3130.76***
Growing stage (G)	6277.67***	1677.96***	2779.58***
F x G	279.01**	113.64 ^{ns}	1940.13***
Y x F	94.08 ^{ns}	2623.77***	1791.04***
Y x G	1037.27***	1312.60***	1145.71***
Y x F x G	22.28 ^{ns}	1441.94***	979.11***
Error	37.66	72.66	62.34

ns, *, ** = no significant effect, significant effect respectively at ($P < 0.05$) and ($P < 0.01$).

Le tableau (14) montre l'évolution des paramètres de colonisation mycorhizienne au niveau des deux traitements étudiés à travers les années d'expérimentation et les stades de croissance. L'évolution de chaque paramètre est expliquée par un coefficient de régression et un coefficient de détermination (R^2). Les paramètres évoluent comme suit :

3.1.2.5.1. Taux de mycorhization total (H %)

Une colonisation racinaire par les CMA a été détectée dans tous les échantillons prélevés, pour les deux traitements. Cependant, l'évolution du taux de mycorhization total (H) montre qu'il est très élevé ($H > 90\%$) en début de cycle et durant le remplissage du grain, mais diminue en fin de cycle au stade maturité. Une régression significative a été observée au stade de la maturité du grain, avec un coefficient de régression plus élevé et négatif pour le semis conventionnel ($SC -30.11 \pm 3.162$), comparativement au semis direct ($SD -18.37 \pm 6.045$) (Tableau 14). Cette régression a réduit le taux de mycorhization de 85% et 87% en 2011 à 48.76% et 26.85% en 2013 au stade maturité, respectivement pour le semis direct et le semis conventionnel. Le semis direct a montré donc un taux de mycorhization en fin de cycle plus important que celui du semis conventionnel, la différence entre les deux traitements étudiés a atteint 44,93% en cinquième année d'essai (Figure 37).

Tableau 14. – Effet du travail du sol conventionnel (SC) et du système de culture sans labour (SD) sur le taux de colonisation racinaire totale (H %), le pourcentage d'arbuscules (A %) et de vésicules (V %) estimés durant trois stades de croissance durant trois années de culture successives, régressions significatives ($b \pm s.e.$) et coefficient de détermination (R^2)

Semis direct				Semis conventionnel		
Années	Tallage	Remplissage du grain	Maturité du grain	Tallage	Remplissage du grain	Maturité du grain
Taux de colonisation racinaire totale H%						
2011	98.26	99.65	85.50	99.31	100.00	87.08
2012	100	99.38	85.27	93.10	100.00	66.45
2013	97.22	99.38	48.76	90.28	97.22	26.85
$b \pm es$	-0.52 ± 0.753	-0.13 ± 0.045	-18.37 ± 6.045	-4.51 ± 0.565	-1.39 ± 0.463	30.11 ± 3.162
		a	45	65	ab	62
R^2	0.14	0.75	0.75	0.95	0.75	0.97
Pourcentage d'Arbuscules A%						
2011	12.49	19.79	3.12	0.90	1.38	3.95
2012	64.19	48.91	2.15	28.23	-	1.38
2013	80.56	48.76	2.78	18.05	21.75	1.54
$b \pm es$	16.51 ± 0.753	14.48 ± 0.045	-0.17 ± 6.045	8.57 ± 0.565	10.18 ± 0.463	-1.20 ± 3.162
	a	abcd	b	abc	d	Bc
R^2	0.91	0.75	0.12	0.38	0.99	0.70

Pourcentage de Vésicules V%						
2011	68.40	75.34	63.19	51.45	56.24	45.48
2012	23.45	16.66	29.16	12.03	66.66	12.80
2013	11.72	26.54	39.81	38.27	74.99	21.91
b ± es	-28.34±0.753	-24.40±0.045	-11.69±6.045	9.38±0.565	10.18±0.463	-11.78±3.162
	a	ab	ab	b	b	Ab
R ²	0.91	0.75	0.12	0.38	0.99	0.70

3.1.2.5.2. Taux d'arbuscules (A %)

Les observations ont montré un taux d'arbuscules plus élevé aux stades de tallage et de remplissage du grain et qui diminuait à la maturité du grain (Tableau 14). L'évolution du taux d'arbuscules montre qu'il est plus important au niveau du semis direct, comparativement au semis conventionnel. Cette différence est devenue très hautement significative à partir de la troisième année d'étude. En quatrième année d'essai, le nombre d'arbuscules augmente en semis direct de cinq fois en début de cycle et de deux fois au stade remplissage du grain par rapport à l'année précédente. Cette augmentation continue en cinquième année en début de cycle pour atteindre 80,56% d'arbuscules, alors qu'en semis conventionnel le nombre ne dépasse pas 21%. En fin de cycle, le nombre d'arbuscules est toujours faible pour les deux traitements étudiés. Un effet stade très hautement significatif est observé à partir de la quatrième année (Figure 37). Des coefficients de régression positifs pour ce paramètre ont été observés ($b = 16,51 \pm 0,753$ et $b = 14,48 \pm 0,045$), pour respectivement les deux premiers stades (Tableau 14).

3.1.2.5.3. Taux de vésicules (V %)

En troisième année d'essai (A3), le taux de vésicules est élevé pour les deux traitements ($V\% > 50$), mais à partir de la quatrième année (A4) ce nombre diminue considérablement pour le semis direct et reste très élevé pour le semis conventionnel, surtout au stade remplissage du grain (Figure 37). À ce stade, un coefficient de régression positif pour ce paramètre a été observé ($b = 10,18 \pm 0,463$) (Tableau 14).

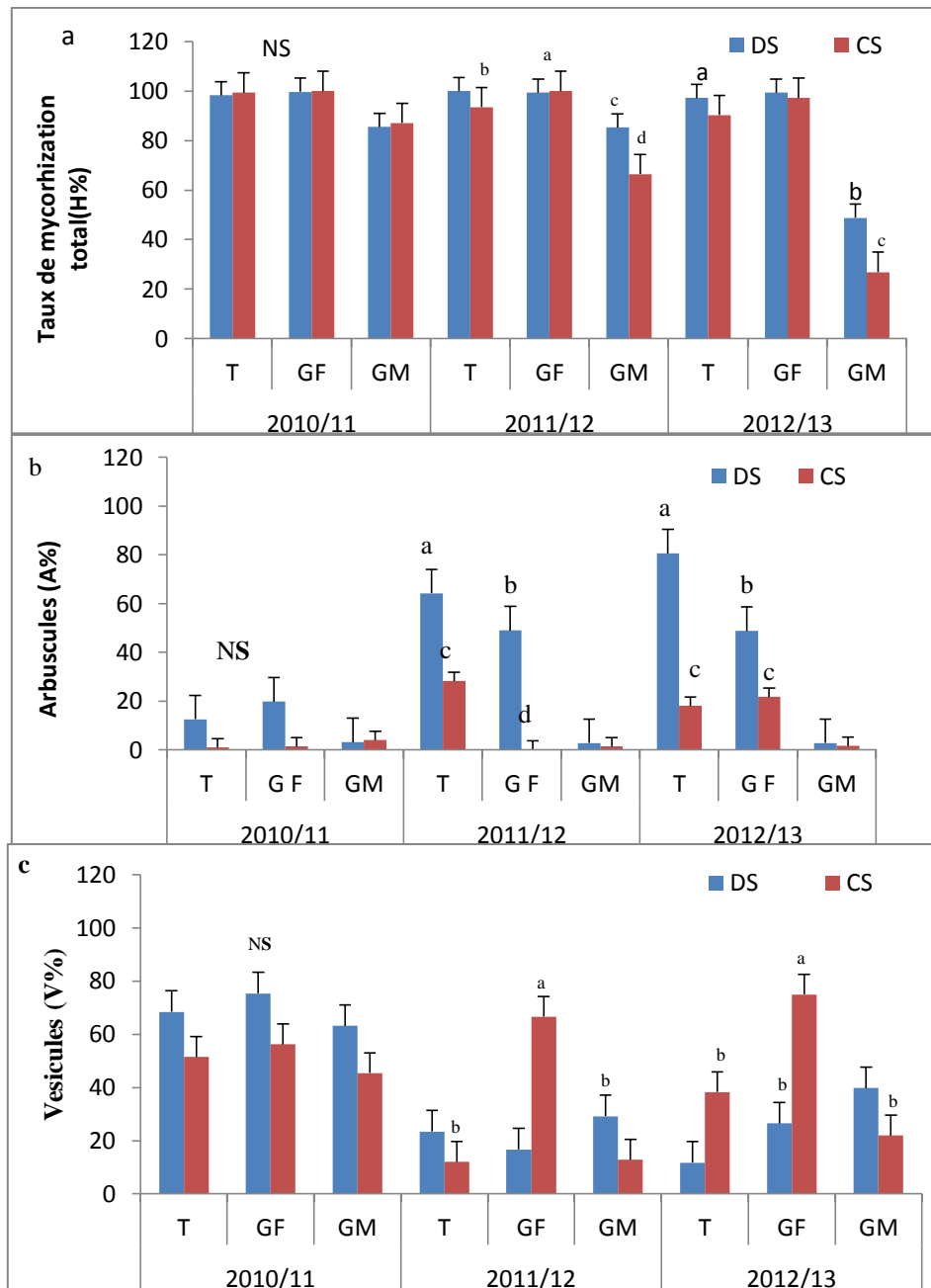


Figure 37. – influence des traitements semis conventionnel (SC) et semis direct (SD) sur l'évolution des paramètres de mycorrhization (taux de mycorrhization total, pourcentage d'arbuscules et pourcentage de vésicules) durant les trois dernières années de suivi de l'essai et à travers les différents stades de développement (Tallage T; Remplissage du grain GF, Maturation du grain GM). Les moyennes ont été obtenues à partir de 3 répétitions. Les différences significatives entre SD et SC sont signalées selon le test LSD ($P < 0,05$).

3.1.2.6. Effet des techniques culturales sur la diversité des communautés mycorhiziennes arbusculaires

3.1.2.6.1. Densité et diversité des spores observées dans le sol rhizosphérique de la variété de blé Boussalem

La densité de spores (nombre de spores par 100g de sol) est de 1251,91 et 1233,55 respectivement pour le semis direct et le semis conventionnel en marquant ainsi une différence non significative entre les deux traitements ($P \geq 0,05$). Cette densité est observée après cinq années d'expérimentation mais les observations faites après seulement trois années d'essai avaient montré une densité plus faible (80 à 100 spores/100g de sol).

Une grande diversité morphologique des spores a été observée, montrant ainsi une grande biodiversité des CMA isolés de la rhizosphère de la variété de blé dur Boussalem (Figure 38 et 39 a et b) les différents types de spores sont différenciés selon leurs caractères morphologiques (taille, forme, aspect et couleur). Les spores appartenant par exemple à la famille des *Glomeraceae* et observées sous loupe binoculaire (x40) sont de forme globuleuse et lisse, de couleur brun-noirâtre, avec une taille x ($x \geq 80\mu\text{m}$) (Figure 38a); et des spores en grappe, de forme irrégulière lisses, de couleur jaune pale hyaline, on observe un hyphe suspenseur effilé en continuité avec la paroi sporale, leur taille x ($x \geq 80\mu\text{m}$) (Figure 38b).

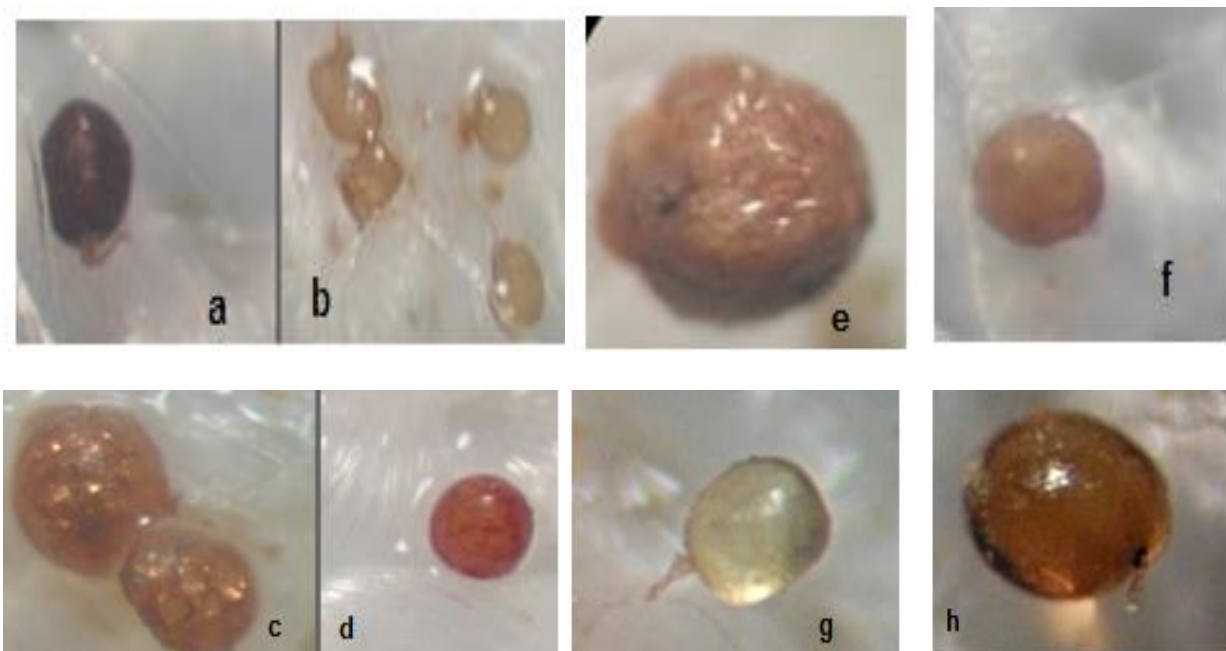


Figure 38. – spores isolées à partir du sol rhizosphérique de la variété Boussalem observées sous loupe binoculaire x 40. (a,b) famille des Gloméracées ; (c,d) famille des Acaulosporacées ; (e) famille des Diversisporaceae, (f) Entrophosporaceae ; (g) famille des Gigasporaceae ; (h) famille des Scutellosporaceae .

Les spores de la famille des Acaulosporacées sont de forme subglobuleuse de couleur orange-brun à orange foncé, avec une taille x ($125\mu\text{m} < x < 280\mu\text{m}$), avec une présence d'ornementation (Figure 38 c,d). Les spores de la famille des Diversisporaceae sont de forme subglobuleuse ornementée, d'une couleur marron claire, avec une taille x ($125\mu\text{m} \leq x < 280\mu\text{m}$) (Figure 38 e). Les spores de la famille des Entrophosporaceae (Figure 38 f) sont de forme globuleuse surface irrégulière, d'une couleur brun clair, avec une taille x ($80\mu\text{m} < x < 125\mu\text{m}$). Les spores de la famille des Gigasporaceae (Figure 38g) sont de forme globuleuse lisse, d'une couleur hyaline-crème pale, avec une taille x ($x \geq 280\mu\text{m}$). Les spores de la famille des Scutellosporaceae (Figure 38 h) sont de forme globuleuse lisse, d'une couleur hyaline-orange brun, avec une taille x ($125\mu\text{m} \leq x < 280\mu\text{m}$).

D'autres caractères complémentaires permettent également d'identifier les espèces après observations microscopiques, tels que le nombre de couches de la paroi sporale et leur ornementation. Chez le genre *Acaulospora*, la paroi est constituée de trois feuillets et les spores apparaissent sessiles. Chez le genre *Glomus* la paroi des spores est constituée d'une seule couche de cellules. La forme et la taille ainsi que la composition de la paroi de l'hyphe sous tendant à la base de spores est également prise en considération dans l'identification des espèces de CMA. Sur la base de ces caractères plusieurs espèces ont été observées et identifiées sur les prélèvements réalisés en troisième année et en cinquième année d'expérimentation (Figure 39 a et b), la majorité des espèces ont été observées au niveau des deux traitements.

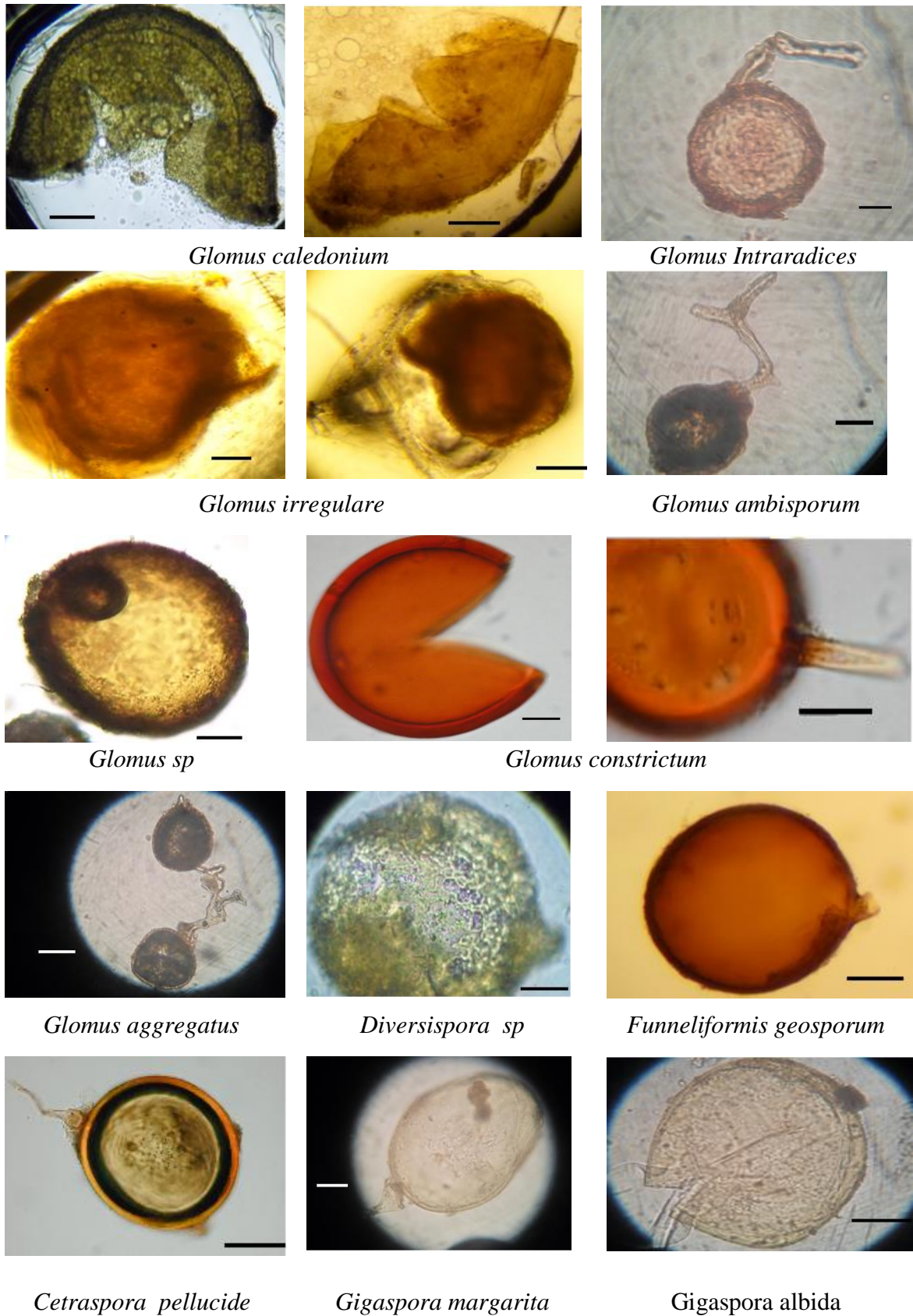


Figure 39. – a: structures morphologiques de spores de CMA isolées à partir du sol rhizosphérique de la variété de blé dur Boussalem observées au microscope optique. — 200µm

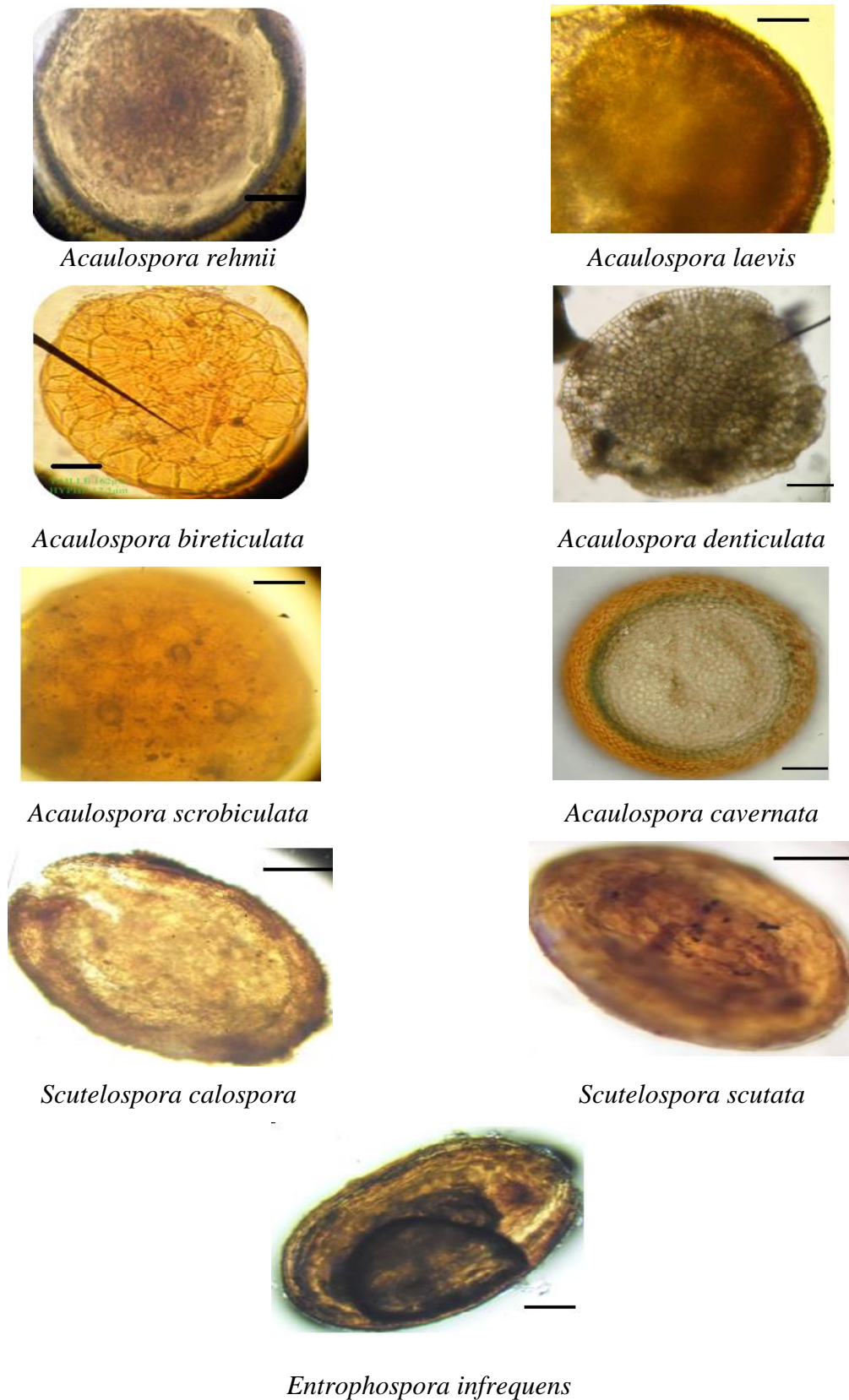


Figure 39. – **b:** structures morphologiques de spores de CMA isolées à partir du sol rhizosphérique de la variété de blé dur Boussalem observées au microscope optique. — 200µm

3.1.2.6.2. Présence des espèces de CMA dans les traitements semis direct et semis conventionnel

Le prélèvement de la cinquième année a montré la présence de cinq familles, sept genres et vingt et une espèces (Tableau 15). Les observations ont montré que sur les cinq familles recensées dans ce dernier prélèvement, certaines espèces sont présentes uniquement au niveau du traitement semis direct, c'est le cas de cinq espèces du genre *Acaulospora* (*A. koskei*, *A. thomii*, *A. capsicula*, *A. denticulata* et *A. scrobiculata*) et deux espèces du genre *Gigaspora* (*G. albida* et *G. margarita*), alors que d'autres sont uniquement présentes en semis conventionnel comme c'est le cas du genre *Glomus* avec *G. mossae*, *G. aggregatus* et *G. ambisporum* (Tableau 15).

Tableau 15. – les espèces de CMA isolées des parcelles expérimentales des traitements de Semis direct (SD) et de semis conventionnel (SC) durant la dernière année d'essai.

Famille/Espèces	DS	CS
<u>1.Glomeraceae</u>		
<i>G. intraradices</i>	x	x
<i>G. fasciculatus</i>	x	x
<i>G. constrictum</i>	x	x
<i>G. irregulare</i>	x	x
<i>G. mossae</i>		x
<i>G. aggregates</i>		x
<i>G. ambisporum</i>		x
<u>2.Acaulosporaceae</u>		
<i>A. koskei</i>	x	
<i>A. rehmi</i>	x	
<i>A. capsicula</i>	x	
<i>A. denticulata</i>	x	
<i>A. scrobiculata</i>	x	
<i>Entrophospora</i>		
<i>e. infrequens</i>	x	x
<u>3.Gigasporaceae</u>		
<i>Gg. Albida</i>	x	
<i>Gg. margarita</i>	x	
<i>Gg. Decipiens</i>	x	x
<i>Scutellospora</i>		
<i>S. scutata</i>	x	x
<i>S. calospora</i>	x	x
<u>4.Dentiscutataceae</u>		
<i>D. erythropha</i>	x	x
<i>D. nigra</i>	x	x
<u>5.Diversisporaceae</u>		
<i>D. tortuosa</i>	x	x

Pour les espèces présentes dans les deux traitements, elles ont des abondances relatives différentes (Figure 40). En effet quatre familles sont présentes au niveau des deux traitements, mais leur abondance relative (AR%) est plus élevée en semis direct. C'est le cas des **Gigasporaceae** avec une dominance relative respective en semis direct et en semis conventionnel (56,99/17,82) avec deux espèces du genre *Gigaspora* rencontrées uniquement en semis direct (*Gg. albida*, et *Gg. margarita*) et une espèce du même genre (*Gg. decipiens*) et deux espèces du genre *Scutellospora* (*S. scutata* et *S. calospora*) rencontrées dans les deux traitements; suivies des **Acaulosporaceae** fortement présents en semis direct (53,71 / 3,72%) et très faiblement présents en semis conventionnel (Figure 40) il y a une seule espèce de cette famille du genre **Entrophospora** (*E. infrequens*) qui est (Tableau 15) présente dans les deux traitements.

Les **Diversisporaceae** avec l'espèce *D. tortuosa* ont une dominance relative moyenne à faible pour les deux traitements (12,82/5,47) de même que les **Dentiscutataceae**, avec les espèces *D. erythropha* et *D. nigra* sont faiblement présentes en semis direct et rarement présentes en semis conventionnel (7,82 / 0,17 %).

Les Glomeraceae ont une présence dominante dans les échantillons du sol des deux traitements étudiés, mais leur abondance relative (AR%) est plus importante en semis conventionnel (SD 58,74 / SC 76,6).

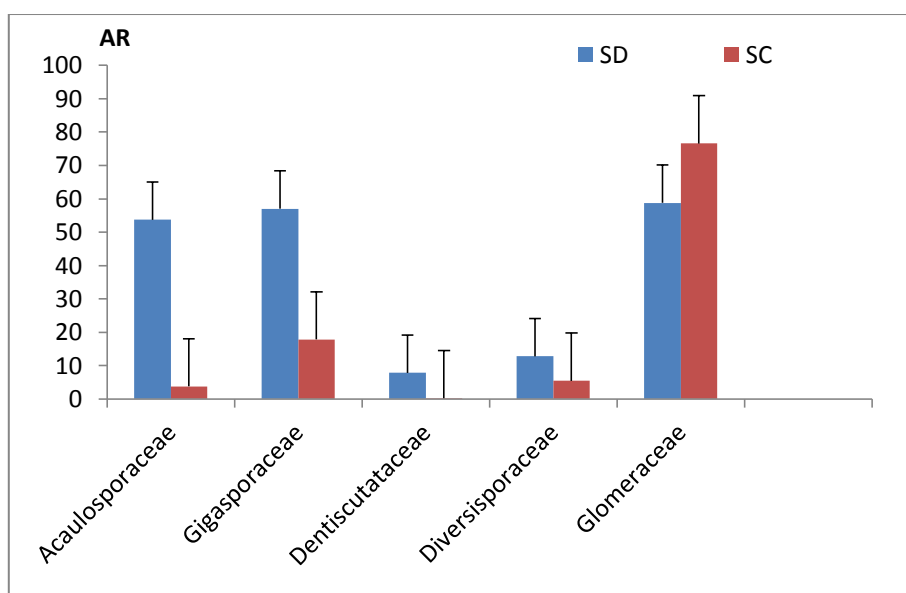


Figure 40. – influence des traitements semis conventionnel (SC) et semis direct (SD) sur l'abondance relative des familles de Glomeromycota

3.1.2.7. Comparaison de la colonisation racinaire par les CMA et les DSE

La mesure comparative de la colonisation des racines de blé par les structures symbiotiques spécifiques aux CMA et celles des champignons DSE a montré que la colonisation mycorhizienne est plus importante dans les deux traitements par rapport à la colonisation racinaire par les DSE. Ces derniers atteignaient 40% en semis conventionnel et 57% en semis direct, tandis que la colonisation racinaire par les CMA a dépassé 90% dans les deux traitements (Figure 41).

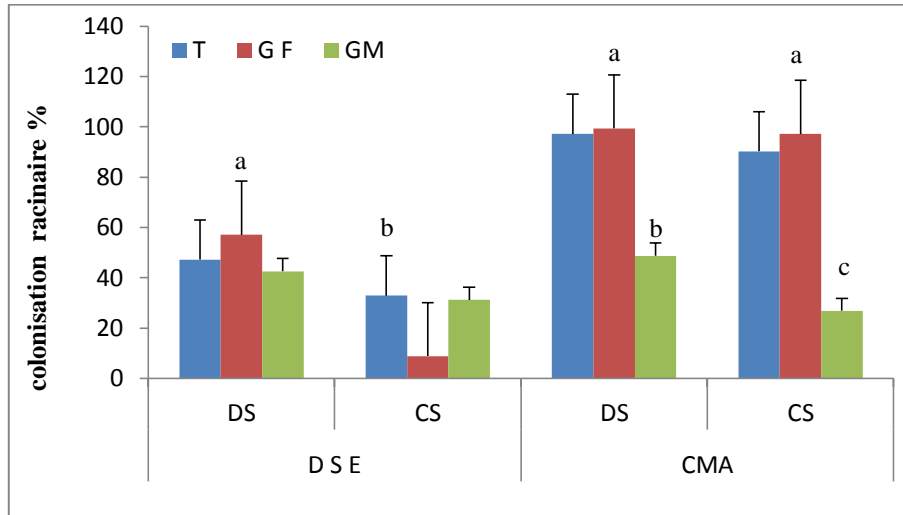


Figure 41. – Effet du semis conventionnel (SC) et du semis direct (SD) sur la colonisation racinaire par les champignons mycorhiziens arbusculaires et les champignons endophytes septés foncés durant la cinquième année d’essai sur trois stades de croissance. Note. T: tallage, G F: remplissage du grain, GM: maturité du grain maturity. Moyennes sont obtenues à partir de 3 répétitions. Différentes lettres indiquent les différences significatives entre le semis direct SD et le semis conventionnel SC selon le test de Newman et Keuls ($P < 0.05$).

3.1.2.7.1. Evolution du rendement en grains

Le tableau 16 montre un effet année significatif observé sur le rendement en grains de blé dans les deux traitements ($P < 0,01$). Un effet significatif du travail du sol ($P < 0,05$) et une interaction entre l'année et le travail du sol ($P < 0,01$) sont également observés. Le rendement moyen obtenu sur cinq années d’étude est de 24,4 et 19,7 qx/ha, respectivement pour le semis direct et le semis conventionnel permettant un gain de 20%.

Tableau 16. – Carrés moyens de l'analyse combinée de la variance du rendement en grains

Année (Y)	Farming system (F)	Rep (E)	Y x F	Error
98.98***	7.44*	21.78**	21.11**	1.51

*, ** = significant effect respectively at ($P < 0.05$) and ($P < 0.01$).

L'évolution du rendement en grains durant la période expérimentale est illustrée dans la figure 42 qui montre une différence non significative entre les deux traitements sauf pour la deuxième année expérimentale où nous observons un rendement en semis direct plus important que celui en semis conventionnel.

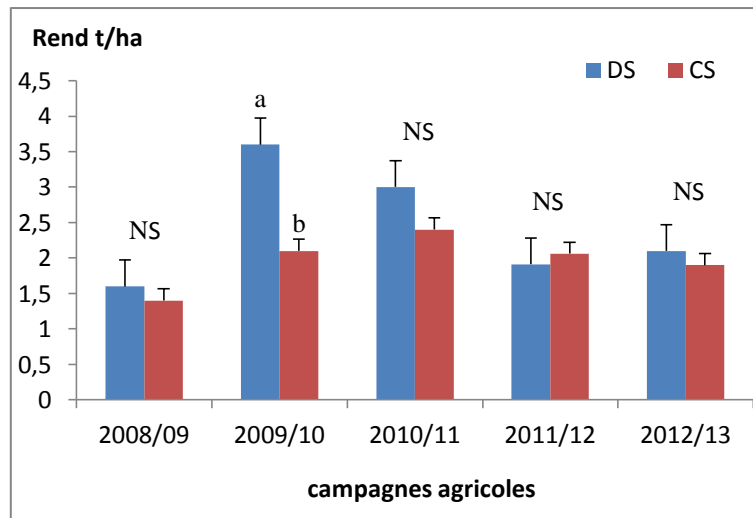


Figure 42. – Evolution du rendement en grain du blé durant les années d'expérimentation dans les deux traitements (Semis direct et semis conventionnel). Moyennes sont obtenues à partir de 3 répétitions. Différentes lettres indiquent les différences significatives entre le semis direct SD et le semis conventionnel SC, selon le test de Newman et Keuls ($P < 0.05$).

3.1.2.7.2. Identification des caractères de covariables significatifs sur la production de rendement

L'analyse de régression multiple du rendement en grains selon les caractères mesurés a révélé que dans le semis direct, le rendement dépend très significativement du pourcentage d'arbuscules au stade de remplissage du grain (R^2 cumulé = 0,63) et du pourcentage de vésicules au stade maturité du grain (R^2 cumulé = 0,81) (Tableau 17). Cependant, l'émergence d'arbuscules au stade du remplissage du grain a eu un effet négatif sur le rendement en grain ($b = -0,19$). Le pourcentage de vésicules au stade de maturité du grain était le seul facteur affectant le rendement du grain en semis conventionnel, avec un impact plus faible ($R^2 = 0,57$) que pour le semis direct.

Tableau 17. – analyses de régressions multiples, en utilisant la procédure stepwise, pour chaque caractère sur le rendement dans les traitements semis direct et semis conventionnel. Seuls les coefficients significatifs (b) sont indiqués avec leurs coefficients de détermination cumulés (R^2).

Semis direct		Semis Conventionnel			
Traits	Cumulative R^2	P valeur	Traits	Cumulative R^2	P valeur
A% 2	0,63	0,006			
V% 3	0,81	0,033	V%3	0,57	0,019
Coefficients					
	b	e.s		b	e.s
Constante	26,46	2,08	Constante	19,10	0,98
A%2	-0,19	0,04			
V%3	0,09	0,03	V%3	0,10	0,03
<small>A% 2 : pourcentage d'arbuscules au stade remplissage du grain ; V%3 : pourcentage de vésicules au stade maturité du grain</small>					

Le modèle d'analyse de régression a donc permis de formuler une équation reliant le rendement en grains et les composantes symbiotiques des CMA spécifiques à chaque traitement comme suit :

Semis direct : Rendement = $-0,19 \pm 0,04$ A%2 + $0,09 \pm 0,03$ V%3 + $26,46 \pm 2,08$

Semis conventionnel : Rendement = $0,10 \pm 0,03$ V%3 + $19,10 \pm 0,98$

3.1.2.7.3. Relation entre variables

Les coefficients de corrélation de Pearson (voir Annexe 5) entre la colonisation mycorhizienne racinaire, le pourcentage d'arbuscules et de vésicules estimés durant les trois stades de croissance pour les deux traitements (semis direct et semis conventionnel) et le rendement en grains ont montré dans le semis direct, une corrélation significative et positive entre la colonisation des racines par les CMA (H%) et le pourcentage d'arbuscules au stade du tallage (A%1) ($r = 0,69$ *). Au stade de la maturité du grain, le pourcentage de colonisation des racines (H%) est significativement et positivement corrélé avec le pourcentage de vésicules produites durant ce stade (V%3) ($r = 0,75$ *) et négativement avec le pourcentage d'arbuscules du même stade (A%3) ($r = -0,95$ **). Dans les conditions du semis conventionnel, une corrélation positive a été observée entre le pourcentage de colonisation des racines (H%) et le pourcentage de vésicules produites au stade (2) remplissage du grain (V%2) ($r = 0,94$ **) et négative avec le pourcentage d'arbuscules du même stade (A%2) ($r = -0,96$ **) au stade du remplissage du grain.

L'analyse de la corrélation entre les paramètres symbiotiques des CMA et le rendement en grain a montré en semis direct, une corrélation significative et négative entre le rendement en grains et le pourcentage d'arbuscules produite au stade remplissage du grain (A% 2) ($r = -0,82^{**}$). A tous les stades, on observe une corrélation significative et positive entre le rendement et le pourcentage de vésicules (V%). Dans le semis conventionnel, le rendement n'est significativement et positivement corrélé qu'avec le pourcentage de vésicules (V%3) ($r = 0,75^*$) au stade de maturité des grains.

3.1.3. Discussion

3.1.3.1. Effet des techniques culturales sur la composante organique du sol

L'agriculture de conservation contribue à travers la suppression du travail du sol (no tillage) et l'apport de résidus en surface à l'augmentation du stock de carbone organique dans le sol et constitue ainsi une alternative à l'agriculture conventionnelle (Liu et *al.*, 2006). Van Groenigen (2010) signale qu'après vingt années de conduite en semis direct, le carbone organique du sol a augmenté de 16% en régions tempérées humides et de 10% dans les régions tempérées sèches, comparativement au semis conventionnel. Dans ce même ordre, nos résultats montrent qu'après cinq années d'essai, le semis direct a amélioré la teneur en matière organique dans la couche superficielle du sol, ainsi que la teneur en carbone organique de 41,9% comparativement au semis conventionnel, mais la teneur en matière organique du sol (MOS) reste faible respectivement pour le semis direct ou le semis conventionnel (3,71% et 2,62%), ce qui est en relation avec un faible retour de la matière organique, suite à la faiblesse des quantités de résidus des cultures à retourner au sol par de faibles rendements et par la pression de la demande sur ces produits utilisés comme source d'énergie en alimentation animale (élevage ovin) (Lahmar et Ruellan, 2007). La teneur en azote minéral pour 100g de sol (N%) reste faiblement identique pour les deux itinéraires techniques (0,17%). Ceci peut être expliqué par la faible vitesse de minéralisation de la matière organique en relation avec les faibles températures du sol notamment enregistrées après semis au niveau du semis direct (Chapman et *al.*, 2001), ainsi que la rotation (blé/blé) qui implique un ralentissement de minéralisation, comparativement par exemple à une rotation (céréale/légumineuse). Les flux potentiels de C et N fournissent ainsi une estimation globale du fonctionnement de l'écosystème sol et du niveau de productivité des parcelles agricoles (Aon et *al.*, 2001a). Le rapport C/N de la MOS dans les systèmes de conservation est en général supérieur à celui des systèmes labourés en surface, là où les résidus de culture

s'accumulent et peu de différences apparaissent en deçà (Vian et *al.*, 2009). Ceci est confirmé par nos résultats, qui montrent une augmentation du C/N de 27% dans le semis direct par rapport au semis conventionnel. Le rapport C/N est de l'ordre de 12,34 et de 8,94, respectivement pour le semis direct et conventionnel. Ces valeurs indiquent la présence d'une bonne activité biologique. De même, la quantité de carbone organique présent dans le sol est corrélée à la stabilité des agrégats (Stengel et *al.*, 1984). En effet, en semis direct les agrégats sont plus stables (Sasal et *al.*, 2006), induisant une stabilité structurale permettant au sol de résister aux aléas climatiques. Ceci est vérifié au niveau des parcelles expérimentales de notre essai par l'observation de fentes de retrait, dont le nombre et la profondeur sont plus importants en semis conventionnel, comparativement au semis direct (Figure 43).

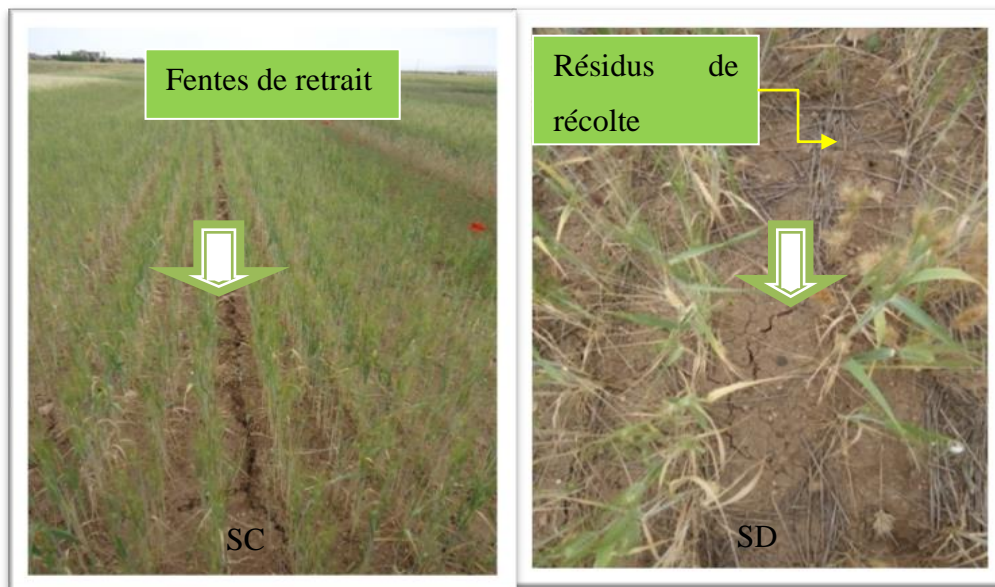


Figure 43. – fentes de retrait plus importantes en semis conventionnel. résidus de récolte en surface observés en semis direct

3.1.3.2. Effet des techniques culturales sur la biomasse fongique du sol

Le dosage des bio-marqueurs lipidiques (C16 : 1 ω 5 et C18 : 2 ω 6,9) permettant de décrire la structure et la dynamique des communautés de microorganismes du sol (Olsson, 1999 ; Frostegård et *al.*, 2011) a permis de montrer l'effet positif du semis direct sur la biomasse des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) et saprotrophes à partir de la troisième année d'essai. L'amélioration de cette communauté microbienne peut s'expliquer par le fait qu'en semis direct la matière organique se concentre en surface, en formant un mulch de

résidus de récolte sur une épaisseur variant de 0-5cm à 0-30cm (Aslam et *al.*, 1999 ; Alvarez et *al.*, 2000 ; Balota, et *al.*, 2004 ; Babujia et *al.*, 2010), favorisant ainsi le développement d'une importante masse microbienne. En semis conventionnel, le travail du sol provoque par contre une dilution de la matière organique et perturbe la biomasse des mycéliums fongiques. Nos résultats rejoignent ceux de Lienhard et *al.* (2014) et Bourgeois et *al.*, (2015) qui confirment que l'arrêt du travail du sol évite la rupture physique des hyphes mycéliens et préserve l'habitat microbien. Selon Fontaine et *al.* (2003), dans les sols non labourés ou conduits avec un travail réduit, les communautés microbiennes sont majoritairement composées de populations vivant en relation étroite avec la plante, mais aussi copiotrophes et capables de se développer rapidement en présence d'une forte quantité de matière organique, facilement dégradable et utilisable. Dans le cas de ce présent travail, la dominance des champignons mycorhiziens arbusculaires(CMA) par rapport aux saprotrophes est liée à l'aridité de la région ($P < 400\text{mm}$) (Nouaim et *al.*, 1996), associée à une présence au niveau du sol d'un taux de calcaire total et actif respectif de 51,58% et 21,25% sur les trente premiers centimètres du sol ; sachant que les propriétés physicochimiques des sols ont une influence importante sur la diversité et l'activité des communautés microbiennes telluriques (Rousk et *al.*, 2010). Cette dominance est accentuée au niveau de l'essai labouré, par manque de résidus organiques et par la présence d'un gradient d'aridité plus important que celui du semis direct, au niveau duquel la présence du mulch résiduel diminue l'évaporation et le ruissellement (Al-Kaisi et *al.*, 2005) et influence ainsi le gradient d'aridité de son sol (Balesdent et *al.*, 2000). En plus, la monoculture joue un rôle dans cette discrimination, puisque la conduite de l'essai avec la variété de blé dur Boussalem durant cinq années, a favorisé la présence des CMA, reconnus pour se développer en association étroite avec les racines des plantes dont elles vont augmenter la productivité, via l'amélioration de l'absorption d'azote et de phosphore (Rodriguez et *al.*, 2004).

Les lipides neutres (AGNL) de l'acide gras C16 :1 ω 5 sont en relation avec l'énergie stockée par les CMA sous forme de triglycérides et sont bien corrélés avec le nombre de spores et de vésicules (Olsson et *al.*, 1995). L'estimation des AGNL montre une quantité plus élevée que celle des AGPL dans les deux traitements ; l'effet traitement est non significatif, traduisant ainsi une présence d'organes de stockage (spores) dans le sol similaire en semis direct et en semis conventionnel. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'échantillonnage s'est produit après récolte de la culture ; le champignon passe à la forme conservation. Nos résultats montrent également un rapport AGNL /AGPL de l'acide gras C16 :1 ω 6 supérieur à 1, dans

les deux traitements. Ce rapport est considéré pour caractériser le groupe des CMA, il varie entre (1 et 200). S'il est inférieur à 1, il s'agirait d'une communauté bactérienne (Olsson, 1999). Ce rapport est plus élevé au niveau du semis conventionnel comparativement au semis direct (2,47 / 1,88), mais ces différences sont non significatives ($p > 0,05$). Le rapport AGNL /AGPL chez les eucaryotes traduit un statut de nutrition. Il renseigne sur le flux de carbone vers les structures de stockage. Quant il est élevé, c'est qu'il y a une bonne attribution de carbone à partir de la plante hôte (Olsson, 1999). Certaines conditions du milieu (taux de phosphore élevé, réduction de la température et de la lumière au niveau du sol) réduisent la formation des mycorhizes, par diminution de l'attribution du carbone aux racines et aux mycorhizes, le rapport diminue ainsi de 60 à 20 (Olsson, 1999).

3.1.3.3. Effet des techniques culturales sur l'évolution de la symbiose mycorhizienne

La présence des différentes structures mycorhiziennes dans les échantillons de racines prélevés des deux traitements a confirmé l'interaction du blé dur avec l'inoculum mycorhizien du sol et le statut mycotrophique de la variété de blé dur Bousselam (Nadji et *al.*, 2017). De même, certaines caractéristiques de la zone d'étude telles que l'aridité (une pluviométrie proche de 400 mm), un faible taux de phosphore total et un pH alcalin du sol favorisent la symbiose mycorhizienne (Olsson et *al.*, 1998 ; Beauregard, 2010 ; Mohammad et *al.* 2004 ; Duponnois et *al.*, 2012).

De nombreuses études ont rapporté une variation temporelle et saisonnière de la dynamique des CMA (Schalamuk et *al.*, 2006 ; Mandyam et Jumpponen , 2008). Ces auteurs ont rapporté que la cinétique de colonisation des racines par les champignons AM montrait une augmentation au stade de tallage et un pic atteint au stade épiaison (floraison) et une baisse par la suite au stade de remplissage du grain. Nos résultats ont montré une évolution similaire avec une réduction observée au stade maturité du grain. Cependant, le taux de colonisation racinaire dans le système semis direct est plus élevé en fin de cycle, comparativement au semis conventionnel. Les racines mycorhizées constituent donc une source de propagules mycorhiziennes, qui faciliteront l'installation de la mycorhisation l'année suivante grâce à l'absence de perturbation du réseau hyphal dans le sol non travaillé (Galvez et *al.*, 2001). En effet, les propagules du réseau mycélien persistant dans le sol dans l'essai semis direct et induisant une colonisation racinaire précoce de la variété Boussalem, ont permis la formation en début de cycle (Tallage) d'un nombre élevé d'arbuscules dans le cortex racinaire, à partir de la quatrième année d'essai et leur nombre devient quatre fois plus élevé qu'en semis

conventionnel, après cinq ans d'essai. Ces structures constituent les parties actives des hyphes, assurant les échanges entre les partenaires symbiotiques (Brundrett et *al.*, 1996 ; Balestrini et *al.*, 2015). L'augmentation de leur nombre en semis direct reflète une bonne activité des CMA (Jansa et *al.*, 2002 ; Curaqueo et *al.*, 2010), qui se répercute positivement sur les échanges entre les partenaires symbiotiques et permet à la culture du blé d'optimiser l'acquisition du phosphore par les racines dans des sols pauvres ou calcaires (Castillo et *al.*, 2012). Les arbuscules dégénèrent après quelques semaines et transfèrent les assimilats carbonés issus des plantes hôtes aux vésicules, qui sont des structures de stockage, formées à l'extrémité ou au milieu des hyphes du cortex racinaire ; elles peuvent être inter ou intracellulaires (Brundrett et *al.*, 1996) et peuvent contenir également des réserves de lipides neutres d'acides gras (Olsson 1999). Ces produits de synthèse se révèlent abondants à des périodes où la plante ne les utilise pas, comme en fin de cycle (Al-Karaki et *al.*, 2004). Dans le cas du semis conventionnel, le pourcentage d'arbuscules est faible et le pourcentage de vésicules est la principale composante de la colonisation racinaire par les CMA. Leur formation survenant au stade du remplissage du grain traduirait plutôt un partenariat négatif entre la plante hôte (blé dur) et le partenaire fongique.

Les hyphes intra-racinaires sont une composante mycorhizienne principale, ils sont observés au niveau de tous les échantillons racinaires testés. Ces hyphes sont connectés à un réseau mycélien extra-racinaire capable d'exploiter les interstices du sol, là où les sels minéraux dissous subsistent le plus longtemps lors des périodes de sécheresse (Gavériaux, 2012; Kabir, 2005), ce qui permettra d'améliorer la nutrition de la plante dans les conditions d'aridité de la région (Auge et *al.*, 2001) ; ils permettent également de relier la plante cultivée avec des plantes voisines (plantes spontanée) et d'établir ainsi un réseau commun de connexion (common mycorrhizal network (CMN) (Wu, 2017). A la fin du cycle végétatif, la persistance de ces d'hyphes mycorhiziens intra- racinaires dans le sol non labouré (semis direct), constitue une source majeure de propagules mycorhiziennes (Read, 1998) ; ils permettront une meilleure colonisation précoce de la culture qui succédera (Castillo et *al.*, 2012). Les plantes emprunteront les anciens canaux radiculaires (Kabir, 2005). Ceci est justifié par les observations faites sur des prélèvements racinaires au niveau de plusieurs points de la parcelle du semis direct, qui nous ont permis de détecter des anastomoses racinaires (Figure 44), reliant le système racinaire du plant installé en quatrième année d'essai (A4) à celui de l'année précédente (A3), ce qui permet une meilleure alimentation du plant.



Figure 44. – anastomoses racinaires observées au niveau du semis direct en quatrième année d'essai A4.

3.1.3.4. Effet des techniques culturales sur la structure des communautés mycorhiziennes arbusculaires

Après cinq années de conduite de l'essai, le semis direct a permis d'améliorer l'abondance relative (AR) des familles recensées, sauf pour les Gloméracées qui ont une abondance relative (AR) élevée dans les deux traitements. Les vingt et une espèces appartenant aux cinq familles de Glomeromycota recensées, reflètent une biodiversité élevée du sol de la parcelle expérimentale ce qui est confirmé par les travaux de Nadji et *al.*, (2017) dans la même région. Schalamuk et *al.*, (2006) trouvent pour un blé de printemps trois familles ; cet auteur mentionne que cette biodiversité présente une interaction entre le travail du sol et l'année. Jansa et *al.*, (2002) signalent après treize ans de conduite d'essai sans travail du sol, que la présence de certaines espèces de champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) surtout celles n'appartenant pas au genre *Glomus* a tendance à augmenter. C'est le cas de *Scutellopora pellucida*, *Acaulospora paulinae* et *Entrophospora infrequens*, qui sont signalées plus abondants dans les sols non travaillés (Galvez et *al.*, 2001; Jansa et *al.*, 2002) ; de même Soka et Ritchie (2014) rapportent que les hyphes d'*Acaulospora laevis* perdent complètement leur infectivité lorsque le sol est perturbé.

L'abondance d'une famille au détriment des autres est liée à certains mécanismes de concurrence, dominance et d'antagonisme, qui peuvent être influencés par des facteurs tels que la restriction spatiale et /ou les facteurs édaphiques, comme le pH du sol qui a un impact sur la viabilité des spores (Gemma et *al.*, 1989 ; Wang et *al.*, 2008). Dans le semis conventionnel, le labour influence la communauté de CMA par l'enfouissement de propagules en profondeur, certaines espèces trouvent donc refuge sous le labour (Oehl et *al.*, 2003 ; 2004 ; 2005) ; ce qui se traduit généralement par une perte globale de la diversité des

champignons MA, du moins dans l'horizon labouré (Jasper et *al.*, 1991). Celui-ci se trouve alors occupé par des espèces de champignons MA qui interagissent moins avec les cultures et qui investissent une bonne partie de leurs ressources dans la production de spores (Johnson et *al.*, 1992). La zone superficielle de l'horizon se trouve alors dominée par les bactéries (Frey et *al.*, 1999). La diversité des spores peut être liée également à la densité racinaire (Cardoso et *al.*, 2003), qui augmente favorablement dans les conditions du semis direct. Les travaux conduits sur un sol en jachère montrent un déclin dans la biodiversité des CMA comparativement à un sol travaillé (Schalamuk et *al.*, 2006) ceci montre également que la composition de la communauté des AMF est basée surtout sur la compétition entre les champignons AM et les interactions interspécifiques que sur les caractéristiques végétatives (Gemma et *al.*, 1989).

De même l'abondance des adventices dans le semis direct (Karkour, 2012) peut constituer un hôte intermédiaire entre les champignons MA et la culture principale (Kabir et Koide 2000) par l'intermédiaire du mycélium extraradical, les CMA peuvent non seulement assurer l'absorption de l'eau et des nutriments du sol et fournir des voies de transfert réciproque de carbone (C) reçu des racines de la plante hôte, mais ils transfèrent également les nutriments et le C entre les plantes liées par le même réseau mycélien (Simard et *al.* 2002).

La dominance des spores appartenant à la famille des Gloméracées a été aussi comptabilisée dans d'autres pays en Afrique, notamment dans les zones semi arides du Sénégal (Diallo et *al.*, 1999) et au Burkina Faso (Guisson, 2001). Schalamuk et *al.* (2006) signalent après deux années d'essai que les Gloméracées sont plus abondantes dans le système conventionnel, comparativement au semis direct dépendamment de la durée de la conduite culturale. En effet, l'ubiquité des Gloméracées est rendue possible même dans les écosystèmes perturbés, grâce à leur aptitude à sporuler rapidement et à développer un réseau d'hyphes en formant rapidement des anastomoses entre les différentes branches mycéliennes de même génotype ou de génotype voisin, ce qui leur confère la capacité de rétablir un réseau interconnecté après une perturbation mécanique, comme le labour (Voets et *al.*, 2006).

3.1.3.5. Interaction entre la symbiose mycorhizienne et endophytique

A la fin de la cinquième année d'essai, la quantification des structures symbiotiques spécifiques aux champignons mycorhiziens (hyphes non septés, vésicules et arbuscules) présentes au niveau du cortex racinaire et celles des champignons endophytiques (mycéliums septés foncés (DSE), conidies et microsclérotés), présentes au niveau du cortex racinaire et du

cyindre central, montre que le taux d'endophytisme a augmenté en semis direct de 200 % au stade remplissage du grain, mais la colonisation mycorhizienne reste plus prépondérante dans les deux traitements.

Ceci est confirmé également par nos résultats par les marqueurs lipidiques, ainsi que par les travaux de Olsson *et al.* (1999) qui signalent que dans les sols cultivés, les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) sont les plus abondants et constituent 5 à 50% de la biomasse microbienne ; de même Johansson *et al.*, (2004) rapportent que l'établissement de la symbiose mycorhizienne a un effet qualitatif et quantitatif sur la structure de la microflore du sol (effet mycorhizosphère), en privilégiant en particulier la multiplication de microorganismes saprophytes présentant des propriétés bénéfiques pour le développement de la plante. Ceci est en contradiction avec les travaux de Guo *et al.* (1992), Muller, (2003), Keenan *et al.*, (2007) et Liu *et al.* (2011), qui signalent que la présence des endophytes chez les Graminées réduit la densité des spores dans le sol, ainsi que le taux de mycorhization qui peut diminuer de 50%. De même, Christopher *et al.*, (2008) signalent que la biomasse des endophytes racinaires peut être souvent plus grande que celle des champignons mycorhiziens.

Cependant Jansa *et al.*, (2002) rapportent dans leurs travaux un effet compétitif des champignons mycorhiziens sur les champignons non mycorhiziens et que cet effet est favorisé par la réduction du travail du sol. Ce qui rejoint nos résultats, sauf que cet effet est similaire au niveau de nos deux traitements. Le caractère d'aridité de la région ($P < 400\text{mm}$) et la présence d'un taux élevé de calcaire justifient nos résultats (Nouaim *et al.*, 1994; Rodriguez *et al.*, 2004 ; Allen, 2007 ; Duponnois *et al.*, 2012). Les champignons endophytes (DSE) différent des mycorhiziens dans leurs principaux avantages conférés à la plante hôte, mais également dans leurs localisations et dans le moment de la colonisation de la plante hôte (Keenan *et al.*, 2007).

3.1.3.6. Rendements du blé

Angar *et al.*, (2010) signalent que le rendement du blé dur conduit durant dix années en semis direct au niveau d'une zone subhumide de la Tunisie, est en moyenne supérieur de 8 q/ha, par rapport au semis conventionnel, alors qu'au niveau de la zone semi-aride inférieure, cette différence est de 3,5 q/ha et elle atteint 7qx/ha au niveau du semi-aride supérieur. Ces résultats concordent avec les nôtres qui montrent un gain de rendement de 4,7q/ha, après cinq années de conduite en semis direct. Pittelkow *et al.* (2015) et Biberdzic *et al.*, (2020) ont

indiqué que les systèmes sans labour dans les régions sèches d'Afrique augmentent les rendements par rapport au système de semis conventionnel.

L'absence de l'effet positif du système semis direct sur le rendement durant les dernières campagnes de notre essai peut être en relation avec les semis tardifs que nous avons effectué en mois de janvier, en effet les températures froides des mois après semis, peuvent empêcher la bonne croissance des plantes en affectant le développement physiologique des méristèmes (Chassot et *al.*, 2002) et impactent également la minéralisation de l'azote (N) du sol (Chapman et *al.*, 2001). D'autres auteurs signalent que le semis direct peut réduire le rendement du blé, c'est le cas de Berner et *al.*, (2008) qui signalent une réduction de 14% du rendement du blé tendre, après trois années de réduction du travail du sol ; de pareils résultats sont signalés en Suisse sur maïs (Rieger ; 2001). Dans d'autres expérimentations, l'effet de la réduction du travail du sol n'impacte pas le rendement des cultures et des différences non significatives sont mentionnées entre les différents tillages (Anken et *al.*, 2004 ; Jansa et *al.*, 2006).

On considère que le bénéfice de la formation de mycorhizes sur le rendement dépend de l'équilibre entre la demande fongique en énergie et les besoins de la plante en nutriments (Corrêa et *al.*, 2011). On s'attend à des effets négatifs de la colonisation mycorhizienne sur la plante hôte lorsque les coûts nets du carbone pour l'entretien et la croissance des champignons dépassent les avantages nets obtenus grâce à un meilleur apport en nutriments (Tuomi et *al.*, 2001). Plusieurs études ont indiqué que l'effet des mycorhizes sur la productivité de la plante hôte dépend de la quantité de nutriments disponibles et de l'état nutritionnel de la plante hôte (Cavagnaro et *al.*, 2006; Janos, 2007).

L'effet bénéfique de la mycorhization (réseau mycélien et taux d'arbuscules) sur le rendement de notre culture n'apparaît pas nettement durant toutes les campagnes expérimentales, car il dépend de l'équilibre entre les besoins des deux partenaires symbiotiques. Ce rendement est fortement impacté par le pourcentage de vésicules formées en fin de cycle. Le nombre de vésicules augmente dans les vieilles racines ou les racines mortes et contribuent à renouveler le potentiel mycorhizien infectieux du sol (MSI) (Schalamuk et *al.*, 2006).

L'émergence d'arbuscules au stade du remplissage du grain est un facteur limitant du rendement en grain. Cette relation négative entre le rendement et l'activité de la symbiose mycorhizienne énoncée dans le système de culture sans labour a mis en évidence la notion de

compétition pour les assimilats en C entre les puits des végétaux et des CMA, ainsi que le coût de la symbiose (Dai et *al.*, 2014).

3.1.4. Conclusion

Cette étude a eu pour objectifs de mesurer, à moyen terme, l'impact de la suppression du travail du sol sur l'évolution de la symbiose mycorhizienne d'une variété locale de blé dur, dans le but de mesurer la viabilité de nouveaux agrosystèmes pour la production alimentaire, tout en préservant et en optimisant les interactions plantes - microorganismes.

Le dosage des marqueurs lipidiques montre qu'après trois ans de conduite, le semis direct a permis une augmentation de 159% de la biomasse microbienne spécifique aux champignons saprophytes et de 52% de celle spécifique aux CMA, comparativement au semis conventionnel. Cependant le gradient d'aridité, la monoculture et les caractéristiques édaphiques ont facilité l'installation des CMA au niveau des deux conduites culturales, ce qui est vérifié par un rapport NL/PL de l'acide gras C16 :1w5 >1.

En permettant une pérennisation du réseau mycélien, le semis direct a modifié le comportement des champignons mycorhiziens et la orienté vers une stratégie d'échange et de partenariat positif avec la plante hôte, en augmentant le nombre d'arbuscules. Ceci est confirmé après quatre années d'essai, où la quantification des structures mycorrhiziennes a permis de constater en semis direct, une réduction de la production de vésicules et une augmentation de celles des arbuscules, dès le début du cycle végétatif permettant ainsi de rentabiliser le partenariat symbiotique. Le semis direct a permis d'augmenter l'inoculum mycorhizien produit en fin de cycle basé sur des racines colonisées par des hyphes et des vésicules, ce qui affecte ainsi le potentiel infectieux mycorhizien du sol.

L'étude de la biodiversité des champignons endomycorhiziens après cinq années d'essai a permis de recenser cinq familles de Glomeromycota, ce qui reflète une biodiversité élevée du sol de la parcelle expérimentale. Le semis direct a permis d'améliorer l'abondance relative (AR%) de quatre familles, qui sont les **Gigasporaceae**, les **Diversisporaceae**, les **Acaulosporaceae** et les **Dentiscutataceae**. Les Glomeraceae ont une présence dominante dans les échantillons du sol des deux traitements étudiés, mais avec une abondance relative (AR) plus importante en semis conventionnel. Parmi les vingt et une espèces recensées, le semis direct a permis d'améliorer l'abondance relative de neuf espèces qui sont comme suit : *Gg. albida*, et *Gg. margarita* pour les Gigasporaceae ; *A. capsicula*, *A. denticulata*, *A.*

scrobiculata, *A. koskei*, *A. thomii* chez les Acaulosporaceae ainsi que *D. erythropha*, et *D. nigra* pour les Dentiscutataceae.

La stabilité du réseau mycélien des champignons mycorhiziens (networks of AMF hyphae) conjuguée à la présence de résidus en surface a favorisé la présence d'anastomoses racinaires et a réduit l'apparition de fentes de retrait, ce qui peut avoir un impact favorable sur la structure du sol et la nutrition des plantes.

Le semis direct a également amélioré la teneur en matière organique dans la couche superficielle du sol, de 29%, comparativement au semis conventionnel, mais la teneur en matière organique du sol (MOS) reste faible respectivement pour le no tillage et le conventionnel (3,71% et 2,62%), ce qui est en relation avec un faible retour de la matière organique suite à la faiblesse des quantités de résidus des cultures à retourner au sol, par de faibles rendements et par la pression de la demande sur ces produits utilisés comme source d'énergie en alimentation animale (élevage ovin). La teneur en azote minéral pour 100g de sol (N%) reste faiblement identique pour les deux itinéraires techniques (0,17%). Ceci est expliqué par la rotation (blé/blé) qui implique un ralentissement de la vitesse de minéralisation de la matière organique, de même le rapport C/N a augmenté dans le semis direct de 27%, comparativement au semis conventionnel.

Malgré une augmentation moyenne des rendements en grains observée en semis direct, celle-ci reste tributaire des conditions climatiques et de certains facteurs de l'itinéraire technique, tels que la date de semis. Elle dépend également dans le système de semis direct du coût de l'activité mycorhizienne et de la quantité d'inoculum produits à la fin du cycle.

Cette étude préliminaire devrait être complétée par d'autres investigations relatives à l'étude de la biodiversité mycorhizienne des sols cultivés et des facteurs influençant la mycorhization des plants de blé, tels que la date de semis, la présence de mauvaises Adventices et le comportement des variétés de blé dans les différentes zones.

3.2. Expérimentation de Saida

3.2.1. Résultats

3.2.1.1. Caractéristiques pédologiques de la parcelle expérimentale

Le sol de la parcelle expérimentale présente une granulométrie uniforme sur les trois niveaux, étudiés [0-20[; [20-40[; [40-60] cm avec une texture argilo-limoneuse. Il présente

une densité apparente de 1,21 et ses caractéristiques hydriques sont telles que : (CC = 2,37 mm/cm, PF = 1,7 mm/cm, RU = 0,67 mm/cm et RFU = 0,44 mm/cm). La présence de calcaire varie entre des taux moyens de 5 à 25%. La teneur en matière organique et en phosphore est très faible.

Tableau 18. – : caractéristiques physicochimiques du sol de la parcelle expérimentale.

Caractères physiques (%)		Limons	Argiles	Sables	(CEmmho/cm)
Caractères chimiques		30.5	39.9	29.6	0.3 – 0.5
MO(%)		pH (water)	CaCO ₃ (%)	CaCO ₃ Acif (%)	P ₂ O ₅ Soluble (ppm)
1,7	1,27	8.07	18	11	6 - 7.33

3.2.1.2. Quantification des paramètres symbiotiques racinaires avec les CMA et les DSE chez les variétés de blé dur et d'orge étudiées

Les résultats figurant dans les tableaux 19 et 20 montrent le degré de mycorhization et d'endophytisme, par niveau de profondeur racinaire, respectivement chez le blé dur et l'orge. Pour l'orge, le taux de mycorhization total (H) a atteint en moyenne 90,5%. Il correspond à la présence au niveau du cortex racinaire d'une ou de plusieurs structures mycorhiziennes. Cependant, le taux d'endophytisme correspondant à la présence des structures des DSE au **niveau du cortex et du cylindre central, n'est que de 7,5%. La présence des arbuscules et des vésicules** est respectivement de 36% et 55%. Des variabilités entre variétés sont observées.

Tableau 19. – variation des paramètres de mycorhization et d'endophytisme chez les variétés d'orge étudiées.

Variété par Niveau de profondeur	Mycorhization			Endophytes
	H%	A%	V%	E%
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

Résultats et Discussion

En ce qui concerne le blé dur, la proportion des structures mycorhiziennes (H% et A%) est similaire à celle de l'orge, mais le taux de vésicules (V) est plus faible (-10%) ; cependant, le taux d'endophytisme (E) est plus élevé, atteignant ainsi le seuil de 34,25%, soit 26,75% de plus que pour l'orge.

Tableau 20. – . Variation des paramètres de mycorhization et d'endophytisme chez les variétés de blé dur étudiées.

Variété Par Niveau De	Mycorhization			Endophytes
	H%	A%	V%	E%
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 du 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 21).

Tableau 21. – Résultats des paramètres de mycorhization et d'endophytisme par niveau d'enracinement.

Niveau de profondeur racinaire	Mycorhization			Endophytes
	H%	A%	V%	E%
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 de variance à deux critères de classification (profondeurs et variétés) effectuée par stat box, 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 22).

Tableau 22. – Résultats de l'analyse statistique des paramètres de mycorhization et d'endophytisme par niveau d'enracinement.

Analyse de variance	Mycorhization			Endophytes
	H%	Ab%	V%	E%
Test F var	1	1,33	4,1	5,61
Test F prof	1,417	0,09	0,56	1,02
Prob fact variété	0,46	0,33	0,02	0,01
Prob fact profondeur	0,29	0,91	0,59	0,4
C.V %	13,35	111,36	45,61	49,5
Effet variété	NS	NS	S	HS
Effet profondeur	NS	NS	NS	NS

3.2.1.3. Étude de la variation paramétrique

Le comportement symbiotique a été étudié à l'échelle variété et 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 45.

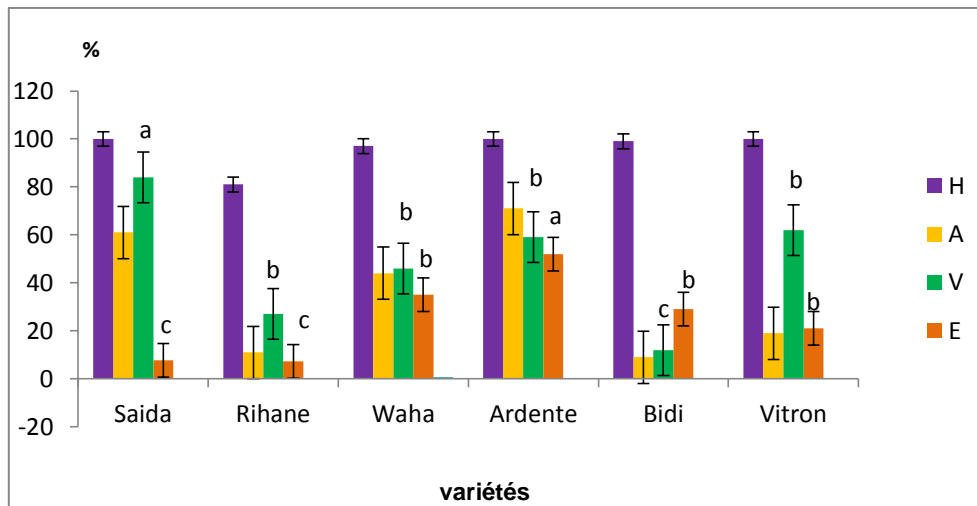


Figure 45. – Variation du taux de mycorhization (H) d’arbuscules (A), de vésicules (V) et d’endophytisme (E) chez les variétés d’orge (Saida 183, Rihane 03) et de blé dur (Waha, Ardente, Bidi 17 et Vitron).

L’histogramme (Figure 45) 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 (Figure 46a). 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 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 ($P \leq 0,01$). 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 Waha 03, 29% et 21% respectivement avec Bidi17 et Vitron.

Le comportement symbiotique variétal par niveau de profondeur racinaire est illustré par la figure 46.

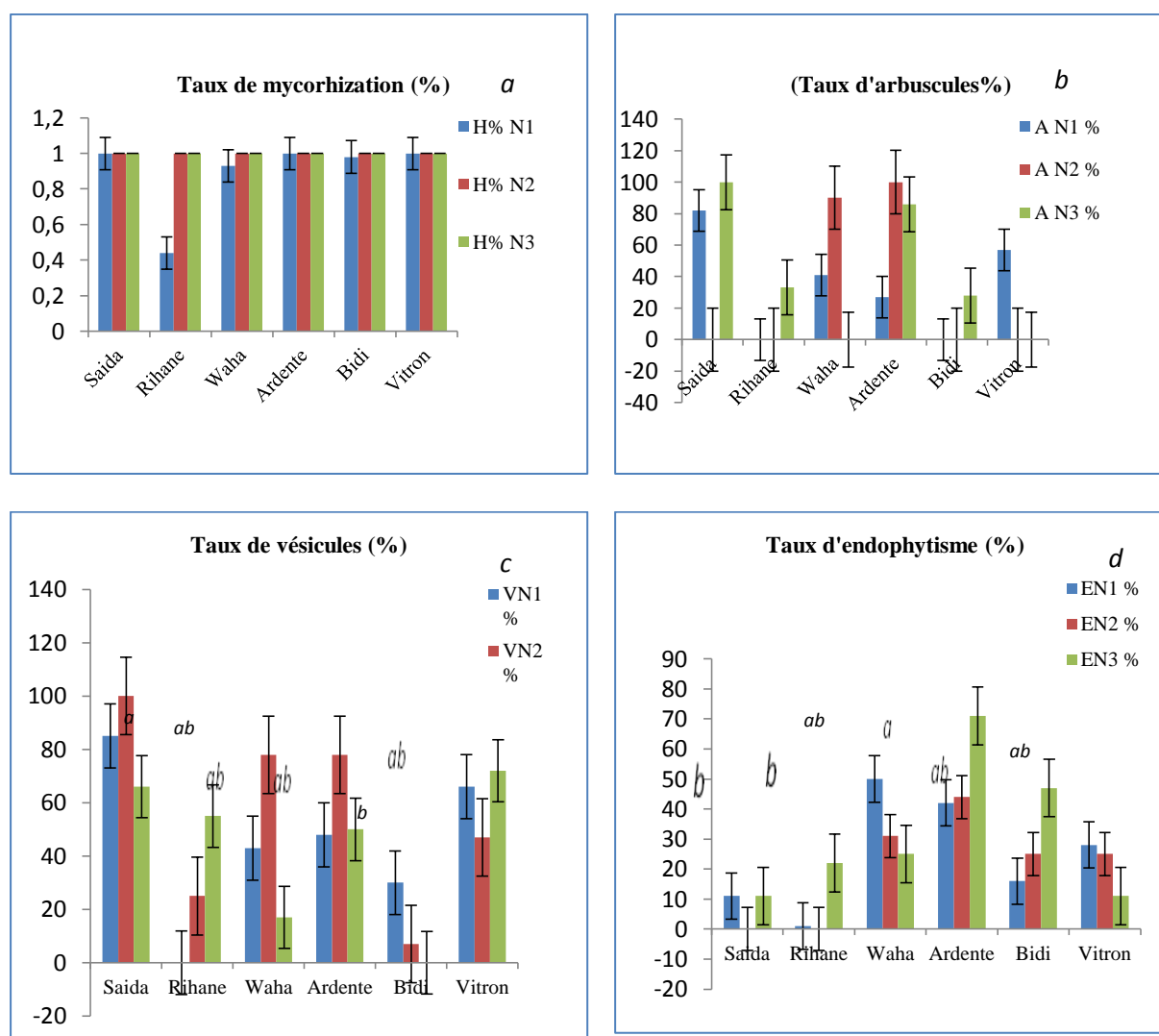


Figure 46. – évolution variétale des paramètres de mycorhization et d'endophytisme par niveau de profondeur racinaire.

La répartition des arbuscules dans les différents niveaux du sol est aléatoire pour l'ensemble du matériel végétal retenu (Figure 46b), contrairement à celle des vésicules qui est plus uniforme. En effet, la majorité des variétés présente des vésicules (Figure 46c) sur toute la profondeur racinaire étudiée (0-60cm), excepté la variété d'orge Rihane 03 qui ne présente pas en surface (0-20cm) et la variété de blé dur Bidi17 sur le niveau correspondant à 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 (Figure 46d).

3.2.1.4. 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 47) et variétale (Figures 48 et 49).

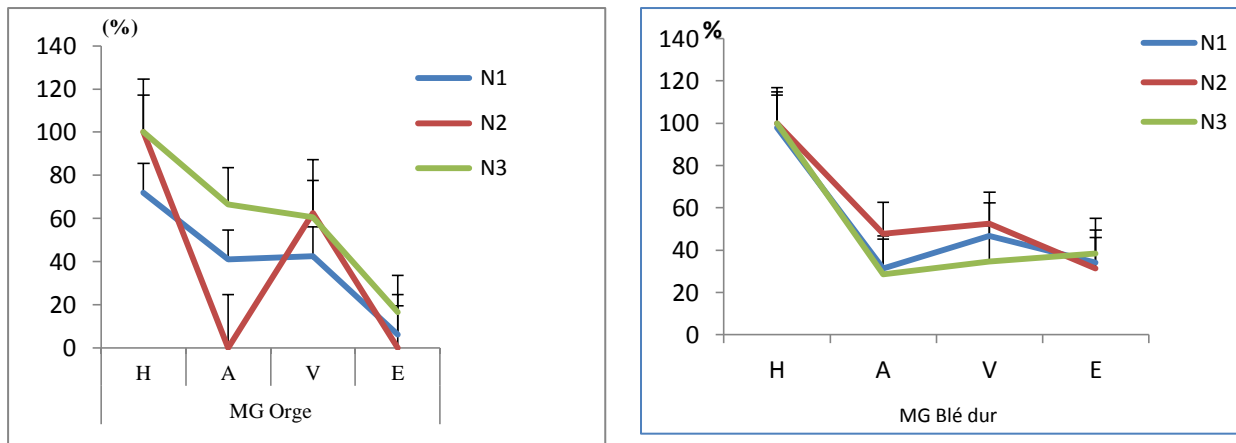


Figure 47. – cinétique symbiotique racinaire moyenne des variétés d'orge et de blé dur sur les différentes profondeurs racinaires.

La figure 47 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 se manifeste plus sur l'horizon N2 (20-40cm) pour la symbiose mycorhizienne et au niveau N3 (40-60cm) pour l'endophytisme.

Afin de cerner le comportement de chacune des variétés, nous avons suivi leur cinétique (Figures 48 et 49).

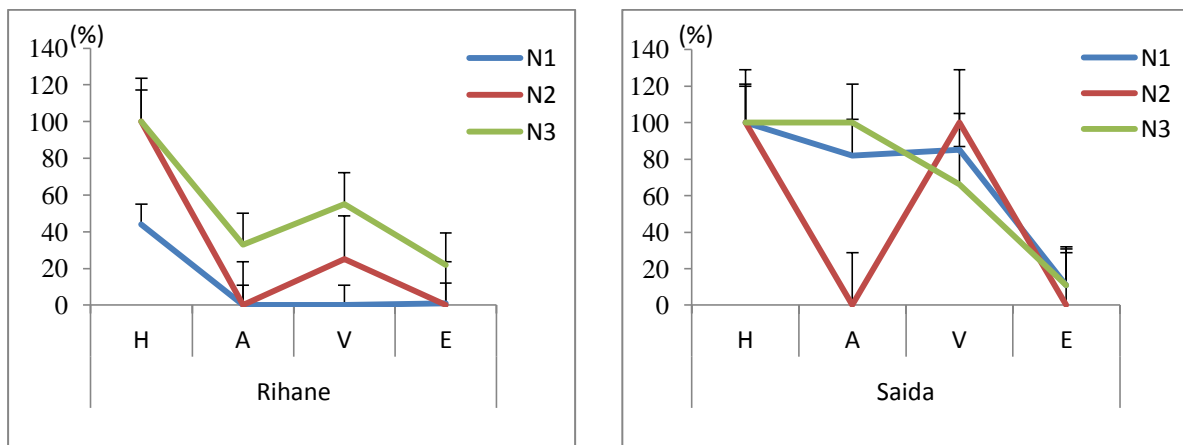


Figure 48. – cinétique racinaire de la symbiose mycorhizienne et endophytique des variétés d'orge sur les différentes profondeurs racinaires.

Les variétés d'orge ont un comportement racinaire différent (Figure 47). 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 la variété 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).

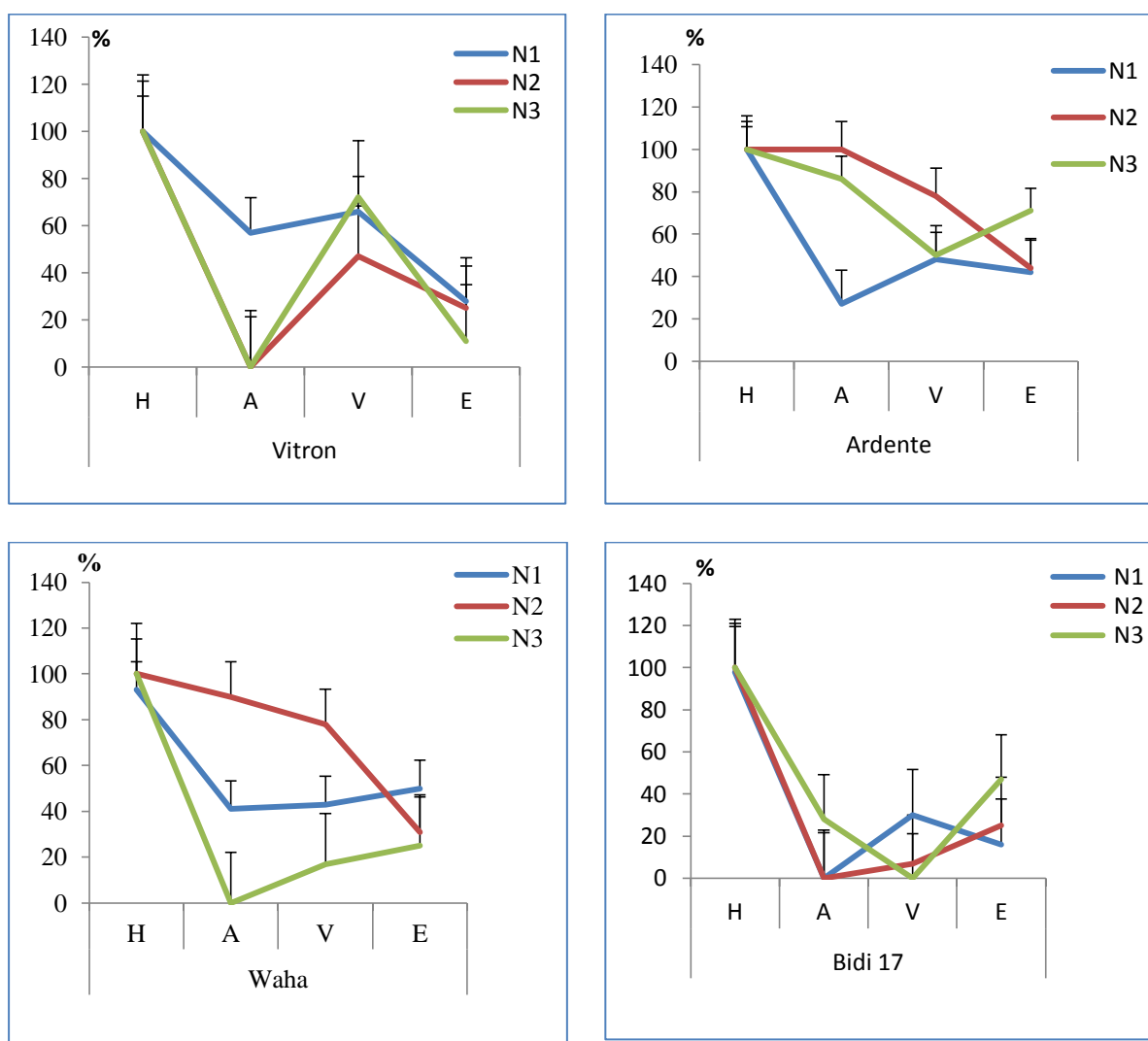


Figure 49. – cinétique racinaire de la symbiose mycorhizienne et endophytique des variétés de blé dur sur les différentes profondeurs racinaires.

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

La variété Bidi17 a une activité symbiotique mycorhizienne faible, profonde, (40-60cm), mais les vésicules sont localisées superficiellement, tandis que les structures des DSE se trouvent au niveau 20-40 cm.

3.2.1.5. Interaction entre la symbiose mycorhizienne et endophytique

Une ACP est effectuée dans le but d'illustrer l'interaction entre les différents paramètres symbiotiques des espèces et variétés considérées. Dans ce sens, la matrice de corrélation de Pearson (Tableau 19) montre une corrélation positive et significative entre un paramètre de la symbiose mycorhizienne (A%) et la symbiose endophytique (E%), chez le blé dur uniquement.

Tableau 23. – Matrice de corrélation entre les paramètres symbiotiques chez le blé dur.

	H%	A%	V%	E%
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)

La présentation des paramètres sur le plan 1/2 de l'ACP fait apparaître trois groupes chez le blé dur répartis comme suit :

- le groupe A comprend la variété française Ardente, avec une symbiose endophytique et mycorhizienne élevée sur les trois profondeurs racinaires étudiées ; la variété Vitron (espagnole) avec le premier niveau de profondeur (Vitron 0-20cm) et Waha 03 (syrienne) sur les deux premiers niveaux de profondeur racinaire : Waha (0-40cm) ;

- le groupe B est représenté par Bidi 17 (locale), avec une très faible symbiose racinaire (Arb 9% ; Ves 12%) dans les premiers niveaux (0-40cm) et la variété Waha dans le dernier niveau (40-60 cm).

- une large variabilité dans l'expression du comportement symbiotique a été observée entre les niveaux de profondeur, ceci a révélé un groupe AB présentant une symbiose racinaire moyenne avec Vitron (20-60cm) et Bidi17 (40-60cm).

Chez l'orge, la différence entre les variétés se fait uniquement sur la base des paramètres de la symbiose mycorhizienne, qui sont élevés pour Saida 183 à tous les niveaux, alors que pour Rihane 03, ils sont moyens en profondeur (40-60cm) et faibles en surface (Figure 50).

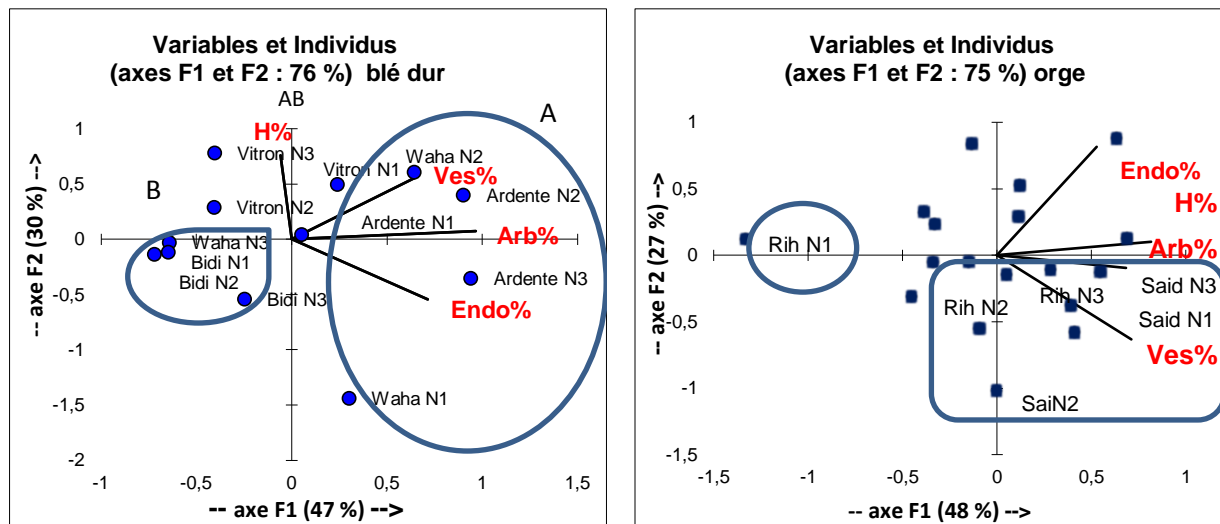


Figure 50. – Présentation sur le plan (1,2) de l'ACP des paramètres symbiotiques pour tous les niveaux de profondeurs et variétés étudiés (n=18)

3.2.2. Discussion

L'observation d'une colonisation mycorhizienne plus importante que celle liée aux champignons endophytes DSE 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. 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, Labidi 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 pathogènes et même contre les nématodes (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 and Zahangir, 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, 1996). Elles contiennent des réserves lipidiques accumulées à la suite des échanges effectués avec les arbuscules, qui dégèrent 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 MCA (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 CMA. Selon Jasper et al. (1991), le travail du sol se traduit généralement par une perte globale de la diversité des champignons CMA 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 l'élimination de certaines familles clés

comme les Acaulosparaceae 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 cultivées 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 (Plenchettes et al., 1983). Le comportement mutualiste contrasté des variétés peut être en relation avec plusieurs points.

- La stratégie d'adaptation de la variété aux contraintes du milieu, comme le cas de la variété d'orge locale Saida 183 qui appartenant à la région d'étude, présente un caractère xérophyte ; en effet, elle présenterait différents mécanismes d'adaptation au stress hydrique (Khaldoun et al., 1990 ; Fernandez, 1992) ; son taux élevé d'arbuscules révèle sa capacité d'interagir avec la flore mycorhizogène du milieu, même en présence d'un taux de calcaire élevé (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, qui est précoce et échappe à la sécheresse en raccourcissant son cycle ; l'indice de sensibilité à la sécheresse de cette dernière est élevé (Khaldoun 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 racinaire, parce 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 de 60 cm pour Ardente et 40 cm 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) qui présente un nombre de racines principales élevé (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).
- La réaction simultanée des variétés de blé dur avec les champignons mycorhiziens et endophytiques DSE est liée à leur sensibilité aux maladies et particulièrement Waha 03, très sensible à la rouille et qui se trouve dans le cadran des endophytes (Figure 48).

3.2.3. 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 6 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 DSE plus faible. Cependant la comparaison des deux espèces étudiées montre que le blé dur présente une colonisation par les DSE plus élevée comparativement à l'orge. Notons également que la symbiose avec les champignons endophytes DSE est corrélée positivement avec le taux d'arbuscules, qui reflètent l'activité symbiotique mycorhizienne.

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 symbiotique élevée chez 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.

Conclusion générale et perspectives

4. Conclusion générale et Perspectives

A l'heure du développement durable, les mycorhizes apparaissent comme un élément de base des différents services éco-systémiques rendus par la nature à l'homme, dans ce contexte la présence et/ou l'utilisation des mycorhizes représentent un des enjeux majeurs pour une agriculture plus durable visant à réduire l'usage des pesticides et permettant d'améliorer 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. Dans ce sens, les études menées sur l'évaluation des capacités symbiotiques des variétés céréalières cultivées en Algérie sont peu nombreuses.

Les essais expérimentaux menés en plein champs dans deux zones céréalières à l'Est et à l'Ouest du pays ont permis de faire une lecture du **comportement symbiotique mycorhizien** des variétés céréalières étudiées, et de nous informer **sur l'installation et l'évolution** de cette symbiose en fonction des conditions **pédoclimatiques** des zones d'étude, selon **les stades végétatifs** choisis et selon la **conduite culturale adoptée**.

Les résultats ont montré que la colonisation racinaire par les hyphes mycorhiziens a été recensée dans la majorité des racines, dans les deux stations d'étude et pour toutes les variétés étudiées. La mycorhization a été observée à un stade précoce (tallage – 6 semaines après semis) dans les conditions de travail du sol conventionnel ou du semis direct. Dans ces dernières conditions culturales une persistance des hyphes intra-racinaires à la fin du cycle végétatif été observée. Cette composante mycorhizienne principale, constitue une source majeure de propagules qui a permis une meilleure colonisation précoce de la culture durant le cycle suivant. Cependant la présence de cette composante mycorhizienne ne reflète pas l'activité ou la dynamique de la symbiose mycorhizienne. Cette dernière est illustrée par plusieurs paramètres tels que ;

- La présence des **structures arbusculaires** intra- racinaires permettant l'échange et le partenariat positif avec la plante hôte. Leur nombre est important en conditions de semis direct où on observe un taux élevé depuis le stade tallage. Les variétés étudiées à la station de Saida ont présenté des taux différents.
- La présence des **vésicules** qui sont des structures de stockage, formées à l'extrémité ou au milieu des hyphes du cortex racinaire ; elles peuvent être inter ou intracellulaires et peuvent contenir également des réserves de lipides neutres d'acides gras. Elles permettent la survie et la régénération du champignon

Conclusion générale et Perspectives

mycorhizien, leur nombre est plus important dans les conditions du semis conventionnel.

- **La cinétique symbiotique racinaire** montre un comportement variétale différent quand à la répartition des composantes mycorhiziennes (hyphes, arbuscules et vésicules) qui pourrait être en relation avec l'évolution racinaire. Cette cinétique a permis d'identifier un comportement spécifique (orge, blé dur). De même la répartition aléatoire des vésicules et des arbuscules le long du prolongement racinaire peut être 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.
- **La cinétique symbiotique** à travers les **années** et les **stades végétatifs** étudiés a permis de montrer un effet année en relation avec la durée du test et un effet stade de croissance statistiquement très significatifs pour l'ensemble des paramètres étudiés dans les deux traitements , ceci rejoint à dire que le comportement symbiotique évolue avec le temps et que la durabilité des techniques sans labours peuvent à long terme améliorer le comportement du blé dur.
- L'effet du semis direct est observé également sur l'amélioration de la biomasse microbienne et celle de la biodiversité des champignons mycorhiziens ainsi que sur la teneur de la matière organique du sol.
- **L'interaction des champignons mycorhiziens** avec une autre composante endophytique à savoir les **Dark Septa Endophytes**, montre que la présence de ces derniers est permanente dans les deux stations d'étude, et au niveau de tous le matériel végétal étudié ; leur présence est même corrélée positivement avec l'activité mycorhizienne (résultats de Saida), le nombre de leur structures varie d'une variété à une autre, il est plus important chez le blé comparativement à l'orge, et dans le semis conventionnel par rapport au semis direct, mais dans tous les cas la colonisation racinaire par les structures spécifiques aux champignons mycorhiziens est plus dominante que celle spécifiques aux champignons endophytes. Ce qui constitue une réponse au caractéristiques pédoclimatiques des régions d'étude (aridité, taux de calcaire élevé, faible fertilité des sols).

Conclusion générale et Perspectives

Enfin, il est nécessaire de préciser que cette étude préliminaire devrait être complétée par d'autres investigations relatives à l'étude des capacités mycorhizogènes des sols des régions céréalières et des facteurs qui peuvent les influencer, tels que la date de semis, la présence des adventices, la rotation culturale et le comportement des variétés de blé dur cultivées dans les différentes zones agro-climatiques.

Références bibliographique

Référence bibliographique

A

1. **Abdel-Fattah, G.M.; Asrar, A.A.** 2012. Arbuscular mycorrhizal fungal application to improve growth and tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) plants grown in saline soil. *Acta Physiol. Plant.*, 34, 267–277.
2. **Abdellaoui Z., Teskrat H., Belhadj A., Zaghouane O.** 2011. Étude comparative de l'effet du travail conventionnel, semis direct et travail minimum sur le comportement d'une culture de blé dur dans la zone subhumide. In : Bouzerzour H. (ed.), Irekti H. (ed.), Vadon B. (ed.). 4. Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct. Zaragoza : CIHEAM / ATU-PAM / INRAA / ITGC / FERT, p. 71- 87 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 96).
3. **Adekiya, A. O., Ojeniyi, S. O., Agbede, T. M.** 2011. Soil physical and chemical properties and cocoyam yield under different tillage systems in a tropical Alfisol. *Experimental Agriculture* 47(3): 477–488.
4. **Agbede. T.M, Adekiya. A. O.** 2018. The Effect of Tillage on Soil Physical and Chemical Properties and Yield of Ginger. *Agric. conspec. sci.* Vol 83 No 4
5. **Akiyama K, Matsuzaki K, Hayashi H.** 2005. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature* 435: 824–827.
6. **Al-Kaisi M. and Yin X.** 2005. Tillage and crop residues effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotation. *Journal of environment quality*, 34: 437- 445.
7. **Al-Karaki G. McMichael B · Zak J.** 2004 Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza* 14:263–269 DOI 10.1007/s00572-003-0265-2
8. **Ali, A., Ayuba, S. A., Ojeniyi, S. O.** 2006. Effect of tillage and fertilizer on soil chemical properties, leaf nutrient contents and yield of soybean in the guinea savanna zone of Nigeria. *Nigerian Journal of Soil Science* 16: 126–130.
9. **Allen, B.L., Jolley, V.D., Robbins, C.W. & Freeborn, L.L.** 2001. Fallow versus wheat cropping of unamended and manure-amended soils related to mycorrhizal colonization, yield, and plant nutrition of dry bean and sweet corn. *Journal of Plant Nutrition*, 24, 921–943.
10. **Allen M.F.,** 2007. Mycorrhizal fungi: Highways for water and nutrients in arid soils. *Vadose Zone Journal*, 6 (2): 291-297.
11. **Alvarez, C. R., Alvarez, R., Rosa, C., & Roberto, A.** 2000. Short-term effects of tillage systems on active soil microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*, 31(2), 157-16. <http://doi.org/10.1007/s003740050639>.
12. **Alvey, S., Bagayoko, M., Neumann, G. & Buerkert, A.** 2001. Cereal/legume rotations affect chemical properties and biological activities in two West African soils. *Plant and Soil*, 231, 45–54.
13. **Amara, M. ; Mohand Ouali ,K. ; Fatiha, H.,**2006- Effet de succession des machine agricoles pour la mise en place d'un blé sous pivot sur le développement des racines et conséquence sur le rendement. *Rev. Terre et Vie*, juillet 2006-.14p.
14. **Amara M; Feddal Ma ; Hamani A.** 2015. Analyse du comportement du sol sous l'action de trois techniques de mise en place d'un blé dur (*Triticum durum*). Effet sur le développement des racines et conséquences sur le rendement. *Revue « Nature & Technologie »*. B- Sciences Agronomiques et Biologiques, n° 12/ Janvier 2015, Pages 130à 141
15. **Andrade D.S., Colozzi-Filho A. et Giller K.E.** 2003. The Soil Microbial Community and Soil Tillage, p. 51-81, In A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC, Boca Raton
16. **Angar, H., Ben Haj Salah, H., & Ben-Hammouda, M.** 2010. Semis direct et semis conventionnel en Tunisie: Les résultats agronomiques de 10 ans de comparaison. In H. Bouzerzour, H. Irekti, & B. Vadon (Eds.), *Options Méditerranéennes: Série A, Séminaires Méditerranéens* (No. 96 pp. 53-59). *Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct in Zaragoza: CIHEAM/ATU-PAM/INRAA/ITGC/FERT*. <http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=801418>
17. **Anken T., Weisskopf P., Zihlmann U., Forrer H., Jansa J., Perhacova K.** 2004: Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. *Soil and Tillage Research*, 78: 171–183.
18. **Aon, M.A., Sarena, D.E., Burgos, J.L. et Cortassa, S.** 2001a. (Micro)biological, chemical and physical properties of soils subjected to conventional or no-till management: an assessment of their quality status. *Soil & Tillage Research* 60:173-186.

- 19. Arabi, M., & Roose, E.** 1989. Influence du système de production et du sol sur l'érosion et le ruissellement en nappe en milieu montagnard méditerranéen (station d'Ouezra, Algérie). Réseau d'Erosion (Bulletin No. 9). Montpellier, ORSTOM.
- 20. Aslam, T., Choudhary, M. A., & Saggarr, S.** 1999. Tillage impacts on soil microbial biomass C, N and P, earthworms and agronomy after two years of cropping following permanent pasture in New Zealand. *Soil and Tillage Research*, 51(1-2), 103-111. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00032-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00032-2)
- 21. Attard E., Le Roux X., Laurent F., Chabbi A., Nicolardot b., Recous S.** 2011 : "Impacts de changements d'occupation et de gestion des sols sur la dynamique des matières organiques, les communautés microbiennes et les flux de carbone et d'azote", *Etude et gestion des Sols*, 18, 3, 147-159.
- 22. Aubert, G.** 1978. Méthodes d'analyses des sols (p. 189). Edit C.R.D.P. Marseille.
- 23. Auge, R.M. 2001:** Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis—Mycorrhiza 11:3-42.

B

- 24. Babujia, L. C., Hungria, M., Franchini, J. C., & Brookes, P. C.** 2010. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(12), 2174-2181. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.08.013>
- 25. Bagy, H.M.M.K.; Hassan, E.A.; Nafady, N.A.; Dawood, M.F.A.** 2019. Efficacy of arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic strain *Epicoccum nigrum* ASU11 as biocontrol agents against blackleg disease of potato caused by bacterial strain *Pectobacterium carotovora* subsp. *atrosepticum* PHY7. *Biol. Control*, 134, 103–113
- 26. Bai C, He X, Tang H, Shan B, Zhao L.** 2009. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi, glomalin and soil enzymes under the canopy of *Astragalus adsurgens* Pall. in the Mu Us sandland, China. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 941–947
- 27. Baker JM, Ochsner TE, Venterea RT, Griffis TJ** 2007. Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? *Agric Ecosyst Environ* 118:1–5.
- 28. Bakhshandeh S Mariotte P Corneo P E ; Kertesz M A** 2017. **Effect of crop rotation on mycorrhizal colonization and wheat yield under different fertilizer treatments. *Agriculture Ecosystems & Environment* 247:130-136. DOI:10.1016/j.agee.2017.06.027**
- 29. Baldy CH** 1986 . Comportement des blés dans les climats méditerranéens. *Ecologia Méditerranéa* XII : 74 – 88.
- 30. Balesdent J.C. Chenu et Balabane M.** 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil & Tillage Research*, 53: 215-230.
- 31. Balestrini, R. and Lanfranco, L.** 2006. Fungal and plant gene expression in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 16, 509-524.
- 32. Balestrini, R., Lumini, E., Borriello, R., & Bianciotto, V.** 2015. Plant-soil biota interactions. In E. A. Paul (Ed.), *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (pp. 311-338). London: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-415955-6.00011-6>
- 33. Balota, E. L., Colozzi-Filho, A., Andrade, D. S. & Dick, R. P.** 2004. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian oxisol. *Soil Tillage Res.* 77, 137–145.
- 34. Balergue C, Puech-Pagès V, Bécard G, Rochange SF.** 2011. The regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves early and systemic signalling events. *Journal of experimental botany* 62: 1049–1060.
- 35. Barber, R.G.** 1995. Soil degradation in the tropical lowlands of Santa Cruz, eastern Bolivia. *In Land degradation and Rehabilitation*, 6: 95-107.
- 36. Barber, R.G. & Thomas, D.B.** 1981. Infiltration, surface runoff and soil loss from high intensity simulated rainfall in Kenya. FAO Research Contract No. RP/HQ 1977-3/AGL. Faculty of Agriculture, University of Nairobi, Kenya.
- 37. Batouches, S., & Labiod, H.** 1991. Les sols des hautes plaines sétifiennes, inventaire, analyse et synthèse des tudes pédologiques réalisées dans cette région de 1965 à 1985: Essais de thématization (p. 133). Mém. Ing. Univ. Sétif.

- 38. Baumgartner K., Smith R F.& L** 2005. BettigaWeed control and cover crop management affect mycorrhizal colonization of grapevine roots and arbuscular mycorrhizal fungal spore populations in a California vineyard. *Mycorrhiza* volume 15, pages111–119.
- 39. Beauregard M.S.** 2010.Impacts de la fertilisation phosphatée sur la biodiversité microbienne de sols agricoles. Ph.D en sciences biologiques. Faculté des études supérieures. Université de Montréal.
- 40. Bécard, G. and Y. Piché,** 1989. New aspects on the acquisition of biotrophic status by a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Gigaspora margarita*. *New Phytologist*, 112(1): p. 77-83.
- 41. Bellotti, B., & Rochecouste, J. F.** 2014. The Development of Conservation Agriculture in Australia Farmers as innovators. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(1), 1-34. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30011-3](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30011-3).
- 42. Ben Belkacem. A,** 1993: la recherche variétale sur les blés en Algérie ITGC KHROUB, Céréalicultures N ° 20 mais 1993.
- 43. Bencharif, A ; Madignier, A ; Chehat, F.** 2010. Les filières des blés dans les pays du Maghreb, Report de recherche. PAMLIM-CIHEAM-IAMM : Perspectives agricoles et agroalimentaires Maghrébines Libéralisation et Mondialisation, mars 2010.
- 44. Benhamou N, Picard K.** 1999, Induced resistance: a novel plant defense strategy against pathogens. *Phytoprotection* 80: 137–168.
- 45. 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.
- 46. Benouada H.,** 1994. Installer les céréales d'automne. Guide de développeur en aridoculture n°10. Service Recherche et Développement, INRA Settat. Dounia eds., Maroc. 2p.
- 47. Benyassine A.,** 1991. Caractéristiques des exploitations agricoles et adaptation du Système Ley-farming. In : Ley-farming, M.Amine ed., ACTES ed .pp : 9-28.
- 48. Bernardo, L.; Carletti, P.; Badeck, F.W.; Rizza, F.; Morcia, C.; Ghizzoni, R.; Roupael, Y.; Colla, G.; Terzi, V.;Lucini, L.** 2019. Metabolomic responses triggered by arbuscular mycorrhiza enhance tolerance to water stress in wheat cultivars. *Plant Physiol. Biochem.*, 137, 203–212. [
- 49. Berner A. , Hildermann I., Fließbach A., Pfiffner L., Niggli U., Ma"der P.** 2008. Crop yield and soil fertility response to reduced tillage under organic management / *Soil & Tillage Research* 101 (2008) 89–96
- 50. Berruti, A Bianciotto V et Lumini 2018 .** **Seasonal variation in winter wheat field soil arbuscular mycorrhizal fungus communities after non-mycorrhizal crop cultivation..** *Mycorrhiza* volume 28, pages535–548
- 51. Besserer A, Puech-Pagès V, Kiefer P, Gomez-Roldan V, Jauneau A, Roy S, Portais JC, Roux C, Bécard G, Séjalon-Delmas N.** 2006. Strigolactones stimulate arbuscular mycorrhizal fungi by activating mitochondria. *PLoS Biology* 4: 226.
- 52. Bever, J.D., Morton, J.B., Antonovics, J. & Schultz,P.A.** 1996. Host-dependent sporulation and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in a mown grassland. *Journal of Ecology*, 84, 71–82.
- 53. Biberdzic M, Barac S, Lalevic D, Djikic A, Prodanovic D, Rajicic V,** 2020. Influence of soil tillage system on soil compaction and winter wheat yield..*Chil.j.agric. res.* vol.80 no.1 Chillán mar. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392020000100080>
- 54. Blanco-Canqui H. et Lal R.** 2007. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. *Soil and Tillage Research* 95:240-254. ciety of Agronomy (ASA).
- 55. Blason, A. D., Fernandez, N. R., Barrios, M. B., Makar, D., Molla-Kralj, A., &Rodríguez, R. O.** 2014. Gradientes termicos del suelo superficial cultivado conmaíz en labranza convencional y en siembra directa. *Revista de la Facultad de Agronomía y Ciencias Agroalimentarias*, 9y10, 29e46.
- 56. Blaszkowski J.,** 2003. Arbuscularmycorrhizal fungi (Glomeromycota), Endogone , and Complexipes species deposited in the Department of Plant Pathology, University of Agriculture in Szczecin, Poland.<http://www.agro.ar.szczecin.pl/~jblaszkowski/>.
- 57. Bohrer, K. E., C. F. Friese and J. P. Amon.** 2004. Seasonal dynamics of arbuscular ycorrhizal fungi in differing wetland habitats. *Mycorr.* 14:329-337.
- 58. Boiffin,J. et Marin-Lafleche, A.,** 1990- La structure du sol et son évolution :conséquences agronomiques, maitrise par l'agriculture. Colloque de INRA N° 53,216p.

- 59. Bonfante, P, Genre, A,** 2010. Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature communications*, 1(4), 48
- 60. Bouazza Marouf .**2016. Les symbioses mycorrhiziennes et leurs importance dans le réhabilitation des sols dégradés. Thèse de doctorat. Spécialité, interaction plantes – microorganismes. Université d'Oran ; Algérie
- 61. Boulal H ; Zaghouane O ; El mourid M ; Rezguis.** 2007 -Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blé et orge) dans le maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie). Edition. ITGC, INRA, ICARDA, 176 p
- 62. Bouzerzour ,H. et Benmahammed,A.,** 2009- Variation in Early Growth, Canopy Temperature, Translocation and Yield of Four Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Genotypes under Semi Arid Conditions. *Jordan. Journal of Agricultural Sciences*, Volume 5, No.2.
- 63. Bouzerzour H. (ed.), Irekti H. (ed.), Vadon B.** 2011. (ed.). 4. Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct. Zaragoza : CIHEAM / ATU-PAM / INRAA / ITGC / FERT,. 251 p. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 96). 4. Actes des Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct, 2010/05/03-05, Sétif (Algérie).
- 64. Bremner, J.M. and Mulvaney, C.S.** 1982 Nitrogen-Total. In: *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*, Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. Eds., American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 595-624.
- 65. Brouillet L. Coursol F. Favreau M.** 2006. VASCAN. The database of Canadian vascular plants. *Herbier Marie-Victorin, Institut de recherche en biologie végétale, Université de Montréal.* <http://data.canadensys.net/vascan/about>.
- 66. Bruelle, G., Affholder, F., Abrell, T., Ripoche, A., Dusserre, J., Naudin, K., ... Scopel, E.** 2017. Can conservation agriculture improve crop water availability in an erratic tropical climate producing water stress? A simple model applied to upland rice in Madagascar. *Agricultural Water Management*, 192, 281-293. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.020>
- 67. Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., & Malajczuk, N.** 1996. Working with Mycorrhizas. *Forestry and Agriculture (Monograph 32, 374)*. ACIAR.
- 68. Brundrett M C, Piche Y and Peterson R L** 1985 A development study ´ of the early stages in vesicular-arbuscular mycorrhiza formation. *Can. J. Bot.* 63, 184–194.
- 69. Brundrett ,** 2008. mycorrhizal associations: the web resource mark.
- 70. Brunel. B., M. Bourgeois, E. Coquillart, M. Cournarie, C. Fassino.,** 2011. Les mycorrhizes. *Supagro.fr*
- 71. Bucher, M.** 2007. Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. *New Phytol*, 173, 11-26.
- 72. Buwalda JG, Stribley DP, Tinker PB** 1985. VA-mycorrhiza of winter and spring cereals. *J Agric Sci* 105: 649–657

C

- 73. Cade-Menun BJ, Berch SM, Bomke AA** 1991. Seasonal colonization of winter wheat in south coastal British Columbia by VAM fungi. *Can J Bot* 69: 78–86
- 74. Candelon, P.,** 1993- Les machines agricoles, Vol II. Edi. Tec & Doc ,320P.
- 75. Carama K.M., Payne W.A. et Rasmussen P.E.** 2003. Long-term effects of tillage, nitrogen and rainfall on winter wheat yields in the Pacific Northwest. *European Journal of Agronomy*, 95: 828-835.
- 76. Cardoso, I. M., Boddington, C., Jansen, B. H., Oenemaet, O., & Kuyper, T. W.** 2003. Distribution of Mycorrhizal fungal spores in soils under agroforestry and monocultural coffee systems in Brazil. *Agroforestry Systems*, 58, 33-43. <https://doi.org/10.1023/A:1025479017393>.
- 77. Carr P., Horstley R.D. et Poland W.W.,** 2003. Tillage and seeding effects on wheat cultivars: 1. Grain production. Dans : *Crop Sci.*, 43, pp. 202-209.
- 78. Carter M.R. et Renne D.A.** 1987. Effects of tillage on déposition and utilization of 15 N residual fertilizer. *Soil and tillage research*(9), 33-43.
- 79. 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012005000012>
- 80. Castillon. P** 2011 : Analyse de sol en non labour permanent Prélever à la bonne profondeur. *AGRICOLES - N°383 - NOVEMBRE*

- 81. Cavagnaro, T.R., Jackson, L.E., Six, J., Ferris, H., Goyal, S., Asami, D., Scow, K.M.** 2006: Arbuscular mycorrhizas, microbial communities, nutrient availability, and soil aggregates in organic tomato production. – *Plant and Soil* 282:209-225.
- 82. Cedra C.**, 1993. Les matériels de travail du sol, semis et plantation, Ed Tec, Doc. Volume III: pp: 384.
- 83. Chapman, P. J., Williams, B. L., & Hawkins, A.** 2001. Influence of temperature and vegetation cover on soluble inorganic and organic nitrogen in a Spodosol. *Soil Biology & Biochemistry*, 33, 1113-1121. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00017-7)
- 84. Chassot, A.** 2000. Early growth of roots and shoots of maize as affected by tillage-induced changes in soil physical properties (p. 89, PhD Thesis, ETH Zürich). <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004132762>
- 85. Chennafi H. Bouzerzour H. Saci A., Chenafi A.** 2008a. La pratique des façons culturales sur la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en environnement semi-aride. In: Proceedings of the 5th International Conference on Land Degradation. Valenzanos, Bari, Italy, 18-22 September 2008, p: 63-67.
- 86. Chennafi, H.** 2010a- L'optimisation du rendement de la culture du blé sous l'effet du précédent cultural et l'outil de labour en environnement semi-aride. Actes des quatrième rencontres méditerranéennes du semis direct. *Revue INRAA N). Spécial.*
- 87. Christopher R. Boomsma, Tony J. Vyn** :2008. Maize drought tolerance: Potential improvements through arbuscularmycorrhizal symbiosis? *Field Crops Research* 108 (2008) 14–31
- 88. Clement-Grandcourt M. et Prats J.**, 1971. Les céréales Collections d'enseignement agricole 2eme Ed, Ballier France. 351p.
- 89. Corrêa, A., Hampp, R., Magel, E., Martins-Loução, M.** 2011: Carbon allocation in ectomycorrhizal plants at limited and optimal N supply: an attempt at unraveling conflicting theories. – *Mycorrhiza* 21(1):35-51.
- 90. Curaqueo, G., Acevedo, E., Cornejo, P., Seguel, A., Rubio, R., & Borie, F.** 2010. Tillage Effect on Soil Organic Matter, Mycorrhizal Hyphae and Aggregates in a Mediterranean Agroecosystem. *R.C. Suelo Nutr. Veg.*, 10(1), 12-21. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912010000100002>

D

- 91. Dai, M. Hamel C ; Bainard L D., St. Arnaud M; Grant C A.; Lupwayi N. Z., Malhi S. S., Lemke. R.** 2014. Negative and positive contributions of arbuscular mycorrhizal fungal taxa to wheat production and nutrient uptake efficiency in organic and conventional systems in the Canadian prairie. *Soil. Biol. Biochem.* **74**, 156–166. DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.03.016](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.016)
- 92. Daei, G.; Ardekani, M.; Rejali, F.; Teimuri, S.; Miransari, M.** 2009, Alleviation of salinity stress on wheat yield components, and nutrient uptake using arbuscular mycorrhizal fungi underfield conditions. *J. Plant Physiol.* **166**, 217–225.
- 93. Dalpe, Y.** 1993. Vesicular-arbuscular mycorrhiza. In M. R. Carter (Ed.), *Soil sampling and methods of analysis* (pp. 287-301). Canadian Society for Soil Science, Lewis, Boca Raton, Fla.
- 94. Dalpé Y.** 2005. Mycorrhizae: a potential tool for plant protection but not a panacea. *Phytoprotection* **86**: 53-59.
- 95. 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.
- 96. Das P. et Kayang H.** 2010. Association of dark septate endophytes and arbuscular mycorrhizal fungi in potato under field conditions in the northeast region of India. *Mycological Society of China*. DOI: 10.1080/21501203.2010.517787. <http://www.informaworld.com>
- 97. Davet. P.**, 1995. Vie microbienne dans le sol et production végétale collection mieux comprendre, I.N.R.A., Paris. 383 p.
- 98. Declerck S, Strullu D, Plenchette C.** 1998. Monoxenic culture of the intraradical forms of the *Glomus* sp. isolated from a tropical ecosystem: a proposed methodology for germplasm collection. *Mycologia* **90**: 579–585.
- 99. Derkaoui I.** 2015. Etude des champignons endophytes halotolérants et producteurs de métabolites secondaires
- 100. Derpsch R. Friedrich T. Kassam A. and Hongwen L.** 2010 .Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits,” *International Journal of Agriculture and Biological Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 1–26.

- 101. Devineau. C.** 2015. Etude de la mycorhization du blé sur trois niveaux de diversité génétique : culture simple, mélange variétal et association blé/légumineuse. Rapport de stage a INRA France. 6 P.
- 102. Diallo, A. T., Samba, P. I., & Ducouso, M.** 1999. Arbuscular mycorrhizal fungi in the semi-arid areas of Senegal. *European Journal of Soil Biology*, 35(2), 65-75. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(99\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(99)00110-7)
- 103. Dimitrios D ; Johannes M. S. S ; Egbert A. L; Pablo A. T** 2015: Influence of reduced tillage and fertilization regime on crop performance and nitrogen utilization of organic potato. *Organic Agriculture* 6(2) April 2015. DOI:10.1007/s13165-015-0110-x
- 104. Dinel H. and E. Gregorich,** 1995 - Structural stability status as affected by longterm continuous maize and Bluegrass sod treatments. *Biological Agriculture and Horticulture*. 2:237-252.
- 105. Dodd JC, Jeffries P** 1986. Early development of VAM in autumn-sown cereals. *Soil Biol Biochem* 18: 149–154
- 106. Douds, D.D. & Millner, P.** 1999. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74, 77–93.
- 107. Douds.** 2004. Utilités des mycorhizes. *Centre de recherche régionale de l'Est* (USDA-AES). 5p
- 108. Drijber, R.A., Doran, J.W., Parkhurst, A.M. & Lyon, D.J.** 2000. Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 1419–1430.
- 109. Dubois G.** 2007 :Protéagineux dans l'assolement. Un effet précédent qui ne se limite pas au gain de rendement. *Perspectives Agricoles* • N° 336 • Juillet-Août 2007
- 110. Duhoux E. et Nicole M.,** 2004. *Biologie végétale : association et interactions chez les plantes* Ed. D.U.N.O.D. Paris. 166p.
- 111. Duponnois, R., Founoune, H., Masse, D. et Pontanier, R.** 2005 Inoculation of *Acacia holosericea* with ectomycorrhizal fungi in a semi-arid site in Senegal: growth response and influences on the mycorrhizal soil infectivity after 2 years plantation. *Forest Ecology and Management*, 207: 351-362.
- 112. Duponnois, R., Hafidi, M., Wahbi, S., Sanon, A., Galiana, A., Baudoin, E., Bally, R.** 2013. La symbiose mycorhizienne et la fertilité des sols dans les zones arides: un outil biologique sous-exploité dans la gestion des terres de la zone sahélo-saharienne. In A. Dia & D. Robin (Eds.), *La Grande Muraille Verte: Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux* (pp. 351-369). Marseille: IRD.

E

- 113. 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 pour obtenir le grade de Docteur en Science de la vie, Spécialité Biologie végétale ; Université de Bourgogne 199p.
- 114. Eliard JL.,** 1979. *Manuel d'agriculture générale. Bases de la production végétale.* Ed. J.B. Baillière. 344 p.
- 115. Evelin, H.; Giri, B.; Kapoor, R.** 2012 Contribution of *Glomus intraradices* inoculation to nutrient acquisition and mitigation of ionic imbalance in NaCl-stressed, *Trigonella foenum-graecum*. *Mycorrhiza*, 22, 203–217.

F

- 116. FAO.** 2001a. Conservation agriculture - Case studies in Latin America and Africa. *In FAO Soils Bulletin No. 78.* FAO, Rome. ISBN 92-5-104625-5. 69 pp.
- 117. FAO** 2020. Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales
- 118. Faucher, Y. et Perreault, Y.** 2013. Impact des mycorhizes sur la productivité du soya. Présentation à la Journée d'information régionale Grandes cultures, St-Hyacinthe 3 décembre 2013
- 119. Feng Y, Motta AC, Reeves DW, et al.,** 2003. Soil microbial communities under conventional-till and no-till continuous cotton systems. *Soil Biol Biochem* 35:1693– 1703.
- 120. 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.

- 121. Fernandez FG, White C** 2012. No-Till and Strip-Till Corn Production with Broadcast and Subsurface-Band Phosphorus and Potassium. *Agron J* 104:996–1005.
- 122. Fester, T., D. Strack, and B. Hause,** 2001. Reorganization of tobacco root plastids during arbuscule development. *Planta* . 213(6): p. 864-8.
- 123. Feuillet P ;** 2000-le grain de blé : composition et utilisat : Edition INRA, Pass, 308 P.
- 124. Fiorilli, V.; Vannini, C.; Ortolani, F.; Garcia-Seco, D.; Chiapello, M.; Novero, M.; Domingo, G.; Terzi, V.; Morcia, C.; Bagnaresi, P.; et al.,** 2018. Omics approaches revealed how arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances yield and resistance to leaf pathogen in wheat. *Sci. Rep.*, 8, 9625.
- 125. Fontaine, S., Mariotti, A., & Abbadie, L.** 2003. The priming effect of organic matter: A question of Microbial competition? *Soil Biology and Biochemistry*, 35(6), 837-843. [http://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00123-8](http://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00123-8).
- 126. Fortas B , Mekhlouf A , Hamsi K , Boudiar R , Laouar .A.M ; Djaidjaa Z .** 2013. Impacts des techniques culturales sur le comportement physique du sol et la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous les conditions semi-aride de la région de Sétif/ *Revue Agriculture*. 06. 12 – 20 .
- 127. Fortin J. André** 2015. , *Les mycorhizes : l'essor de la nouvelle révolution verte*, MultiMondes,
- 128. Fortin JA, Plenchette C, Piché Y.** 2013. *Les mycorhizes- la nouvelle révolution verte*. Québec: Quae et multimondes 148 p.
- 129. Freitas, P. L., & Landers, J. N.** 2013. The transformation of agriculture in Brazil through development and adoption of Zero Tillage Conservation Agriculture. *International Soil and Water Conservation Research*,2(1), 35-46. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30012-5](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30012-5)
- 130. Frey S.D., Elliott E.T. et Paustian K.** 1999. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology and Biochemistry* 31:573-585.
- 131. Frostegård, Å., Tunlid, A., & Bååth, E.** 2011. Use and misuse of PLFA measurements in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 43, 1621–1625.

G

- 132. Gajda A.M., Czyż E.A., Stanek-Tarkowska J., Dexter A.R., Furtak K.M., and Grządziel J.,** 2017. Effect of long-term tillage practices on the quality of soil under winter wheat. *Plant Soil Environment*, 63, 236-242
- 133. Gál A., Vyn T.J., Michéli E., Kladvik E.J. et McFee W.W.** 2007. Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths. *Soil and Tillage Research* 96:42-51.
- 134. Galvez L., Douds Jr D. and Wagoner P.** 2001. Tillage and Farming System Affect AM Fungus Populations, Mycorrhizal Formation, and Nutrient Uptake by Winter Wheat in a High-P Soil. *American Journal of Alternative Agriculture*, vol. 16, no. 4, pp. 152–160. JSTOR, www.jstor.org/stable/44509990
- 135. Ganugi P , Masoni A, Pietramellara G and Benedettelli S.** 2019: A Review of Studies from the Last Twenty Years on Plant–Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associations and Their Uses for Wheat Crops. *Agronomy* 2019, 9, 840; doi:10.3390/agronomy9120840
- 136. Garane A. Koussao S, Traoré M . and Sawadogo M,** 2017. Effets du travail du sol sur le comportement chimique et biologique du sol et les conséquences sur le rendement d'un blé tendre dans la région « non chernozem », Russie. *J.Appl. Biosci* . 115: 11454-11464
- 137. Garbaye J.,** 2013. *La symbiose mycorrhizienne, une association entre les plantes et les champignons*. Ed. Quae, Versailles, 251 p.
- 138. Gate P.,** 1995. *Ecophysiologie du blé*. Ed. Lavoisier, Paris. 429 p
- 139. Gate Ph. Et Giban M.,** 2003. *Stades du blé*. Edition ITCF, Paris. 68 p
- 140. Gaude N, Bortfeld S, Duensing N, Lohse M, Krajinski K.** 2012. Arbuscule-containing and non-colonized cortical cells of mycorrhizal roots undergo extensive and specific reprogramming during arbuscular mycorrhizal development. *Plant Journal* 69: 510–528.
- 141. Gavériaux J.P.,** 2012. *Les Glomeromycota – Mycorhizes VAM et Geosophon pyriformis (Kützing) Wettstein*, Bull. Soc. Mycol. Nord Fr., n°92, pp. 1-17

- 142. Genre, A. and P. Bonfante, 1998.** Actin versus tubulin configuration in arbuscule-containing cells from mycorrhizal tobacco roots. *New Phytologist*, 140(4): p. 745-752.
- 143. Genre A, Chabaud M, Timmers T, Bonfante P, Barker DG.** 2005. Arbuscular mycorrhizal fungi elicit a novel intracellular apparatus in medicago truncatula root epidermal cells before infection. *The Plant Cell* 17: 3489–3499.
- 144. Genre A, Bonfante P, Vegetale B, Torino U, Mattioli IV.** 2007. Check-In Procedures for Plant Cell Entry by Biotrophic Microbes. *Molecular Plant-Microbe Interactions Journal* 20: 1023–1030.
- 145. Gerdeman, J. W., & Nicolson, T. H.** 1963. Spore of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans. Brit. Mycol. Soc.*, 46, 235-244. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0).
- 146. Gerdemann, J. W., & Trappe, J. M.** 1974. The Endogonaceae in the Pacific Northwest. *Myc. Memoir.*, 5, 1-76.
- 147. Ghorji, N.H.; Ghorji, T.; Hayat, M.Q.; Imadi, S.R.; Gul, A.; Altay, V.; Ozturk, M.** 2019. Heavy metal stress and responses in plants. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 16, 1807–1828.
- 148. Gianinazzi, S.; Golotte, A.; Binet, M.N.; van Tuinen, D.; Redecker, D.; Wipf, D.** 2010. Agroecology: The key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20, 519–530.
- 149. Girard, M.C.; Walter, C.; Rémy J.C. ; Berthelin J. et Morel, J.L.,** 2005- *Sols et Environnement*, Eds., Dunod, Paris, 816 p.
- 150. Gomathy, M.; Sabarinathan, K.G.; Thangaraju, M.; Subramanian, K.S.; Sivashankari Devi, T.; Ananthi, K.** 2011. The effect of mycorrhizae inoculated maize root exudates in alleviation of chromium toxicity in chromium polluted environments. *Insight Microbiol.*, 1, 20–30. [
- 151. Gonzalez-Guerrero, LH Melville, N Ferrol, JNA Lott, C Azcon-Aguilar,** 2008. Ultrastructural localization of heavy metals in the extraradical mycelium and spores of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*; *Canadian Journal of Microbiology* 54 (2), 103-110.
- 152. Gosling P., Hodge A., Goodlass G. & Bending G.D.** 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture. Ecosystems and Environment*, 113, 17–35.
- 153. Guignard J.L. et Dupont F.,** 2004 - *Botanique systématique moléculaire*. 13ème édition révisée.
- 154. Guo BZ, Hendrix JW, An Z-Q, Ferris RS,** 1992. Role of *Acremonium* endophyte of fescue on inhibition of colonization and reproduction of mycorrhizal fungi. *Mycologia* 84: 882e885.
- 155. Grant, C.A., Flaten, D.N., Tomasiewicz, D.J. & Sheppard, S.C.** 2001. The importance of early season phosphorus nutrition. *Canadian Journal of Plant Science*, 81, 211–224.
- 156. Grignac P.H.,** 1965-Contribution d l'étude de *Triticum durum*(Desf) Thèse d'état en agronomie.Toulouse, 152 p.
- 157. Grignac.R ,1986 :** contrainte de l'environnement et l'élaboration du rendement dans la zone méditerranéenne France. In l'élaboration du rendement des cultures céréalière, colloque Franco-Romain généralement, 17-18 mars 178-207.

H

- 158. Hamadache, A.** 2001- Les alternatives possibles à la jachère en relation avec le milieu physique et socio-économique. In: *Proceedings du séminaire national sur la problématique de l'agriculture des zones arides et de la reconversion*. Direction des services agricoles.
- 159. Hamadache A., Abdellaoui Z., Akrine M.,** 2002. Facteurs agro-technique d'amélioration de la productivité du blé dur en Algérie. Cas de la zone sub-humide. *Revue Recherche Agronomique – INRA Algérie*, np10 : 5-18.
- 160. Hamrick JL, Godt MJW,** 1997. Allozyme diversity in cultivated crops, *Crop Science*, 37, 26 - 30.
- 161. Haro H. , Semde K, Bahadio K et Sanon K B.**2020. Effet de l'inoculation mycorrhizienne avec des souches des champignons mycorrhiziens arbusculaires sur la croissance de *Mucuna pruriens* (L.) DC en condition contrôlée. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 14(3): 1065-1073, April 2020 ISSN 1997-342X (Online), ISSN 1991-8631 (Print). Available online at <http://www.ifgdg.orgK>.
- 162. Harrison. MJ, Dewbre. GR, Liu J.,** 2002. A phosphate transporter from *Medicago truncatula* involved in the acquisition of phosphate released by arbuscular mycorrhizal fungi. *The Plant Cell* 14: 2413-2429.

- 163. Hart, M.M., Reader, R.J. & Klironomos, J.N.** 2003. Plant coexistence mediated by arbuscular mycorrhizal fungi. *Trends in Ecology & Evolution*, 18: 418-423.
- 164. He, X., Mouratov, S., Steinberger, Y.,** 2002. Temporal and spatial dynamics of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi under the canopy of *Zygophyllum dumosum* Boiss. in the Negev Desert. *Journal of Arid Environment* 52, 379–387.
- 165. Heggo A et Angle J. S.** 1990. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal uptake by soybeans. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 22, No. 6, pp. 865-869. 0038-0717/90 \$3.00 + 0.00 Printed in Great Britain. All rights reserved.
- 166. He C., Cuia J., Chena X., Wanga W., Hou J.** 2020. Effects of enhancement of liquor rice plants with dark septate endophytes on the root growth, glycyrrhizic acid and glycyrrhizin accumulation amended with organic residues. *Current Plant Biology* 23 100154.
- 167. Heddadj, D .** 2005 - Techniques de travail du sol en agrobiologie (C4). Inter Bio Bretagne, ITAB, Université Rennes 1, ISARA Lyon, CDA 56.
- 168. Henry Y., J. Buysier.** 2000. L'origine du blé. *Pour la Science* 26 :60-62.
- 169. Hemissi I. Labidi S, Dhifalli F, HAMMAMI R, HACHANA A, Hlel D, Bouaziz S , and F Ben jeddi** 2019. Effet de la bio inoculation mycorrhizienne et rhizobiale sur les composantes de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Annales de l'INRA*, Volume 92, ISSN : 0365-4761
- 170. Hetrick BA, Bockus WW, Bloom J** 1984. The role of VAM fungi in the growth of Kansas winter wheat. *Can J Bot* 62:735–740
- 171. Hetrick B A, Wilson G W T and Cox T S,** 1993. Mycorrhizal dependence of modern wheat cultivars and ancestors: a synthesis. *Canadian Journal of Botany* • March 1993 • <https://doi.org/10.1139/b93-056>
- 172. Hibbett. D.S, Binder.M, Bischoff. J.,** 2007. A higher-level phylogenetic classification of the fungi. *Mycol. Res.*, 111 : 509-547.
- 173. Hildebrandt, U., Kaldorf, M. & Bothe, H.** 1999. The zinc violet and its colonization by arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Plant Physiology*, 154, 709–717.
- 174. Hkaur Kehri , Ovaïd Akhtar , Ifra Zoomi , Dheeraj Pandey** 2018. Arbuscular Mycorrhizal Fungi: Taxonomy and its Systematics. *International Journal of Life Sciences Research* ISSN 2348-3148 (online) Vol. 6, Issue 4, pp: (58-71), Month: October - December 2018, Available at: www.researchpublish.com.
- 175. Hulugalle, N.R., Entwistle, P.C., Cooper, J.L., Scott, F., Nehl, D.B., Allen, S.J. & Finlay, L.A.** 1999. Sowing wheat or field pea as rotation crops after irrigated cotton in a grey Vertosol. *Australian Journal of Soil Research*, 37, 867–889.

I

- 176. Ibrahim, A.H.; Abdel-Fattah, G.M.; Eman, F.M.; Abd El_Aziz, M.H.; Shohr, A.E.** 2011. Arbuscular mycorrhizal fungi and spermine alleviate the adverse effects of salinity stress on electrolyte leakage and productivity of wheat plants. *New Phytol.*, 51, 261–276.
- 177. ITGC.** 2001. La culture intensive du blé, 2e éd. actualisée. Alger: Éditions ITGC, 45 p.
- 178. INPV,** 2013. Reconnaissance et identification des principales maladies cryptogamiques du blé et de l'orge. p18.

J

- 179. Jabaji-Hare S, Deschene A, Kendrick B.** 1984. Lipid content and composition of vesicles of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus. *Mycologia* 76: 1024–1030.
- 180. Jakobsen I, Nielson NE** 1983. VA mycorrhiza in field-grown crops. 1. Mycorrhizal infection in cereals and peas at various times and soil depths. *New Phytol* 93 :401–413
- 181. Janos, D.P.** 2007. Plant responsiveness to mycorrhizas differs from dependence upon mycorrhizas. – *Mycorrhiza* 17:75-91.
- 182. Jansa, J., Mozafar, A., Anken, T., Ruh, R., Sanders, I. R., & Frossard, E.** 2002. Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. *Mycorrhiza*, 12, 225-234. <https://doi.org/10.1007/s00572-002-0163-z>
- 183. 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.

184. Jansa J Wiemken A & Frossard E 2006. The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fungi. Geological Society, London, Special Publications, 266, 89-115, 1 January 2006, <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.266.01.08>.

185. 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*, 118, 471-476. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1991.tb00029.x>

186. Johnson, N. C., Zak, D. R., Tilman, D., & Pflieger, F. L. 1991. Dynamics of vesicular-arbuscular mycorrhiza during old field succession. *Oecologia*, 86, 349-358. <https://doi.org/10.1007/BF00317600>

187. Johansson, J. F., & Paul, L. R. 2004. Finlay RD Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiology Ecology*, 48, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.11.012>

188. Jouve P., Berrada A., 1993. Résultats d'expérimentation en arido-culture. In. Adaptation des systèmes de production à l'Aridité au Maroc et au Sahel. Volume II : Publications et travaux. Thèse de Doctorat, P. Jouve, Université Paul Valéry, Montpellier III. Pp : 20-85.

189. Jouy, L., 2001-Techniques sans labour : Evolution de la flore adventice. *Pers. Agri.* 271 : 58-61.

190. Julca-Otiniano A, L. Meneses-Florian, R. Blas-Sevillano, S. Bello-Amez ; 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura *Idesia*, 24 (1), pp. 49-61, 10.4067/S0718-34292006000100009

191. Jumpponen A., Trappe JM. 1998. Dark septate endophytes: a review of facultative biotrophic root-colonizing fungi. *New Phytol.* 140, 295–310.

192. Jung, S.C.; Martínez-Medina, A.; Lopez-Raez, J.A.; Pozo, M.J. 2012. Mycorrhiza-induced resistance and priming of plant defenses. *J. Chem. Ecol.*,

K

193. Kabir, Z. 2005. Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae. *Can. J. Plant Sci.*, 85, 23-29. <https://doi.org/10.4141/P03-160>

194. Kapoor R et Bhatnagar A. K. 2007 Attenuation of cadmium toxicity in mycorrhizal celery (*Apium graveolens* L.). *World Journal of Microbiology and Biotechnology* volume 23, Article number: 1083

195. Karkour, L. 2012. La dynamique des mauvaises herbes sous l'effet des pratiques culturales dans la zone des plaines intérieures. Mémoire d'obtention du diplôme de Magister Option, Production Végétale et Agriculture de Conservation, Université Ferhat Abbas Sétif Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.

196. Karlen DL, Whitney DA. 1980. Dry matter accumulation, mineral concentrations and nutrient distribution in winter wheat. *Agron J* 72:281–288

197. Kaci, M., Habi, M., & Morsli, B. 2017. Application of universal soil loss equation (USLE) model to estimate water erosion by GIS system and remote sensing: catchment area of oued Rhiou (Watershed of Cheliff), Algeria. *Geo-Eco-Trop.*, 41(3), 503-518.

198. Keenen, M. L., Mack, A., & Rudgers, A. 2007. Balancing multiple mutualists: Asymmetric interactions among plants, arbuscular mycorrhizal fungi, and fungal endophytes (p. 11). Publication Dept. of Biology, Indiana Univ, Bloomington, IN, USA. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0030-1299.15973.x>

199. Khaldoun 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.

200. Khodadadi M, Fotokian MH, Miransari M, 2011. Genetic diversity of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes based on cluster and principal component analyses for breeding strategies". *Australian Journal of Crop Science*, 5, 17 - 24.

201. Kirouani A, Henkrar F, Udupa SM, Boukhalfoun L, Bouzerzour H, 2018. Genetic diversity in Algerian durum wheat varieties (*Triticum turgidum* L var.durum) using microsatellite markers, *Bioscience journal*, 34(6), 1575-1583.

- 202. Kirouani ABR , Ould Kiar R , Boukhalfoun L, et Fellahi Z E A.** 2019. Caractérisation de quelques variétés Algériennes de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) par le biais des marqueurs phénotypiques. *Journal of Applied Biosciences* 142: 14464 - 14477
- 203. Koide R T. and Mosse B** 2004. A history of research on arbuscular mycorrhiza. *Mycorrhiza* volume 14, pages145–163 (2004)
- 204.Köller K.,** 2003: Techniques of Soil Tillage, In A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*.CRC Press LLC, Boca Raton, p. 1-25.
- 205.Koske RE.** 1981. *Gigaspora gigantea*: observations on spore germination of a VA-mycorrhizal fungus. *Mycologia* 73: 288–300.
- 206. Kouadria .M.** 2019 : Désherbage des sols céréaliers cultivés en semis direct (région des hauts plateaux Algériens) par utilisation de l'extrait aqueux des feuilles d'*Eucalyptus globulus* . *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*. http://dx.doi.org/remav_kouadria_7-1
- 207. Kulkarni, S.; Goswami, A.** 2019. Effect of Excess Fertilizers and Nutrients: A Review on Impact on Plants and Human Population. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Computing in Science, Technology and Management (SUSCOM)*, Jaipur, India, 26–28.
- 208. Kumar, A.,** 1992. Occurrence of VAM among certain plants important in agroforestry under semi arid condition. *Agroforestry Newsletter*4, 7–8.
- 209. Kumar S, Sharma AK, Rawat SS, Jain DK, Ghosh S.** 2013. Use of pesticides in agriculture and livestock animals and its impact on environment of India. *Asian J. Environ. Sci* 8: 51–57.

L

- 210. Labidi S, Ben Jeddi F, TisserantB, Debiane D, Rezgui S, Grandmougin-Ferjani A et Lounès-Hadj Sahraoui A** 2012 . Role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in root mineral uptake under CaCO₃ stress. *Mycorrhiza* 22:337-345;DOI 10.1007/s00572-011-0405-z
- 211. Labrada R.** 2005 . Gestion des mauvaises herbes pour les pays en développement. Etude FAO production végétale et protection des plantes 120 add.1. Organisation Des Nations Unis Pour L'alimentation Et L'agriculture Rome
- 212. Labreuche, J.; Le Souder, C.; Castillon, P.; Ouvry, J.F.; Real B.; Germon, J.C. et De Tourdonnet, S.** 2007- Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour en France. ADEME-ARVALIS . Institut du végétal-INRA-APCA-AREAS-ITB-CETIOMIFVV. 400 p.
- 213. Lahmar, M.,**1989- L'influence de quelque précédent sur l'évolution de l'humidité d'un type du sol d'une région semis aride (Batna).mémoire d'ingénieur .INSA . Batna.74p.
- 214. Lahmar R., Batouche S., Labiad H. et Meslem M.** 1993. Les sols et leur répartition dans les Hautes Plaines Sétifiennes. *Eaux et sols d'Algérie*, 6: 60-70.
- 215. Lahmar, R., & Ruellan, A.** 2007. Dégénération des sols et stratégies coopérative en Méditerranée. La pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable (Vol. 16, pp. 318-323). Dans: *Cahiers Agricultures*.
- 216. Lahmar R. et Bouzerzour H.** 2010. Du mulch terreux au mulch organique. Revisiter le dry-farming pour assurer une transition vers l'agriculture durable dans les Hautes Plaines Sétifiennes. « Actes des quatrièmes rencontres méditerranéennes du semi direct ».Recherches agronomiques, N0° Spécial, INRAA p 48-58.
- 217. Lal, R.** 1994. Sustainable land use systems and soil resilience. *In Soil resilience and sustainable land use*. CAB International, Wellingfor, UK. ISBN 0-85198-871-7. p.54.
- 218. Lal R Jarecki M K.** 2003. Crop Management for Soil Carbon Sequestration Critical Reviews in Plant Sciences, 22(5):471–502 Copyright C 2003 Taylor and Francis Inc. ISSN: 1040-8371 DOI: 10.1080/07352680390253179
- 219. Lal, R., Reicosky, D.C., et J.D. Hanson.** 2007. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research* 93:1-12.
- 220. Lampurlanés J. et Cantero-Martínez C.** 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agronomy Journal*, 95,526-536.
- 221. Latef, A.A.H.A.; Miransari, M.** The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Alleviation of Salt Stress. In *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses*; Springer: New York, NY, USA, 2014; Volume 2, pp. 23–38.

- 222. Lee YJ, George E.** 2005. Contribution of mycorrhizal hyphae to the uptake of metal cations by cucumber plants at two levels of phosphorus supply. *Plant and Soil*, 278 (1–2), 361–370. doi:10.1007/s11104-005-0373-1.
- 223. Lehnert, H., Serfling, A., Enders, M., Friedt, W., and Ordon, F.** 2017. Genetics of mycorrhizal symbiosis in winter wheat (*Triticum aestivum*). *New Phytologist* 215, 779–791. doi: 10.1111/nph.14595
- 224. Lenoir I, Fontaine J, Lounès Hadj Sahraoui A.** 2016. Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: A review. January 2016 *Phytochemistry* 123. DOI: 10.1016/j.phytochem.2016.01.002
- 225. Le Tacon. F,** INRA Nancy- La Recherche n° 166 mai 1985
- 226. Levy, AA. & Feldman, M.,** 2002. The Impact of Polyploidy on Grass Genome Evolution. *Plant physiol.*, 130: 1587-1593.
- 227. Leyval, C., Joner, E.J., del Val, C., and Haselwandter, K.** 2002. Potential of arbuscular mycorrhizal fungi for bioremediation. In *Mycorrhizal technology in agriculture — from genes to bioproducts*. Edited by S. Gianinazzi, H. Schuëpp, K. Haselwandter, and J.M. Barea. Birkhäuser Verlag AG, Heidelberg, Germany. pp. 175–186.
- 228. Li HY.** 2005. Roles of mycorrhizal symbiosis in growth and phosphorus nutrition of wheat in a highly calcareous soil. Adelaide, Australia: University of Adelaide. PhD Thesis.
- 229. Li, H., Smith, S.E., Holloway, R.E., Zhu, Y., Smith F.A.** 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to phosphorus uptake by wheat grown in a phosphorus-fixing soil even in the absence of positive growth responses. *New Phytologist* 172, 536-543.
- 230. Li. H.** 2016. Long-term impact of tillage on biogeochemical phosphorus cycle : analysis of the test of L'Acadie (Quebec, Canada) and modelling. *Geochemistry*. Université de Bordeaux, English. ffNNT : 2016BORD0223ff. fftel-01480670f
- 231. Lienhard, P., Terrat, S., Prévost-Bouré, N. C., & Nowak, V.** 2014. Régner T, Sayphoummie S et Ranjard L Pyrosequencing evidences the impact of cropping on soil bacterial and fungal diversity in Laos tropical grassland. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 525-533. <http://doi.org/10.1007/s13593-013-0162-9>
- 232. Linn DM, Doran JW** 1984. Aerobic and anaerobic microbial populations in no-till and plowed soils. *Soil Sci Soc Am J* 48:794–799.
- 233. Liu. X, Parsons A J. Xue. H . Fraser. K, Ryan. G D, Newman J. A.et. Rasmussen .S.** 2011. Competition between foliar *Neotyphodium lolii* endophytes and mycorrhizal *Glomus* spp. fungi in *Lolium perenne* depends on resource supply and host carbohydrate content. *Functional Ecology*. 25, 910–920. doi: 10.1111/j.1365-2435.2011.018.
- 234. Liu X., Herbert S.J, Hashemi A.M., Zhang X., Ding G** 2006. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation – a review. *Plant Soil Environ.*, 52, (12): 531–543
- 235. Lugo MA. Menyo E. Allione L.R. Negretto. M.A. et al.,** 2018. Arbuscular mycorrhizas and arbuscular septate endophytes associated with grasses from the Argentine Puna. August. *Mycologia* 110(4):1-12. OI:10.1080/00275514.2018.1492846
- 236. Lucini, L.; Colla, G.; Miras Moreno, M.B.; Bernardo, L.; Cardarelli, M.; Terzi, V.; Bonini, P.; Rouphael, Y.** 2019. Inoculation of *Rhizoglyphus irregularis* or *Trichoderma atroviride* differentially modulates metabolite profiling of wheat root exudates. *Phytochemistry*, 157, 158–167.

M

- 240. Mac Key, J,** 2005. Wheat: Its concept, evolution, and taxonomy. In : Conxita.
- 241. MADR.** 2020: Statistiques agricoles. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
- 242. Maillet F, Poinot V, André O, Puech-Pagès V, Haouy A, Gueunier M, Cromer L, Giraudet D, Formey D, Niebel A, Martinez EA, Driguez H, Bécard G, Dénarié J.** 2011. Fungal lipochitooligosaccharide symbiotic signals in arbuscular mycorrhiza. *Nature* 469: 58–63.
- 243. Mandyam, K., & Jumpponen, A.** 2008. Seasonal and temporal dynamics of arbuscular mycorrhizal and dark septate endophytic fungi in a tall grass prairie ecosystem are minimally affected by nitrogen enrichment. *Mycorrhiza*, 18, 145-155. <http://doi.org/10.1007/s00572-008-0165-6>.
- 244. Mardukhi, B.; Rejali, F.; Daei, G.; Ardakani, M.R.; Malakouti, M.J.; Miransari, M.** 2011. Arbuscular mycorrhizas enhance nutrient uptake in different wheat genotypes at high salinity levels under field and greenhouse conditions. *C. R. Biol.*, 334, 564–571.

- 245. Martin P.**, 2008. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology* : 6. pp. 763-775.
- 246. Martin, M. ; Metay , A. Mary, B. ; Arrouays, D. ; Nicolardot , B. et Germon J.C.**, 2009 .Effets des techniques culturales sans labour (TCSL) sur le stockage de carbone. Dans le sol. *Canadian Journal Soil Science*.
- 246. Mathur, S.; Tomar, R.S.; Jajoo, A.** 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) protects photosynthetic apparatus of wheat under drought stress. *Photosynth. Res.*, 139, 227–238.
- 247. Mazhar M.**, 1986. Rotation des cultures. In : Journée de recyclage des vulgarisateurs en technique de productions des céréales en zones semi-aride. INRA/MIAC/USAID ed., CRRRA Settat, Maroc. Pp : 19-24.
- 248. 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. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x>
- 249. Milaire H.**, 1995. à propos de quelques définitions. *Phytoma, La Défense des Végétaux*. 474:7-9.
- 250. Miller, S.P.** 2000. Arbuscular mycorrhizal colonization of semi-aquatic grasses along a wide hydrologic gradient. *New Phytologist*, 145, 145–155.
- 251. Mohammad, M.J., Pan, W.L., & Kennedy, A.C.**1995. Wheat responses to vesicular arbuscular mycorrhizal fungal inoculation of soils from eroded toposequence. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 1086-1090.
- 252. Mohammad, M. J., Pan, W. L., Kennedy, A. C.**1998. Seasonal mycorrhizal colonization of winter wheat and its effect on wheat growth under dryland field conditions. *Mycorrhiza*. 8: 139-144.
- 253. Mohammad, A., B. Mitra and A. G. Khan.** 2004. "Effects of sheared-root inoculum of *Glomus intraradices* on wheat grown at different phosphorus levels in the field." *Agriculture Ecosystems & Environment* 103: 245-249.
- 254. Monneveux, PH.**, 1989- le système de culture sur jachère au zone méditerranéenne : Etude historique et essai d'analyse de fonctionnement .polycopie N° 34060 Montpellier.
- 255. Monnier G.**, 1994. Introduction à la simplification du travail du sol, p. 5-9, In G. Monnier, et al. eds. *Simplification du travail du sol*, INRA (Les Colloques n° 65) ed, Paris
- 256. Moreau J.M.**, 2011. Lutte contre les maladies. Livre Blanc « Céréales » ULg Gembloux Agro-Bio Tech et CRA-W.
- 257. Mosse, B.** 1986. Mycorrhizae in a sustainable agriculture, pp. 105-123 in Lopez-Real, J.M., et Hodges, R.D. (eds.), *The Role of Microorganisms in a Sustainable Agriculture*. AB Academic Publ. Berkhamstead, UK., 246 p.
- 258. Moughli, L.**, 2000. Transfert de technologie en agriculture : Les engrais minéraux caractéristiques et utilisation, N 72.1p 1-3-4
- 259. Mozafar, A., Anken, T., Ruh, R. & Frossard, E.** 2000. Tillage intensity, mycorrhizal and nonmycorrhizal fungi, and nutrient concentrations in maize, wheat, and canola. *Agronomy Journal*, 92, 1117–1124.
- 260. Mrabet, R.**, 1993. Revue bibliographique sur les systèmes de labour et conservation de l'eau et leur effet sur le système sol-plante. *Al Awamia*, 80 : 3-38.
- 261. Mühlbachová G., Kusá H., and Růžek P.**, 2015. Soil characteristics and crop yields under different tillage techniques. *Plant Soil Environ.*, 61, 566-572.
- 262. Mujica M.T., Fracchia S., Ocampo J.A., and Godeas A.**1999. Influence of the Herbicides Chlorsulfuron and Glyphosate on Mycorrhizal Soybean Intercropped with the Weeds *Brassica campestris* or *Sorghum halepensis*. *Symbiosis*, 27 (1999) 73-81.
- 263. Muller J**, 2003. Artificial infection by endophytes affects growth € and mycorrhizal colonization of *Lolium perenne*. *Functional Plant Biology* 30: 419e424.
- 264. Mummey, D.L., Antunes, P.M., Rillig, M.C.**, 2009. Arbuscular mycorrhizal fungi preinoculant identity determines community composition in roots. *Soil Biol. Biochem.* 41, 1173-1179.
- 265. Mustafa, G.; Randoux, B.; Tisserant, B.; Fontaine, J.; Magnin-Robert, M.; Sahraoui, A.L.; Reignault, P.H.** 2016. Phosphorus supply, arbuscular mycorrhizal fungal species, and plant genotype impact on the protective efficacy of mycorrhizal inoculation against wheat powdery mildew. *Mycorrhiza*, 26, 685–697
- 266. Mustafa, G.; Khong, N.G.; Tisserant, B.; Randoux, B.; Fontaine, J.; Magnin-Robert, M.; Reignault, P.; Sahraoui, A.L.** 2017. Defence mechanisms associated with mycorrhiza-induced resistance in wheat against powdery mildew. *Funct. Plant Biol.*, 44, 443–454.

267. Muthukumar, T., Udaiyan, K., 2002. Seasonality of vesicular–arbus-cular mycorrhizae in sedges in a semi-arid tropical grassland. *ActaOecologia* 23, 337–347.

N

268. Nadji, W., Belbekri, N., Ykhlef, N., & Djekoun, A. 2017. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi of durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) fields of the East of Algeria. *J. Agric. Sci*, 9, 117. <http://doi.org/10.5539/jas.v9n3p117>

269. Nguvo, K.J.; Gao, X. 2019. Weapons hidden underneath: Bio-control agents and their potentials to activate plant induced systemic resistance in controlling crop *Fusarium* diseases. *J. Plant Dis. Prot.*, 126, 177–190

270. Nouaim R., Chaussod R.1996 . Rôle des mycorrhizes dans l'alimentation hydrique et minérale des plantes, notamment des ligneux de zones arides ; Cahiers Options Méditerranéennes; n. 20 pages 9-26

271. Nyabyenda P ; 2005. -Les plantes cultivées en régions tropicales d'altitude d'Afrique : Généralités. Légumineuses alimentaires, plantes à tubercules et racines, céréales. Ed. Les presses agronomiques de Gembloux. 223 p.

O

272. Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Mader, P., Boller, T. & Wiemken, A. 2003. Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of Central Europe. *Applied and Environmental Microbiology*, 69, 2816–2824.

273. 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.

274. Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Mader, P., Wiemken, A., Boller, T., 2009. Distinct sporulation dynamics of arbuscular mycorrhizal fungal communities from different agroecosystems in long-term microcosms. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 134, 257–268

275. Oehl F, Alves da Silva G, Goto BT, Costa Maia L, Sieverding E. 2011. Glomeromycota: two new classes and a new order. *Mycotaxon* 116: 365–379.

276. Oliveira A N. and Oliveira L A. 2010. Influence of Edapho-Climatic Factors on the Sporulation and Colonization of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Two Amazonian Native Fruit Species. *Braz. Arch. Biol. Technol.* v.53 n.3: pp. 653-661, May/June 2010

277. Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. & Dean. L. A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with NaHCO₃, USDA Cir.939. U.S. Washington.

278. Olsson, P. A., Baêath, E., Jakobsen, I., & Soëderstroëm, B. 1995. The use of phospholipid and neutral lipid fatty acids to estimate biomass of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycological Research*, 99, 623-629. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)80723-5](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)80723-5)

279. Olsson, P. A., Francis, R., Read, D. J., & Söderström, B. 1998. Growth of arbuscular mycorrhizal mycelium in calcareous dune sand and its interaction with other soil microorganisms as estimated by measurement of specific fatty acids. *Plant and Soil*, 201(1), 9-16. <https://doi.org/10.1023/A:1004379404220>

280. Olsson, P. A., Thingstrup, J. I., & Bâath, E. 1999. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology and Biochemistry*, 31, 1879-1887. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00119-4)

281. Oorts K. 2006. Effect of tillage system on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereal cropping systems on a silt loam soil in Northern France, PhD thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.

282. Ould Said H., 2004. Influence de l'époque du travail de la jachère et du type d'outils dans l'amélioration du rendement de blé. *Céréaliculture*, np41 : 27-33.

283. Ouimet . R. Camiré C. V. Furlan . 1996 : Effect of soil K, Ca and Mg saturation and endomycorrhization on growth and nutrient uptake of sugar maple seedlings, *Plant and Soil* volume 179, pages207–216

284. Öpik M, Zobel M, Cantero JJ, Davison J, Facelli JM, Hiiesalu I, Jairus T, Kalwij JM, Koorem K, Leal ME, Liira J, Metsis M, Neshataeva V, Paal J, Phosri C, Põlme S, Reier Ü, Saks

Ü, Schimann H, Thiéry, O, Vasar M, Moora M. 2013. Global sampling of plant roots expands the described molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* 23: 411–430.

285. Oweis ,T. et Tavakolli, M ., 2004- The role of supplemental irrigation and nitrogen in producing bread wheat in the highlands of Iran. *Agricultural Water Management*, 65:225-236.

P

286. Panwar J et Tarafdar J.K, 2006 . Arbuscular mycorrhizal fungal dynamics under *Mitragyna parvifolia* (Roxb.) Korth in Thar Desert. *Applied Soil Ecology*.Volume 34, Issues 2–3, December 2006, Pages 200-208.<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.02.00>

287. Panwar V. Meghvansi MK. Siddiqui S 211.Short-term temporal variation in sporulation dynamicsof arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and physico-chemicaledaphic properties of wheat rhizosphere. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 18/ 247-254.

www.ksu.edu.sawww.sciencedirect.com

288. Parniske, M. 2000 Intracellular accommodation of microbes by plants: a common developmental program for symbiosis and disease? *Current Opinion in Plant Biology*., 3(4): p. 320-8

289. Paszkowski U. 2006a. A journey through signaling in arbuscular mycorrhizal symbioses. *New Phytologist* 172: 35–46.

290. Phillips, J. M., & Hayman, D. S. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 55, 158-161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)

291. Piercey M.M., Graham S.W., Currah R.S. 2004. Patterns of genetic variation in *Phialocephala fortinii* across a broad latitudinal transect in Canada. *Mycol Res* 108:955–964.

292. Pittelkow, M.C., Linqvist, A.B., Lundy, E.M., Liang, X., Groenigen, J., Lee, J., et al. 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research* **183**:156-168.

293. 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.

293. Plenchette, C., Perrin, R. & Duvert, P. 1989. The concept of soil infectivity and a method for its determination as applied to endomycorrhizas. *Canadian Journal of Botany*, 67: 112-115.

294. Plouznikoff, K.; Declerck, S.; Calonne-Salmon, M. 2016. Mitigating Abiotic Stresses in Crop Plants by Arbuscular Mycorrhizal Fungi; Springer Nature: Basel, Switzerland,; pp. 341–400.

295. Powlson D.S., C.M. Stirling, M.L. Jat, B.G. Gerard, C.A. Palm, P.A. Sánchez, et al. 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation *Nature Climate Ch*, 4 pp. 678-683.

296. Pratap. Singh V , Singh S.P., Dhyani V.C., Banga A., Kumar A., Satyawali K.and Bisht N.2016. Weed management in direct-seeded rice. 201. *Indian Journal of Weed Science* 48(3): 233–246, DOI: 10.5958/0974-8164.2016.00059.9.

297. Prévost, Ph., 1999- Les bases de l'agriculture Édition3Éditeur .Éd. Tec & doc, 290 p.

298. Prévost P., 2006. Les bases de l'agriculture. Troisième Edition tec et doc .Lavoisier, pp:190

R

299. Rabie, G.H. . 2005. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungus to red kidney and wheat plants tolerance grown in heavy in metal polluted soil. *Afr. J. Biotechnol*, 4, 332–345.

300. Raunet M., Séguy L. et Fovet-Rabot C. 1999. Semis direct sur couverture végétale permanente du sol: de la technique au concept. Rasolo, F. et M. Raunet (eds). In : *Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture*. Actes de l'atelier international, Antsirabe, Madagascar, 23-28 Mars 1998. CIRAD, collection Colloques, Montpellier, pp :41-52.

301. Raven P.H, Evert R.F, Eichran S.E.,2007 -Biologie végétale 7 éme édition .De Boeck.944p.

302. Read, D. J. 1998. "Plants on the web." *Nature* 396: 22-23.

303. Redecker D, Raab P. 2006. Phylogeny of the Glomeromycota (arbuscular mycorrhizal fungi): recent developments and new gene markers. *Mycologia* 98: 885-895.

304. Recous S., Chabbi A., Vertès F., Thiébeau P., Chenu C. 2015. “Fertilité des sols et minéralisation de l’azote : sous l’influence des pratiques culturales, quels processus et interactions sont impliqués ?”, *Fourrages*, 223, 189-196.

305. Redecker D, Schüßler A, Stockinger H, Stürmer SL, Morton JB, Walker C. 2013. An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza* 23: 515–531.

- 306. Rejeb, I.; Pastor, V.; Mauch-Mani, B.** Plant responses to simultaneous biotic and abiotic stress: Molecular mechanisms. *Plants* 2014, 3, 458–475.
- 307. Reinhardt D.** 2007. Programming good relations--development of the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Current Opinion in Plant Biology*, 10 (1): 98-105.
- 308. Requena N, Serrano E, Ocón A, Breuninger M.** 2007. Plant signals and fungal perception during arbuscular mycorrhiza establishment. *Phytochemistry* 68: 33–40.
- 309. Richards R.A. & Passioura J.B.** 1981. Seminal root morphology and water use of wheat. II. Genetic variation. *Crop Sci* 21: 253-255.
- 310. Rieger S B;** 2001 Impacts of tillage systems and crop rotation on crop development, yield, and nitrogen efficiency. Doctoral Thesis. Swiss federal institute of technology zurich for the degree of doctor of natural sciences <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004135854>
- 311. Rillig MC, Ramsey PW, Morris S et Paul EA,** 2003. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change. *Plant and Soil*, 253: 293-299.
- 312. Rillig, M.C., Steinberg, P.D.,** 2002. Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 1371e1374.
- 313. Rodriguez, R. J., Redman, R. S., & Joan, M. H.** 2004. The role of fungal symbioses in the Adaptation of plants to high stress environments. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 9, 261-272. <http://doi.org/10.1023/B:MITI.0000029922.31110.97>
- 314. Rodriguez RJ, White JF, Arnold AE, Redman RS.** 2009. Fungal endophytes: diversity and functional roles. *New Phytol.* ; 182(2) : 314–30.
- 315. Roger-Estrade J., Richard G., Caneill, J., Boizard H., Coquet Y., Defosse P. et Manichon H.** 2000. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil & Tillage Research*, 79, 33-49.
- 316. Rousk J, Baath E, Brookes PC, Lauber CL, Lozupone C, Caporaso JG, Knight R & Fierer N** 2010. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *ISME J* 4: 1340– 1351.
- 317. Ruiz-Lozano, J.M.** 2003. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress. *New perspectives for molecular studies. Mycorrhiza*, 13, 309–317.

S

- 318. Saber, N. et Mrabet, R.,** 2002- Influence du travail du sol et des rotations de cultures sur la qualité d'un sol argileux gonflant en milieu semi-aride marocain. *Revue Étude et Gestion des Sols*, Volume 9, 1, 2002 - pages 43 à 53.
- 319. Saif SR, Khan AG** 1975 The influence of season and stage of development of plant on endogone mycorrhiza of field-grown wheat. *Can J Microbiol* 21 :1020–1024
- 320. Sanginga, N., Carsky, R.J. & Dashiell, K.** 1999. Arbuscular mycorrhizal fungi respond to rhizobial inoculation and cropping systems in farmers' fields in the Guinea savanna. *Biology and Fertility of Soils*, 30, 179–186.
- 321. Santos, S. G. D., Silva, P. R. A. D., Garcia, A. C., Zilli, J. É, and Berbara, R. L. L.** 2017. Dark septate endophyte decreases stress on rice plants. *Braz. J. Microbiol.* 48, 333–341. doi: 10.1016/j.bjm.2016.09.018
- 322. Sasal M.C., Andriulo A.E. et Taboada M.A.** 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil & Tillage Research*, 87, 9-18.
- 323. Scervino, J.M., Ponce, M., Erra-Bassells, R., Vierheilig, H., Ocampo, J.A., Godeas, A.,** 2005. Arbuscular mycorrhizal colonization of tomato by *Gigaspora* and *Glomus* species in the presence of root flavonoids. *J. Plant Physiol.* 162, 625-633.
- 324. Schalamuk, S., Velazquez, S., Chidichimo, H., & Cabello, M.** 2004. Effect of No-till and Conventional Tillage on Mycorrhizal Colonization in Spring Wheat. *Bol. Soc. Argent. Bot.* 39 (1-2): 13 - 20. 2004
- 325. Schalamuk, S., Velazquez, S., Chidichimo, H., & Cabello, M.** 2006. Fungal spore diversity of arbuscular Mycorrhizal fungi associated with spring wheat: Effects of tillage. *Mycologia*, 98(1), 16-22. <http://doi.org/10.3852/mycologia.98.1.16>
- 326. Schwarzott, D, Walker, C, Shubler, A.,** 2001. *Glomus*, the largest genus of the arbuscular mycorrhizal fungi (Glomales) is non-monophyletic. *Mol. Phylogen. Evol.* 21: 190-197.

- 327. Scopel E, Triomphe B, Affholder F, et al.,** 2013. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agron Sustain Dev* 33:113–130.
- 328. Sebilotte M.,** 1990. Système de culture ,un concept opératoire pour les agronomes. In: L. Combe et D. Picard coord, les systèmes de cultures .INRA VERSAILLES : 165-196
- 329. Shahabivand, S.; Maivan, H.Z.; Goltapeh, E.M.; Sharifi, M.; Aliloo, A.A.** 2012. The effects of root endophyte and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and cadmium accumulation in wheat under cadmium toxicity. *Plant Physiol. Biochem.*, 60, 53–58.
- 330. Sharma, I.P.; Sharma, K.** 2018. Mycorrhizal colonization and phosphorus uptake in presence of PGPRs along with nematode infection. *Symbiosis*, 77, 185–187.
- 331. Sharma, S.; Anand, G.; Singh, N.; Kapoor, R.** 2017. Arbuscular Mycorrhiza augments arsenic tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by strengthening antioxidant defense system and thiol metabolism. *Front. Plant Sci.*, 8, 906.
- 332. Shekhawat K , Singh Rathore S and Chauhan B S .**2020. Weed Management in Dry Direct-Seeded Rice: A Review on Challenges and Opportunities for Sustainable Rice Production. *Agronomy*, 10, 1264; doi:10.3390/agronomy10091264
- 333. Sieverding, E.** 1991. Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza Management in Tropical Agrosystems. GTZ Schriftenreihe No. 224. Hartmut Bremer Verlag, Friedland, Germany.
- 334. Simard, S.W., Durall, D., and Jones, M.** 2002. Carbon and nutrient fluxes within and between mycorrhizal plants. In *Mycorrhizal ecology*. *Ecol. Stud.* 157: 33–74.
- 335. Simon H., Codaccioni P., Lecoeur X.,** 1989. Produire des céréales à pailles. Tec & Doc-Lavoisier ed., Paris. 333P.
- 336. Sinclair T.R. et Jamieson P.D.** 2006. “Grain number, wheat yield, and bottling beer an analysis, Field” *Crops Research*, 98: 60 - 67.
- 337. Singh A.K., Hamel C., Depauw R.M & Knox R.E.,** 2012 – Genetic variability in arbuscular mycorrhizal fungi compatibility supports the selection of durum wheat genotypes for enhancing soil ecological services and cropping systems in Canada. *Canadian journal of microbiology* 58(3), 293-302.
- 338. Smadhi D . Zella L** 2009. Variabilite De La Pluviometrie Et Son Impact Sur La Production Cerealier Au Nord De L'algerie. Periode (1970-2009). *Sciences & technologie. C, Biotechnologies* Volume 0, Numéro 35, Pages 55-63
- 339. Smith B, Smith S.** 1997. Structural diversity in vesicular arbuscular mycorrhizal symbioses. *New Phytologist* 137: 373–388
- 340. Smith SE, Read DJ.** 2008. *Mycorrhizal symbiosis*. San Diego, CA: Academic Press
- 341. Smith E.G. et Young D.L.,** 2000. Requiem for fallow in western North America. *Dans : Choices*, 1, pp. 24- 25.
- 342. Snyder, C.S., Reetz, H.F., Bruulsema, T.W.** 2003. Phosphorus nutrition of wheat – optimize production. *NEWS and VIEWS* Sept 2003. Potash and Phosphate Institute, Norcross, GA, USA.
- 343. Soane BD, Ball BC, Arvidsson J, et al.,** 2012 No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil Tillage Res* 118:66–87.
- 344. Soka, G., & Ritchie, M.** 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis, ecosystem processes and Environmental changes in tropical soils. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(1), 229-245. http://doi.org/10.15666/aeer/1301_229245
- 345. Sokolowski A. C, McCormick B. P. De Grazia J, Wolski J E, Rodríguez Hernan A., Rodríguez-Frers Eric .P., Gagey María C., Debelis Silvina P, Paladino Ileana R., Barrios M. B.** 2020 . Tillage and no-tillage effects on physical and chemical properties of an Argiaquoll soil under long-term crop rotation in Buenos Aires, Argentina. *International Soil and Water Conservation Research* 8. 185-194.
- 346. Soltner D.,** 2005 -Les grandes productions végétales : céréales, plantes sarclées, prairies. 2eme édition collection science et techniques agricoles France, 472 p.
- 347. Sonmez, O.; Aydemir, S.; Kaya, C.** 2009. Mitigation effects of mycorrhiza on boron toxicity in wheat (*Triticum durum*) plants. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.*, 37, 99–104.
- 348. Spedding, T.A., Hamel, C., Mehuys, G.R., Madramootoo, C.A.,** 2004. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology and Biochemistry* 36, 499–512.
- 349. Srivastava, R., Roseti, D., Sharma, A.K.,** 2007. The evaluation of microbial diversity in a

vegetable based cropping system under organic farming practices. *Appl. Soil Ecol.* 36, 116-123.

350. Staddon, P.L., Thompson, K., Jakobsen, I., Grime, J.P., Askew, A.P and Fitter, A.H. 2003 Mycorrhizal fungal abundance is affected by long-term climatic manipulations in the field. *Global Change Biol.* 9, 186–194.

351. Stanek-Tarkowska J, Czyżł Ewa A., Dexter Anthony R., and Sławiński Cezary 2018.. Effects of reduced and traditional tillage on soil properties and diversity of diatoms. under winter wheat / *Int. Agrophys.*, , 32, 403-409 doi: 10.1515/intag--0016.

352. Stengel P., Douglas J.T., Guérif J., Goss M.J., Monnier G. et Cannell R.Q. 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. *Soil & Tillage Research*,4, 35-53.

353. Stover HJ, Thorn RG, Bowles JM, Bernards MA, Jacobs CR. 2012. Arbuscular mycorrhizal fungi and vascular plant species abundance and community structure in tallgrass prairies with varying agricultural disturbance histories. *Applied Soil Ecology* 60: 61–70.

354. Stoyke G., Currah R.S. 1991. Endophytic fungi from the mycorrhizae of alpine ericoid plants. *Can J Bot* 69:347–352

355. Strack, D., Fester, T., Hause, B., Schliemann, W. and Walter, M.H. 2003. Arbuscular mycorrhiza: biological, chemical, and molecular aspects. *J Chem Ecol*, 29, 1955-1979.

356. Strullu D.G., 1991.-Les mycorrhizes des arbres et plantes cultivées. Techniques et documentation, Lavoisier, Paris. p.250.

357. Surget A, Barron C 2005. Histologie du grain de blé revue *Industrie des Céréales* numéro 145, page(s) 03-07, référence 145/03.

358. Surono , Narisawa K. 2017.The dark septate endophytic fungus *Phialocephala fortinii* is a potential decomposer of soil organic compounds and a promoter of *Asparagus officinalis* growth. *Fungal Ecology* 28.

T

359. Taha, A.A. and Nezar, H.S., 2006.Tillage practice in wheat production under rainfed condition in Jordan: an economic comparison. *Wor. J. of Agri. Sci.* 2(3) 322-325.

360.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.

361. 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 mycorrhizogène 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.

362. Talaat, N.B.; Shawky, B.T. 2014. Protective effects of arbuscular mycorrhizal fungi on wheat (*Triticum aestivum* L.) plants exposed to salinity. *Environ. Exp. Bot.*, 98, 20–31.

363. Tancredo Souza 2015. *Handbook of Arbuscular Mycorrhizal Fungi* . Springer International Publishing Switzerland DOI<https://doi.org/10.1007/978-3-319-24850-9>

364. Tarkalson, David D.; Hergert, Gary W.; and Cassman, Kenneth G., 2006. Long-Term Effects of Tillage on Soil Chemical Properties and Grain Yields of a Dryland Winter Wheat–Sorghum/Corn–Fallow Rotation in the Great Plains. *Agronomy & Horticulture Faculty Publications*. 95. <https://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/95>.

365. Tedersoo, L., May, T.W. & Smith, M.E. 2010. Ectomycorrhizal lifestyle in fungi: global diversity, distribution and evolution of phylogenetic lineages. *Mycorrhiza* 20: 217-263.

366. Thébeau P., Iqbal A., recous S. 2011 : “Eléments de caractérisation de la biomasse d'un mulch en systèmes d'agriculture de conservation”, 10e Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'analyse (Comifer-gEMAS), Reims (France), 23-24/11/2011 (poster).

367. Thibault, E. ,2000- Les outils de travail primaires : leur impacte sur le sol in colloque en agroenvironnement ; Des outils d'intervention à notre échelle .Bull.N°12 : 43-51.

368. Thomas GA, Titmarsh GW, Freebairn DM, Radford BJ. 2007. No-tillage and conservation farming practices in grain growing areas of Queensland—a review of 40 years of development. *Aust. J. Exp. Agric.* 47: 887-898

369. Triplett G.B. et Dick W.A. 2008. No-tillage crop production: A revolution in agriculture! *Agron. J.*, 100 :153 -165.

- 370. Troeh, Z.I. & Loynachan, T.E.** 2003. Endomycorrhizal fungal survival in continuous corn, soybean, and fallow. *Agronomy Journal*, 95, 224–230.
- 371. Trottet M. et Doussinault G.** 2002. “Analyse du progrès génétique chez le blé tendre au cours du XXème siècle”. *Le Sélectionneur Français*, 53: 3 -13.
- 372. Trouvelot, A., Gianinazzi-Pearson, V., Gianinazzi,S.** 1982. Les endomycorhizes en agriculture; recherches sur le blé. Présenté dans : *Les mycorhizes : biologie et utilisation* (p. 251-256). Dijon, France (1982-05-05 - 1982-05-06). Paris, FRA : INRA Editions.
- 373. Tuomi, J., Kytöviita, M., Härdling, R.** 2001: Cost efficiency of nutrient acquisition and the advantage of mycorrhizal symbiosis for the host plant. – *Oikos* 92:62-70.

V

- 374. Van Groenigen, K. J., Bloem, J., Bååth, E., Boeckx, P., Rousk, J., Bodé, S., & Jones, M. B.** 2010. Abundance production and stabilization of microbial biomass under conventional and reduced tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(1), 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.09.023>
- 375. Vian J.F.** 2009. Comparaison de différentes techniques de travail du sol en agriculture biologique : effet de la structure et de la localisation des résidus sur les microorganismes du sol et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech) Spécialité : Agronomie, 205p.
- 376. Vierheilig, H., Garcia-Garrido, J.M., Wyss, U., Piché, Y.,** 2000. Systemic suppression of mycorrhizal colonization of barley roots already colonized by AM fungi. *Soil Biol. Biochem.*32, 589-595.
- 377. Viglizzo and Jobaggy,** 2010 E.F. Viglizzo, E. Jobaggy (Eds.), *Expansión de la frontera agropecuaria Argentina y su impacto ecológico-ambiental*, INTA , p. 102
- 378. Vievier M. et Leconte D.,** 1994. Flore et végétation : reflète de la rupture des pratiques agronomiques. Poitiers : Ed. INRFA, pp. 164.
- 379. Voets, L., de la Providencia, I. E., & Declerck, S.** (2006). Glomeraceae and Gigasporaceae differ in their ability to form hyphal networks. *New Phytologist*, 172, 185-188. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01873.x>

W

- 380. Wang, J., Zhu, B., Zhang, J. B., Muller, C. & Cai, Z. C.** 2015. Mechanisms of soil N dynamics following long-term application of organic fertilizers to subtropical rain-fed purple soil in China. *Soil Biol. Biochem.* **91**, 222–231).
- 381. Wang, B. & Qiu, Y-L.** 2006. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. *Mycorrhiza*, 16: 299-363.
- 382. Willekens K. Vandecasteele B. Buchan D. and De Neve S.** 2014. Soil quality is positively affected by reduced tillage and compost in an intensive vegetable cropping system. *Applied Soil Ecology*, vol. 82, pp. 61–71.
- 383. Wu Q.-S., He X.H , Zou Y-N, He K-P, Sun Y-H , Cao M-Q** 2012. Spatial distribution of glomalin-related soil protein and its relationships with root mycorrhization, soil aggregates, carbohydrates, activity of protease and b-glucosidase in the rhizosphere of Citrus unshiu/ *Soil Biology & Biochemistry* 45 181e183.
- 384. Wu, Q. S.** 2017. *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants* (Library of Congress Control Number: 2017936364). <http://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0>.
- 385. Xavier LJC, Germida JJ** 1997. Growth response of lentil and wheat to *Glomus clarum* NT4 over a range of P levels in a Saskatchewan soil containing indigenous AM fungi. *Mycorrhiza* 7 : 3-8.
- 386. Zaaboubi, S.** 2007. Effet comparatifs de deux outils aratoires (Disque- Dents) et de différents précédents culturaux sur les propriétés physiques d'un sol cultivé en céréales dans la région de Timgad. Mémoire magister. Université de Batna. Pp.78
- 387. Zhang Q., Gong M., Yuan J., Hou Y., Zhang H., Wang Y., Hou X.** 2017. Dark Septate Endophyte Improves Drought Tolerance in Sorghum. *International Journal of Agriculture & Biology*, 19: 53–60.
- 388. Zihlmann U., Chervet A., Müller M., Schafflützel R., Sturny W.G. et Weisskopf P.,** 2001.

Semis direct en grandes cultures. Effets sur la matière organique et les nutriments dans le sol. Revue suisse Agric. 33 (1), 21-25.

389. Zhu. Y, Miller. RM., 2003. Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant systems. National Center for Biotechnology Information's.USA.

390. Zubek S, Blaszkowski J, Mleczko P. 2011. Arbuscular mycorrhizal and dark septate endophyte associations of medicinal plants. Acta Soc Bot Pol. 2011;80:285–292. doi: 10.5586/asbp..033.

Les sites WEB

Web2:<http://informationsdocuments.com/environnement/coppermine15x/displayimage.php?pid=26950>

Web 3 : <https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/ACetMo.html>

Web 4: <http://www.fao.org/3/y4690e/y4690e0a.htm>

(AtlasBig.com.2020) <https://www.atlasbig.com> › fr-fr › Production mondiale de blé par pays

Annexes

Outils de travail du sol	Description et spécificité
---------------------------------	-----------------------------------

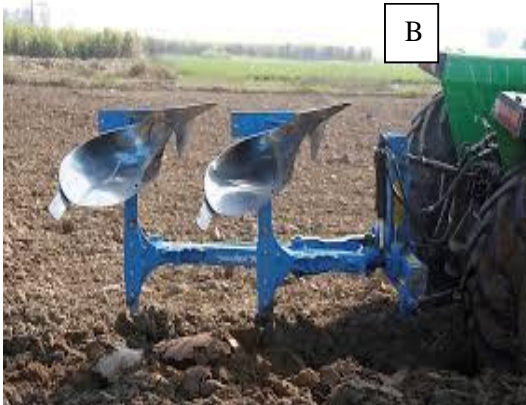
Annexe 1 :

Tableau A1 : description des outils de travail du sol



A

La charrue à disques (A) produit généralement une qualité de labour moins intense et différente de la charrue à versoir, mais elle est mieux adaptée aux conditions difficiles (pierres et graviers) (Thibault, 2000). La profondeur de labour est de 25 à 40 cm.



B

La charrue à socs (B) favorise l'aération et la restructuration du sol, assure le contrôle des adventices en les enfouissant dans le sol, perturbe le développement des rhizomes des vivaces et diminue le taux des bio-agresseurs (Candelon, 1993).



La charrue chisel à dents *flexibles* aplaties et légèrement recourbées pour permettre de contourner les obstacles peut être utilisée à la place des charrues à disques et à versoir dans de nombreux cas. La profondeur de travail est d'environ 30cm, ameublisse le sol et détruit les plantes adventices. Elle améliore la teneur en matière organique du sol et l'activité biologique en surface, réduit par conséquent les risques d'érosion et donc, contribue à la fertilité du sol.

L'utilisation du chisel est préconisée sur un sol mal drainé et/ou mal aéré ayant une semelle de labour, pour améliorer la perméabilité et la pénétration des racines (Thibault, 2000).



Le cover-crop est un outil muni de deux rangées de disques, la première est composée de disques crénelés, la seconde de disques lisses; fixés sur deux bâtis en forme de V. Il est sensible à l'humidité de sol, il est adapté pour les sols secs. La rotation des disques assure le mélange de la terre avec les débris végétaux dont la profondeur d'enfouissement est fonction de la vitesse, l'angle et le poids de l'instrument (Thibault, 2000).



La herse réalise des opérations de travail du sol après le labour en sol léger ou après les pseudos labours sur sols plus lourds. Les herses nivèlent la surface du sol et affinent la structure du lit de semence sur une faible profondeur et utilisées après semoir, elles régularisent le semis. (Amara et *al.* 2006)




La déchaumeuse est un outil agricole conçu pour le déchaumage mais il a aussi d'autres objectifs : effectuer simultanément un travail du sol superficiel par pulvérisation pour préparer le semis ; casser la croûte de battance ; détruire les adventices



Le rouleau

Le rouleau est un outil agricole utilisé pour aplanir le sol ou briser de grandes mottes de terre, surtout après le labour. Les rouleaux peuvent consister en un ou plusieurs cylindres en acier épais remplis de béton ou d'eau. Les rouleaux segmentés, les rouleaux lisses, le cultipacker, le rouleau Crosskill, le rouleau Cambridge. La surface des rouleaux peut être lisse, ou elle peut être texturée pour aider à casser le sol ou à rainurer la surface finale pour réduire le récurage de la pluie.

Source: [Rouleaux agricoles: types et utilisations – Renseigner-Point-Com](#) 

a. zonation écoclimatique selon la méthode de Le Houérou (1995) des stations expérimentales de Sétif Saida (1980-2009).

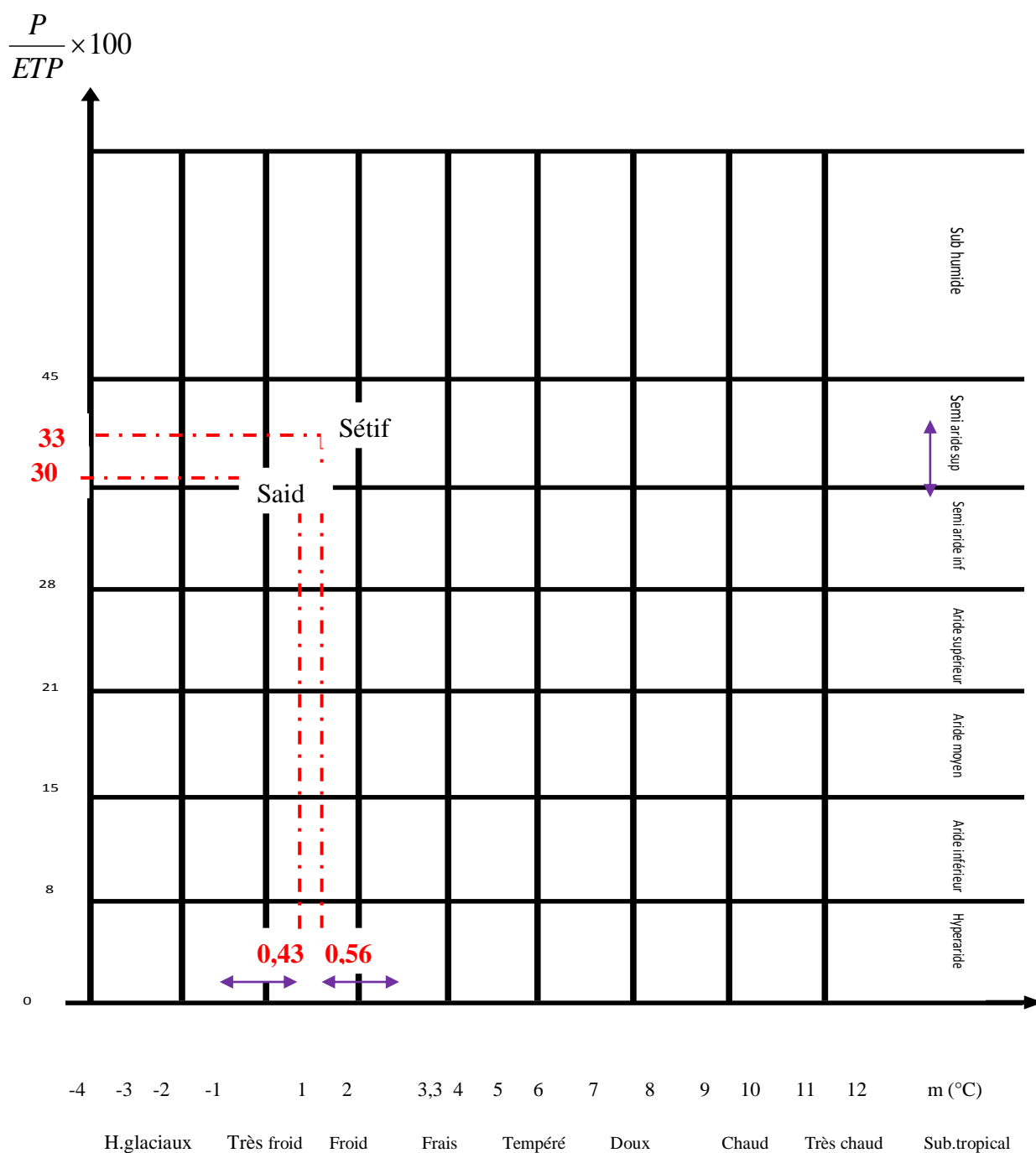


Figure A2: zonation écoclimatique selon la méthode de Le Houérou (1995). Station de Sétif et Saida

Annexe3 :

Tableau A3a: caractéristiques agronomiques et technologiques de la variété Bousselam.

Caractéristiques agronomiques	Caractéristiques technologiques	Résistance aux maladies
Rendement moyen 33,90qx/ha	Qualité semoulière :bonne .	Oidium feuille : sensibilité moyenne
	Mitadinage :résistante .	Oidium épi :Résistante.
PMG :élevé.	Teneur en protéines :15.01%.	Rouille brune : Sensible .
		Septoriose :Moyennement sensible.

Annexe 4 :

Composition des réactifs et colorants utilisés dans la partie observation et identification des CMA.

1. Solution de Bleu de Trypan .

Acide Lactique	100ml
Glycérol	100ml
Bleu de Trypan	0,3g
Phénol	100ml
Eau distillée	100ml

2. Polyvinyl lacto-glycerol PVLG (Locquin et Langeron, 1978)

Alcool Polyvinylique acq 15%	56g
Acide lactique	22g
Glycerol	22g

3. Réactif de Melzer (Locquin et Langeron, 1978)

Hydrate de chlorale	100g
Iodine	1,5g
Potassium iodide	5g
Eau distillée	100g

Annexe 5 :

Table A5. Correlation coefficient *total mycorrhizal root colonization, Abuscules and Vesicles percentage and endophytes* estimated at three growing stage under two farming sytem (no-tilling and conventionel tilling).

No-till farming

	H% 1	A% 1	V% 1	En% 1	H% 2	A% 2	V% 2	En% 2	H% 3	A% 3	V% 3	En% 3	Yield
H% 1	1	0.69*	-0.32	-0.65	0.07	0.17	-0.04	0.61	0.90**	-0.95**	0.75*	-0.89	0.26
A% 1		1	-0.87**	-0.14	0.03	0.63	-0.65	-0.99*	0.67*	-0.72*	0.27	0.25	-0.36
V% 1			1	-0.18	-0.01	-0.85**	0.92**	0.92	-0.32	0.32	0.16	-0.55	0.73*
En% 1				1	-0.94	-0.51	-0.18	0.18	0.03	-0.54	0.86	0.92	0.85
H% 2					1	0.32	-0.01	0.14	-0.19	0.09	-0.05	-0.99*	-0.16
A% 2						1	-0.83**	0.74	0.06	-0.09	-0.32	-0.81	-0.82**
V% 2							1	0.92	-0.07	0.01	0.46	-0.55	0.81**
En% 2								1	-0.97	-0.92	0.65	-0.20	-0.34
H% 3									1	-0.95**	0.77*	0.41	0.36
A% 3										1	-0.80**	-0.17	-0.34
V% 3											1	0.60	0.66*
En% 3												1	0.98
Yield													1

Conventional tillage

H% 1	1	-0.90**	0.53	-0.66	0.53	-0.57	0.32	0.99	0.34	-0.77*	0.63	0.80	0.50
A% 1		1	-0.78*	0.93	-0.61	0.56	-0.40	-0.94	-0.58	0.61	-0.80**	-0.43	-0.55
V% 1			1	-0.52	0.33	-0.20	0.15	-0.15	0.54	-0.15	0.74*	-0.80	0.35
En% 1				1	0.00	-0.36	0.96	-0.76	0.16	0.24	0.30	-0.09	0.80
H% 2					1	-0.96**	0.94**	0.00	0.88**	-0.81**	0.65	0.00	0.55
A% 2						1	-0.91**	-0.32	-0.75*	0.90**	-0.60	-0.89	-0.56
V% 2							1	-0.90	0.83**	-0.73*	0.41	-0.34	0.41
En% 2								1	-0.76	-0.81	-0.84	0.71	-0.22
H% 3									1	-0.51	0.73*	-0.99*	0.57
A% 3										1	-0.48	-0.98	-0.45
V% 3											1	-0.97	0.75*
En% 3												1	0.52
Yield													1

1: tillering stage, 2: grain filling stage, 3: grain maturity stage H%: AMF root colonization, V%: vesicles percentage, A% : arbuscules percentage, En% : DSE root colonization

Publications



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.

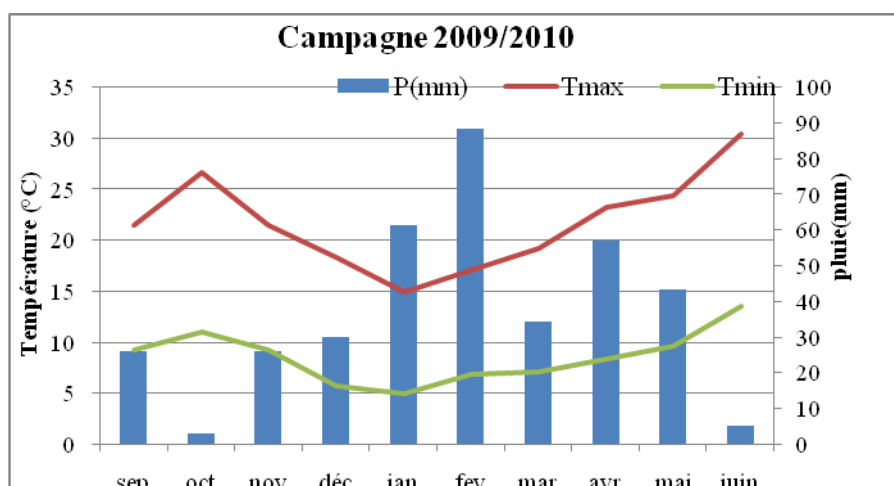


Figure 1. Variations de la pluviométrie et de la température mensuelle maximale et minimale du site expérimental – Variations of the pluviometry and the monthly maximal and minimal temperature of the experimental site

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, microsclérotos 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).

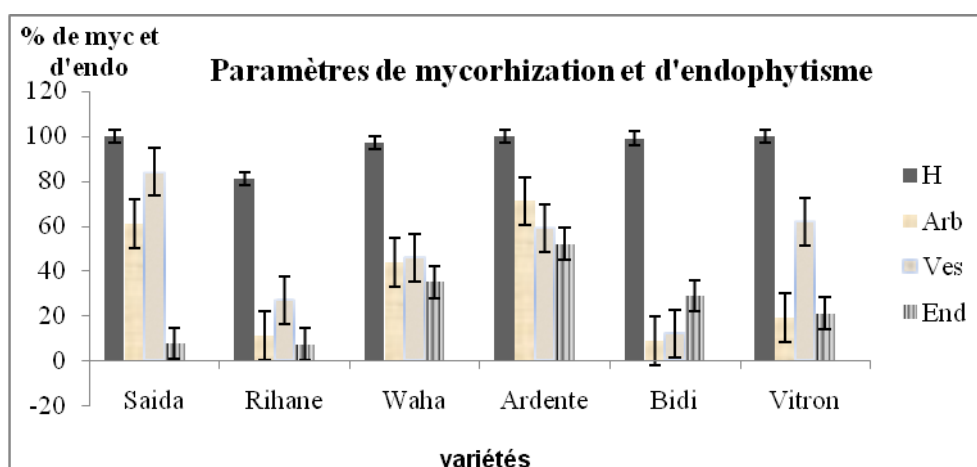


Figure 2. Variation du taux de mycorhization (H) d'arbuscules (Arb), de vésicules (Ves) et d'endophytisme (End) chez les variétés d'orge (Saida 183, Rihane 03) et de blé dur (Waha, Ardente, Bidi 17 et Vitron) — Change in the rate of mycorrhizal (H) of arbuscules (Arb), vesicles (Ves) and endophytic (End)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

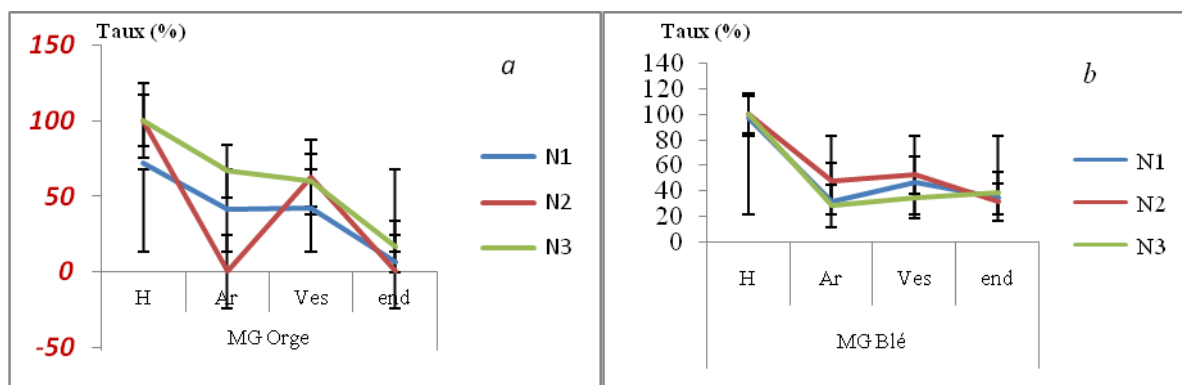


Figure 3. Cinétique symbiotique racinaire moyenne des variétés d'orge (a) et de blé dur (b) sur les différentes profondeurs racinaires — *Average root symbiotic kinetics of barley (a) and (b) durum wheat varieties at different root depth.* (MG : moyenne générale ; average)

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.

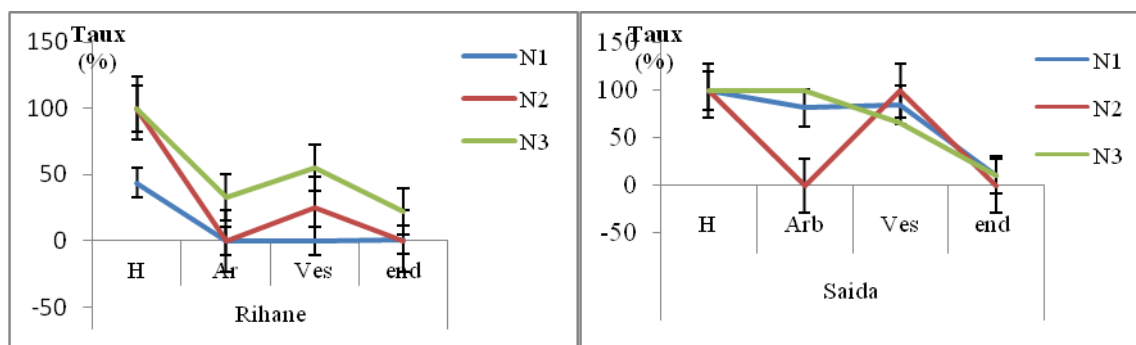


Figure 4. Cinétique racinaire de la symbiose mycorhizienne et endophytique des variétés d'orge sur les différentes profondeurs racinaires — *Root kinetics of mycorrhizae and endophyte symbiosis of barley varieties at different root depths.*

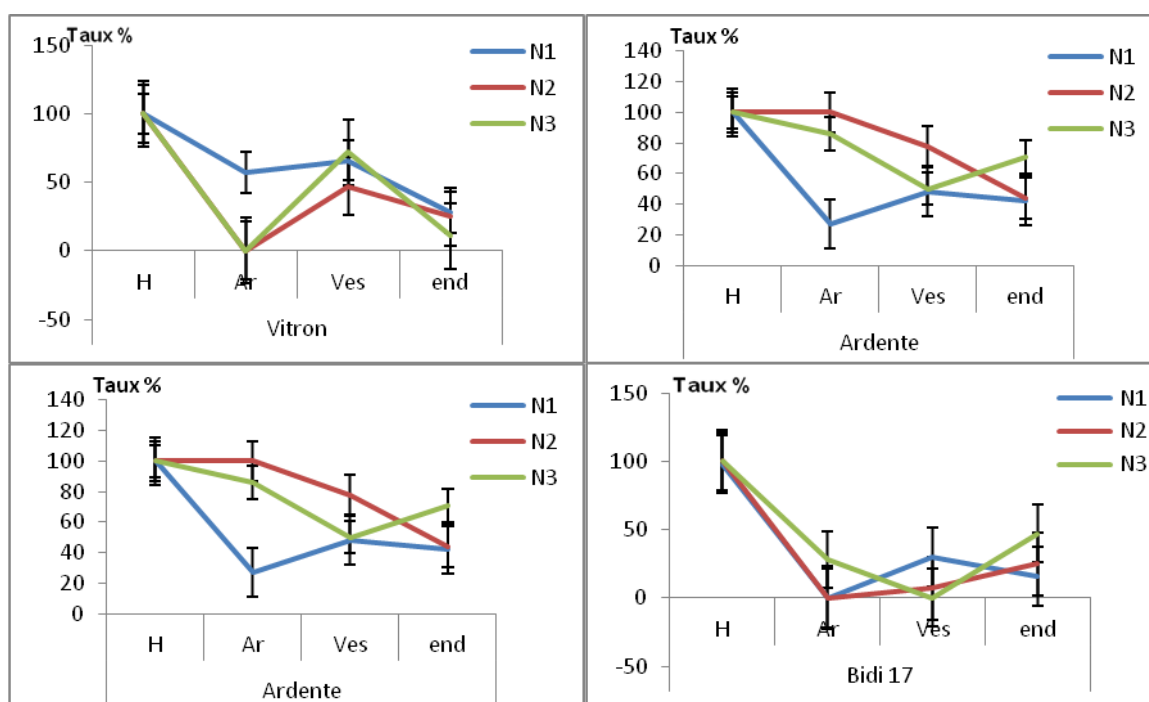


Figure 5. Cinétique racinaire de la symbiose mycorhizienne et endophytique des variétés de blé dur sur les différentes profondeurs racinaires — *Kinetics of root mycorrhizae and endophyte symbiosis of durum wheat at different root depths.*

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.

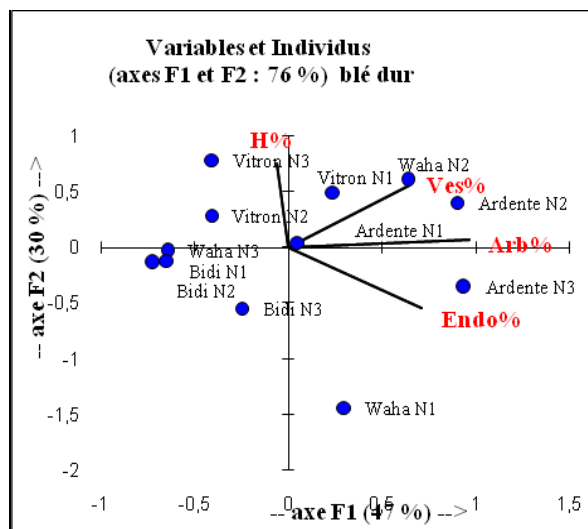


Figure 6. Présentation sur le plan (1,2) de l’ACP des paramètres symbiotiques pour tous les niveaux de profondeurs et variétés étudiés (n=18) — *Presentation on the CPA plan symbiotic settings for all levels and varieties studied depths*

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 (Khaldoun 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 (Khaldoun 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.

The Influence of No-till Farming on Durum Wheat Mycorrhization in a Semi-Arid Region: A Long-Term Field Experiment

Hassiba Hadj Youcef Taibi^{1,6}, Noria Smail-Saadoun¹, Sonia Labidi^{2,5}, Karima Abdellaoui¹, Mahfoud Makhoulouf⁴, Abdelkrim Laouar³, Chérifa Tagmount Benouaret¹, Lila Rezki-Sekhi¹, Amel Belkebir Boukais¹ & Anissa Lounès-Hadj Sahraoui²

¹ Natural Resources Laboratory, Department of Agronomic Sciences, Mouloud Mammeri University, Tizi Ouzou, Algeria

² Unit of Environmental Chemistry and Interactions on the Living, UR 4492-UCEIV, University of the Littoral Opale Coast, Condorcet FR CNRS 3417, F-62228 Calais Cedex, France

³ Faculty of Science of Nature and Life, Ferhat Abbas University, Setif, Algeria

⁴ Institute of Field Crops, Agricultural Experimental Station of Setif, Setif, Algeria

⁵ Laboratory of Horticultural Sciences, LR13AGR01, Carthage University, National Agronomic Institute of Tunisia, 43 Ave Charles Nicolle, 1082 Tunis, Mahrajène, Tunisia

⁶ Department of Agronomy, M'Hamed Bougara University of Boumerdes, Boumerdes, Algeria

Correspondence: Hassiba Hadj Youcef Taibi, Natural Resources Laboratory, Department of Agronomic Sciences, Mouloud Mammeri University, Hasnaoua Road, BP 17, 15000, Tizi Ouzou, Algeria. Tel: 213-555-457-726. E-mail: htaibi@hotmail.fr

Received: January 8, 2020

Accepted: February 9, 2020

Online Published: March 15, 2020

doi:10.5539/jas.v12n4p77

URL: <https://doi.org/10.5539/jas.v12n4p77>

This research was financed by the Ministry of Higher Education and Scientific Research of Algeria and the Ministry of Agriculture.

Abstract

Maintaining a reliable and sustainable agricultural production system has become one of the major concerns of producers in arid and semi-arid regions. Simplifying farming techniques and practicing Direct Seedling (DS) could contribute to insure the sustainability of agriculture, preserving the natural resources and the environment. Direct Seedling based on limiting soil plowing has a potential number of benefits, including reduced production costs and soil erosion. Associated with the organic mulch, this technique improves the soil fertility and favors the establishment of root symbioses. Given the importance of the no-till farming techniques, the present research work aims to compare the effects of DS and those of Conventional Seedling (CS) on the evolution of arbuscular mycorrhizal symbiosis in durum wheat (*Triticum durum* Desf) roots, cultivated in the field for five years. Soil and root samples were collected during three different cropping stages at two different treatments. The results of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) root colonization kinetics have shown an increase in the percentage of arbuscules and a decrease in vesicles for plants sampled from a DS field compared to those from CS. Effects of the DS on the mycorrhizal parameters appears clearly in the fourth year of the experiment and continues in the fifth year, with an arbuscule percentage reaching 80% in a DS field and not exceeding 21% in a CS field. Soil phospholipid fatty acids (PLFA) C16:1 ω 5 (biomarker of AMF) and C18:2 ω 6, 9 (biomarker of saprophytic/ectomycorrhizal fungi) demonstrate that no-till practice improves AMF biomass and saprotrophic/ectomycorrhizal fungal biomasses by 52 and 159%, respectively, in comparison with those found in a CS field. In both treatments, no-till farming and CS plots, the AMF biomass is higher than saprotrophic/ectomycorrhizal biomasses. The natural biodiversity of AMF is also enhanced in a no-till field. In addition, an increase in the relative abundance of six families of Glomeromycota (Gigasporaceae, Diversisporaceae, Scutellosporaceae, Entrophosporaceae, Acaulosporaceae, Dentiscutataceae) was observed. To summarize, the present study highlights the importance of no-till practice as an approach to restore the microbiome in soils disturbed by tillage in semi-arid regions.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi, no-till farming, conventionnel seedling, lipid biomarkers, root endophytes, semi-arid region

1. Introduction

Maintaining a reliable and sustainable agricultural production system has become one of the major concerns of producers in arid and semi-arid regions (Lyons et al., 1996; Bruelle et al., 2017). Simplifying farming techniques and using no-till techniques contribute to ensure the sustainability of agriculture, preserving the natural resources and the environment. To cope with the various constraints, including drought, many countries around the world (The United States, Argentina, Chile, Brazil, and Australia), have adopted the simplification of cultural techniques, known as SCT (Freitas et al., 2013; Bellotti et al., 2014). In 2007, the extension of this system was about 95 million hectares (Lal et al., 2007), and presently it exceeds 125 million hectares (Bruelle et al., 2017).

In Algeria, cereals are rainfed crops that occupy an annual area of 3.5 million hectares (Rouabhi et al., 2019). They are mainly located in the east of the country, in the semi-arid regions of the High Plateaus, where yearly rainfall levels are less than 400mm. Soils of these regions are predominantly calcareous with low levels of soil organic matter (Batouche & Labiod, 1991). The combined effects of all these factors affect cereal production, and yields remain low even though the cultivated varieties are improved (Lahmar & Ruellan, 2007). Cultivation of cereals is conducted according to the soil conventional tillage system, based mainly on soil plowing to control weeds, preparing seedlings, incorporating residue crops and fertilizers, and increasing water infiltration. Conventional farming system increases grain production costs and threat of soil erosion (about 2000 to 4000 tons/km² of soil are lost) (Kaci et al., 2017; Arabi & Roose, 1989), especially when combined with overgrazing.

Compared to other farming systems, conventional soil tillage (CT) influences the soil physical characteristics. It increases the soil pulverization at 0-10cm depth leading to lower bulk density and higher macroporosity, which facilitates water erosion. In layers below 10 cm depth, CT increases bulk density and reduces the macro-porosity to critical levels for crop growth (Tuzzin de Moraes et al., 2016), which increases the risk of soil compaction, penetration resistance and affects their biological activity (Babujia et al., 2010; Aslam, 1999).

Conservation agriculture (CA) is a more recent innovation that combines soil cover-organic-mulch, reduced plowing or no-till practice and crop rotation. It is currently promoted as a means to reduce soil degradation in the Mediterranean semi-arid areas (Lahmar & Bouzerzour, 2011). A number of experiments and research results from Spain, Morocco and Tunisia, underlines the prominent role of the organic mulch in the improvements that occur in the soil, and suggest that no-till practice is a plausible alternative to conventional tillage (Mrabet, 2001; Lahmar & Arrúe, 2007; Lahmar, 2010; Vega et al., 2015). However, the adoption of no-till farming should be done in an integrated approach, allowing good management of rotations, judicious control of weeds, diseases and the attack of herbivores while minimizing the use of chemical inputs (Karuma et al., 2014). This will promote biological activity and microbial biomass in soils (Labreuche et al., 2007). Celik et al. (2011) have specified that no-tillage practices under a semi-arid climate have considerably increased the number of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) spores in the soil. Indeed, for cultivated cereal species, direct seedling promotes interactions between the root system and the symbiotic fungi such as Dark Septated Endophytes (DSE) or AMF (Jansa et al., 2006; Schalamuk et al., 2006; Duponnois et al., 2012).

AMF symbiotic interactions allow the host plant to tolerate abiotic stress through a structural change of the root system and especially by providing them better water and mineral nutritions (Rodriguez et al., 2004; Soka & Ritchie, 2014; Wu, 2017). Root Dark Septate Endophytes (DSE) are fungi that locate and grow between root tissues (Vega et al., 2008). They are characterized by having dark pigmentation, microsclerotia and melanized septated hyphae that colonizes the epidermis as well as the inter and intracellular root cortex of the host plant (Peterson et al., 2008). Many of these fungi are able to colonize the root cells of plants, promoting growth without causing pathologies (Clay, 2004; Yuan et al., 2010; Vergara et al., 2018). DSE are found worldwide and coexist often with different mycorrhizal fungi (Mandyam & Jumpponen, 2005, 2008).

In Algeria, only 5,559 ha of cereal areas are converted to no-till farming as a result of sensitization campaigns carried out by agricultural research and development institutions. They encourage farmers to adopt the no-till farming system in order to reduce the environmental and economic costs of agricultural production (Zeghouane et al., 2015, 2016).

Consequently, whilst aiming to compare the effect of no-till farming and conventional seedling systems on two important types of fungal root symbiosis-arbuscular mycorrhiza and dark septated endophytic fungi of durum wheat in a field experiment, the present study lasted five years.

2. Material and Methods

2.1 Experimental Site

This study was carried out from 2008 to 2013, at the agronomic experimental station of the Technical Institute of Field Crops (ITGC) of Sétif (latitude, 36°08' N; longitude, 5°20' E and altitude 962 m. The climate is Mediterranean and semi-arid, characterized by cold wet winters and hot dry summers. During the experiment, the average annual rainfall did not exceed 400 mm and presented some irregularity in distribution, with large inter-month and inter-annual variations. The dry season was usually noted from May to September (Figure 1).

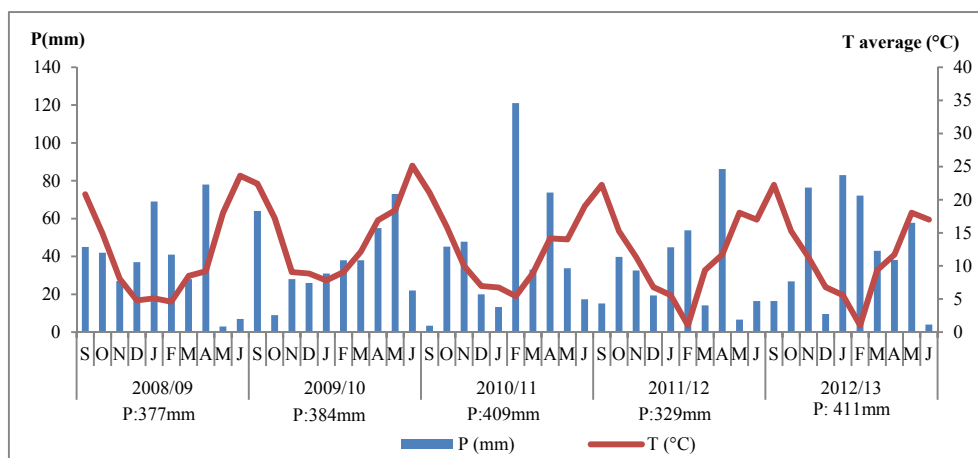


Figure 1. Evolution of precipitation and temperature during the five years of field experimental trial conducted at the agronomic experimental station of the Technical Institute of Field Crops (ITGC) of Setif (ONM National Office of the meteorology).

Soil characterization analyses of the experimental plot were made by the Technical Institute of Field Crops (ITGC) at the beginning of the project. They indicated that on the horizons which delimited the first thirty centimeters of topsoil, the soil of the experimental plot had a clay-sandy-loamy texture, with an average organic matter content of 2.6%. Basic pH (8.26) justified the strong presence of total and active limestone (51.58%; 21.25%), which weakened the availability of absorbable phosphorus (7.33 ppm) (Table 1).

Table 1. Physicals and chemicals characteristics of the soil in the experimental field

Physical characteristics %			Chemical characteristics					Organic characteristics	
Silt	Clay	Sand	CE (mmho/cm)	pH	Total CaCO ₃ (%)	Actif CaCO ₃ (%)	Available P ₂ O ₅ (ppm)	OM (%)	C org (mg g ⁻¹)
34.66	34.66	30.66	0.175	8.26	51.58	21.25	7.33	2.6	1.51

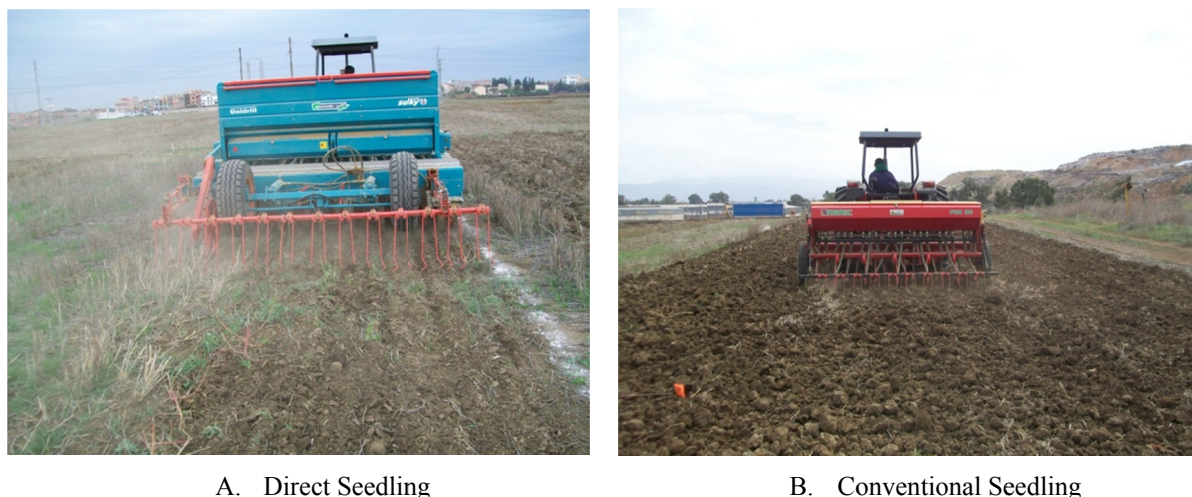
Note. Available phosphorus (Olsen Phosphorus) was determined by the Olsen et al. (1954) method.

The soil organic carbon was determined by means of the Anne method.

The total and active carbon dosages were made by the methods of Bernard's calcimeter and that of Drouineau, respectively. Soil Granulometry by the Robinson Method.

2.2 Plant Material and Field Conditions

The studied variety of durum wheat used in the present study is named "Boussalem". It was obtained from the Sétif experimental station (Heider/Marli/Heider Cro ICD4141BLCTR4AP) on an ICARDA-CIMMYT introduced material. The experimental design was based on the application of two soil management practices: 1) No-till with seedling (SD) carried out directly in the residue of the previous crop, using a combined seeder (SEMEATO) which opened only a seed line with 2 cm of width; 2) Conventional seedling (CS), where the soil was prepared with a moldboard plough followed by a cover crop and a disc harrow. Seedling was carried out by means of a conventional seed drill (Figure 2).



A. Direct Seeding

B. Conventional Seeding

Figure 2. Photos of the both seeders used in the experiment

Note. The previous crop is a durum wheat, two treatments are conducted as follows: Direct Seeding (A): No Tillage; Conventional Seeding (B): Mouldboard plough + Cover Crop + disc harrow.

Seedling rate was of 130 kg/ha. Farming techniques applied on the fields during the five years of the experiment culture are described in Table 2.

Table 2. Culture conditions applied to the plots of the field trial

Years of study	Soil tillage		Herbicides Treatment		Fertilizers		Sowing dates	
	DS	CS	DS	CS	DS	CS	DS	CS
A1 (2008/09)			Topic 0.75 l/ha				10/11/2008	
-----			Grand star 15 g/ha				-----	
A2 (2009/10)			Glyphosate 2 l/ha		*TSP (46%) 100 kg/ha		03/11/2009	
			Glyphosate 2 l/ha		Before sowing		-----	
A3 (2010/11)	No tillage	Mouldboard plough + Cover Crop + disc harrow	Rymbi 0.75 l/ha				28/11/2010	
			Grand star 15 g/ha		Urée (46%) 100 kg/ha		-----	
A4 (2011/12)			Glyphosate 3 l/ha		Tillage Stage		12/01/2012	
-----			Pallas OD				-----	
A5 (2012/13)			(Pyroxilam 45 g/l) 0.5 l/ha				09/01/2013	

Note. DS: no-till farming system; CS: Conventional Seeding; TSP: Tri Sulfate of Phosphate.

*The high presence of weeds in no-till plots necessitated a total weeding before sowing with glyphosate and at post-emergence with Grand star (anti dicotyledonous) mixed with Brumby (anti monocotyledons) or with Pallas OD (anti dicotyledonous and monocotyledons).

* The conventional seeding trial was only subjected to post-emergence weeding.

* The change of products for the last two campaigns is justified by the appearance of Brome plants (*Bromus rubens*) which is controlled by the Pallas OD herbicide and not by the other previous products.

For the two treatments, the plots had 180m² of area with three replicates per treatment, and they were distributed following a completely randomized bloc design (Figure 3).

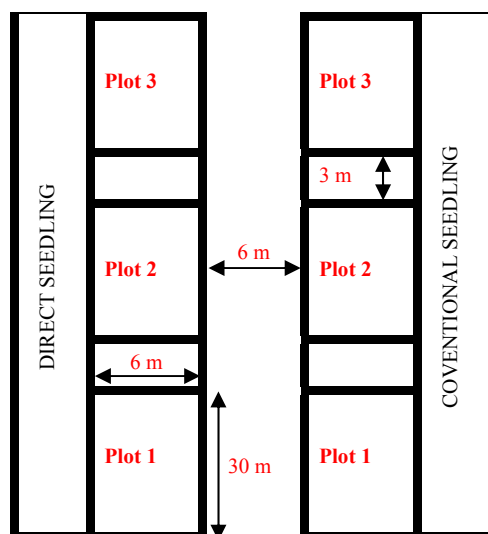


Figure 3. The experimental design applied during the five years of experimentation

Note. Test with six plots with 180 m² (6 m × 30 m) arranged as a complete random block (CRB).

2.3 Plant and Soil Sampling

The experimental trial was field-installed in 2008, but our observations started in the third year of testing (2010-2011) and proceeded as follows:

2.3.1 Soil Fatty Acid Analysis

Two soil samples were taken from each plot at a depth of 10 cm with an auger, following the harvest of the 2010/2011 trial (third year of application of the two different operating systems). After removing plant debris from soil samples, four replicates of 3 g of freeze-dried soil (from each soil sample) were analysed to measure the phospholipid fatty acid (PLFA) contents. Amounts of PLFA and neutral fatty acid (NLFA) specific to AMF (C16:1 ω 5) and to saprotrophic/ectomycorrhizal fungi (C18:2 ω 6.9) were measured.

Lipid extraction was carried out following the method suggested by Frostegård et al. (1991). The extracted lipids were fractionated into neutral lipids, glycolipids and polar lipids on a silica acid column by successively eluting with chloroform, acetone and methanol (1:2:1, V:V:V). Chloroform fraction (containing the neutral lipids) and the methanol fraction (containing the phospholipids) were subjected to a transesterification using a base solution (KOH 0.2 M) prepared in methanol to transform the PLFA and the NLFA into free fatty acid methyl esters. Final extracts were analysed by using a PerkinElmer Auto system gas chromatograph (GC) equipped with a flame-ionization detector (Norwalk, CT) and an EC-1000 (Alltech) capillary column (30 m × 0.53 mm i.d.) with hydrogen as a carrier gas (3.6 ml min⁻¹). The temperature program included a fast rising from 50 °C to 150 °C at 15 °C min⁻¹ and then a rise from 150 to 220 °C at 5 °C min⁻¹. Fatty acid quantification was made by using nonadecanoic acid methyl ester (C19:0) as an internal standard. Their identification relied on the retention times of a wide range of standards (fatty acid methyl ester mixtures C4-C24:1, Sigma Aldrich) and mass analysis. The system was operated in the constant linear velocity (70 cm s⁻¹) using helium as a carrier gas. Fatty acids were identified by comparing their mass spectra with the standard mass spectra in the NIST MS library.

2.3.2 Determination of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Colonization

To estimate the root colonization by AMF, during three stages of the vegetative cycle of wheat (tillering, grain filling and grain maturity), 6 plants/plot/stage for each treatment were sampled in 2011, 2012 and 2013 (last three years of the experiment). The measurement was performed on fresh roots. Roots were soaked during 5 min in an H₂O₂ (30%) bath to remove pigments, cleared in KOH (10%) and stained with Trypan blue (0.05%) (Phillips & Hayman, 1970). Root mycorrhizal rates were calculated using a magnified grid line intersect method (Mc Gonigle et al., 1990). For each repetition three microscopic slides with ten randomly root fragments (1 cm) were observed under an optical microscope (× 100). Intersections were counted in the following categories: negative (no fungal material in root), arbuscules, vesicles and hyphae. This made it possible to quantify the following rates:

$$H\% = (G - p)/G \times 100; Arb\% = (q + s)/G \times 100; Ves\% = (r + s)/G \times 100 \quad (1)$$

where, G: total number of intersections; p: no mycorrhizal structure; q: presence of arbuscules; r: presence of vesicles; s: presence of arbuscules and vesicles.

2.3.3 Determination of Dark Septated Endophytic Fungal Root Colonization Rate

The estimation of root colonization was completed in 2013 by the observation of structures specific to dark septated endophytic fungi (DSE). Microscopic observations were performed on the same slides used for AMF but focused on the structures specific to DSE (dark septated hyphae, microsclerotia) in the root cortex and the central cylinder. The rate of DSE (DSE%) was calculated according to the following formula:

$$DSE\% = E/G \times 100 \quad (2)$$

where, E: presence of DSE structures; G: total number of intersections, using the method suggested by McGonigle et al. (1990).

2.3.4 Biodiversity of AMF Species

Soil samples were collected during the grain filling stage in the last year of the study. Two soil samples were taken from the rhizosphere zone per plot for each treatment. A mixed homogenized sample was made for each plot to form three samples per treatment. AMF spores were extracted from 100 g of soil using the wet-sieving method (Gerdemann & Nicolson, 1963) followed by flotation-centrifugation in 50% sucrose (Dalpé, 1993). The spores were isolated from supernatant on a filter paper and were counted using a stereomicroscope at $\times 40$ magnification to determine the total density of AMF (density of spores per 100 g of soil collected in each studied plot). Spores were thus classified by spore morphotype (size, color, hyphae) (Gerdemann & Trappe, 1974) and then mounted in polyvinyl alcohol-lacto-glycerol (PVLG) with or without Melzer's reagent on microscopic slides. Observations were carried out under an optical microscope ($\times 100$ magnification). Identification, based on morphological characters, was performed using the INVAM website: <http://invam.wvu.edu>. Following identification, AMF species richness was evaluated based on the number of species present in each treatment.

The relative abundance of each species in each treatment was calculated following the method provided by Johnson et al. (1991):

$$RA\% = (n/N) \times 100 \quad (3)$$

Where, n = number of identified spores, N = total number of spores. This made it possible to determine the relative abundance of each spore family.

2.3.5 Carbon and Nitrogen Stocks

An analysis of organic matter and mineral nitrogen was performed on the soil samples after harvesting during the last year of the experiment. Two soil samples per plot and replicate were taken from a 10-cm depth for each treatment. The soil organic carbon was determined by means of the Anne method (Aubert, 1978). The quantification of total nitrogen was determined according to the KJELDAHL method (Bremner et al., 1982).

2.3.6 Grain Yield Evaluation

The grain yield was determined after harvesting for each plot area, during the five years of testing (Grignac, 1986).

2.4 Statistical Analysis

An analysis of variance with a Newman and Keuls test for the comparison of means was applied to the data ($p < 0.05$) with Statbox 2012 software. The Percentage data was transformed by a square root procedure.

3. Results

3.1 Effect of Farming System on Wheat Mycorrhizal Colonization

The results of the three years of observation showed that the total mycorrhizal rate was about 90% at the tillering stage and during grain filling. At the grain maturity stage, this rate decreased until reaching 26% in the last year. However, during this latter stage, no-till treatment showed a higher mycorrhizal root colonization compared to conventional seedling. This increase was about 22% during the second year of observation, and it reached 45% during the last year (Figure 4). Arbuscules were higher in plant roots sampled from the no-till farming plots than those from the conventional seeding plots during all the time of the trial. At the second year of observation, the arbuscules reached in no-till plots 65% and 45% at tillering and filling stages of the grain, respectively. However, in the conventional seedling system, it did not exceed 25%. While this increase continued during the last year of the experiment until reaching 80% at tillering stage, it remained stable in conventional seedling (Figure 4).

Contrary to this evolution, the vesicles were found to have increased in the conventional seedling plots, especially in the grain filling stage (Figure 4).

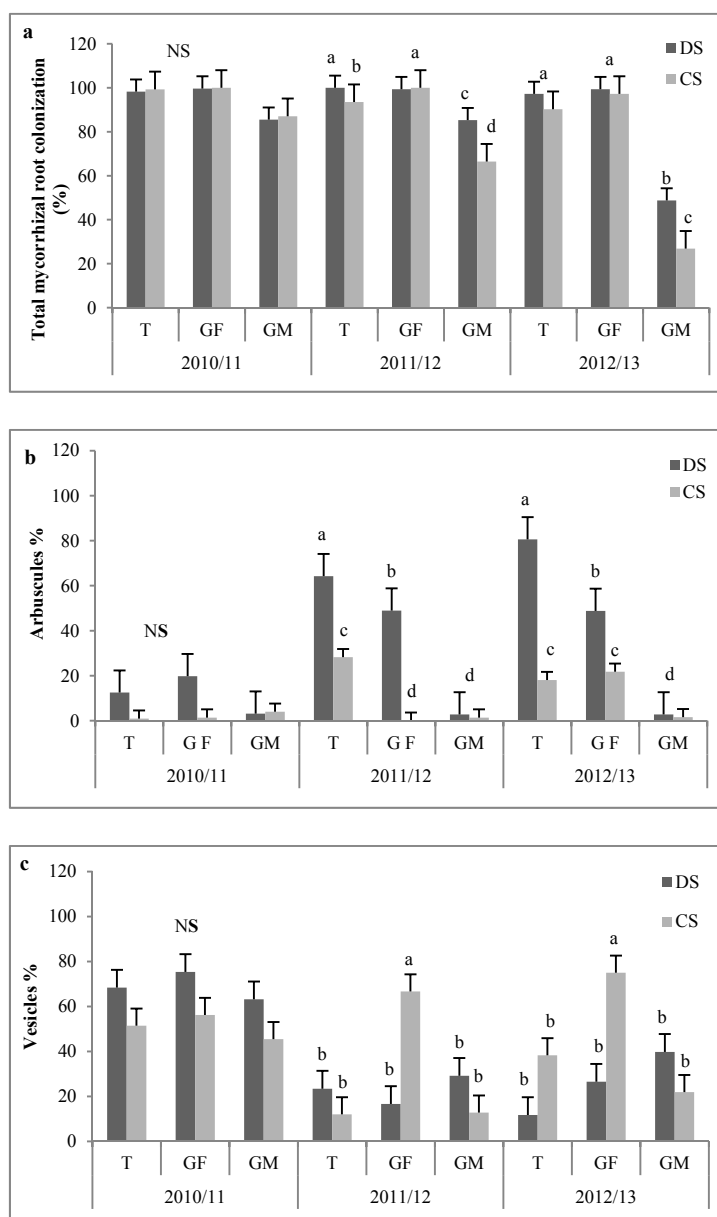


Figure 4. Effect of conventional seedling (CS) and no-till farming system (DS) on total mycorrhizal root colonization (a), arbuscules (b) and vesicles(c) percentage during the last three-years of the experiment for the three plant growth stages

Note. T: tillering, GF: grain filling, GM: Grain maturity. Means were obtained from 3 replicates. Significant differences between CS and DS are reported according to the Newman-Keuls test ($P < 0.05$).

3.2 Effect of Cultivation System on AMF Diversity

Spores density varied from 1280 spores to 2114 spores isolated from the soil of conventional and in direct seedling plots respectively. A total of 21 AMF species belonging to 7 families were identified. The AMF richness values of direct and conventional seedling soils were estimated respectively to 85.71 and 66.67% of the total estimated richness.

Seven species were found exclusively in direct seedling soil. Among them five species of Acaulosporaceae (*Acaulospora scrobiculata*; *Acaulospora koskei*; *Acaulospora thomii*; *Acaulospora capsicula*; *Acaulospora denticulata*) and two species of Gigasporaceae (*Gigaspora albida* and *Gigaspora margarita*) with respective relative abundance (38 and 33%) for two families. Three species of Glomeraceae (*G. mossae*, *G. aggregates* and *G. ambisporum*) were occurred only in the conventional seedling soil.

Eleven species were present in both treatments but more abundant in plots conducted in the no-till system (Figure 5). The respective relative abundance in DS/CS was as follows: Gigasporaceae (13.4%/7.4%) with one species (*Gigaspora decipiens*); Diversisporaceae (12.8%/5.5%) with the species *Diversispora tortuosa*; Scutellosporaceae (24%/10.5%) with the species *Scutellospora scutata* and *Scutellospora calospora* and Entrophosporaceae (15.6%/3.7%) with *Entrophospora infrequens*. Dentiscutataceae were rarely present in the conventional seedling plots and are poorly present in the no-till plots (7.8%/0.2%) with *Dentiscutata erythropha* and *Dentiscutata nigra*. Glomeraceae had a dominant presence in the soil of both treatments, but their relative abundance is higher in conventional seedling (58.7%/76.6%) with (*G. intraradices*; *G. fasciculatus*; *G. gerdemanni* and *G. multicaule*) (Table 3 and Figure 5).

Table 3. AMF spore species isolated from the soil of the experimental field plots, for each treatment (DS: no-till farming system; CS: conventional seedling) in the last year of the trial

Family/Species	DS	CS
Glomeraceae		
<i>G. intraradices</i>	x	x
<i>G. fasciculatus</i>	x	x
<i>G. gerdemanni</i>	x	x
<i>G. multicaule</i>	x	x
<i>G. mossae</i>		x
<i>G. aggregates</i>		x
<i>G. ambisporum</i>		x

Acaulosporaceae		
<i>A. koskei</i>	x	
<i>A. thomii</i>	x	
<i>A. capsicula</i>	x	
<i>A. denticulata</i>	x	
<i>A. scrobiculata</i>	x	

Gigasporaceae		
<i>Gg. Albida</i>	x	
<i>Gg. margarita</i>	x	
<i>Gg. decipiens</i>	x	x

Dentiscutataceae		
<i>D. erythropha</i>	x	x
<i>D. nigra</i>	x	x

Diversisporaceae		
<i>D. tortuosa</i>	x	x

Scutellosporaceae		
<i>S. scutata</i>	x	x
<i>S. calospora</i>	x	x

Entrophosporaceae		
<i>E. infrequens</i>	x	x

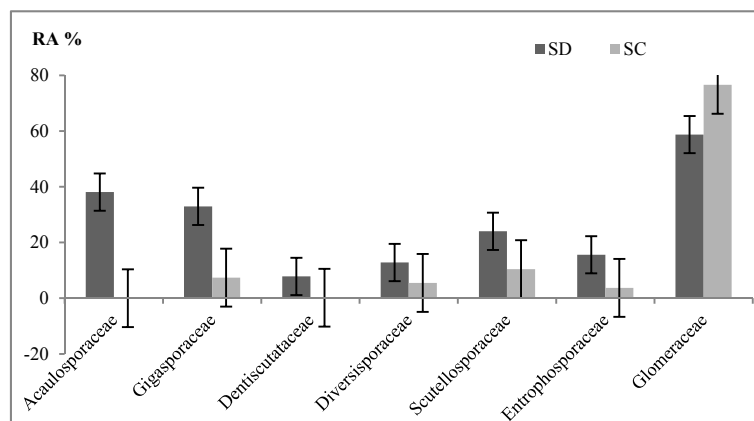


Figure 5. Influence of conventional seedling (CS) and no-till farming system (DS) on the relative abundance (RA%) of Glomales families. Means were obtained from 3 replicates

3.3 Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Dark Septate Endophytic Root Colonization

The comparative measurement of wheat root colonization by symbiotic structures specific to AMF and those of dark septate endophytic fungi (DSE) showed that mycorrhizal colonization remained more important in both treatments in comparison with DSE root colonization. The latter reached 40% in conventional seedling and 57% in the no-till farming plots, while AMF root colonization exceeded 90% in both treatments (Figure 6).

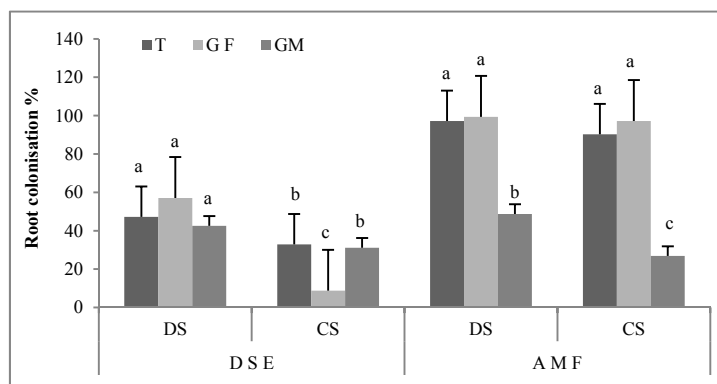


Figure 6. Influence of conventional seedling (CS) and no-till farming system (DS) on mycorrhizal and dark septated endophytic fungi root colonization, after five years of experimentation for the principal stages of plant growth

Note. T: tillering, G F: grain filling, GM: Grain maturity. Means were obtained from 3 replicates. Different letters indicate significant differences between DS and CS according to the Newman-Keuls test ($P < 0.05$).

3.4 Effect of the Farming System on Soil Fungal Biomass

Quantification of microbial biomass by means of specific lipid biomarkers showed that the amounts of PLFA C16:1 ω 5, a specific fatty acid of AMF, increased by 52% in the no-till plots (DS) compared to the conventional seedling ones with respective values of (DS 1.07/CS 0.70) nanomoles g^{-1} of soil. Similarly, the amount of PLFA C18:2 ω 6.9 used to quantify saprotrophic and ectomycorrhizal fungal biomasses increased by 159% with respective values of (DS 0.96/CS 0.37) nanomoles g^{-1} of soil. C16:1 ω 5 PLFA amounts were higher than C18:2 ω 6.9 PLFA both in the no-till and conventional seedling plots (Figure 7). In contrast, the content of C16:1 ω 5 NLFA representing mainly the storage structures of the AMF (vesicles and spores) was almost the same for both treatments: 1.6 nanomoles/g of soil.

The NLFA/PLFA ratio of C16:1 ω 5 fatty acid was superior to 1 indicating that the C16:1 ω 5 fatty acid was originating from AMF and not bacteria.

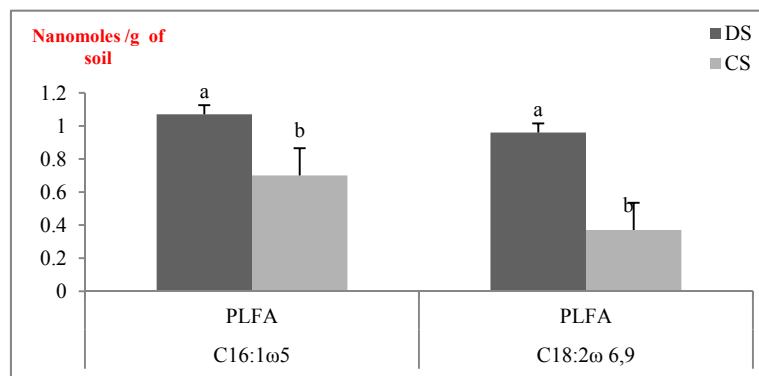


Figure 7. Amounts of phospholipid fatty acid (PLFA) (C16:1ω5) specific to AMF and (C18:2 w 6,9) specific to saprotrophic/ectomycorrhizal fungi in root-free soil in no-till farming system (DS) and conventional seedling (CS), after three years of experiment. Means were obtained from 6 replicates. Different letters indicate significant differences between DS and CS according to the Newman-Keuls test ($P < 0.05$)

3.5 Organic Matter and Nitrogen Amounts in the Soil

The results showed that after five years of no-till farming, the soil organic matter and organic carbon contents increased by 29% compared to conventional seedling. However, this increase was statistically insignificant, and the soil organic matter (SOM) remained low for respectively the no-till and conventional seedling systems (3.71 and 2.62%) (Figure 8). The mineral nitrogen content remained similar for the two cultural systems (0.17%) (Figure 8). The C/N ratio was improved by 27%.

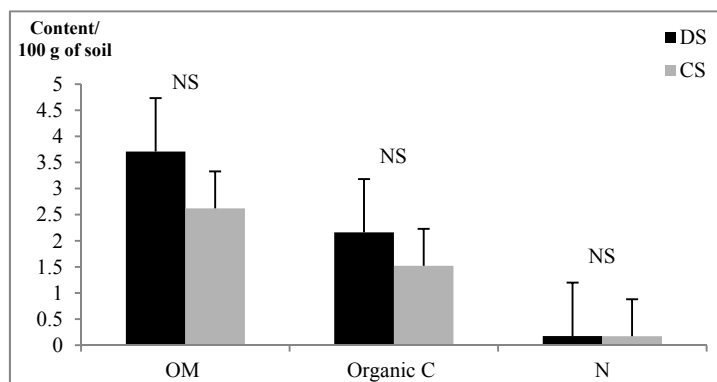


Figure 8. The effect of conventional seedling (CS) and no-till farming (DS), after five years of experimentation, on soil organic matter organic carbon and nitrogen amounts. Means were obtained from 3 replicates. (NS) No significant differences between DS and CS according Newman-Keuls test ($P < 0.05$) were observed

3.6 Grain Yields

In the first three years of the experiment, the wheat grain yield was higher in plots conducted in the direct seedling system compared to the conventional seedling system (Figure 9). The recorded grains are 1.6; 3.6 and 3 t/ha respectively for the three years of trial. However, in the last two years, cereal yields were similar for both systems.

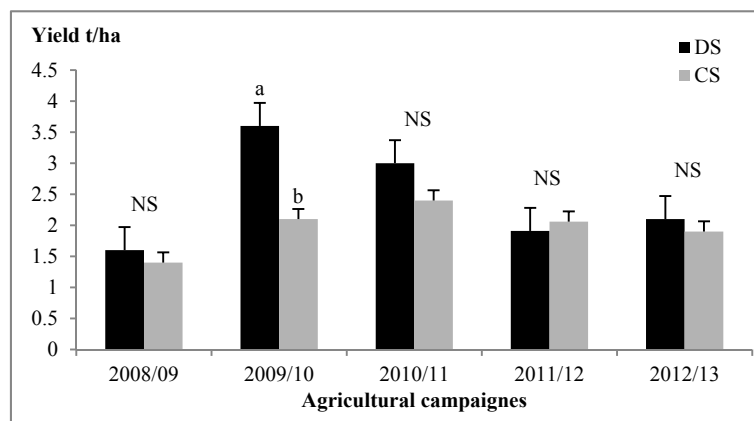


Figure 9. Wheat grain yield during the five years trials in no-till farming system and in conventional one. Means were obtained from 3 replicates. Different letters indicate significant differences between DS and CS according to the Newman-Keuls test ($P < 0.05$)

4. Discussion

This long-term study of durum wheat rainfed crop in the east of Algeria, in no-till farming and in the conventional seedling system, has allowed us to determine the effect of these two farming systems on the establishment of a mycorrhizal symbiosis and the diversity of AMF in the field.

After three years of no-till practice, the amounts of PLFA biomarkers (C16:1 ω 5 for AMF) showed an increase in AM fungal biomass in the soil compared to those found in the conventional plots (Figure 7). This reflects a better growth and establishment of extra-radical AMF mycelium (Olsson et al., 1998). Alguacil et al. (2008) reported that the persistence of AM fungi in the soil depends on the survival of their active propagules (e.g. spores, hyphens, colonized roots). Our findings are in agreement with those of Roldan et al. (2007) who observed the highest levels of mycorrhizal propagules in the soil of maize and bean crops without tillage compared to tillage soils.

Under the same conditions, an improvement of saprotrophic and ectomycorrhizal fungi biomass was observed through the measurements of PLFA biomarkers: C18:2 ω 6.9. Consequently, one may say that the no-till system promotes the presence of a mulch of crop residues on the soil surface over a thickness varying from 5 to 30 cm, which may cause the increase in the biomass of the microbial community (Aslam et al., 1999; Balota et al., 2004; Babujia et al., 2010; Kabiri et al., 2016). On the other hand, tillage in conventional seedling causes a dilution of the organic matter and disturbs the fungal mycelium biomass. Our results are consistent with those reached by Bourgeois et al. (2015) and Lienhard et al. (2014), who claim that stopping tillage avoids physical disruption of mycelial hyphae and preserves microbial habitat.

Mycorrhizal and saprophytic fungi constitute the major component of the microbial community of unplowed soils or those with reduced soil tillage (Fontaine et al., 2003). The most intensively managed soils have the highest relative abundance of bacteria and actinobacteria (García-Orenes et al., 2013).

Our results showed that AMF biomass was higher than saprotrophic and ectomycorrhizal biomasses in both no-till farming and conventional seedling plots. Similar findings have been reported by Olsson et al. (1999) in cultivated soils. Van Groenigen et al. (2010) have shown, using both ergosterol and PLFA analyses, that while reduced tillage increased biomass of saprotrophic fungi in the 0-5 cm soil layer, it increased AMF biomass across the whole plough layer. The aridity of the study area (a rainfall close to 400 mm) may explain the dominance of the AMF biomass (Rodriguez et al., 2004; Duponnois et al., 2012; Nadjj et al., 2017). Similarly, some characteristics of the study area soil such as the low total phosphorus level (Nadjj et al., 2017) and the alkaline soil pH in relation with limestone mother rock (Djebaili et al., 1984; Halitim et al., 1988) also contributes to the AMF installation. Coutinho et al. (2015) reported that low levels of phosphorus allow production by AMF of a large number of propagules in an environment with few nutrients. This highlights the adaptation of endogenous mycorrhizal fungi strains to the soil physicochemical characteristics (Meglouli et al., 2018). Moreover, the monoculture facilitates the AMF installation because the presence or absence of host plant is important in the occurrence of colonization and sporulation of AMF (Cavalcante et al., 2009; Coutinho et al., 2015).

The root colonization also demonstrated a predominance of the number of intra-radicular structures specific to AM compared to the dark septated endophytic fungi (Figure 6). This is in accordance with the work of Jansa et al. (2006), who have observed a competitive effect of mycorrhizal fungi on non-mycorrhizal fungi and have claimed that this effect is promoted by reduced tillage. Olsson (1998) maintains that there is a negative impact of AMF on the growth of saprotrophic fungi in calcareous dune sand. However, Keenan et al. (2007) and Liu et al. (2011) showed that the presence of saprotrophic fungi in Gramineae crops reduced the density of AMF spores in the soil and mycorrhizal root colonization could be decrease by 50%.

The emergence of arbuscules in the root cortex of the no-till farming plants at the fourth year of this experiment is likely to reflect a good AMF activity, as put forward by Jansa et al. (2006) and Curaqueo et al. (2010). Their significant positive evolution from the early stage to the last year of the vegetative cycle demonstrates the efficiency of no-till farming in comparison with the conventional seedling system (Figure 4). In fact, arbuscules are the main symbiotic structures ensuring the exchanges between both symbiotic partners (Brundrett et al., 1996, Balestrini et al., 2015).

In our experiment, we observed a large production of vesicles in the cortical compartments of the plant roots grown under the conventional seedling system. The vesicles are carbon storage structures in particular lipids, obtained from the host plant (Brundrett et al., 1996; Olsson, 1999, Trépanier et al., 2005). Vesicle formation is abundant at the end of the growth cycle of the host plant (Al-Karaki et al., 2004). It is a mean of conservation and propagation of fungi (Staddon & Fitter, 2001). At this stage, AMF will be disconnected from the root of their host plant and deprived of their usual source of energy, thereby catabolising the lipids stored in the vesicles (Olsson, 1998). Under the conditions of the conventional sowing system, the vesicles formation occurred at the grain filling stage reflected a negative partnership between the host plant (durum wheat) and the AMF.

AMF are obligate biotrophs and constitute a strong sink for plant carbon (Gavito et al., 2019) they take advantage of 3% to 20% of the carbon substances produced by the host plant (Strullu et al., 1991; Smith & Read, 2008; Garbaye, 2013). These reserves stored in the vesicles will allow the AMF to develop extended extraradical hyphal networks for efficient soil exploration (Keymer et al., 2017). The growth of the mycelial networks requires a large amount of energy and carbon building blocks, which are transported mostly as lipid droplets and glycogen to the growing hyphal tips (Bago et al., 2002, 2003). The destruction of the hyphal network by tillage explains the high presence of vesicles in the roots of plants growing under the conditions of conventional seeding.

AMF biodiversity studied in the last year of the trial showed the positive effect of no-till farming on the values of spore density and total species richness. Several studies reported the effect of soil tillage on the diversity and structure of AMF in temperate (Jansa et al., 2002, 2003), tropical (Boddington & Dodd, 2000) subtropical (Alguacil et al., 2008) and Mediterranean soils (Brito et al., 2012). Our findings are in agreement with these studies indicating that intensification of agriculture practices affects negatively AMF abundance and diversity.

The twenty-one species belonging to the seven families of Glomales recorded in the soil of the experimental plot reflect a high AMF diversity. Nadji et al. (2017) reported the importance of diversity and abundance of mycorrhizal propagules in the eastern wheat fields of Algeria. However, a specific richness is observed in the no-tillering treatment soil, linked mainly to the presence of five species of Acaulosporaceae (*Acaulospora scrobiculata*; *Acaulospora koskei*; *Acaulospora thomii*; *Acaulospora capsicula*; *Acaulospora denticulata*) and two species of Gigasporaceae (*Gigaspora albida* and *Gigaspora margarita*) which completely disappeared in conventional seedling. Similarly Jansa et al. (2006) have reported that, after thirteen years of non-tillage testing, there is the presence of some species of AMF, especially those not belonging to the genus *Glomus* such as *Acaulospora paulinae*. Soka and Ritchie (2014) have explained that the hyphae of *Acaulospora laevis* completely lose their infectivity when the soil is disturbed.

In the Grime's classification of functional groups (Chagnon et al., 2013), the Acaulosporaceae family corresponds to the stress-tolerant AMF which produce less extraradical hyphae and intraradical root structures as compared to Glomeraceae and Gigasporaceae (Maherali & Klironomos, 2007; Chagnon et al., 2013) which may reduce the exposure to abiotic factors (i.e. drought, salinity, heavy metals, acidity) (Chagnon et al., 2013). These AMF are capable to complete their life cycle producing low biomass, which disappears under plowing in the conventional seedling soil.

Seven species were present in both treatments but more abundant in plots conducted in the no-till system. This is the case of (*Gigaspora decipiens*; *Diversispora tortuosa*; *Scutellospora scutata*; *Scutellospora calospora*; *Entrophospora infrequens*; *Dentiscutata erythropha* and *Dentiscutata nigra*). This finding is in line with the study of Jansa et al. (2006) which reported that *Scutellospora pellucida* and *Entrophospora infrequens* were most

abundant in no tilled soils. The work of Alguacil et al. (2008) showed an interaction between the tillage system and the host plant showing very significant differences between AM fungal populations for different managed tillage systems. They concluded that no-tillage system had in fact a higher number of fungal types colonizing bean and sorghum crops than the other management.

Spore diversity may also be related to root density which increases favorably under no-till conditions (Cardoso et al., 2003). Similarly, the more abundant weeds in direct seedling (Karkour, 2012) can be an intermediate host between AMF and the main crop (Kabir, 2005).

The Glomeraceae are predominant in both treatments, but their relative abundance was higher in conventional seedling. Three species of Glomeraceae (*G. mossae*, *G. aggregates* and *G. ambisporum*) were occurred only in the conventional seedling soil. The predominance of spores belonging to the family of Glomeraceae has also been recorded in some countries of Africa, particularly in the semi-arid zones of Senegal (Diallo et al., 1999) and Burkina Faso (Guissou, 2001). Schalamuk et al. (2006) have noted that Glomeraceae were more abundant in the conventional system, compared to the no-till farming system. The ubiquity of Glomeraceae family in disturbed environments is related to their ability to grow fast (de Souza et al., 2005), to sporulate rapidly and to restore a network of hyphae by quickly forming anastomoses between the different mycelial branches of the same or neighboring genotype (Giovannetti et al., 1999; Oehl et al., 2003; de la Providencia et al., 2005; Voets et al., 2006). They are therefore considered ruderal AMF (Van der Heijden & Scheublin, 2007).

Most Glomeraceae have been classified on the basis of their life-history strategies (LHS) as r-strategist because they invest mainly in the production of many offspring, favoring their development in unstable environments (Ijdo et al., 2010). In this sense (Johnson et al., 1992; Wang et al., 2008) reported in the tillage soil system, the plowed horizon is mainly occupied by AMF species less useful for crops and investing a large part of their resources in the production of spores.

In addition, Glomeraceae colonize via fragments of mycelium or mycorrhizal root pieces, and therefore have the ability to high root colonization and to develop larger extraradical hyphae (Declerck et al., 2001). In contrast, Gigasporaceae invest more energy in the production of extraradical biomass than in intraradical fungal structures (Hart et al., 2002; Maherali & Klironomos, 2007), they produce few and large spores (Johnson et al., 1992, de Souza et al., 2005; Wang et al., 2008) and propagate via sporal dispersal or infection from an intact mycelium (Biermann & Linderman, 1983, Daniell et al., 2001). Such differences clearly explain the dominance of Glomeraceae over Gigasporaceae in environments characterized by repeated severe physical disturbances, such as tillage agricultural practices and clearly explain the loss of species richness of Gigasporaceae by the deep burial of their propagules following the plowing (Oehl et al., 2004) (Jasper et al., 1991; Hart & Reader, 2004).

The presence of plant residues (mulch) contributes in the increase of the organic soil matter. This hypothesis is in line with Van Groenigen et al. (2010) study which has reported that, after twenty years of no-till operations, the soil organic carbon increases by 16% in humid temperate regions and by 10% in dry temperate regions, compared to conventional seedling. In our study, the soil organic matter and organic carbon contents showed a tendency increase of 29% in no-till plots (Figure 8). Contents of soil organic matter (SOM) and total nitrogen remained low for respectively the no-till and conventional seedling systems respectively (Figure 6), which reflects soil poor fertility.

This situation could be explained by the low amounts of cereal crop residues to return to the soil. In North Africa, often cereal residues are used as a pasture source for sheep farming (Lahmar & Ruellan, 2007). The monoculture (wheat/wheat), applied in our experiment, implies a slow-down of organic matter mineralization in comparison to crop rotation (cereal/legume).

An increase in yields observed in our experiment during the first three years of the no-tillage farming system (Figure 9), is consistent with the results reached by Angar et al. (2010), who have reported that durum wheat yields, during ten years of no tillage in a sub-humid zone of Tunisia, increased by 0.8 t/ha, compared to conventional seedling. In a semi-arid zone, this difference was lower (0.35 t/ha), and it reached 0.7 t/ha in the upper semi-arid areas.

Consequently, one may say that late sowing (12/01/2012 and 09/01/2013) (Table 3) during the last two years of experimentation does not allow a good early planting of the crop and limits the H₂O intake of the rainfall during the autumn season. These effects are to be added to the low temperatures of January and February that occur just after sowing, which prevents an adequate growth of plants by affecting their physiological development of meristems (Chassot et al., 2002). Chapman et al. (2001) have pointed the negative effect of low temperatures on the rate of mineralization of nitrogen in the soil. These factors together seem to be at the origin of the suppression of the positive effect of the no-till farming system during these two agricultural campaigns.

5. Conclusion

The results of our study demonstrated that the no-till farming system has a positive impact on the AMF symbiosis, as demonstrated by the increase of AMF biomass in the soil and the arbuscular root colonization percentages. Besides, in conventional seedling, root colonization was characterized by a strong presence of vesicles. The biodiversity of AMF was improved by the relative abundance of six families of Glomales and the emergence of new AMF species. These results are in favor of the adoption of the no-till system as an approach to restore the microbiome in agro-systems disturbed by tillage.

The aridity of our study area, the monoculture and the presence of a high level of soil limestone facilitated the predominance of the AMF root colonization over the other endophytic fungi.

For the sake of productivity and sustainability, it is desirable that a similar study be carried out using co-culture of wheat/legume rotation to improve nitrogen and soil organic matter levels. An economic study is also needed to assess the impact of no tillage technique on the cost of production and profitability of the crop.

Acknowledgements

This work is part of the Algerian-Australian Research and Cooperation Project (CANA) (Conservation Agriculture North Africa). The experimental trials were conducted on rainfed cereals in semi-arid areas, notably at the Experimental Station of the Technical Institute of Field Crops (ITGC) of Sétif, located in eastern Algeria. Our gratitude goes to the technical team of ITGC Sétif for the installation and conduct of field trials. We are grateful to Mrs Y. Dalpé and Mrs K. Bencherif for their valuable contribution to the identification of mycorrhizal spores. We also wish to thank Mrs N. Deguiche (ITGC) and Mr R. Bradai (INRA) for having carried out the analysis of organic matter and mineral nitrogen of the soil.

References

- Alguacil, M. M., Lumini, E., Roldan, A., Salinas-Garcia, J. R., & Bonfan, P. (2008). The impact of tillage practices on arbuscular mycorrhizal fungal diversity in subtropical crops. *Ecological Applications*, 18(2), 527-536. <https://doi.org/10.1890/07-0521.1>
- Alvarez, C. R., Alvarez, R., Rosa, C., & Roberto, A. (2000). Short-term effects of tillage systems on active soil microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*, 31(2), 157-16. <http://doi.org/10.1007/s003740050639>
- Angar, H., Ben Haj Salah, H., & Ben-Hammouda, M. (2011). Semis direct et semis conventionnel en Tunisie: Les résultats agronomiques de 10 ans de comparaison. In H. Bouzerzour, H. Irekti, & B. Vadon (Eds.), *Options Méditerranéennes: Série A, Séminaires Méditerranéens* (No. 96 pp. 53-59). Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct in Zaragoza: CIHEAM/ATU-PAM/INRAA/ITGC/FERT. <http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=801418>
- Arabi, M., & Roose, E. (1989). Influence du système de production et du sol sur l'érosion et le ruissellement en nappe en milieu montagnard méditerranéen (station d'Ouezra, Algérie). *Réseau d'Erosion* (Bulletin No. 9). Montpellier, ORSTOM.
- Aslam, T., Choudhary, M. A., & Saggar, S. (1999). Tillage impacts on soil microbial biomass C, N and P, earthworms and agronomy after two years of cropping following permanent pasture in New Zealand. *Soil and Tillage Research*, 51(1-2), 103-111. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00032-X)
- Aubert, G. (1978). *Méthodes d'analyses des sols* (p. 189). Edit C.R.D.P. Marseille.
- Babujia, L. C., Hungria, M., Franchini, J. C., & Brookes, P. C. (2010). Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(12), 2174-2181. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.08.013>
- Bago, B., Pfeffer, P. E., Abubaker, J., Jun, J., Allen, J. W., Brouillette, J., Shachar-Hill, Y. (2003). Carbon export from arbuscular mycorrhizal roots involves the translocation of carbohydrate as well as lipid. *Plant Physiology*, 131, 1496-1507. <https://doi.org/10.1104/pp.102.007765>
- Bago, B., Zipfel, W., Williams, R. M., Jun, J., Arreola, R., Lammers, P. J., Shachar-Hill, Y. (2002). Translocation and utilization of fungal storage lipid in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Plant Physiology*, 128, 108-124. <https://doi.org/10.1104/pp.010466>
- Balestrini, R., Lumini, E., Borriello, R., & Bianciotto, V. (2015). Plant-soil biota interactions. In E. A. Paul (Ed.), *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (pp. 311-338). London: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-415955-6.00011-6>

- Balota, E. L., Colozzi Filho, A., Andrade, D. S., & Dick, R. P. (2004). Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. *Soil and Tillage Research*, 77(2), 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.003>
- Batouches, S., & Labiod, H. (1991). *Les sols des hautes plaines sétifiennes, inventaire, analyse et synthèse des études pédologiques réalisées dans cette région de 1965 à 1985: Essais de thématization* (p. 133). Mém. Ing. Univ. Sétif.
- Bellotti, B., & Rochecouste, J. F. (2014). The Development of Conservation Agriculture in Australia Farmers as innovators. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(1), 1-34. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30011-3](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30011-3)
- Berner, A., Hildermann, I., Fließbach, A., Pfiffner, L., Niggli, U., & Mader, P. (2008). Crop yield and soil fertility response to reduced tillage under organic management. *Soil & Tillage Research*, 101, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.012>
- Biermann, B., & Linderman, R. G. (1983). Use of vesicular-arbuscular mycorrhizal roots, intraradical vesicles and extraradical vesicles as inoculum. *New Phytologist*, 95, 97-105. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1983.tb03472.x>
- Boddington, C. L., & Dodd, J. C. (2000). The effect of agricultural practices on the development of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi. I. Field studies in an Indone-sian ultisol. *Plant and Soil*, 218, 137-144. <https://doi.org/10.1023/A:1014966801446>
- Bourgeois, E., Dequiedt, S., Lelièvre, M., van Oort, F., Lamy, I., Maron, P. A., & Ranjard, L. (2015). Positive effect of the Miscanthus bioenergy crop on microbial diversity in wastewater-contaminated soil. *Environmental Chemistry Letters*, 13(4), 495-501. <http://doi.org/10.1007/s10311-015-0531-5>
- Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Total nitrogen. In A. L. Pages, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis* (2nd ed., Agronomy No. 9, pp. 595-622). ASA and SSSA, Madison, WI.
- Bruelle, G., Affholder, F., Abrell, T., Ripoché, A., Dusserre, J., Naudin, K., ... Scopel, E. (2017). Can conservation agriculture improve crop water availability in an erratic tropical climate producing water stress? A simple model applied to upland rice in Madagascar. *Agricultural Water Management*, 192, 281-293. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.020>
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., & Malajczuk, N. (1996). Working with Mycorrhizas. *Forestry and Agriculture* (Monograph 32, 374). ACIAR.
- Cardoso, I. M., Boddington, C., Jansen, B. H., Oenemaet, O., & Kuyper, T. W. (2003). Distribution of Mycorrhizal fungal spores in soils under agroforestry and monocultural coffee systems in Brazil. *Agroforestry Systems*, 58, 33-43. <https://doi.org/10.1023/A:1025479017393>
- 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012005000012>
- Cavalcante, U. M. T., Goto, B. T., & Maia, L. C. (2009) Aspectos da simbiose micorrizica arbuscular. *An Acad Pe Cien Agr*, 5(6), 180-208. <https://doi.org/10.1007/s00572-015-0636-5>
- Celik, I., Barut, Z. B., Ortas, I., Gok, M., Demirbas, A., Tulun, Y., & Akpınar, C. (2011). Impacts of different tillage practices on some soil microbiological properties and crop yield under semi-arid Mediterranean conditions. *International Journal of Plant Production*, 5(3), 237-254.
- Chagnon, P. L., Bradley, R. L., Maherali, H., & Klironomos, J. N. (2013). A trait-based framework to understand life history of mycorrhizal fungi. *Trends in Plant Science*, 18, 484-491. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.05.001>
- Chapman, P. J., Williams, B. L., & Hawkins, A. (2001). Influence of temperature and vegetation cover on soluble inorganic and organic nitrogen in a Spodosol. *Soil Biology & Biochemistry*, 33, 1113-1121. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00017-7)
- Chassot, A. (2000). *Early growth of roots and shoots of maize as affected by tillage-induced changes in soil physical properties* (p. 89, PhD Thesis, ETH Zürich). <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004132762>
- Clay, K. (2004). Fungi and the food of the gods. *Nature*, 427, 401-402. <https://doi.org/10.1038/427401a>

- Coutinho, E. S., Fernandes, G. W., Berbara, R. L. L., Valério, H. M., & Goto, B. T. (2015). Variation of arbuscular mycorrhizal fungal communities along an altitudinal gradient in rupestrian grasslands in Brazil. *Mycorrhiza*, 25(8), 627-638. <https://doi.org/10.1007/s00572-015-0636-5>
- Curaqueo, G., Acevedo, E., Cornejo, P., Seguel, A., Rubio, R., & Borie, F. (2010). Tillage Effect on Soil Organic Matter, Mycorrhizal Hyphae and Aggregates in a Mediterranean Agroecosystem. *R.C. Suelo Nutr. Veg.*, 10(1), 12-21. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912010000100002>
- Dalpe, Y. (1993). Vesicular-arbuscular mycorrhiza. In M. R. Carter (Ed.), *Soil sampling and methods of analysis* (pp. 287-301). Canadian Society for Soil Science, Lewis, Boca Raton, Fla.
- Daniell, T. J., Husband, R., Fitter, A. H., & Young, J. P. W. (2001). Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi colonizing arable crops. *FEMS Microbiology Ecology*, 36, 203-209. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2001.tb00841.x>
- De la Providencia, I. E., de Souza, F. A., Fernández, F., Séjalon Delmas, N., & Declerck, S. (2005). Arbuscular mycorrhizal fungi reveal distinct patterns of anastomosis formation and hyphal healing mechanisms between different phylogenetic groups. *New Phytologist*, 165, 261-271. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01236.x>
- De Souza, F., Dalpé, Y., Declerck, S., Providencia, I. de la, & Séjalon-Delmas, N. (2005). Life History strategies in Gigasporaceae: Insight from monoxenic culture. In S. Declerck, D. Strullu, & J. A. Fortin (Eds.), *In vitro culture of mycorrhizas* (pp. 74-94). Heidelberg, Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-27331-X_5
- Diallo, A. T., Samba, P. I., & Ducouso, M. (1999). Arbuscular mycorrhizal fungi in the semi-arid areas of Senegal. *European Journal of Soil Biology*, 35(2), 65-75. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(99\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(99)00110-7)
- Djebaili, S. (1984). *Steppes algériennes: Phytosociologie et écologie* (p. 177). Office des Publications Universitaires, Alger.
- Drijber, R. A., Doran, J. W., Parkhurst, A. M., & Lyon, D. J. (2000). Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(10), 1419-1430. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00060-2)
- Duponnois, R., Hafidi, M., Wahbi, S., Sanon, A., Galiana, A., Baudoin, E., Bally, R. (2012). La symbiose mycorrhizienne et la fertilité des sols dans les zones arides: un outil biologique sous-exploité dans la gestion des terres de la zone sahélo-saharienne. In A. Dia & D. Robin (Eds.), *La Grande Muraille Verte: Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux* (pp. 351-369). Marseille: IRD.
- FAO. (2003). *Economie de l'agriculture de conservation* (p. 77). Service de la gestion des terres et de la nutrition des plantes. Division de la mise en valeur des terres et des eaux. Rome, Italy.
- Fontaine, S., Mariotti, A., & Abbadie, L. (2003). The priming effect of organic matter: A question of Microbial competition? *Soil Biology and Biochemistry*, 35(6), 837-843. [http://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00123-8](http://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00123-8)
- Freitas, P. L., & Landers, J. N. (2013). The transformation of agriculture in Brazil through development and adoption of Zero Tillage Conservation Agriculture. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(1), 35-46. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30012-5](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30012-5)
- Frostegård, Å., Tunlid, A., & Bååth, E. (1991). Microbial biomass measured as total lipid phosphate in soils of different organic content. *J. Microbiol. Methods*, 14, 151-163. [https://doi.org/10.1016/0167-7012\(91\)90018-L](https://doi.org/10.1016/0167-7012(91)90018-L)
- Garbaye, J. (2013). *La symbiose mycorrhizienne, une association entre les plantes et les champignons*. Editions Quae.
- García-Orenes, F. A., Morugan-Coronado, R., & Zornoza Scow, K. (2013). Changes in Soil Microbial Community Structure Influenced by Agricultural Management Practices in a Mediterranean Agro-Ecosystem. *PLoS ONE*, 11(3), e0152958. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152958>
- Gavito, M. E., Jakobsen, I., Mikkelsen, T. N., & Mora, F. (2019). Direct evidence for modulation of photosynthesis by an arbuscular mycorrhizal induced carbon sink strength. *New Phytol.*, 223(2), 896-907. <https://doi.org/10.1111/nph.15806>
- Gerdeman, J. W., & Nicolson, T. H. (1963). Spore of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans. Brit. Mycol. Soc.*, 46, 235-244. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)

- Gerdman, J. W., & Trappe, J. M. (1974). The Endogonaceae in the Pacific Northwest. *Myc. Memoir.*, 5, 1-76.
- Giovannetti, M., Azzolini, D., & Citernesi, A. S. (1999) Anastomosis formation and nuclear and protoplasmic exchange in arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, 65, 5571-5575. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.12.5571-5575.1999>
- Grignac, P. (1986). Contraintes de l'environnement et élaboration du rendement dans la zone méditerranéenne française. *L'élaboration du rendement des cultures céréalières* (pp. 196-207). Colloque Franco Romain, Clermont-Ferrant.
- Halitim, A. (1988). *Sols des régions arides* (p. 384). Office des Publications Universitaires, Alger.
- Hart, M. M., & Reader, R. J. (2004). Do arbuscular mycorrhizal fungi recover from soil disturbance differently? *Tropical Ecology*, 45(1), 97-111.
- Ijdo, M., Schtickzelle, N., Cranenbrouck, S., & Declerck, S. (2010). Do arbuscular mycorrhizal fungi with contrasting life-history strategies differ in their responses to repeated defoliation? *FEMS Microbiology Ecology*, 72, 114-122. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00829.x>
- Jansa, J., Mozafar, A., Anken, T., Ruh, R., Sanders, I. R., & Frossard, E. (2002). Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. *Mycorrhiza*, 12, 225-234. <https://doi.org/10.1007/s00572-002-0163-z>
- Jansa, J., Mozafar, A., Kuhn, G., Anken, T., Ruh, R., Sanders, I. R., & Frossard, E. (2003). Soil tillage affects the community structure of mycorrhizal fungi in maize roots. *Ecological Applications*, 13, 1164-1. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2003\)13\[1164:STATCS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)13[1164:STATCS]2.0.CO;2)
- Jansa, J., Wiemken, A., & Frossard, E. (2006). The effects of agricultural practices on arbuscular Mycorrhizal fungi. *The Geological Society of London, Special Publications*, 266, 89-115. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.266.01.08>
- 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*, 118, 471-476. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1991.tb00029.x>
- Johansson, J. F., & Paul, L. R. (2004). Finlay RD Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiology Ecology*, 48, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.11.012>
- Johnson, N. C., Zak, D. R., Tilman, D., & Pflieger, F. L. (1991). Dynamics of vesicular-arbuscular mycorrhizaeduring old field succession. *Oecologia*, 86, 349-358. <https://doi.org/10.1007/BF00317600>
- Kabir, Z. (2005). Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae. *Can. J. Plant Sci.*, 85, 23-29. <https://doi.org/10.4141/P03-160>
- Kabiri, V., Raiesi, F., & Ghazavi, M. A. (2016). Tillage effects on soil microbial biomass, SOM mineralization and enzyme activity in a semi-arid Calcixerepts. *Agriculture, Ecosystems& Environment*, 232(16), 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.022>
- Kaci, M., Habi, M., & Morsli, B. (2017). Application of universal soil loss equation (USLE) model to estimate water erosion by GIS system and remote sensing: catchment area of oued Rhiou (Watershed of Cheliff), Algeria. *Geo-Eco-Trop.*, 41(3), 503-518.
- Karkour, L. (2012). *La dynamique des mauvaises herbes sous l'effet des pratiques culturales dans la zone des plaines intérieures*. Mémoire d'obtention du diplôme de Magister Option, Production Végétale et Agriculture de Conservation, Université Ferhat Abbas Sétif Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.
- Karuma, A., Mtakwa, P., Amuri, N., Gachene, C. K., & Gicheru, P. (2014). Tillage Effects on Selected Soil Physical Properties in a Maize-Bean Intercropping System in Mwala District, Keny. *International Scholarly Research Notices*, Article ID 497205. <https://doi.org/10.1155/2014/497205>
- Keenen, M. L., Mack, A., & Rudgers, A. (2007). *Balancing multiple mutualists: Asymmetric interactions among plants, arbuscular mycorrhizal fungi, and fungal endophytes* (p. 11). Publication Dept. of Biology, Indiana Univ, Bloomington, IN, USA. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0030-1299.15973.x>
- Keymer, A., Pimprikar, P., Wewer, V., Huber, C., Brands, M., Bucerius, S. L., Gutjahr, C. (2017). Lipid transfer from plants to arbuscular mycorrhiza fungi. *eLife*, 6, e29107. <https://doi.org/10.7554/eLife.29107.001>

- Labreuche, J. C., Le Souder, P., Castillon, J. F., Oury, B., Real, J. C., Germon, S., & Tourdonnet, D. (2007). *Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour en France* (p. 400). ADEME-ARVALIS Institut du végétal-INRA-APCA-AREAS-ITB CETIOMIFVV. <https://doi.org/10.1684/agr.2007.0119>
- Lahmar, R., & Bouzerzour, H. (2011). Du mulch terreux au mulch organique pour assurer une transition Vers l'agriculture durable dans les hautes plaines sétifiennes. In H. Bouzerzour, H. Irekti, & B. Vadon (Eds.), *Options Méditerranéennes: Série A, Séminaires Méditerranéens* (No. 96, pp. 99-106). Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct Zaragoza: CIHEAM/ATU-PAM/INRAA/ITGC/FERT.
- Lahmar, R., & Ruellan, A. (2007). Dégénération des sols et stratégies coopérative en Méditerranée. *La pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable* (Vol. 16, pp. 318-323). Dans: Cahiers Agricultures.
- Lienhard, P., Terrat, S., Prévost-Bouré, N. C., & Nowak, V. (2014). Régner T, Sayphoummie S et Ranjard L Pyrosequencing evidences the impact of cropping on soil bacterial and fungal diversity in Laos tropical grassland. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 525-533. <http://doi.org/10.1007/s13593-013-0162-9>
- Lyon, D. J., Boa, F., & Arkebauer, T. J. (1996). Water-yield relations of several spring-planted dry land Crops following winter-wheat. *J. Prod. Agric.*, 8, 281-286. <https://doi.org/10.2134/jpa1995.0281>
- Madejon, E., Moreno, F., Murillo, J. M., & Pelegrin, F. (2007). Soil biochemical response to long-term conservation tillage under semi-arid Mediterranean conditions. *Soil Till. Res.*, 94, 346-352. <http://doi.org/10.1016/j.still.2006.08.010>
- Maherali, H., & Klironomos, J. N. (2007). Influence of Phylogeny on Fungal Community Assembly and Ecosystem Functioning. *Science*, 316, 1746-1748. <http://doi.org/10.1126/science.1143082>
- Mandyam, K., & Jumpponen, A. (2005). Seeking the elusive function of the root-colonising dark septate endophytic fungi. *Studies in Mycology*, 53, 173-189. <https://doi.org/10.3114/sim.53.1.173>
- Mandyam, K., & Jumpponen, A. (2008). Seasonal and temporal dynamics of arbuscular mycorrhizal and dark septate endophytic fungi in a tall grass prairie ecosystem are minimally affected by nitrogen enrichment. *Mycorrhiza*, 18, 145-155. <http://doi.org/10.1007/s00572-008-0165-6>
- McGonigle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L., & Swan, J. (1990). A new method which gives and objective measure of colonization of roots by vesicular arbuscular fungi. *New Phytologist*, 115, 1569-1574. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x>
- Meglouli, H., Lounès-Hadj Sahraoui, A., Magnin-Robert, M., Tisserant, B., Hijri, M., & Fontaine, J. (2018). Arbuscular mycorrhizal inoculum sources influence bacterial, archaeal, and fungal communities' structures of historically dioxin/furan-contaminated soil but not the pollutant dissipation rate. *Mycorrhiza*, 28(7), 635. <http://doi.org/10.1007/s00572-018-0852-x>
- Mrabet, R. (2001b). Le Semis Direct: Une technologie avancée pour une Agriculture durable au Maroc. *Bulletin de Transfert de Technologie en Agriculture MADREF-DERD* (No. 76, p. 4). Retrieved from <http://agriculture.ovh.org>
- Nadji, W., Belbekri, N., Ykhlef, N., & Djekoun, A. (2017). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi of durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) fields of the East of Algeria. *J. Agric. Sci*, 9, 117. <http://doi.org/10.5539/jas.v9n3p117>
- Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Mader, P., Boller, T., & Wiemken, A. (2003). Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agro-ecosystems of central Europe. *Applied and Environmental Microbiology*, 69, 2816-28. <http://doi.org/10.1128/AEM.69.5.2816-2824.2003>
- Oehl, F., Sieverding, E., Mader, P., Dubois, D., Ineichen, K., Boller, T., & Wiemken, A. (2004). Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia*, 138, 574-583. <http://doi.org/10.1007/s00442-003-1458-2>
- Olsson, P. A., Baêath, E., Jakobsen, I., & Soêderstroêm, B. (1995). The use of phospholipid and neutral lipid fatty acids to estimate biomass of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycological Research*, 99, 623-629. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)80723-5](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)80723-5)

- Olsson, P. A., Francis, R., Read, D. J., & Söderström, B. (1998). Growth of arbuscular mycorrhizal mycelium in calcareous dune sand and its interaction with other soil microorganisms as estimated by measurement of specific fatty acids. *Plant and Soil*, *201*(1), 9-16. <https://doi.org/10.1023/A:1004379404220>
- Olsson, P. A., Thingstrup, J. I., & Bååth, E. (1999). Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology and Biochemistry*, *31*, 1879-1887. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00119-4)
- Peterson, R. L., Wagg, C., & Pautler, M. (2008). Associations between microfungus endophytes and roots: Do structural features indicate function? *Botany*, *86*, 445-456. <http://doi.org/10.1139/B08-016>
- Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, *55*, 158-161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Rouabhi, A., Laouar, A., Mekhlouk, A., & Dhehibi, B. (2019). Socioeconomic Assessment of No-Till in Wheat Cropping System: A Case Study in Algeria. *New Medit*, *18*(1), 53-64. <https://doi.org/10.30682/nm1901e>
- Rodriguez, R. J., Redman, R. S., & Joan, M. H. (2004). The role of fungal symbioses in the Adaptation of plants to high stress environments. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *9*, 261-272. <http://doi.org/10.1023/B:MITI.0000029922.31110.97>
- Roldan, A., Salinas-Garcia, J. R., Alguacil, M. M., & Caravaca, F. (2007). Changes in soil sustainability indicators following conservation tillage practices under subtropical maize and bean crops. *Soil and Tillage Research*, *93*, 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.001>
- Schalamuk, S., Velazquez, S., Chidichimo, H., & Cabello, M. (2006). Fungal spore diversity of arbuscular Mycorrhizal fungi associated with spring wheat: Effects of tillage. *Mycologia*, *98*(1), 16-22. <http://doi.org/10.3852/mycologia.98.1.16>
- Soka, G., & Ritchie, M. (2015). Arbuscular mycorrhizal symbiosis, ecosystem processes and Environmental changes in tropical soils. *Applied Ecology and Environmental Research*, *13*(1), 229-245. http://doi.org/10.15666/aeer/1301_229245
- Staddon, P. L., & Fitter, A. H. (2001). The differential vitality of intraradical mycorrhizal structures and its implications. *Soil Biology & Biochemistry*, *33*, 129-132. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00593.x>
- Strullu, D. G. (1991). *Les mycorhizes des arbres et des plantes cultivées* (p. 250). Lavoisier, Paris.
- Trépanier, M., Bécard, G., Moutoglis, P., Willemot, C., Gagné, S., Avis, T. J., & Rioux, J. A. (2005). Dependence of arbuscular-mycorrhizal fungi on their plant host for palmitic acid synthesis. *Applied and Environmental Microbiology*, *71*, 5341-5347. <http://doi.org/10.1128/AEM.71.9.5341-5347.2005>
- Tuzzin de Moraes, M., Debiasi, H., Carlesso, R., Cezar Franchini, J., Rodrigues da Silva, V., & Bonini da Luz, F. (2016). Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research*, *155*, 351-362. <http://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.015>
- Van der Heijden, M. G. A., & Sanders, I. R. (2003). *Mycorrhizal Ecology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-38364-2>
- Van Groenigen, K. J., Bloem, J., Bååth, E., Boeckx, P., Rousk, J., Bodé, S., & Jones, M. B. (2010). Abundance production and stabilization of microbial biomass under conventional and reduced tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, *42*(1), 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.09.023>
- Vega, F. E., Posada, F., Aime, M. C., Ripoll, M. P., Infante, F., & Rehner, S. A. (2008). Entomopathogenic fungal endophytes. *Biological Control*, *46*, 72-82. http://doi.org/10.1007/978-90-481-3966-8_9
- Vega, J., Cristina, A., & Fonturbel, T. (2015). Comparing the effectiveness of seeding and mulching + seeding in reducing soil erosion after a high severity fire in Galicia (NW Spain). *Ecological Engineering*, *74*, 206-212. <https://doi.org/10.1016%2Fj.ecoleng.2014.10.019>
- Vergara, C., Karla, E. C. A., Luiziene, S. A., Sônia, R. de S., Leandro, A. S., Gustavo, R. X., Jerri, E. Z. (2018). Contribution of dark septate fungi to the nutrient uptake and growth of rice plants. *Brazilian Journal of Microbiology*, *49*(9), 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.04.010>
- Voets, L., de la Providencia, I. E., & Declerck, S. (2006). Glomeraceae and Gigasporaceae differ in their ability to form hyphal networks. *New Phytologist*, *172*, 185-188. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01873.x>

- Wang, Y., Vestberg, M., Walker, C., Hurmer, T., Zhang, X., & Lindström, K. (2008). Diversity and infectivity of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils of the Sichuan Province of mainland China. *Mycorrhiza*, *18*, 59-68. <https://doi.org/10.1016%2Fj.ecoleng.2014.10.019>
- Wu, Q. S. (2017). *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants* (Library of Congress Control Number: 2017936364). <http://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0>
- Yu, J., Xue, Z., He, X., Liu, C., & Steinberger, Y. (2017). Shifts in composition and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin contents during revegetation of desertified semiarid grassland. *Applied Soil Ecology*, *115*, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.015>
- Yuan, Z. L., Llin, F. C., Zhang, C. L., & Kubicek, C. P. (2010). A new species of Harpophora (Magnaporthaceae) recovered from healthy wildrice (*Oryza granulata*) roots, representing a novel member of abeneficial dark septate endophyte. *FEMS Microbiol Lett.*, *307*, 94-101. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2010.01963.x>
- Zeghouane, O., Abdellaoui, Z., & El Mourid, M. (2015). *L'agriculture de conservation: Introduction et perspectives de développement du semis direct dans les systèmes de production céréalières, une nouvelle expérience en Algérie*. Collaboration entre ITGC, ICARDA, ACIAR. Retrieved from <http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=6600104>
- Zeghouane, O., Bouzerzour, H., Houassine, D., Makhoulf, M., Abdellaoui, Z., & Ameroun, R. (2011). La situation du programme de développement de l'agriculture de conservation en Algérie. *Revue Céréaliculture n° 57* (pp. 19-31). Institut Technique des Grandes Cultures.

Copyrights

Copyright for this article is retained by the author(s), with first publication rights granted to the journal.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

DYNAMICS OF WHEAT ROOT COLONIZATION BY ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI UNDER CONTRASTING SOIL TILLAGE SYSTEMS AND ITS IMPACT ON GRAIN YIELD

H. Hadj Youcef Taibi^{*1}, N. Smail-Saadoun², A. Djemel³

¹Laboratory of Soft Technology, Valorization, Physical-chemistry of Biological materials and Biodiversity, Department of Agronomy, Faculty of Sciences, University of M'hamed Bougara, Boumerdes, Algeria

²Natural Resources Laboratory, Department of Agronomic Sciences, Mouloud Mammeri University, Tizi Ouzou, Algeria

³Department of Plant Production, Ecole Nationale Supérieure Agronomique | ENSA. Avenue Pasteur, Hassan Badi, 16200 El Harrach-Algiers, Algeria

Received: 07 October 2020 / Accepted: 11 November 2020 / Published online: 01 January 2021

ABSTRACT

In this work, we investigated the effect of the soil tillage farming system on the variability of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) root colonization of a local durum wheat variety, conducted during five years of experimental trial in a semi-arid region of eastern Algeria. No tillage farming system improved the AMF symbiotic activity from the fourth year of testing with the appearance of high root percentage of arbuscules at tillering and grain filling stage. Compared to that, the conventional tillage was marked by the observation of a high root percentage of vesicles especially at grain filling. Despite inter-annual fluctuations, the no tillage farming system improved the average yield of the five trial years by 20%. Multiple regressions analyses using the stepwise selection method were made to formulate an equation linking grain yield and the AMF symbiotic components specific to each tillage farming system.

Keywords: Arbuscular mycorrhiza; Soil tillage Farming system; Triticum durum; Yield.

Author Correspondence, e-mail: htaibi@hotmail.fr

doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v13i1.25>



1. INTRODUCTION

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) establish mutualistic symbiotic associations with the roots of most land plants [31] and provide many different agro-ecosystem services, such as an efficient use of fertilizers and soil nutrients, protection against biotic and abiotic stresses and improved soil aggregation [15]. They increased plant nutrition in legume crops by means of extensive mycelial networks which spread from colonized roots and efficiently absorb and translocate mineral nutrients from the soil to the host plants [3,4,12].

Mycorrhizal fungi have the potential to be considered a major component of sustainable agro-ecosystems and their presence in environments where rainfall is scarce, can make plants more resistant to water stress and strengthen their capacity to use the nutrients naturally present in the soil which would reduce the use of chemical fertilizers [1; 20]. Although many data corroborate the AMF positive effect on plant growth, however, the role of AMF colonization rate on crop yield and economics of farming is still uncertain, particularly in wheat [28]. Durum Wheat (*Triticum durum*) is a major food crop that is widely grown around the world under diverse climatic conditions [29]. It is classified as a non-mycorrhizal or mycorrhizal plant species depending on the wheat cultivar [19; 16; 14]. Positive and negative effects of AMF seem to influence wheat crops [8]. The different cropping practices used in the management of organic and conventional wheat producing farms influence its mycorrhizal symbiosis and affect some of the benefits conferred by mycorrhizal fungi [7].

The crop rotation and soil tillage, the main elements of the conservation agriculture, influence mycorrhizal root colonization [10]. A greater proportion of the roots being colonized by AMF in the non-tilled soil early in the season and cause a higher uptake of P and Zn elements by plants than under conventional tillage and this may eventually translate to yield-increases [17]. Soil disturbance imposed by tillage is particularly detrimental to AMF hyphae if the soil is tilled in the fall and the hyphae are detached from the host plant which reduces mycorrhizal infectivity [18]. The effect of no-till cultivation on mycorrhizal colonization of roots and wheat yield has been the subject of several studies at long and short term field experiment and in different agro-ecological zones and have shown that tillage practices affected the colonization dynamics and the lack of tillage supplied the most appropriate conditions for the establishment of the symbiosis between the plant and the fungus [13,30], but this benefit of enhanced AMF colonization, did not translate into enhanced growth and yield. This impact on the yield can be related to the installation and the dynamics of the mycorrhizal symbiosis influenced by input system, the effective control of weeds and with climatic conditions [13].

In Algeria, wheat is mainly grown under rainfed conditions, where its culture is suffering from the hardness of the semi-arid climate conditions. The adoption of the No-Till wheat cropping interested local farmers because it recorded less work time and fuel consumption in comparison with conventional tilled wheat [27]. This practice minimizes the soil disturbance and providing residue soil cover, is found to increase the soil fertility and water use efficiency, thus helping cereal farmers to sustain the crop yield over a longer term [9]. For this, it was considered useful to conduct a study in a semi-arid cereal region for five years to examine the effect of two tillage systems (without tillage and conventional tillage) on the evolution of the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) root colonization of durum wheat and yield production.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Site description and experimental design

The field trials were carried out from 2008 to 2013, at the agronomic experimental station of the Technical Institute of Field Crops (ITGC) of Sétif (latitude, 36°08' N; longitude, 5°20' E and altitude 962m). In general, this region is considered as a representative of the semi arid cereal area in Algeria. The climate is Mediterranean and semi-arid, characterized by cold wet winters and hot dry summers. During the experiment, the average annual rainfall did not exceed 400 mm with the dry season usually noted from May to September. Field experiments were conducted over an area of 1080m². The wheat cultivar “Boussalem”, one of the most important varieties cultivated in such regions, was used in the present study. The experimental design was based on the application of two-soil management treatment: 1) No-tillage system (NTS) and 2) Conventional tillage system (CTS). Each experiment plot had 180 m² (6 m × 30 m) of area with three replicates per treatment. In the plots of the No-tillage system, sowing was carried out directly in the residues of the previous crop but in the conventional tillage system treatment, the sowing was carried out after tillage with a moldboard plough followed by a cover crop and a disc harrow. The both farming systems not differed in fertilization strategy and plant protection management. The previous crop has been wheat for all experimental period.

2.2 Plants and soil Sampling

For each treatment, two soil samples per plot and replicate were taken at 10 cm depth for further soil physicochemical studies.

To estimate the components of AMF root colonization, the roots of 6 plants per plot and per stage (tillering, grain filling and grain maturity of wheat vegetative growth cycle), were sampled in 2011, 2012 and 2013. In total, 324 plants were then collected.

2.3. Root processing

Roots were soaked during 5 min in an H₂O₂ (30%) bath to remove pigments, cleared in KOH (10%) and stained with Trypan blue (0.05%) [25]. Root mycorrhizal rates were calculated using a magnified grid line intersects method [21]. 108 segments of ~1 cm long stained root samples were mounted on slides in lacto glycerol and examined for AMF structures under a light microscope (Olympus 41209). Estimations of AMF colonization were done by the magnified intersection method [21]. Intersections were counted in the following categories: negative (no fungal material in root), arbuscules, vesicles and hyphae. This made it possible to quantify the following percentage: $H\% = (G - p)/G \times 100$; $Arb\% = (q + s)/G \times 100$; $Ves\% = (r + s)/G \times 100$ (1)

Where, G: total number of intersections; p: no mycorrhizal structure; q: presence of arbuscules; r: presence of vesicles; s: presence of arbuscules and vesicles.

2.4. Soil properties

The soil characteristics which are presented in the Table 1, were determined using the Robinson method, Organic matter (OM) content was calculated from the measurement of organic carbon (OC) using the ANNE method, the total nitrogen (N) by Kjeldahl method, the pH of the soil (pH water) measured with a pH meter. Available phosphorus (Olsen Phosphorus) was determined by the Olsen method [24]. The total and active calcium carbonate measurements were made respectively by the methods of the Bernard and Drouineau calcimeter.

2.5. Statistical analysis

Statistical analyses were conducted using the software package Statbox 2012. We also checked the normality of data distribution, transformed the data by a square-root procedure as necessary. The variance analysis with a p-level of 0.05 was conducted, including means comparisons according to the test of NEWMAN and KEULS with a p-level of 0.05. Pearson correlation coefficients between the mycorrhizal root colonization, Arbuscules and Vesicles percentage estimated at three growing stage under two farming system (no-till and conventional tilling) and yield were estimated. In addition, the coefficients of regression were used to estimate the effect of conventional tillage (CTS) and no-till farming system (NTS) on total mycorrhizal root colonization, Arbuscules and Vesicles percentage evolution over years.

To identify the traits that were significant covariates on yield production, multiple regressions analyses using the stepwise selection method were made. The yield was the dependent variable and total mycorrhizal root colonization, Abuscules and Vesicles percentage were the independent variables.

3. RESULTS

3.1. Soil properties

The soils of experimental plot were characterized by clay loam texture with strong alkalinity (pH 8.26) and extremely low available P concentrations (Table 1). No-till system improved soil organic matter content but low nitrogen content for both treatments.

Table 1. physical and chemical characteristics of the Soil in the experimental plot

Physical characteristics %		Silt	Clay	Sand	CE (mmho/cm)
		34.66	34.66	30.66	0.175
Chemical characteristics		pH (water)	CaCO ₃ (%)	Actif CaCO ₃ (%)	Available P ₂ O ₅ ppm
		8.26	51.58	21.25	7.33
Organic characteristics		OM %	C org %	N %	C/N
2011	NTS	2.6	1.51	0.13	11.62
	CTS	1.9	1.11	0.12	9.25
2012	NTS	3.15	1.83	0.16	11,44
	CTS	2.12	1.23	0.155	7,94
2013	NTS	3.72	2.16	0.175	12.34
	CTS	2.62	1.52	0.17	8.94

OM: organic matter C org: organic carbon NTS: no-tillage system CTS: conventional tillage system

A gain in organic matter content varying between 23.1 t / ha and 23.94 t / ha was respectively recorded at 2012 and 2013 after five years of experimentation. whereas in conventional tillage plots, the gain in soil organic matter content varied between 9.24 t / ha to 21 t / ha during the same study period (fig.1).

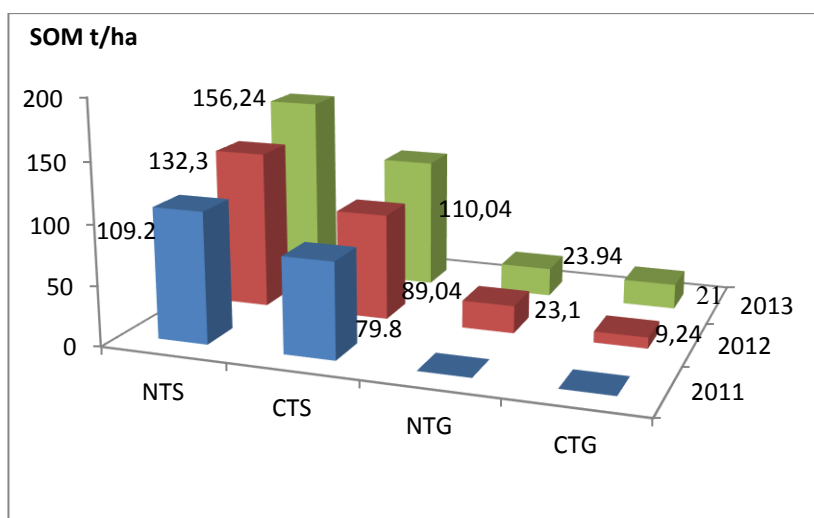


Fig.1. Effect of tillage farming system on the soil organic matter amount. NTS: no-tillage system; CTS: conventional tillage system; NTG: no-tillage gain; CTG: conventional tillage gain. Means were obtained from 3 replicates in 2011, 2012 and 2013. Significant differences between NTS and CTS are reported according to the Newman-Keuls test ($P < 0.05$)

3.2. Presence of arbuscular mycorrhizal fungi

Microscopic observations of stained root segments showed AMF structures such as Intraradical hyphae, vesicles and arbuscules, with occasionally intraradical spores (fig. 2).

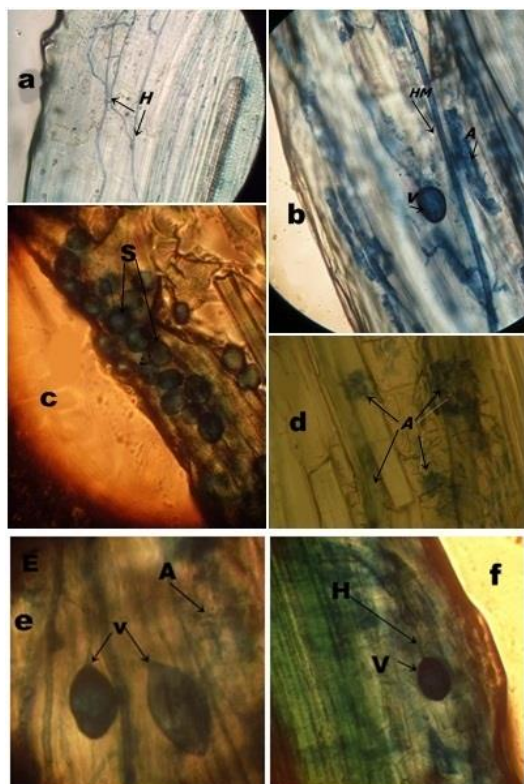


Fig.2. AMF structures in roots of Durum Wheat Microscopic observation ($\times 40$) in:

- Conventional tillage and no-till, grain filling stage 2012 (a and f)
 - No-till system at various years of study at grain filling stage (b; 2011), (c; 2012); (d and e; 2013).
- hyphae (H); vesicles (V), arbuscules (A), spores (S)

3.3. Importance and evolution of AMF symbiotic components

The symbiotic behavior illustrated by the evolution of the AMF symbiotic components (H%, A% and V%) showed a year effect in relation with duration of the test and a growth stage effect which proved to be statistically very significant for the all parameters studied in both treatments (Table 2a). A very highly significant farming system effect was statistically reported; it had a significant interaction with the year and stage growth effect (Table 2b).

Table 2 a. Mean squares from the analysis of variance of *total mycorrhizal root colonization, Abuscles and Vesicles percentage* estimated at three growing stage under two farming system (no-tilling and conventional tilling)

	Df	No-tillage			Conventional tillage		
		H%	A%	V%	H%	A%	V%
Year(Y)	2	524.48***	1354.93***	6137.07***	1151.22**	4735.66***	3331.44***
Rep(E)	6	6.26 ^{ns}	24.45 ^{ns}	76.30 ^{ns}	26.23 ^{ns}	191.69 ^{ns}	30.85 ^{ns}
Growing stage (G)	2	1984.50***	1015.52***	2878.12***	4572.181***	776.09**	1841.59***
Y x G	4	428.01***	1648.82***	1377.62***	631.54**	1105.72***	747.21**
Error	12	9.80	45.70	49.73	76.30	69.12	87.37

ns, *, ** = no significant effect, significant effect respectively at (P <0.05) and P <0.01)

Table 2 b. Mean squares from the combined analysis of variance of total mycorrhizal root colonization, Abuscles and Vesicles percentage estimated at three growing stage under two farming system (no-till and conventional tillage)

	H%	A%	V%	Yield
Year (Y)	1581.62***	3466.83***	7677.47***	98.98***
Rep(E)	16.40 ^{ns}	82.45 ^{ns}	69.67 ^{ns}	7.44*
Farming system (F)	609.18***	688.74**	3130.76***	21.78**
Growing stage (G)	6277.67***	1677.96***	2779.58***	-
F x G	279.01**	113.64 ^{ns}	1940.13***	-
Y x F	94.08 ^{ns}	2623.77***	1791.04***	21.11**
Y x G	1037.27***	1312.60***	1145.71***	-
Y x F x G	22.28 ^{ns}	1441.94***	979.11***	-
Error	37.66	72.66	62.34	1.51

ns, *, ** = no significant effect, significant effect respectively at (P <0.05) and P <0.01)

AMF root colonization (H%) was detected in all collected samples, from both treatments. Maximum levels of root length colonization occurred during tillering and grain filling stages (H%: 97% - 100%) and decreased at grain maturity. The annual regression coefficients were

heterogeneous for the studied treatments and stages. A significant regression was observed during grain maturity stage with a higher and negative coefficient of regression for conventional tilling (CTS -30.11 ± 3.162) compared to no-tilling (NT -18.37 ± 6.045) (Table 3). This reduction lowered root length colonization from 85% and 87% in 2011 to 48.76% and 26.85% reached in 2013 for the no-tilling and conventional tilling system respectively.

The no-tillage observations showed a high root percentage of arbuscules at the tillering and during grain filling stages and which decreased at the grain maturity (Table 3). Positive regression coefficients for this parameter were observed ($b=16.51 \pm 0.753$ and $b=14.48 \pm 0.045$) for respectively the two first stages. The increase in the root percentage of arbuscules started in 2012 which corresponded to the fourth experimental year.

Compared to that, the conventional tillage was marked by the observation of a high root percentage of vesicles especially at grain filling. At this stage, positive regression coefficient for this parameter were observed ($b=10.18 \pm 0.463$). The difference between no-till and conventional tillage in the evolution of this parameter started from the fourth year of experimentation.

Table 3. Effect of conventional tillage (CTS) and no-till farming system (NTS) on total mycorrhizal root colonization, Arbuscules and Vesicles percentage estimated at three growing stage through three cropping seasons, significant regressions ($b \pm s.e.$) and coefficient of determination (R^2)

Years	No-Tilling			Conventional Tilling		
	Tillering	Grain filling	Grain maturity	Tillering	Grain filling	Grain maturity
Total mycorrhizal root colonization H%						
2011	98.26	99.65	85.50	99.31	100.00	87.08
2012	100	99.38	85.27	93.10	100.00	66.45
2013	97.22	99.38	48.76	90.28	97.22	26.85
$b \pm$			-	-		-
es	-0.52 ± 0.753	-0.13 ± 0.045	18.37 ± 6.045	4.51 ± 0.565	-1.39 ± 0.463	30.11 ± 3.162
	ab	a	ab	b	ab	c
R^2	0.14	0.75	0.75	0.95	0.75	0.97
Arbuscules percentage A%						
2011	12.49	19.79	3.12	0.90	1.38	3.95
2012	64.19	48.91	2.15	28.23	-	1.38

2013	80.56	48.76	2.78	18.05	21.75	1.54
<i>b ±</i>						
es	16.51±0.753	14.48±0.045	-0.17±6.045	8.57±0.565	10.18±0.463	-1.20±3.162
	a	abcd	b	abc	d	bc
<i>R</i> ²	0.91	0.75	0.12	0.38	0.99	0.70
Vesicles percentage V%						
2011	68.40	75.34	63.19	51.45	56.24	45.48
2012	23.45	16.66	29.16	12.03	66.66	12.80
2013	11.72	26.54	39.81	38.27	74.99	21.91
<i>b ±</i>	-	-	-			-
es	28.34±0.753	24.40±0.045	11.69±6.045	9.38±0.565	10.18±0.463	11.78±3.162
	a	ab	ab	b	b	ab
<i>R</i> ²	0.91	0.75	0.12	0.38	0.99	0.70

3.4. Wheat grain yield

Significant year effect was observed for the wheat grain yield in the both treatments ($P < 0.01$). A significant effect of the tillage system ($P < 0.05$) and the interaction between year and tillage system ($P < 0.01$) (Table 2b) gave an average yield over five years of study of 24.4 and 19.7qx/ha respectively for the no-tillage and conventional tillage system thus a gain of 20%.

3.5. Identification of significant covariates traits on yield production

The multiple regression analysis of grain yield according to the measured traits revealed that in the no-till farming system, it was very significantly depended on arbuscules percentage of grain filling stage (cumulated $R^2 = 0.63$) and on vesicles percentage of grain maturity (cumulated $R^2 = 0.81$) (Table 4). However, emergence of arbuscules at grain filling stage had a negative effect on grain yield ($b = -0.19$). Vesicles percentage of grain maturity stage was the only factor affecting grain yield in a conventional tillage system conditions with lower impact ($R^2 = 0.57$) than for the no-tillage system.

Table 4. Multiple regression analyses, using the stepwise procedure, for each trait on yield under both no-tilling and conventional tilling farming systems. Only significant coefficients (*b*) are shown along with their accumulated coefficients of determination (R^2)

No-till system			Conventional tillage system		
Traits	Cumulative R^2	<i>P</i> value	Traits	Cumulative R^2	<i>P</i> value
A%2	0,63	0,006			
V%3	0,81	0,033	V%3	0,57	0.019
<i>Coefficients</i>			<i>Coefficients</i>		
	<i>b</i>	<i>e.s</i>		<i>b</i>	<i>e.s</i>
Constante	26,46	2,08	Constante	19,10	0,98
A%2	-0,19	0,04			
V%3	0,09	0,03	V%3	0,10	0,03

The regression analysis model therefore made it possible to formulate an equation linking grain yield and the AMF symbiotic components specific to each tillage farming system.

3.6. Relationship between variables

Pearson correlation coefficients between the mycorrhizal root colonization, Arbuscules and Vesicles percentage estimated at three growing stage for both treatments (no-till and conventional tillage) and grain yield showed in the no-till farming system, a significant and positive correlation between AMF root colonization percentage (H%) and arbuscules percentage (A%) ($r= 0.69^*$) at tillering stage. At grain maturity stage AMF root colonization percentage (H%) was significantly and positively correlated with vesicles percentage (V%) ($r= 0.75^*$) and negatively with arbuscules percentage (A%) ($r= -0.95^{**}$). Under the conditions of the conventional farming system, a positive correlation was observed between AMF root colonization percentage (H%) and vesicles percentage (V%) ($r= 0.94^{**}$) and negative with the percentage of arbuscules (A%) ($r= -0.96^{**}$) at grain filling stage.

Analysis of the interference between the AMF symbiotic components and the grain yield showed in no-till farming system, a significant and negative correlation between grain yield and arbuscules percentage (A%2) ($r=-0.82^{**}$) at grain filling stage. At all stages, a significant and positive correlation between yield and percentage of vesicles (V%) was observed. In the conventional farming system, the yield is significantly and positively correlated only with percentage of vesicles (V%) ($r= 0,75^*$) at grain maturity stage.

4. DISCUSSION

The effect of the no-till farming system appeared in the fourth year of testing; it contributed to increases of the soil organic matter (SOM), en relation to presence of plant residues (mulch).

This parameter is the central indicator of soil quality and health, which is strongly affected by agricultural management, similarly [32] reported that, after twenty years of no-till operations, the soil organic carbon increases by 16% in humid temperate regions and by 10% in dry temperate regions, compared to conventional seedling.

The presence of different mycorrhizal structures in the root samples collected from both treatments confirmed durum wheat interaction with soil mycorrhizal inoculum and the mycotrophic status of this durum wheat variety [23]. Similarly, some characteristics of the study area soil such as aridity (a rainfall close to 400 mm), low total phosphorus level and alkaline soil pH contributes to the AMF installation [11].

Many studies reported temporal and seasonal variation of AMF dynamic [22; 30]. These authors reported that the kinetics of colonization of roots by AM fungi showed an increase from the tillering stage to a peak reached at the earing (flowering) stage and fall thereafter until the grain filling stage. Our results showed similarly with a reduction at grain maturity stage. However, the no-till farming system increased the accumulation of mycorrhizal propagules such as root infected percentage at the end of the cycle which will affect the installation of mycorrhization at the following year through the no disruption of the hyphal network [13].

In the no-till farming treatment, the arbuscules are the main components of AMF root colonization at tillering stage; these symbiotic structures ensure the exchanges between both symbiotic partners [6]. Their emergence at this stage in the root cortex of the no-till farming plants is likely to reflect early good AMF activity, as put forward by [17], and be related to P absorption and root health [7].

In the case of conventional tillage, the arbuscules percentage was low, and the vesicles percentage are main component of AMF root colonization. The vesicles are carbon storage structures in particular lipids, obtained from the host plant; it is also a mean of conservation and propagation of AMF [6]. Their formation is abundant at the end of the growth cycle of the host plant [15]. This model was verified for the no-tillage, but for the conventional tillage system, the formation of vesicles occurring at the grain filling stage reflected a negative partnership between the host plant (durum wheat) and the AMF.

[5] and [26] indicated that no-tillage systems in the dry regions of Africa increase yields compared with CTS. Angar et al. [2], reported that durum wheat yields, during ten years of no tillage in a semi-arid zone, increased by 0.35 t/ha, compared to conventional tillage. Our results showed an average gain of 0.47 t / ha.

This yield was strongly impacted by the vesicles percentage formed at the end of the cycle. Vesicles are resting structures their number is increased in old or dead roots and corresponded to mycorrhizal soil infectivity (MSI) [30].

Emergence of arbuscules at grain filling stage was a limiting factor of grain yield, this negative relationship between the yield and the activity of the mycorrhizal symbiosis stated in no-tillage farming system highlighted the notion of competition for C assimilates between plant and AM fungal sinks and AMF symbiosis cost [8].

5. CONCLUSION

The results showed the symbiotic behavior of the local variety Boussalem in response to the two tillage farming system treatments during five years of experimental trial in a semi-arid area of eastern Algeria. This variety presented a high AMF root colonization in both treatments.

Compared to conventional tillage, the effect of the no-till farming system appeared in the fourth year of testing and it improved the following parameters;

- The soil organic matter (SOM) in relation to the presence of the mulch thus allowing a gain of soil carbon.
- The symbiotic exchange activity in relation to the high root percentage of arbuscules present from the start of the vegetative cycle. Observing these structures during the growing stage suggests this is a dynamic process.
- The mycorrhizal inoculum produced at the end of the cycle and based on roots colonized by hyphae and vesicles thus affecting the mycorrhizal soil infectivity.

The characteristics of the study region gave specificity to the mycorrhizal symbiosis. In these study conditions the grain yield depends in the no-till soil farming system on the cost of mycorrhizal activity and the amount of inoculums produced at the end of the cycle.

This preliminary study should be complemented by other investigations relating to the study of mycorrhizal biodiversity of cultivated soil and the factors influencing the mycorrhization of the wheat plants such as the sowing date, the presence of weeds and the wheat variety behavior in the different agro-ecological zones.

6. REFERENCES

- [1] Al-Karaki G. McMichael B · Zak J .2004 Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza* 14:263–269 DOI 10.1007/s00572-003-0265-2

- [2] Angar, H., Ben Haj Salah, H., & Ben-Hammouda, M. 2011. Semis direct et semis conventionnel en Tunisie : Les résultats agronomiques de 10 ans de comparaison. In H. Bouzerzour, H. Irekti, & B. Vadon (Eds.), *Options Méditerranéennes: Série A, Séminaires Méditerranéens* (No. 96 pp. 53-59). Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct in Zaragoza: CIHEAM/ATU-PAM/INRAA/ITGC/FERT.
<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=801418>.
- [3] Avio, L., Pellegrino, E., Bonari, E. & Giovannetti, M. 2006. Functional diversity of arbuscular mycorrhizal fungal isolates in relation to extraradical mycelial networks. *New Phytol.* **172**, 347–357.
- [4] Battini, F., Grønlund, M., Agnolucci, M., Giovannetti, M. & Jakobsen, I. 2017. Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bacteria. *Sci. Rep.* **7**, 4686.
- [5] Biberdzic M, Barac S, Lalevic D, Djikic A, Prodanovic D, Rajcic V, 2020. Influence of soil tillage system on soil compaction and winter wheat yield. *Chil.j.agric. res.* vol. **80** no.1 Chillán mar. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392020000100080>
- [6] Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., & Malajczuk, N. 1996. Working with Mycorrhizas. Forestry and Agriculture (Monograph **32**, 374). ACIAR.
- [7] Castillo CG, Rubio R, Rouanet JL, Borie F. 2006. Early effects of tillage and crop rotation on arbuscular mycorrhizal fungal propagules in an Ultisol. *Biol Fertil Soils.* ;**43**:83–92. doi: 10.1007/s00374-005-0067-0
- [8] Dai, M. et al. 2014. Negative and positive contributions of arbuscular mycorrhizal fungal taxa to wheat production and nutrient uptake efficiency in organic and conventional systems in the Canadian prairie. *Soil. Biol. Biochem.* **74**, 156–166. DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.03.016](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.016)
- [9] Dhehibi B., Zucca C., Frija A., Shinan N., Kassam S.N., 2018. Biophysical and Econometric analysis of adoption of soil and water conservation techniques in the semiarid region of Sidi Bouzid (Central Tunisia). *New Medit*, **2**: 15-28.
- [10] Dimitrios J. Bilalis & Andreas J. Karamanos. 2010 Organic Maize Growth and Mycorrhizal Root Colonization Response to Tillage and Organic Fertilization, *Journal of Sustainable Agriculture*, **34**:8, 836-849, DOI: 10.1080/10440046.2010.519197
- [11] Duponnois, R., Hafidi, M., Wahbi, S., Sanon, A., Galiana, A., Baudoin, E., Bally, R. 2012. La symbiose mycorrhizienne et la fertilité des sols dans les zones arides: un outil biologique sous-exploité dans la gestion des terres de la zone sahélo-saharienne. In A. Dia & D. Robin (Eds.), *La Grande Muraille Verte: Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux* (pp. 351-369). Marseille: IRD.

- [12] Fekete K, Pap Z, Csapó-Birkás Z, Alhadidi N. 2019. The effect of mycorrhizal inoculation on inner content and yield in case of tomato, cucumber and potato in soilless systems and on field: a review. *21st Century Water Management in the Intersection of Sciences*
- [13] Galvez L., Douds Jr D. and Wagoner P. 2001. Tillage and Farming System Affect AM Fungus Populations, Mycorrhizal Formation, and Nutrient Uptake by Winter Wheat in a High-P Soil. *American Journal of Alternative Agriculture*, vol. **16**, no. 4, pp. 152–160. *JSTOR*, www.jstor.org/stable/44509990.
- [14] Garcia de Leon D, Vahter T, Zobel M, Koppel M, Edesi L, Davison J, et al. 2020. Different wheat cultivars exhibit variable responses to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi from organic and conventional farms. *PLoS ONE* **15**(5): e0233878. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233878>
- [15] Gianinazzi S, Gollotte A, Binet MN, Tuinen Dv, Redecker D & Wipf D. 2010. Agroecology. The key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza* **20**, 519–530.
- [16] Hetrick, Ba. D., Wilson, G. W. T. & Cox, T. S. 1993. Mycorrhizal dependence of modern wheat cultivars and ancestors: a synthesis. *Can. J. Bot.* **71**, 512–518
- [17] Jansa, J., Wiemken, A., & Frossard, E. 2006. The effects of agricultural practices on arbuscular Mycorrhizal fungi. *The Geological Society of London, Special Publications*, 266, 89-115. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.266.01.08>
- [18] Kabir, Z. 2005. Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae. *Can. J. Plant Sci.*, **85**, 23-29. <https://doi.org/10.4141/P03-160>
- [19] Kapulnik, Y. & Kushnir, U. (1991). Growth dependency of wild, primitive and modern cultivated wheat lines on vesicular-arbuscular mycorrhiza fungi. *Euphytica* **56**, 27–36.
- [20] Lounes-Hadj Sahraoui A. 2013. La Mycorrhize a arbuscules : quels benefices pour l'homme et son environnement dans un contexte de développement durable ? *Rev. Sci. Technol.*, Synthèse 26: 06 -19
- [21] 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. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x>
- [22] Mandyam K & Jumpponen A. 2008. Seasonal and temporal dynamics of arbuscular mycorrhizal and dark septate endophytic fungi in a tall grass prairie ecosystem are minimally affected by nitrogen enrichment. *Mycorrhiza* 18:145–155 DOI 10.1007/s00572-008-0165-6

- [23] Nadji, W., Belbekri, N., Ykhlef, N., & Djekoun, A. 2017. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi of durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) fields of the East of Algeria. J. Agric. Sci, 9, 117. <http://doi.org/10.5539/jas.v9n3p117>.
- [24] Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS, Dean LA. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA circular 939. US Government Printing Office, Washington DC
- [25] Phillips, J. M., & Hayman, D. S. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Trans. Br. Mycol. Soc., 55, 158-161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- [26] Pittelkow, M.C., Linquist, A.B., Lundy, E.M., Liang, X., Groenigen, J., Lee, J., et al. 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. Field Crops Research **183**:156-168.
- [27] Rouabhi, A., Laouar, A., Mekhlouk, A., & Dhehibi, B. 2019. Socioeconomic Assessment of No-Till in Wheat Cropping System: A Case Study in Algeria. New Medit, **18**(1), 53-64. <https://doi.org/10.30682/nm1901e>
- [28] Rodriguez, A. & Sanders, I. R. 2015. The role of community and population ecology in applying mycorrhizal fungi for improved food security. ISME. J. **9**, 1053–1061.
- [29] Sall A.T., Chiari T, Legesse W , Ahmed S, Ortiz R, van Ginkel M, Bassi F.M. 2019. Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) origin, cultivation, and potential expansion in sub-Saharan Africa. *Agronomy* , 9(5), 263; <https://doi.org/10.3390/agronomy9050263>
- [30] Schalamuk, S., Velazquez, S., Chidichimo, H., & Cabello, M. 2006. Fungal spore diversity of arbuscular Mycorrhizal fungi associated with spring wheat: Effects of tillage. *Mycologia*, 98(1), 16-22. <http://doi.org/10.3852/mycologia.98.1.16>
- [31] Smith, S. E. & Read, D. J. Mycorrhizal symbiosis. Q. Rev. Biol. 3, 273–281. 2008.
- [32] Van Groenigen, K. J., Bloem, J., Bååth, E., Boeckx, P., Rousk, J., Bodé, S., & Jones, M. B. 2010. Abundance production and stabilization of microbial biomass under conventional and reduced tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, **42**(1), 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.09.023>
- [33] West T.O. and Post W.M 2002. Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation. A Global Data Analysis. *Soil Science Society of America Journal*. Volume **66**, Issue 6. doi <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1930>

How to cite this article:

Hadj Youcef Taibi H, Smail-Saadoun N, Djemel A. Dynamics of wheat root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi under contrasting soil tillage systems and its impact on grain yield. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2021, *13(1)*, 468-483.