

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département des Sciences Agronomiques



MÉMOIRE



De fin d'études en vue de l'obtention de Diplôme de Master Académique
En Sciences Agronomiques
Option: Production Végétale et Agriculture Durable

THÈME:

**SUIVI ET ÉVALUATION DE L'EFFET
D'UN INOCULUM MYCORHIZIEN
NATUREL SUR DES PLANTS DE DEUX
VARIÉTÉS DE BLÉ DUR**

Réalisé par:

M^r AHMAT Al Moudassir

Sous la direction de:

M^{me} Taibi Hassiba

Devant le jury:

Président: M^{elle} Boutabtoub Ouahiba

Maitre de conférence classe « B ».UMMTO

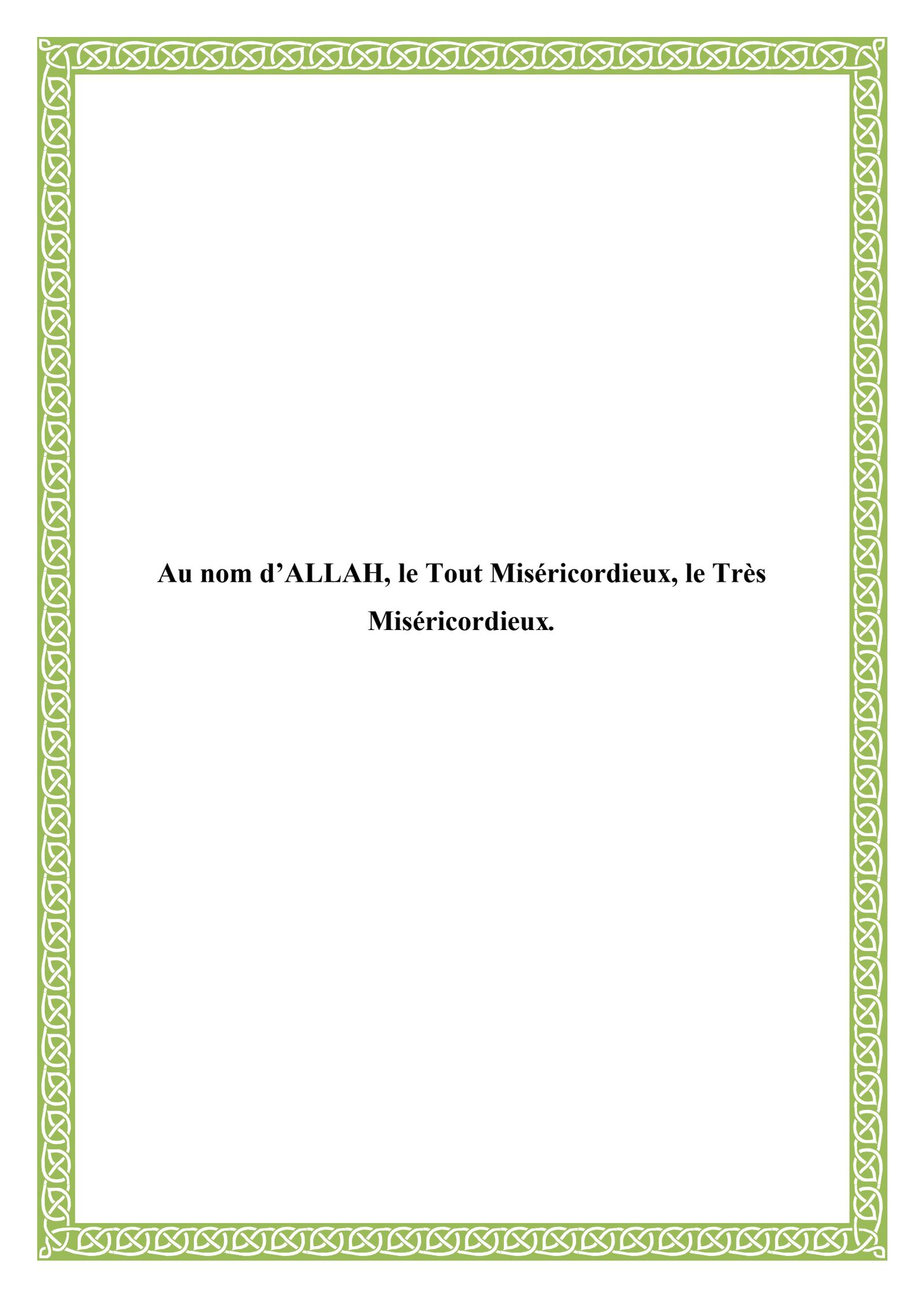
Encadreur: M^{me} Taibi Hassiba

Maitre-assistant classe « A ».UMMTO

Examineurs : M^{me} Taleb Karima

Maitre-assistant classe « B ».UMMTO

2016/2017



**Au nom d'ALLAH, le Tout Miséricordieux, le Très
Miséricordieux.**

REMERCIEMENTS & DEDICACES

*J'aimerai exprimer ma gratitude à mon encadreuse **M^{me} Taibi hassiba** pour avoir acceptée de participer à cette thèse, pour ses efforts fournis, pour ses conseils judicieux, ainsi que pour sa patience et sa persévérance dans mon suivi.*

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire de Physiologie Végétale du Département des Sciences agronomiques à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. Je remercie l'ingénieur de ce laboratoire pour son accueil et son aide à l'accomplissement de la partie pratique de ce mémoire.

*Mes remerciements vont également aux membres du jury, **M^{elle} Boutabtoub Ouahiba** et **M^{me} Taleb Karima** qui me font l'honneur de participer et juger cet essai.*

Ma reconnaissance va à l'endroit de toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à construire ce travail et à me former dès mon jeune âge.

Enfin ;

Je dédie cet humble travail à tous les membres de ma famille, mes amis et collègues.

Liste des abréviations

°C : celsius

µm : micrometre

Bous : Boussalem

cm : Centimètre

CMA: Champignons mycorhiziens à arbuscules

CNCC : Centre National de Contrôle et de Certification des Semences et des Plants, 2009

CNIS : Centre national de l'informatique et des statistiques des douanes

dS : deci siemens

ECs: Conductivité électrique de sol saturé

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'Agriculture

g/l : gramme par litre

H° : humidité

INCA : Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas

K : potassium

Kg /hab /an : Kilogramme/habitant /an

kg : kilogramme

KOH : Hydroxyde de potassium

MADRP : Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche

mM : mili mole

mm : millimètre

mS : milli siemens

Na: Sodium

NaCl : Chlorure de sodium

PH : Potentiel hydrique

q/ha : quintal/hectare

Sim : Simeto

T° : temperature

U.M.M.T.O. : Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
CHAPITRE 1 LE BLE ET LA SALINITE	
1. Le blé dur	3
1.1. Histoire et origine génétique.....	3
1.2. Présentation de l'espèce étudiée : Le blé dur	3
1.3. L'adaptation du blé dur	5
1.4. Importance du blé dur en Algérie	5
1.5. Répartition de la culture du blé dur en Algérie	6
2. La salinité	6
2.1. Définitions et généralités	6
2.2. Origine de la salinité	7
2.3. Le stress salin chez les plantes	8
2.3.1. Tolérance des plantes à la salinité	8
2.3.2. Effets du stress salin sur la plante – cas du blé dur.....	10
2.3.3. Moyens de lutte.....	11
CHAPITRE 2 : LA MYCORHIZATION DU BLE	
1. Généralités.....	12
2. Les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) et leur classification	12
3. Les Structures typique des endomycorhizes à arbuscules (MA)	13
4. Processus d'infection de la symbiose endomycorhizienne	14
5. Facteurs affectant la symbiose endomycorhizienne.....	17
6. Importance de la symbiose endomycorhizienne	17
7. Effet du stress salin sur les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA).....	18
8. Effets du CMA dans la tolérance des plantes au stress salin	19

CHAPITRE 3: L'INOCULATION MYCORHIZIENNE

1. Définition d'un Inoculum.....	21
2. Les différents types d'inoculums endomycorhiziens et leur composition	21
2.1. Les méthodes de préparation des inoculums.....	21
2.2. Composition de l'inoculum.....	22
2.3. Les formulations.....	22
3. Avantages et intérêts de l'inoculation.....	23
4. Quelques exemples d'inoculation	24
5. Avenir de la biotechnologie mycorhizienne.....	26

DEUXIEME PARTIE : EXPERIMENTATION

1. Objectif de l'expérimentation	28
2. Matériels biologiques.....	28
2.1. Plants de blé dur.....	28
2.2. L'inoculum choisi	29
3. Conduite de l'essai	29
4. Analyses et observations effectuées	31
4.1. Analyses physiques et chimiques du sol	31
Analyse granulométrique	31
• La conductivité électrique.....	31
• Le PH	31
4.2. Biomasse végétale.....	32
4.3. Observation de la mycorhization racinaire du matériel végétal récolté	32
4.4. Extraction par tamisage humide et dénombrement des spores à partir du sol des traitements étudiés	34
• Extraction	34
• Dénombrement.....	35

TROISIEMME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Caractéristiques physico-chimiques du sol rhizosphérique	36
2. Suivi de la culture	36
2.1. Levée des plants	37
2.2. Récolte des plants	38
2.3. Matière sèche	39
3. Les paramètres de mycorhization.....	40
3.1. Nombre des spores/100g de sol	40
3.2. Intensité de mycorhization	40
3.3. Intensité arbusculaire	41
3.4. Biodiversité des champignons mycorhiziens	42
Discussions	43
CONCLUSION GENERALE	45
Perspectives.....	46

Références bibliographiques

Annexes

Liste des figures

Figure 1 : Morphologie d'un plant de blé d'après Soltner (1998)	4
Figure 2 : Production nationale de céréales lors de la campagne 2014-2015 (MADRP, 2015) ..	5
Figure 3 : Evolution des rendements du blé dur 2010-2015 (MADRP, 2015)	6
Figure 4 : Production de biomasse de différents groupes de plantes suivant la salinité (Hagemeyer, 1996)	8
Figure 5 : Classification des plantes selon leur niveau de tolérance à la salinité en fonction de la concentration en sel (Munns et Tester, 2008)	9
Figure 6 : Phylogénie des Gloméromycètes d'après Shüßler et al., 2001	13
Figure 7 : Classification des Glomeromycota (http:// invan.caf.wvu.edu).	13
Figure 8 : Les différentes structures des endomycorhizes à arbuscules et à vésicules (Blaszkowski, 2003).	15
Figure 9 : Schéma des différents étapes de colonisation des champignons MA, adapté d'après (Bonfante et Genre, 2010).	16
Figure 10 : Effets du CMA sur la tolérance de la plante au stress salin et représentation du flux d'échange d'eau, minéraux (M) et composés carbonés (C) entre la plante et le champignon (Ruiz-Lozano <i>et al</i> , 2012)	19
Figure 11 : Boite de Pétri compartimentée où la racine mycorhizée se trouve d'un côté, et de l'autre coté un milieu de culture imitant le sol (J. André Fortin, 2017).	21
Figure 12 : Gamme d'inoculants mycorhiziens (ITALPOLLINA) sous forme de tablettes et granulés	23
Figure 13 : Présentation graphique des différents genres des glomales recensés dans le sol rhizosphérique de l'Ail triquètre.	29
Figure 14 : Essai de germination	30
Figure 15 : Essai expérimental en pots	30
Figure 16 : Destruction de la matière organique et fractionnement granulométrique (de gauche à droite)	31
Figure 17 : Conductivimètre avec une électrode pour mesurer la conductivité.....	31

Figure 18 : Conservation et montage des échantillons racinaires colorés au Bleu de Trypan	32
Figure 19 : Echelle d'intensité de colonisation du cortex racinaire	33
Figure 20 : Echelle d'évaluation de la présence des arbuscules	33
Figure 21 : Tamis utilisés pour l'extraction des spores	34
Figure 22 : Observation de la levée des graines dans l'essai en pots.....	37
Figure 23 : Observation des plants au stade récolte.....	38
Figure 24 : Evolution de la matière sèche par variété et par traitement (NM : non mycorhizé ; M : mycorhizé) (Bou : Boussalem ; SIM : Simeto).....	39
Figure 25 : Evolution du nombre de spores par variété et par traitement (NM : non mycorhizé ; M : mycorhizé) (Bou : Boussalem ; SIM : Simeto).....	40
Figure 26 : Evolution de l'intensité mycorhizienne (NM : non mycorhizé ; M : mycorhizé) (Bou : Boussalem ; SIM : Simeto)	40
Figure 27 : Evolution de l'intensité arbusculaire par variété et par traitement (NM : non mycorhizé ; M :mycorhizé) (Bou.Boussalem ; SIM .Simeto)	41
Figure 28 : Répartition de la biodiversité selon l'abondance relative des genres de CMA par variété et par traitement (NM : non mycorhizé ; M : mycorhizé) (Bou : Boussalem ; SIM : Simeto)	42

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification botanique du blé dur (Cronquist, 1981)	4
Tableau 2 : Caractéristiques des variétés étudiées	28
Tableau 3 : caractéristiques chimiques du substrat.....	36

Historiquement, le blé est l'une des premières céréales cultivées (Ricroch *et al.*, 2011) et est actuellement la plus consommée au monde. Selon les dernières prévisions de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'Agriculture (FAO), la production mondiale de blé serait de 750,1 millions de tonnes en 2017. Elle est produite dans le bassin méditerranéen d'une part (Europe du Sud, Moyen orient, Afrique du Nord) et en Amérique du Nord d'autre part (Canada central et Nord des USA) (Clerget, 2011).

En Algérie, le blé dur possède un rôle vivrier très important (Tellah, 2005), c'est l'espèce céréalière la plus cultivée mais sa production demeure insuffisante (Zaghouane *et al.*, 2006). Le rendement moyen obtenu entre 2010-2015 est de 16,9 q/ha (MADRP, 2015), il est faible comparativement à la moyenne mondiale et est fortement limité par de nombreux facteurs biotiques et abiotiques, dont la salinisation.

La salinisation est l'accumulation de sels dans les sols. C'est un problème écologique qui est en grande partie naturel, mais aussi la résultante de certaines activités humaines. Elle menace la productivité des terres dans les régions arides et semi-arides et notamment en cultures irriguées, ce qui entraîne une réduction des surfaces cultivables et représente une menace pour l'équilibre alimentaire du pays.

Diverses recherches visant à développer les approches technologiques consistant à modifier les sols salés par des mesures de remise en état, ou à l'adoption des approches biotiques par l'utilisation des cultures végétales tolérantes au sel, ne sont pas une démarche facile et économique pour une agriculture durable.

Dans le contexte actuel de contraintes croissantes, socioéconomiques et climatiques, le défi est d'augmenter la production agricole de façon viable et durable (Tilman *et al.*, 2002). Pour répondre à cet enjeu, on peut s'orienter vers une intensification écologique, surtout en valorisant la diversité et l'activité des microorganismes du sol au profit des plantes. C'est au niveau de la rhizosphère qu'ont lieu de nombreux dialogues entre la plante et les microorganismes. Parmi ces relations bénéfiques, il ya la symbiose mycorhizienne, elle améliore la croissance de la plante (Gianinazzi *et al.*, 2010) et peut conduire à une meilleure fertilité des sols salins (Hallman *et al.*, 1997).

En effet Les microorganismes symbiotiques sont naturellement présents dans les sols mais leur fonctionnement n'est pas toujours optimal, la symbiose peut être limitée à cause de leur nombre, de leur spécificité, d'une mauvaise efficacité ou des pratiques culturales

intensives. Il est possible de dépasser ces insuffisances en apportant à la plante une quantité importante de micro-organismes symbiotiques sélectionnés (technologie de l'inoculation).

En l'occurrence, l'inoculation mycorhizienne consiste à un apport en masse de spores ou propagules (organes de dissémination de l'espèce) des champignons sous forme d'inoculum, au niveau des racines des plantes pour faciliter la formation des symbioses mycorhiziennes.

La gestion adéquate des mycorhizes en milieu agricole permet de prolonger la qualité des sols tout en protégeant à long terme l'environnement et en réduisant les coûts de production (Abbott et Robson, 1991). L'utilisation des bio-fertilisants à base de champignons mycorhiziens arbusculaires est l'une des alternatives proposée pour améliorer la durabilité des systèmes agricoles (Deirdre et *al.*, 2009).

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire repose sur la conduite d'un essai d'inoculation mycorhizienne naturelle sur deux variétés de blé dur soumises à un stress salin. L'objectif est l'évaluation de l'impact de cet inoculum sur l'évolution de la réponse des plants de blé dur sous l'effet de la salinité.

En générale, ce mémoire est divisé en trois parties distinguées :

- ✓ La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique.
- ✓ La deuxième partie est réservée à une étude expérimentale.
- ✓ Et la dernière partie présente les résultats et discussions.

1. Le blé dur

1.1. Histoire et origine génétique du blé

Le blé est un terme communément utilisé pour désigner plusieurs céréales appartenant au genre *Triticum* et à la famille des Graminées ou Poaceae. Le terme blé désigne également le « grain » produit par ces plantes annuelles. Selon Cauderon (1982), Picard (1988) et Boyeldieu (1992), les études génétiques ont montré que ces espèces pouvaient comporter un équipement chromosomique simple, double ou triple, respectivement :

- diploïde (n=7), issus du foyer SYRIEN et nord PALESTINIEN ;
- tétraploïdes (n=14), ayant comme centre d'origine l'ABYSSINIE ;
- hexaploïdes (n=21), provenant du foyer AFGHANO-INDIEN.

L'Algérie se trouvant à proximité du centre primaire d'origine Abyssin, la diversification et le polymorphisme considérable du blé dur dans ces régions ont invité Vavilov (1934) à considérer l'Afrique du nord comme centre secondaire d'origine du *Triticum durum*.

1.2. Présentation de l'espèce étudiée : Le blé dur

Tableau 1 : Classification botanique du blé dur (Cronquist, 1981).

Règne	Plantae
Sous-règne	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta
Classe	Liliopsida
Sous-classe	Commelinidae
Ordre	Cyperales ou <u>Poales</u> (Classification APG III, (2009))
Famille	Poaceae (Graminées)
Sous-famille	Pooideae
Tribu	Triticeae
Genre	<i>Triticum</i>
Espèce	<i>Triticum turgidum</i>
Sous-espèce	<i>Triticum turgidum</i> subsp. <i>Durum</i>

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une céréale à chaume long mesurant en moyenne 1,20 m, son appareil végétatif est une talle, son inflorescence est un épi à rachis solide, à glumes carénés jusqu'à leur base et glumelle inférieure terminée par une longue barbe colorée. Connu pour son grain (ou caryopse) dur et vitreux, de section subtriangulaire, très riche en albumen, protéines et gluten.

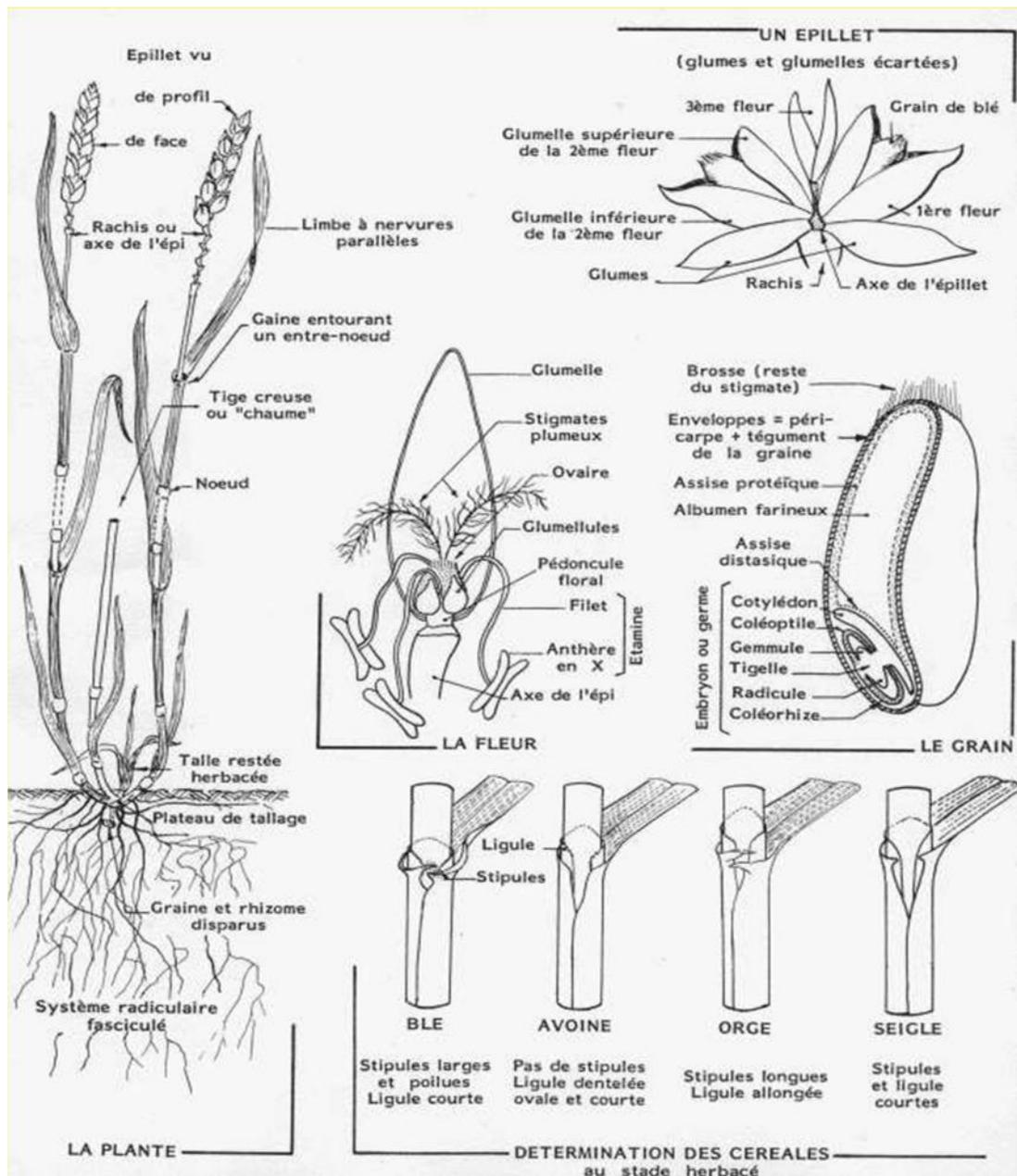


Figure 1 : Morphologie d'un plant de blé d'après Soltner (1998)

1.3. L'adaptation du blé dur

Il est bien adapté aux régions à climat relativement sec, où il fait chaud le jour et frais la nuit durant la période végétative, ce qui est typique des climats méditerranéens et tempérés. Sa température de germination peut varier entre 0°C et 15°C respectivement pour des blés d'hiver et de printemps (Bozzini, 1988 ; Schilling *et al.*, 2003).

1.4. Importance du blé dur en Algérie

Le blé dur est l'aliment de base des régimes alimentaires algériens et revêt une importance stratégique dans la nutrition humaine, sa consommation atteint le seuil de 200 kg/hab/an (Hervieu *et al.* 2006) alors que la consommation mondiale est de 100 kg/hab/an (FAO, 2014). Il est sous plusieurs formes : couscous, pâtes alimentaires, pain, frik et semoule (Anonyme, 2003).

De ce fait, le blé dur devient la première céréale cultivée dans le pays avec une superficie moyenne de 1 454 746 hectares durant la période 2012-2014 (MADRP, 2014), d'où son importance économique qui est appréciée à travers trois principaux paramètres : la production, la consommation et les importations (Anonyme, 1999).

La production nationale de blé dur est très fluctuante, elle est estimée à 21 millions de quintaux en moyenne entre 2009 et 2015 (MADRP, 2015), elle est en deçà des besoins du pays (FAO, 2015).

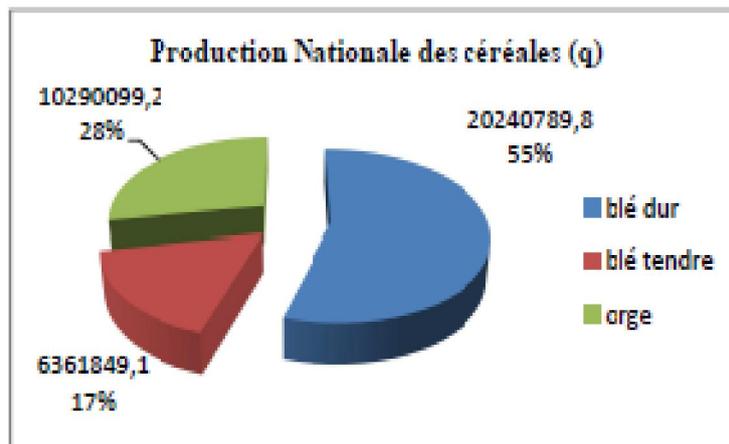


Figure 2 : Production nationale de céréales lors de la campagne 2014-2015 (MADRP, 2015)

Pour répondre à cette demande toujours grandissante, le pays a recours à l'importation, qui s'élève à 17,9 millions de quintaux en 2016 (CNIS, 2016).

En effet, le rendement moyen du blé dur varie entre 15,4 et 19,8 q/ha de 2012-2015 (MADRP, 2015) et se trouve très bas comparativement à la moyenne mondiale qui est de 30 q/ha (Destrait et Defense, 2011) et celles des pays voisins, 25 q/ha (FAO, 2010).

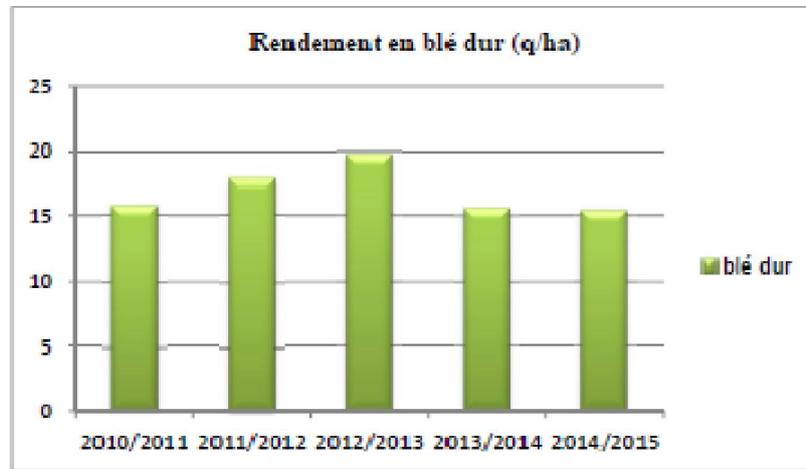


Figure 3 : Evolution des rendements de blé dur 2010-2015 (MADRP, 2015).

1.5. Répartition de la culture du blé dur en Algérie

Le blé dur est cultivé en grande partie dans les zones arides et semi arides, se caractérisant par des hivers froids, un régime pluviométrique irrégulier (Belfakih et *al.*, 2013 ; Mezni et *al.*, 2002), une forte évaporation d'eau à partir du sol (Munns et *al.*, 2006), des gels printaniers très fréquents et des vents chauds et secs en fin de cycle de culture (Selmi, 2000).

Il est également développé en zones sahariennes, où le sol présente un faible niveau de fertilité, les réserves hydriques sont importantes, non renouvelables et diversement minéralisées et les besoins en eau des cultures sont élevés à cause d'une forte demande climatique (Daoud Y. et Halitim A., 1994).

Les caractéristiques climatiques des zones céréalières d'Algérie font que la culture du blé se trouve en générale exposée aux différents stress environnementaux défavorables, parmi eux la salinisation (Chaise et *al.*, 2005).

2. La salinité

2.1. Définitions et généralités

La salinité se définit comme l'accumulation des sels hydrosolubles (sodium, magnésium, calcium, chlorure, sulfate, carbonate et bicarbonate) dans le sol. Les sels se dissolvent et se déplacent avec l'eau, quand l'eau s'évapore les sels restent, ce processus de

dégradation est appelé salinisation (Chandrasekaran *et al.*, 2014). Un sol est généralement considéré comme salin quand la conductivité électrique de sol saturé (ECs) excède 4dSm-1 (40 mM de NaCl) ou quand la teneur du sel excède 0,1% du volume du sol (Calvet, 2003). Il est important de noter un autre phénomène semblable, la sodicité, il se produit lorsque la teneur en sodium (Na⁺) échangeable du sol augmente et s'accumule dans le sol sous forme de cristaux de NaHCO₃ ou Na₂CO₃ (Toth G, 2014).

D'après les estimations de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2015), 397 millions d'hectares dans le monde correspondent à des sols salins et 434 millions d'hectares à des sols sodiques. La salinité se prolonge en Algérie avec 1,5 million d'hectares (MADR, 2004), dont une bonne partie est localisée dans les régions steppiques et plus de 20 % des sols irrigués sont concernés par ce phénomène (Douaoui & Hartani, 2007). Il est observé dans les plaines et vallées de l'Ouest, dans les hautes plaines de l'Est, aux abords des Chotts et de Sebkhass et dans le grand Sud.

La salinisation est un facteur limitant pour la production agricole, l'économie des agriculteurs, l'équilibre des écosystèmes et la qualité des ressources naturelles. Actuellement, avec la problématique du changement climatique, la salinisation des terres arables pourrait conduire à une perte supplémentaire de 30% des terres dans les 25 prochaines années (Porcel *et al.*, 2011), raison pour laquelle la gestion des sols salins et la limitation des impacts reste un enjeu mondial.

2.2. Origine et de la salinité

Les sels responsables de la salinité ont diverses origines :

- **Salinisation primaire** ou naturelle (80% des terres salines) est due aux sels formés lors de l'altération des roches ou par des apports naturels externes : inondations périodiques par de l'eau de mauvaise qualité... (Forster *et al.*, 1990).
- **Salinisation secondaire** (20% des terres salinisées) est induite par l'activité humaine qui est liée à des pratiques agricoles inappropriées par exemple l'irrigation avec de l'eau riche en sel et/ou un drainage insuffisant (FAO, 2008), elle peut être due à la remontée capillaire des eaux souterraines salines voire même l'utilisation excessive d'engrais (Forster *et al.*, 1990).

Les facteurs qui contribuent à l'extension des terres salines en Algérie sont liés à l'aridité du climat qui porte sur plus de 95% du territoire, la qualité médiocre des eaux d'irrigation, le système de drainage souvent inexistant ou non fonctionnel et la conduite empirique des irrigations (Daoud Y. et Halitim A., 1994 ; Saidi, J. 2004).

2.3. Le stress salin chez les plantes

Le stress est défini comme une force ou influence externe qui empêche le développement normal de la plante (Hopkins, 2003). La présence élevée de sel dans les sols, peut être considérée comme un stress au vu de son impact sur la croissance et le développement de la plante (Porcel *et al.*, 2011). Les effets du stress salin sur les plantes sont divers et étroitement liés à la réponse des plantes.

2.3.1. Tolérance des plantes à la salinité

Suivant leur production de biomasse en présence de sel, quatre grandes tendances ont été discernées (voir figure 4)

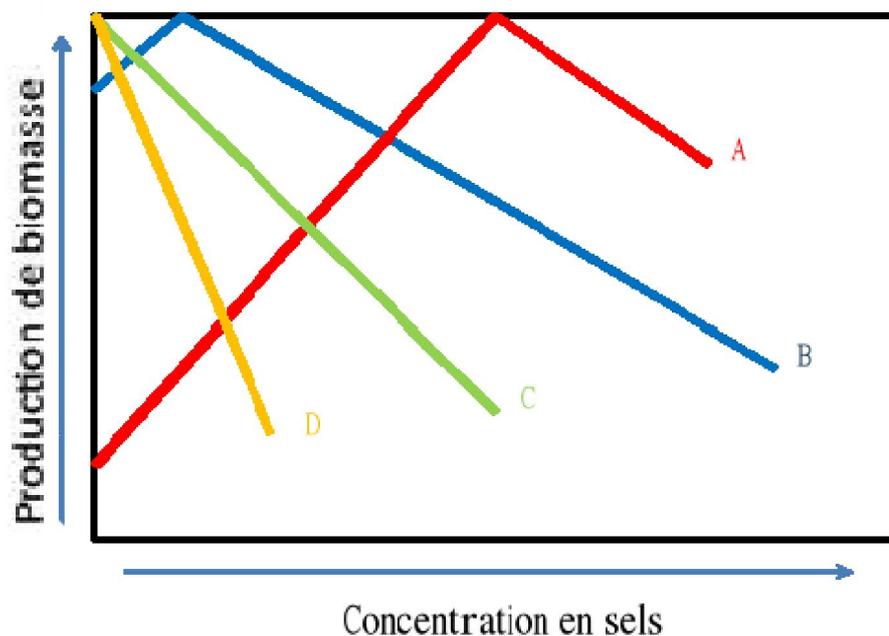


Figure 4 : Production de biomasse de différents groupes de plantes suivant la salinité

D'après Hagemeyer (1996), cité par Hervé *et al.*, (2004)

- ✚ **Les Halophytes vraies (A)** dont la production de biomasse est stimulée par la présence de sel. Ces plantes présentent des adaptations poussées et sont naturellement favorisées par ces conditions par exemple le cas de *Suada maritima*....

- ✚ Les **Halophytes facultatives (B)** montrent une légère augmentation de la biomasse à de teneurs faibles en sel : *Plantago maritima*, *Aster tripolium*
- ✚ Les **Non-Halophytes résistantes (C)** peuvent supporter des faibles concentrations en sel : *Hordeum sp*
- ✚ Les **Glycophytes ou Halophobes**, sont sensibles à la présence de sel : *Phaseolus vulgaris*.

La figure 5, illustre la classification de quelques espèces d'intérêt agronomique selon le taux de réduction de leur rendement sous l'effet du sel à divers concentration mesuré en (mM).

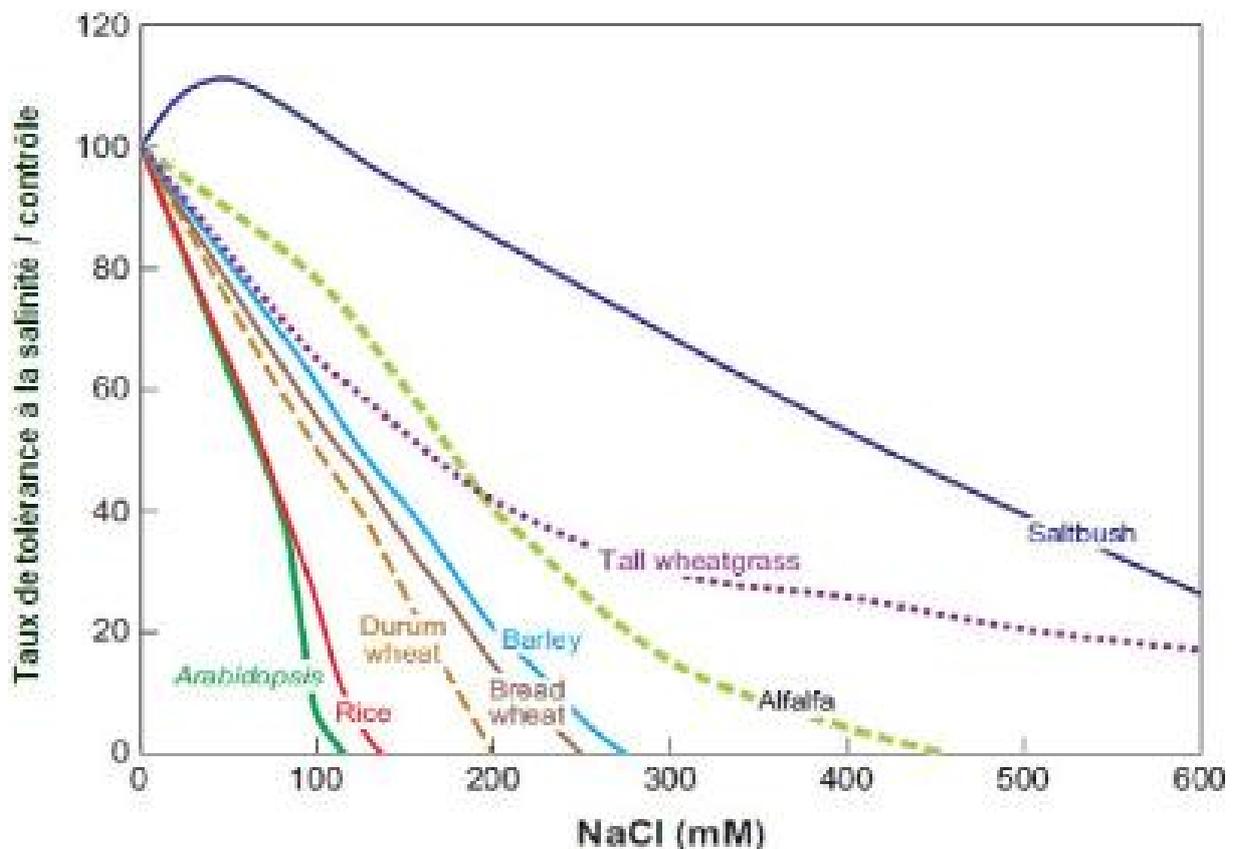


Figure 5 : Classification des plantes selon leur niveau de tolérance à la salinité en fonction de la concentration en sel (Munns et Tester, 2008).

En l'occurrence, le blé dur est considéré comme moyennement tolérant (Porcel *et al.*, 2011).

2.3.2. Effets du stress salin sur la plante – cas du blé dur

Les effets néfastes de la salinité sur les plantes incluent la toxicité des ions, l'effet osmotique, les insuffisances minérales, les perturbations physiologiques et biochimiques et les combinaisons de ces effets (Munns, 2002; Hasegawa *et al.*, 2000 ; cités par Netendo *et al.*, 2004).

En premier lieu, la salinité affecte la germination en baissant le potentiel hydrique autour des graines, ce qui rend l'eau inaccessible à cette dernière pour la réhydratation et la reprise de la vie active de l'embryon (Karmous, 2007; Kayani *et al.*, 1990).

Bayuelo *et al.*, (2002) ont montré que le stress salin augmente le rapport partie racinaire/partie aérienne, les plantes maintiennent une croissance racinaire relativement importante en vue de la recherche d'eau et/ou de la réduction des pertes d'eau et garde ainsi un statut hydrique élevé.

Son effet majeur sur la partie aérienne se traduit par une réduction du nombre de talles et de feuilles et l'augmentation du phyllocrone. Elle modifie l'architecture de la plante, généralement par la diminution de la croissance en hauteur (Katerji *et al.*, 2006).

La salinité affecte la productivité végétale principalement par la réduction de l'activité photosynthétique de la plante (Alem *et al.*, 2002) qui est accentué par la diminution de la surface des feuilles (Abdelly *et al.*, 1995), de leurs potentiels hydriques (Munns et Tester, 2008) et leurs teneurs en chlorophylle (Gadallah, 1999). Ainsi, la fermeture des stomates engendrée (Allen, 1995) réduit la conductance stomatique (Orcutt et Nilsen, 2000). Le taux de CO₂ assimilé, le métabolisme azoté et la synthèse protéique sont aussi sévèrement touchés.

Enfin, ce stress réduit le taux de croissance du blé, de ces organes reproducteurs et entraîne une mauvaise remobilisation des réserves au cours de la phase de remplissage (Hu *et al.*, 2005), il en résulte un développement anormal des plantes et une diminution du rendement de blé dur (Saadollah Houshmand *et al.*, 2005).

Cependant, il faut signaler que des faibles concentrations de sel dans le milieu peuvent stimuler la croissance (Colmer *et al.*, 1995), ce phénomène est observé chez des variétés tolérantes de triticales et du blé (Hamza, 1967) mais les processus impliqués dans cette stimulation sont encore mal compris.

Globalement, la salinité induit plusieurs effets néfastes entraînant de grandes pertes de productivité (Evelin *et al.*, 2009). Le coût de ces pertes est estimé être d'environ 12 milliards de dollars US pour une année, prix qui devrait sans doute augmenter dans les années à venir (Ghassemi F. 1995), puisque la salinisation gagne régulièrement du terrain.

2.3.3. Moyens de lutte

Le stress salin peut être géré grâce à l'application d'osmoprotectants, de régulateurs de croissance, la sélection génétique, la biotechnologie ou encore avec l'aide des microorganismes comme les PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) ou l'utilisation des champignons mycorhiziens à arbuscules (ou CMA).

En agriculture durable, les solutions à ce problème devraient inclure à la fois l'amélioration des plantes pour la tolérance au sel et l'application des processus biologiques tels que les mycorhizes (Suarez, 1989). À cet égard, l'étude des niveaux de population, de l'efficacité des mycorhizes à arbuscules (MA) dans les sols salins et l'impact de différents facteurs de ces sols sur leurs activités est très important.

1. Généralités

Ce n'est que depuis quelques décennies que les botanistes et mycologues ont réalisé que la presque totalité des plantes terrestres vivent en symbiose avec des champignons du sol (Mosse, 1956). Le terme mycorhize, qui résulte de la combinaison de deux mots grecs 'mukès' (champignon) et 'rhiza' (racine), désigne l'association symbiotique entre des champignons bénéfiques du sol et les racines des plantes et est à la base, une interface d'échange bidirectionnel de nutriments. (Smith & Read, 2008).

Les champignons mycorhiziens sont hétérotrophes pour le carbone, ils ont donc besoin des ressources carbonées qui sont produites par l'activité photosynthétique de la plante. En contrepartie, le champignon prélève et transporte des nutriments minéraux et de l'eau à la plante (Honrubia, 2009).

Utilisé pour la première fois par Frank (1885), le terme «mycorhizes» regroupe aujourd'hui plusieurs types de symbioses mycorhiziennes selon le champignon impliqué et les structures symbiotiques formées. Les blés forment des endomycorhizes à arbuscules (MA) (Trouvelot et *al.*, 1982), nous nous sommes donc intéressés à leur étude.

2. Les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) et leur classification

Les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) ou endomycorhizes à arbuscules (MA) constituent la symbiose végétale la plus répandue à l'échelle planétaire (Smith & Read, 2008). Ils se distinguent par la présence d'un réseau extra-racinaire et intra-racinaire d'hyphes qui pénètrent la cellule en perforant la paroi, sans perforer la membrane plasmique. Ces hyphes intra-racinaires forment alors des arbuscules (Bonfante, 2001, Peterson *et al.*, 2004).

Les champignons concernés appartiennent à l'ancien ordre des Glomales (Zygomycètes) et sont aujourd'hui regroupés dans le phylum monophylétique des Glomeromycota ou Glomeromycètes (Schwarzott et *al.*, 2001; Hibbett et *al.*, 2007). Ce sont des champignons filamenteux cenocytiques qui colonisent à la fois le sol et les racines en établissant un pont entre la rhizosphère et la plante (Dalpé, 2005).

Une grande diversité morphologique s'observe au niveau de leurs spores (Smith et Read, 1997). Jusqu'à présent, il existe plus de 200 espèces réparties en 4 ordres différents (*Archaeosporales*, *Paraglomerales*, *Diversisporales* et *Glomerales*), il est possible que d'autres espèces restent encore à découvrir (Shüßler *et al.*, 2001). Une classification simplifiée est présentée dans les figures (6 et 7).

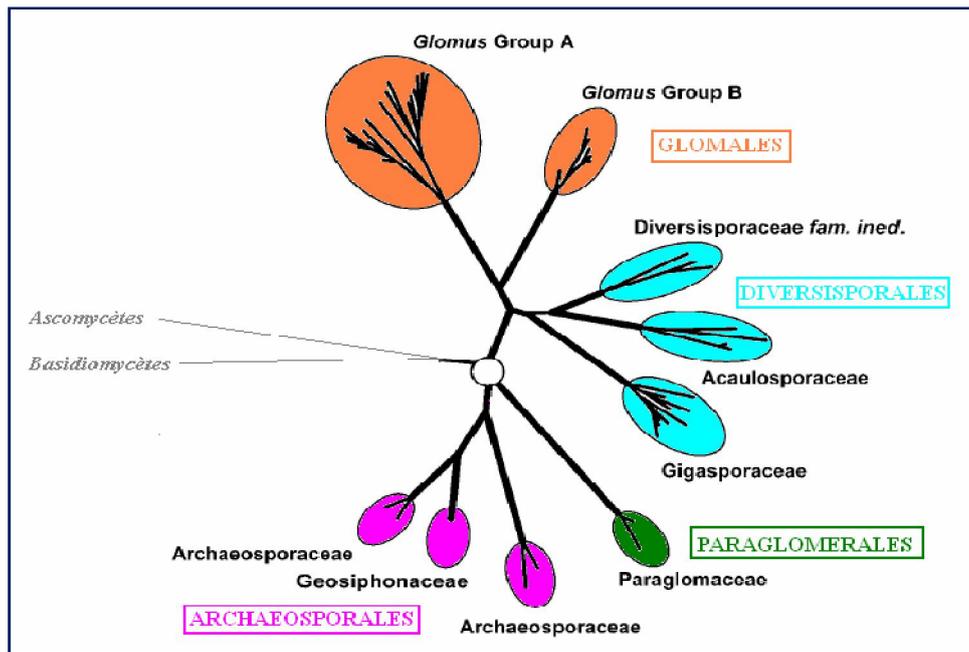


Figure 6: Phylogénie des Gloméromycètes d’après Shüßler et al., (2001).

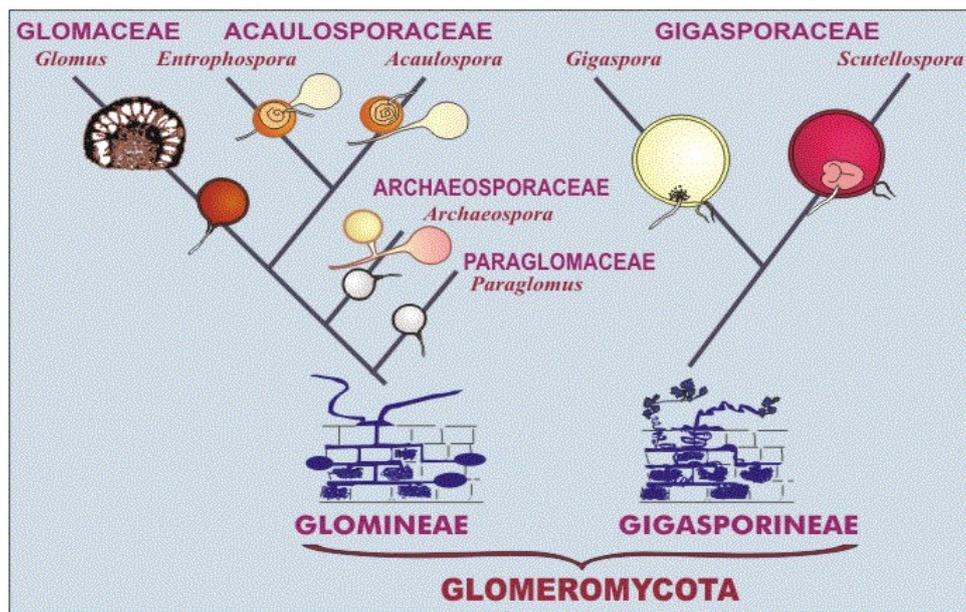


Figure 7: Classification des Glomeromycota (<http://invan.caf.wvu.edu>).

3. Les structures typiques des endomycorhizes à arbuscules (MA)

Les MA se composent des structures intra et extra racinaires. Les structures intra racinaires sont : les arbuscules, les vésicules et les hyphes. Les structures extra racinaires sont des hyphes, des spores et des cellules auxiliaires, ces dernières sont formées uniquement au niveau des genres *Gigaspora*, *Pacispora* et *Scutellospora* (Oehl et al., 2008).

❖ Les arbuscules sont les principaux sites d'échange de nutriments entre la plante hôte et le champignon (Declerck, 2014, Gianinazzi-Pearson *et al.*, 1989). Ils sont formés à l'intérieur des cellules du cortex racinaire interne (Mosse, 1973). Le noyau de la cellule hôte envahi par l'arbuscule s'agrandit. Les arbuscules ont une durée de vie limitée (4-10 jours), peu de temps après leur formation, ils sont digérés par la plante-hôte et les noyaux des cellules envahies reprennent leurs tailles normales. Ces structures diffèrent par leur morphologie, en fonction de l'appartenance génétique de l'espèce fongique (Morton, 2000).

❖ Les vésicules sont des structures globuleuses ovales ou sphériques en position intercalaire ou apicale sur l'hyphe principal. Les vésicules sont intra ou intercellulaires suivant l'hôte. Elles renferment des gouttelettes de lipides et glycolipides. Par conséquent, elles constituent une structure de stockage et de reproduction (Declerck, 2014, Peterson *et al.*, 2004, Mosse, 1981).

❖ Les hyphes sont des filaments non cloisonnés, leurs ramifications forment un mycélium extra racinaire permettant à la plante d'explorer un volume de sol plus étendu. Les hyphes intracellulaires dans les racines, contiennent un matériel de stockage et peuvent prendre part dans le transport des substances absorbées par les hyphes extra-racinaire du sol ou directement des cellules racinaires de la plante hôte (Blaszkowski, 2003).

❖ Les cellules auxiliaires sur les hyphes extra-racinaires, jouent un rôle dans la reproduction et un rôle transitoire de stockages des éléments carbonés. Elles sont d'un aspect épineux chez les *Gigaspora* et noueuses ou épineuses en surface chez les espèces du genre *Pacispora* et *Scutellospora* (Morton, 2000).

❖ Les spores sont des organes de conservation, de dispersion ou moyen d'une reproduction asexuée. La reproduction sexuée n'a jamais été observée et des études confirment que les CMA sont des anciens asexués (Declerck, 2014, Gandolfi *et al.*, 2003). Les spores sont de forme globoïde (sphérique) ou acaulosporoïde (forme ovale, allongée) et multi-nucléées. Leur paroi est chitineuse, la forme, la couleur et la taille varient en fonction des espèces (Hosny *et al.*, 1998).

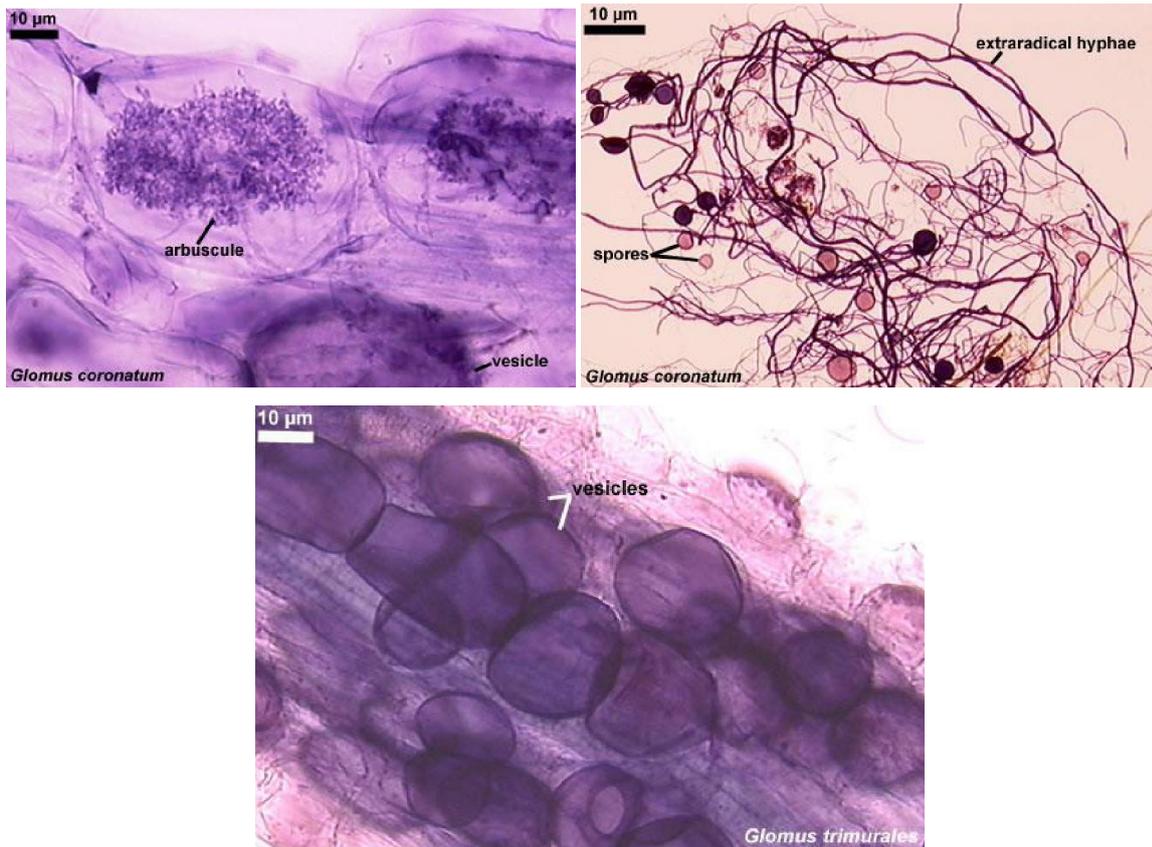


Figure 8 : Les différentes structures des endomycorhizes à vésicules et arbuscules (Blaszkowski, 2003).

4. Processus d'infection de la symbiose endomycorhizienne

L'infection se produit à partir de propagules (spores, fragments d'hyphes de mycorhizes). Il existe plusieurs voies de pénétration, les hyphes du champignon pénètrent dans la racine soit par les poils absorbants (Boullard, 1968), soit directement dans les cellules corticales (Scannerini et Bonfante-Fasolo, 1982) et plus rarement entre les cellules corticales (Jacquelinet, 1986). Après pénétration, les hyphes forment des structures très ramifiées appelées arbuscules et dans certains cas, des renflements terminaux ou vésicules. Les arbuscules ne pénètrent pas dans le protoplasme, mais provoquent une forte invagination de la membrane plasmique, ce qui augmente sa surface et facilite les échanges entre partenaires symbiotiques (Raven et *al.*, 2007). Tout le processus de pénétration et de la formation de l'endomycorhize se réalise en trois phases (Figure 9).

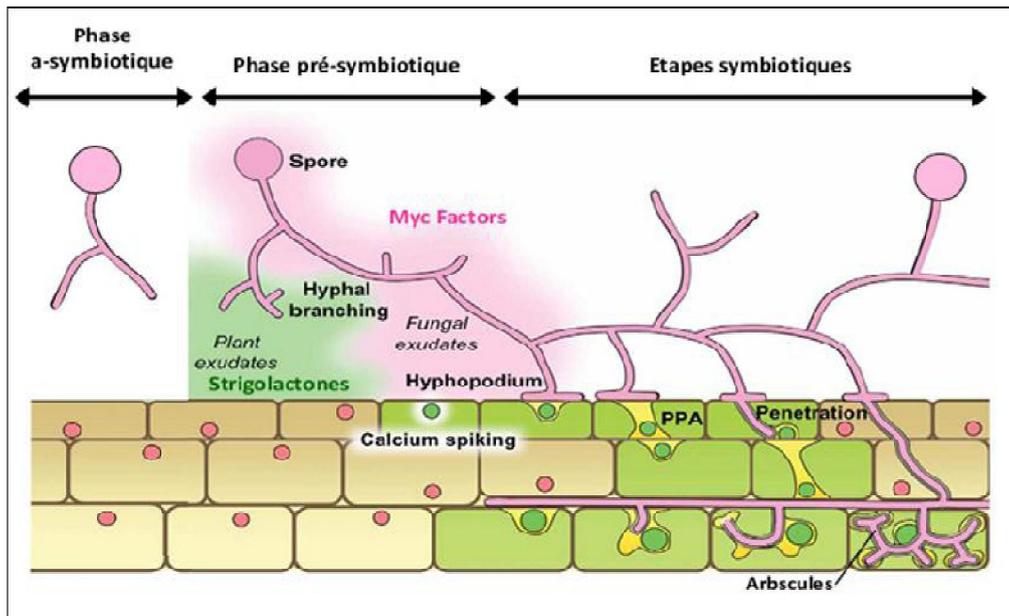


Figure 9 : Schéma des différents étapes de colonisation des champignons MA, adapté d'après (Bonfante et Genre, 2010).

(1) Après la germination des spores (stade asymbiotique) ; (2) La présence de champignons mycorhizogènes près des racines des plantes hôtes conduit à un échange de signaux entre les deux symbiotes, c'est la phase présymbiotique ; (3) Le stade symbiotique commence avec le contact avec la surface des racines, les hyphes fongiques forment ainsi une structure appelée "appressorium". À partir de cette structure de reconnaissance, le champignon développe des hyphes intraradiculaires et pénètre dans les tissus de la racine jusqu'à ce qu'ils atteignent la couche interne de cellules corticales ;(4) Le champignon pénètre ensuite les cellules corticales où il forme des structures intracellulaires appelées à cause de leur forme «arbuscule». Cette structure qui est bordée du plasmalemme de l'hôte constitue le site actif pour l'échange bidirectionnel de nutriments : eau et éléments minéraux vers la plante, et glucides vers le champignon ; (5) L'espace périarbusculaire (EPA) désigne l'interface qui se forme entre la membrane fongique et la membrane périarbusculaire (MPA) de la plante. En plus de l'absorption des nutriments, la colonisation des racines par des champignons MA peut conduire à la protection des plantes contre une large gamme de pathogènes racinaires ; (6) le cycle de vie des champignons MA est complété par la formation de spores au niveau du mycélium extraradical, qui peuvent entrer dans un autre processus de colonisation (Tisserant, 2011)

5. Facteurs affectant la symbiose endomycorhizienne

La germination des spores : mis à part le facteur dormance qui est une caractéristique du champignon mycorhizien (Juge et *al.*, 2002), d'autres facteurs externes tels que la présence d'exsudats racinaires et leur concentration en substances flavonoïdes (Gianinazzi-Pearson et *al.*, 1989; St-Arnaud et *al.*, 1996), les caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol (T° , pH, H° , lumière, CO_2) et la présence de certaines bactéries peuvent influencer la germination des spores.

L'inoculum fongique : est influencé par certains facteurs agronomiques tels que le précédent cultural. Si c'est une culture mycophile comme le blé, elle peut augmenter le niveau de mycorhization de la culture suivante (Boswell et *al.*, 1998). Les adventices peuvent être également des hôtes intermédiaires des champignons MA et favorisent ainsi leur développement (Kabir et Koide, 2000).

La diversité biologique au sein des communautés de champignons MA du sol :

Elle subit une pression de sélection complexe causée par les pratiques agricoles telles que la fertilisation minérale, le travail du sol, l'emploi de pesticides et la monoculture (Gosling et *al.*, 2006 ; Chiffrot, 2008).

- Le travail du sol provoque la destruction perpétuelle du réseau d'hyphes et l'enfouissement des propagules en profondeur par le labour (Oehl et *al.*, 2005), il influence ainsi le niveau de colonisation des racines par les MA et crée un changement dans la structure des communautés de champignons MA (Jansa et *al.*, 2003) qui se traduit généralement par une perte globale de diversité, du moins dans l'horizon labouré (Jasper et *al.*, 1991).

- La fertilisation provoque une augmentation de la concentration en azote et en phosphore dans la solution du sol ce qui diminue la teneur en sucres solubles dans les racines. Or cette teneur détermine les possibilités de nutrition, de l'association et le taux de colonisation mycorhizienne (Le Tacon et *al.*, 1999).

6. Importance de la symbiose endomycorhizienne

La diversité taxonomique des champignons mycorhiziens et leur rôle comme bio-fertilisants et bio-protecteurs reflète les liens étroits qu'ils entretiennent avec la communauté végétale et leur rôle clé dans la durabilité des écosystèmes agricoles et forestiers. En effet, ils forment un réseau d'hyphes pouvant atteindre des dimensions considérables, supérieure à 105 km.ha⁻¹ (Miller et Jastrow, 1992), ou plusieurs dizaines de mètres par gramme de sol (Leake et *al.*, 2004), ce qui permet :

- le prélèvement des ions, surtout ceux à faible mobilité comme le phosphore, (Smith & Read, 2008).
- un ajustement des plantes aux conditions locales du sol (Lerat *et al.*, 2003) et une acclimatation aux stress abiotiques et biotiques (Dalpé, 2005).
- une coexistence entre plusieurs espèces végétales, par une translocation de métabolites via un pont mycélien créé par un réseau d'hyphes connectant plusieurs plantes (phénomène d'anastomose) de même espèce ou d'espèces différentes (Simard et Durall, 2004), permettant ainsi le transfert de nutriments entre elles (Newman, 1988), ce qui influencera la succession des communautés végétales et la compétitivité (Fitter, 1977). Si une perturbation mécanique se produit, le réseau interconnecté est aussitôt rétabli (Voet *et al.*, 2006).
- Une meilleure stabilisation des agrégats du sol grâce à la libération par les hyphes d'une glycoprotéine, la glomaline (Rillig et Mummey, 2006 ; Rillig *et al.*, 2002).
- Les mycorhizes présentent un impact sur la microflore du sol en influençant l'environnement physico-chimique de la rhizosphère et en contrôlant diverses interactions microbiotiques du sol (Barea *et al.*, 2002).

7. Effet du stress salin sur les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA)

Les CMA, comme les plantes, sont aussi affectées par la salinité, elle peut perturber la capacité de colonisation, la germination de spores et la croissance des hyphes (Porcel *et al.*, 2011).

Certaines études indiquent que dans les substrats contenant un faible potentiel hydrique, ce qui est le cas en présence du sel, la germination des spores peut être retardée. Elle peut même être inhibée en cas de forte sécheresse (Juniper & Abbott, 1993, Porcel *et al.*, 2011).

Comme décrit plus haut, le stress salin affecte la croissance et le développement de la plante et réduit la photosynthèse. Or, la croissance du CMA est dépendante des produits issus de la photosynthèse. Le CMA et la plante peuvent ainsi entrer en compétition pour leurs besoins en carbone. Le développement et fonctionnement du CMA peuvent alors être perturbés (Juniper & Abbott, 1993).

Finalement, d'autres études montrent que l'intensité de colonisation et l'abondance de vésicules et arbuscules sont réduits avec l'augmentation de sel, tout comme la réduction

significative de la longueur des hyphes et nombre de « branched absorbing structures » (BAS) en présence de 100 mM de NaCl (Juniper & Abbott, 1993, Porcel *et al.*, 2011).

8. Effets du CMA dans la tolérance des plantes au stress salin

Plusieurs études ont été menées sur le rôle des champignons mycorhiziens dans la protection des plantes contre le stress salin. Elles indiquent qu'en général, la symbiose avec un CMA résulte en une augmentation du prélèvement des nutriments (phosphore, azote, potassium, cuivre, zinc et magnésium (Porcel *et al.*, 2011), une accumulation d'osmorégulateurs, une augmentation de la capacité photosynthétique et une meilleure utilisation de l'eau, avec une croissance améliorée de la plante et un poids sec de feuilles et racines supérieurs (Evelin *et al.*, 2009). Ces études suggèrent que l'allègement des effets négatifs du stress salin sur les plantes mycorhizées, résulte de l'interaction de plusieurs mécanismes nutritionnels, biochimiques et physiologiques et moléculaires (Figure 10).

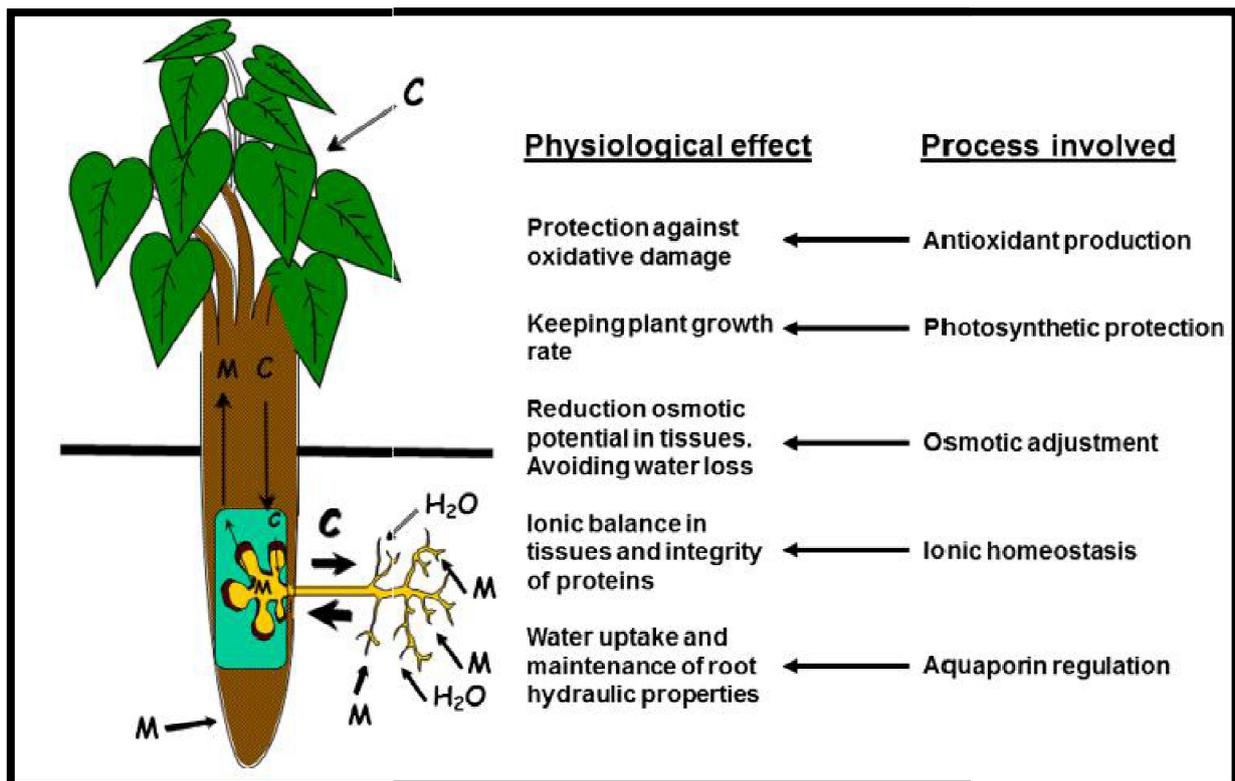


Figure 10 : Effets du CMA sur la tolérance de la plante au stress salin et représentation du flux d'échange d'eau, minéraux (M) et composés carbonés (C) entre la plante et le champignon (Ruiz-Lozano *et al.*, 2012)

Il est établi que les plantes qui se développent dans les sols salins sont soumises à une sécheresse physiologique car les ions Na^+ et Cl^- sont très hydrophiles et retiennent l'eau qui est nécessaire à la plante. Des études ont rapporté que les plantes mycorhizées contiennent une quantité d'eau plus élevée que celles non mycorhizées. L'amélioration de la conductivité hydraulique de racines est facilitée grâce aux modifications du système racinaire induite par la mycorhization (Evelin *et al.*, 2009).

En outre, des incréments de l'expression des aquaporines dans les plantes mycorhizées a été rapporté. Les aquaporines, sont des protéines de la membrane cellulaire, qui permettent le mouvement passif des molécules d'eau suivant un gradient osmotique. De cette manière la plante peut utiliser l'eau plus efficacement et diminuer le stress hydrique induit par la salinité élevée (Bothe, 2012).

Par ailleurs, en condition de stress salin, il semble que l'accumulation de K^+ par les plantes mycorhizées aide au maintien d'un ratio K/Na élevé, prévenant ainsi la perturbation de nombreux processus enzymatiques et l'inhibition de la synthèse protéique (Porcel *et al.*, 2012).

De plus, les racines des plantes mycorhizées ont un faible potentiel osmotique grâce à l'accumulation des solutés (osmolytes), de proline et de bétaïne. Cela permet un meilleur ajustement osmotique pour la plante, contribue au maintien de la turgescence des cellules et assure ainsi divers processus comme l'expansion cellulaire, l'ouverture des stomates, la photosynthèse et la croissance de la plante (Evelin *et al.*, 2009).

Enfin, certaines études suggèrent que la symbiose avec le CMA améliore l'activité des enzymes antioxydantes comme le superoxyde dismutase (SOD), les catalases, peroxydases, ainsi que les ascorbates qui, eux, amenuisent la quantité cellulaire des ERO (espèces réactives de l'oxygène) et minimisent l'apparition des dégâts oxydatifs dans les cellules de la plante (Bothe, 2012).

Ceci dit, communément les champs agricoles sont pauvres en CMA, sans doute dû aux pratiques culturales et stress abiotiques qui modifient la diversité et diminuent la quantité des propagules mycorhiziennes (Fortin *et al.*, 2008). Un apport exogène en mycorhizes est fort utile pour une restauration et une réintroduction de ces microorganismes bénéfiques.

1. Définition d'un inoculum

Formulation liquide ou solide contenant un ou plusieurs microorganismes vivants et utilisée pourensemencer ou enrichir un support de culture (Marie-Line H., 2013).

2. Les différents types d'inoculums endomycorhiziens et leur composition

2.1. Les méthodes de préparation d'un inoculum mycorhizien

Les champignons mycorhiziens à vésicules et arbuscules sont des symbiotes obligatoires strictes, c'est à dire dépendants de la présence d'une plante hôte pour se développer et se multiplier. Le producteur d'inoculum est alors tenu de co-cultiver le complexe « champignon-plante hôte ». Les deux technologies de production d'inoculum les plus utilisées à ce jour sont:

✚ **La méthode dite conventionnelle**, consistant à multiplier les champignons endomycorhiziens sur les racines d'une plante-hôte entière, cultivée en conditions contrôlées en serre ou en chambre de culture.

✚ **La méthode in vitro** en conditions axéniques, sans plante hôte, ce qui consiste à multiplier le champignon endomycorhizien sur des racines isolées de leur tige et cultivées sur milieu synthétique en conditions stériles, la partie aérienne photosynthétique étant remplacée par un apport en sucre et en minéraux essentiels dans leur milieu de culture (N, P, K, etc.).



Figure 11: Boîte de Pétri compartimentée où la racine mycorhizée se trouve d'un côté, et de l'autre coté un milieu de culture imitant le sol (J.A. Fortin, 2013)

2.2. Composition d'un inoculum mycorhizien

L'inoculum sous forme solide ou en suspension liquide pourra se composer de différents types de propagules : spores, mycélium fongique, fragments de racines mycorhizées et plus rarement de vésicules. Un ou plusieurs types de propagules peuvent être formulés dans un même inoculum endomycorhizien.

Les inoculums de champignons endomycorhiziens peuvent contenir une ou plusieurs espèces fongiques mélangées. Les produits multi-espèces sont plus proches des conditions naturelles car dans les écosystèmes naturels, il est rare de ne rencontrer qu'une seule espèce de champignon mycorhizien. La présence de plusieurs espèces fongiques permet à l'inoculum de répondre à une plus grande diversité de conditions de culture.

2.3. Les différentes formulations

Produire des inoculums est une chose, mais assurer le succès de l'inoculation selon les différentes pratiques et les différents équipements utilisés constitue un autre défi majeur.

En fonction du mode d'application envisagée, l'utilisateur aura à choisir la forme d'inoculum la plus appropriée à ses besoins. Actuellement, il est possible de trouver des inoculums mycorhiziens sous forme de:

- Poudres très fines (particules < 250 µm), permettant de préparer une suspension pulvérisable sur les supports de culture ou injectable dans le sol au pied de végétaux déjà installés.
- Les suspensions liquides conviennent aussi pour l'enrobage des semences.
- Micro granulés, entre 1 et 4 mm, ils sont facilement mélangés aux supports de culture pour la production de plants mycorhizés ou apportés dans le trou de plantation au plus près des racines.
- Tablettes, permettant un dosage aisé de l'inoculum à apporter dans le trou au moment de la plantation des végétaux. L'inoculum apporté est localisé à un seul endroit et non réparti uniformément sur le chevelu racinaire.
- Associé à un pralin, l'inoculum est particulièrement adapté pour les végétaux à racines nues. En une seule opération, la plante est inoculée et ses racines protégées.



Figure12: Gamme d'inoculants mycorhiziens sous forme de tablettes et granulés (ITALPOLLINA)

Un inoculum mycorhizien doit être positionné près des racines. Pour les plants déjà en place, il faut éviter les produits préconisés en épandage à la surface du sol et privilégier le mode d'apport par injection ou par enfouissement. Enfin, il est également possible de trouver sur le marché des produits « 2 en 1 » tels que :

- ✚ Les supports de culture déjà inoculés, prêts à l'emploi sont particulièrement adaptés pour la culture hors sol.
- ✚ Les plants mycorhizés (vigne, châtaignier ...) prêts pour la plantation et dont la mycorhization aura été contrôlée avant la commercialisation.
- ✚ Les semences enrobées avec des propagules d'endomycorhizes (principalement des spores) qui permettent de semer et d'inoculer une parcelle en un seul passage.
- ✚ Des engrais et amendements organiques contenant des propagules d'endomycorhizes (distribués via les circuits d'arrosage par exemple).
- ✚ Une formulation contenant à la fois les rhizobiums et les spores des champignons mycorhiziens (lentille ...).

3. Avantages et intérêts de l'inoculation mycorhizienne

Des nombreuses expériences démontrent le plus souvent que l'addition aux sols de spores ou propagules de ces champignons (inoculum) se traduit par un départ plus rapide du développement de la plante, une floraison plus hâtive et des rendements accrus (J.A. Fortin, 2013). D'autres résultats plus spécifiques sont signalés à savoir :

- * En améliorant la physiologie de la plante, notamment en condition de stress hydrique et nutritif (J.A. Fortin, 2013), la technique d'inoculation représente une opportunité en zones

sèches pour optimiser la production agricole et forestière (Gagné et McNicoll, 2010), cet apport devrait alors permettre de réduire de façon sensible les variations de rendement d'un certain nombre de spéculations soumis à des stress, en particulier en conditions de culture pluviale.

- * Dans le domaine de la fertilisation, l'utilisation des inoculums mycorhiziens permet d'améliorer la fertilité des sols, de réduire l'utilisation d'engrais phosphatés et l'importation d'intrants agricoles, coûteuse en devises et en énergie.

- * C'est une pratique non polluante, son utilisation permet la protection des ressources naturelles (réduction notamment de la pollution des nappes phréatiques).

- * L'incidence des maladies est également moins fréquente, ce qui améliore la protection phytosanitaire (Leyval et Joner, 2001 ; Joner et Leyval, 2003) et se traduit par une réduction de l'utilisation des biocides.

- * En pépinière des essences forestières, l'introduction d'un inoculum mycorhizien abondant et diversifié pendant la phase d'élevage, permet d'optimiser les performances de la plantation de l'arbre (baisse de la crise de transplantation), facilitant ainsi les opérations de reboisement (Duponnois et *al.*, 2005, 2007).

- * L'établissement de la symbiose fixatrice d'azote est également stimulé par ce type d'inoculation fongique, de nombreux résultats témoignent des liens très étroits qui régulent le fonctionnement de ces deux types de symbiose (André et *al.*, 2003 ; Samba et *al.*, 2002 ; Matiru et Dakora, 2004).

- * Augmentation de la résistance aux agents pathogènes du sol.

- * Meilleure efficacité de l'irrigation.

4. Exemples d'utilisation d'inoculums mycorhiziens

- **Cuba**

Suite à la dislocation de l'Union des Républiques Socialistes Soviétiques (URSS), principal fournisseur en engrais chimiques et produits phytosanitaires, des pratiques agro-écologiques très variées ont été développées à Cuba pour augmenter la fertilité des terres et compenser les engrais importés désormais non disponibles (Febles – González et autres 2011).

En 1991, les chercheurs cubains qui utilisaient déjà les inoculums naturels (sol et propagules), connaissaient leurs effets positifs sur les cultures. Cependant les méthodes artisanales n'étaient pas pratiques pour les agriculteurs et relativement peu efficaces

(Fernández, 2003). Les recherches étaient donc axées sur le développement des inoculants mycorhiziens adaptés aux différents types de sols et aux conditions culturelles du pays.

Après tant d'évolution, ces bioproduits sont aujourd'hui fabriqués par une technique de culture en pots où l'on fait croître les champignons mycorhiziens avec des plantes hôtes mycotrophes dans un sol stérilisé. Ils sont commercialisés sous le nom : EcoMic (Hamel and Plenchette, 2007).

Les spores, les hyphes et les racines mycorhizées produits sont ensuite extraits et puis concentrés afin d'obtenir le produit fini. La série d'inoculants mycorhiziens est à base de propagules de plusieurs espèces comme *Glomus fasciculatum*, *Glomus mosseae*, *Glomus claroideum* et *Glomus clarum* (Fernandez, 2003).

Les inoculants EcoMic ont fait leurs preuves quant à leur effet positif sur les cultures, en permettant des augmentations de rendement entre 12% et 78% (Rivera, 2003), ce gain était réalisé dans des sols ayant reçu la moitié des doses d'engrais habituelles (Rivera, 2014).

En 2003, l'Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) de Cuba a créé un réseau de recherche sur les mycorhizes qui regroupe différentes universités et centre de recherche situés à Cuba et en Amérique latine. Cette initiative gouvernementale a permis de faire plusieurs progrès quant aux pratiques de l'inoculation mycorhizienne (INCA, 2014; Ruiz et al., 2014).

Actuellement, les scientifiques de l'INCA font des recommandations d'emploi de différentes souches mycorhiziennes selon les types de sol et proposent de les coupler avec d'autres produits comme les rhizobiums (González, 2010; Marquès, 2008).

Ces bioproduits sont aujourd'hui utilisés avec beaucoup de succès à Cuba principalement dans les champs de haricot, de maïs et dans les pâturages. Dans les autres pays de la région, EcoMic est utilisé à l'échelle commerciale dans les champs de: blé, soya, tournesol, lentille, haricots et riz (Rivera, 2014).

L'INCA de Cuba a évalué que l'usage de ces produits permet aujourd'hui d'économiser entre 25 et 50% des engrais minéraux appliqués dans les cultures (González, 2010).

- **Inde**

L'augmentation constante de la demande alimentaire (un milliard trois cent millions habitants), les sécheresses répétées dans les régions tropicales et subtropicales, ainsi que l'augmentation de la stérilité des sols, sont les principales raisons qui ont poussé le gouvernement indien à encourager le développement des bioproduits permettant d'augmenter la fertilité des terres et d'assurer la sécurité alimentaire (The Energy and Resource Institute) (TERI, 2013).

A cet effet et pour pallier la contrainte de la non disponibilité des inoculants mycorhiziens, en 1993 le Centre for Mycorrhizal Research (CMR) basé à TERI a développé un inoculant mycorhizien grâce à une technique de culture *in vitro* et a mis sur pied une technologie de production de masse avec le soutien du département de la biotechnologie du gouvernement indien (TERI, 2013). L'inoculant développé est fait d'une seule souche mycorhizienne appartenant à l'espèce *Glomus intraradices* (Hamel and Plenchette, 2007) et est réalisé au laboratoire dans des conditions aseptiques, assurant ainsi un inoculant dépourvu de contaminants.

Au début des années 2000, cette technologie a ensuite été transférée à de nombreuses industries afin de lancer la commercialisation. La production d'inoculants a été évaluée à 3500 tonnes et a permis d'inoculer la majorité des cultures du pays (Government of India, 2012). Ce qui a permis d'augmenter les rendements du blé dur et du riz de 13 à 41% et de réduire de près de 58% l'utilisation des engrais minéraux phosphatés appliqués pour ces cultures. D'autres cultures comme le haricot, la pomme de terre, le soya et la canne à sucre ont aussi montré des réponses positives à l'inoculation (Adholeya et autres, 2008).

Selon le directeur de Biotechnology & Bioressources Division à TERI, la nouvelle technologie pourrait permettre au producteur agricole d'économiser entre 25 et 50% du coût de production (Koul, 2011 et TERI, 2013). D'autres bénéfices comme la réduction du lessivage des éléments nutritifs et des métaux lourds ont aussi été observés à la suite de l'utilisation de l'inoculant dans les cultures. De plus, cette pratique permet l'élimination de nombreuses maladies ainsi que des nématodes, particulièrement dommageables dans les pays secs.

5. Avenir de la biotechnologie mycorhizienne

L'offre de produits mycorhiziens est en augmentation constante : au Canada (400 000 ha inoculés en 2014) (Laurence J-T, 2014), en France et ailleurs dans le monde. Des applications pratiques (Côte d'Ivoire, Sénégal etc.) progressent et montrent des bénéfices réels. Cet intérêt croissant pour l'inoculation mycorhizienne apparaît comme indication claire de l'utilité de cette pratique dans plusieurs cultures.

Bien que l'inoculum mycorhizien de commerce apparaît être bénéfique, les effets observés ne justifient pas d'office de le préférer à l'inoculum composite de souches de CMA indigènes. Guerbault (2009) note que les champignons mycorhiziens choisis pour concevoir un inoculum peuvent être sélectionnés à partir de sols où prospèrent naturellement la plante car ils sont sûrement les mieux adaptés aux conditions environnementales.

De nos jours, l'agriculture va devoir relever un double défi concernant :

✚ **la sécurité alimentaire** : il s'agira de fournir une nourriture saine et équilibrée à une population en augmentation significative.

✚ **la protection de l'environnement** : en limitant les stress environnementaux et la pression des pratiques agricoles néfastes.

De ce fait, l'intensification des fonctions naturelles des écosystèmes comme la microflore colonisant abondamment le sol et les plantes (notamment les bactéries du genre *Rhizobium* et les champignons mycorhiziens) représente un levier efficace pour optimiser le développement et la protection des végétaux.

1. Objectif de l'expérimentation

Cet essai fait suite aux travaux d'Ouldkaci et Sai 2016, Hikem et Doucene 2016, ainsi que ceux de Zoulim 2017 qui consistaient à évaluer l'effet d'un inoculum mycorhyzien naturel sur la croissance et le développement de deux variétés de blé dur, sous des conditions de salinité. C'est une reconduction de l'essai pour réaliser un piégeage des spores et évaluer à long terme l'impact de l'inoculation sur la mycorhization racinaire et la viabilité des spores de mycorhizes. Pour ce faire, la stratégie expérimentale adoptée est la suivante :

- Etude des caractéristiques physicochimiques du sol rhizosphérique.
- Observation de la mycorhization racinaire des deux variétés étudiées dans les différentes conditions expérimentales.
- Dénombrement et identification des spores de champignons endomycorhiziens dans la rhizosphère des différents milieux étudiés.

2. Matériels biologiques

2.1. Plants de blé dur

L'essai est conduit avec deux variétés de blé dur : BOUSSALEM qui est une variété locale et SIMETO (Sersou) une variété introduite d'Italie. Elles sont choisies selon leur caractéristiques agronomiques, technologiques (CNCC, 2009) et de tolérance au stress salin (Bouchakour et *al.*, 2015).

Tableau 2 : Caractéristiques des variétés étudiées

Variétés blé dur	BOUSSALEM	SIMETO (Sersou)
. Origine	Algérie ITGC Sétif	Italie
Caractéristiques Morphologiques	hauteur moyenne de la paille pigmentation anthocyanique très faible	
Caractéristiques Agronomiques	un rendement élevé, PMG élevé et teneur en protéines de 15%	
Tolérance aux maladies	moyennement sensibles à l'oïdium sur feuilles, à la septoriose et à la rouille brune	
Tolérance à la salinité	Tolérance moyenne	

2.2. L'inoculum choisi

L'inoculum provient du sol rhizosphérique de l'ail triquètre (*Allium triquetrum*) comprenant les propagules (spores et racines mycorhizées) de champignons mycorhiziens arbusculaires et provenant d'une prairie naturelle de la région de Draa el Mizan, situé à 42km de la wilaya de Tizi Ouzou. L'étude de caractérisation de cet inoculum naturelle menée par Hikem en 2016 donne la biodiversité des CMA recensés dans ce milieu (Figure 13).

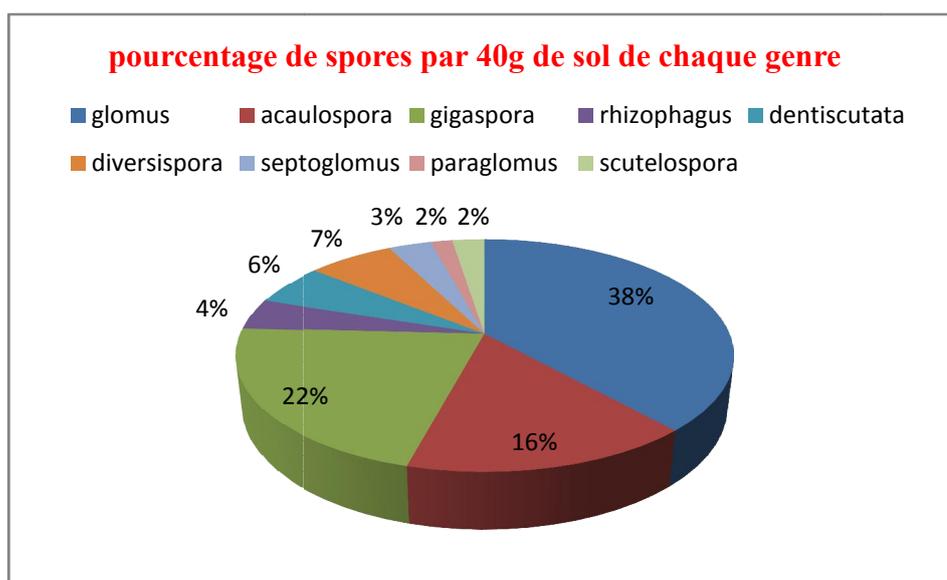


Figure 13 : Présentation graphique des différents genres des glomales recensés dans le sol rhizosphérique de l'Ail triquètre.

3. Conduite de l'essai

L'essai est reconduit dans des pots en plastiques d'une contenance de 400g de substrat composé (2/3 de terre et 1/3 dont : 2/3 de sable et 1/3 de terreau), le sol provient du jardin de l'U.M.M.T.O. et le terreau est commercial, ils ont été inoculés une année au préalable par l'apport de 5 g de sol rhizosphérique de l'Ail Triquètre (*Allium triquetrum*). Une fois inoculés, les pots sont arrosés par une solution saline à une concentration de 8g/l. Suite aux travaux préalables menés sur ces deux variétés (Bouchakour et *al.*, 2015), une solution saline a été préparée avec 87,75 grammes de NaCl pour 10 litres.

Après un test de germination, les graines des deux variétés étudiées sont semées dans les pots suivant deux facteurs étudiés, la salinité et la mycorhization.



Figure 14 : Essai de germination

L'essai expérimental a été semé le 10 octobre 2016 sur un substrat à la capacité au champ, avec une densité de 8 graines par pot. Le dispositif expérimental adopté est un BAC (bloc aléatoire complet) avec quatre traitements : Témoin, Témoin mycorhizé, Salé et Salé mycorhizé.



Figure 15 : Essai expérimental en pots

4. Analyses et observations effectuées

4.1. Analyses physiques et chimiques du sol

- **Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique est réalisée suivant la méthode normalisée AFRON NF X 31-107 (voir annexes).

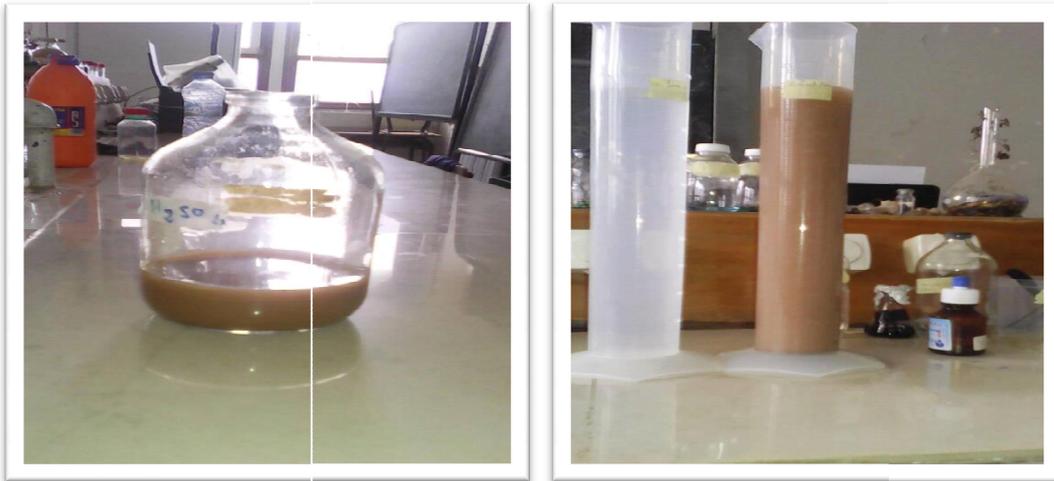


Figure 16 : Destruction de la matière organique et fractionnement granulométrique (de gauche à droite)

- **La conductivité électrique**

La C.E. est mesurée selon la méthode d'AFNOR NF X31- 108 (voir annexes).



Figure 17 : Conductivimètre avec une électrode pour mesurer la conductivité

- **Le PH :** ou potentiel d'hydrogène permet de mesurer la concentration des ions hydrogènes dans la solution du sol étudié (voir annexes) et ainsi son acidité. Cette grandeur a été mesuré à travers un PH mètre.

4.2. Biomasse végétale

A la récolte, les plants ont été prélevés pour chaque variété et chaque traitement (témoin et salé) et ont été passés à l'étuve à 70°C jusqu'à séchage complet, puis pesés pour en déterminer le poids sec des différentes parties constitutives de la plante (racines et partie aérienne).

4.3. Observation de la mycorhization racinaire du matériel végétal récolté

Les racines des plantules déterrées sont colorées au bleu de trypan selon la technique de Philips et Hayman (1970) (voir annexes), ce qui nous a permis de mettre en évidence l'infection racinaire mycorhizienne à arbuscules. Trois lames par traitement contenant 12 fragments chacune ont été montées.



Figure 18 : Conservation et montage des échantillons racinaires colorés au Bleu de Trypan

L'estimation des paramètres mycorhiziens est faite par la méthode de Trouvelot et *al.*, (1986) . La mycorhization s'observe à l'examen au microscope photonique (X40) par une coloration bleue foncée des structures fongiques dans les racines. Cela permet de les annoter sur une fiche spéciale et évalué par conséquent.

- le degré de la colonisation mycorhizienne de chaque fragment au moyen de six classes notées de 0 à 5 (Figure ci-dessus).

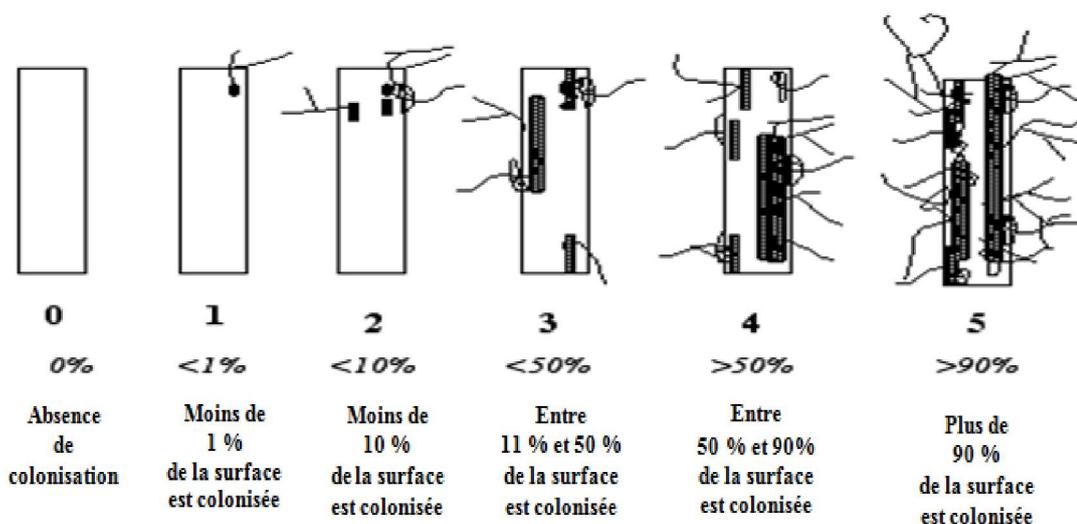


Figure 19 : Echelle d'intensité de colonisation du cortex racinaire

- et la richesse arbusculaire par quatre classes notées A0, A1, A2 et A3.

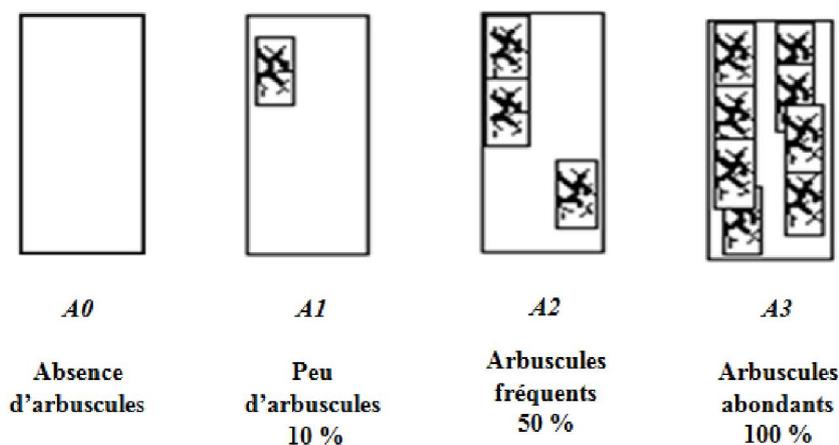


Figure 20 : Echelle d'évaluation de la présence des arbuscules

Cette méthode permet de calculer cinq paramètres de la colonisation :

F % : Fréquence de la colonisation mycorhizienne (% du nombre de fragments racinaires mycorhizés), elle reflète l'importance des points de pénétration de la colonisation du système racinaire.

M % : Intensité de la colonisation du cortex racinaire (proportion du cortex colonisé estimée par rapport au système racinaire entier et exprimée en %), elle reflète l'importance de la colonisation du système racinaire.

m % : Intensité de la colonisation développée dans la partie mycorhizée du système racinaire (proportion du cortex colonisé dans la partie mycorhizée du système racinaire exprimé en %).

A % : Teneur arbusculaire de la colonisation ramené au système racinaire entier (proportion du système racinaire renfermant des arbuscules, exprimée en %).

a % : Teneur arbusculaire de la colonisation dans la partie mycorhizée du système racinaire (proportion colonisée renfermant des arbuscules en %).

4.4. Extraction par tamisage humide et dénombrement des spores à partir du sol des traitements étudiés

- **Extraction :**

Les échantillons contenant 10g de sol pris au niveau de chaque traitement, sont traités par la technique d'extraction de tamisage humide (Gerdmann, 1963 et Daniel et Skipper, 1982). Ils sont mis chacun dans environ 500 ml d'eau de robinet, le mélange est agité longuement pour l'homogénéisation, puis laissé au repos pendant 1 min, il est par la suite tamisé sous filet d'eau à travers des tamis de mailles allant de 2 mm, à 200 μm et 50 μm disposés respectivement l'un au-dessus de l'autre. Les suspensions retenues par les tamis de 200 μm et 50 μm sont transférées chacune dans un bécher et feront l'objet d'une double centrifugation eau/saccharose à 20%, à 2000 tours/minute pendant 5 minutes afin de séparer les spores des particules de sol et des fragments racinaires.

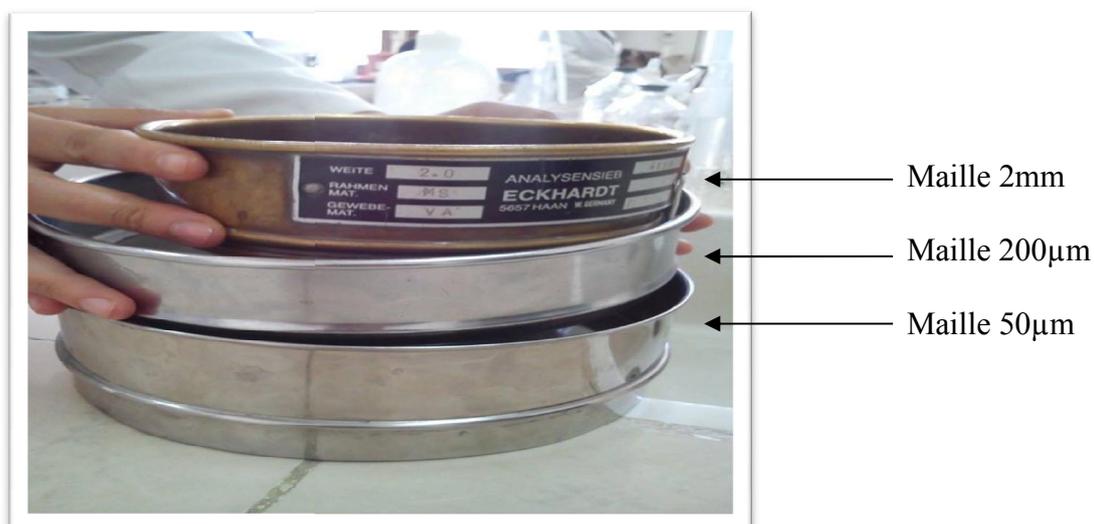


Figure 21 : Tamis utilisés pour l'extraction des spores

- **Dénombrement :**

Après centrifugation, le surnageant est récupéré et filtré sur du papier absorbant (papier mouchoir). L'estimation du nombre de spores de chaque échantillon a été effectuée par comptage sous la loupe binoculaire. Les spores de chaque échantillon de sol sont récupérées avec une pince dans des petits flacons hermétiques contenant de l'eau et conservées au réfrigérateur. Les spores sont examinées sous la loupe binoculaire et placées entre lame et lamelle contenant un fixateur (lactoglycerol) pour être observées au microscope photonique (x 10 et x 40). Les spores sont séparées par morphotype (forme, taille, couleur). L'identification des espèces basée sur les caractères morphologiques, a été réalisée en utilisant des descriptions d'espèces d'origine comme la clé Blazkowski (2012) et des sites spécialisés comme : <http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota> et INVAM:<http://invam.wvu.edu>).

L'abondance relative des spores est déterminée (Johnson *et al.*, 1991) comme suit:

$$\text{Abondance relative} = \text{NSE} \times 100 / \text{NSTE}$$

Où NSE = nombre total de spores observées d'une espèce de Glomerales et
NSTE = nombre total des spores observées pour toutes espèces confondues.

Nous présentons dans cette partie les résultats obtenus suite aux différents tests effectués au laboratoire, ces résultats seront discutés à la fin.

1. Caractéristiques physico-chimiques du sol rhizosphérique

Tableau 3 : caractéristiques chimiques du substrat

Analyses Traitements	Conductivité électrique C. E. (ms)	Potentiel d'hydrogène PH
	Témoin	0,42
Témoin + myc	0,4	7,78
Salé	1,65	7,85
Salé + myc	2,15	7,75

L'analyse granulométrique du sol révèle qu'il se compose de 28,1% d'argile, 67,38% de limons et 4,51% de sable, il est donc de structure limono-argileuse fine.

2. Suivi de la culture

Le suivi de la culture a permis d'évaluer l'impact de l'apport d'inoculum mycorhizien naturel en absence et en présence de salinité sur les paramètres suivants :

2.1. Levée des plants

L'observation de la levée montre un retard exprimé dans les traitements non inoculés soumis au stress salin, alors qu'en traitement non salin la levée n'est pas influencée par l'inoculation. Ceci est vérifié pour les deux variétés étudiées (Figure n° 22)



Figure 22 : Observation de la levée des graines dans l'essai en pots

2.2. Récolte des plants

La récolte a lieu 120 jours après semis, l'observation des plants à ce stade montre un meilleur comportement de l'essai inoculé par rapport à celui non inoculé. Ce résultat est observé surtout au niveau de l'essai salé pour les deux variétés étudiées et pour le témoin non salé de la variété Siméto (Figure n° 23).

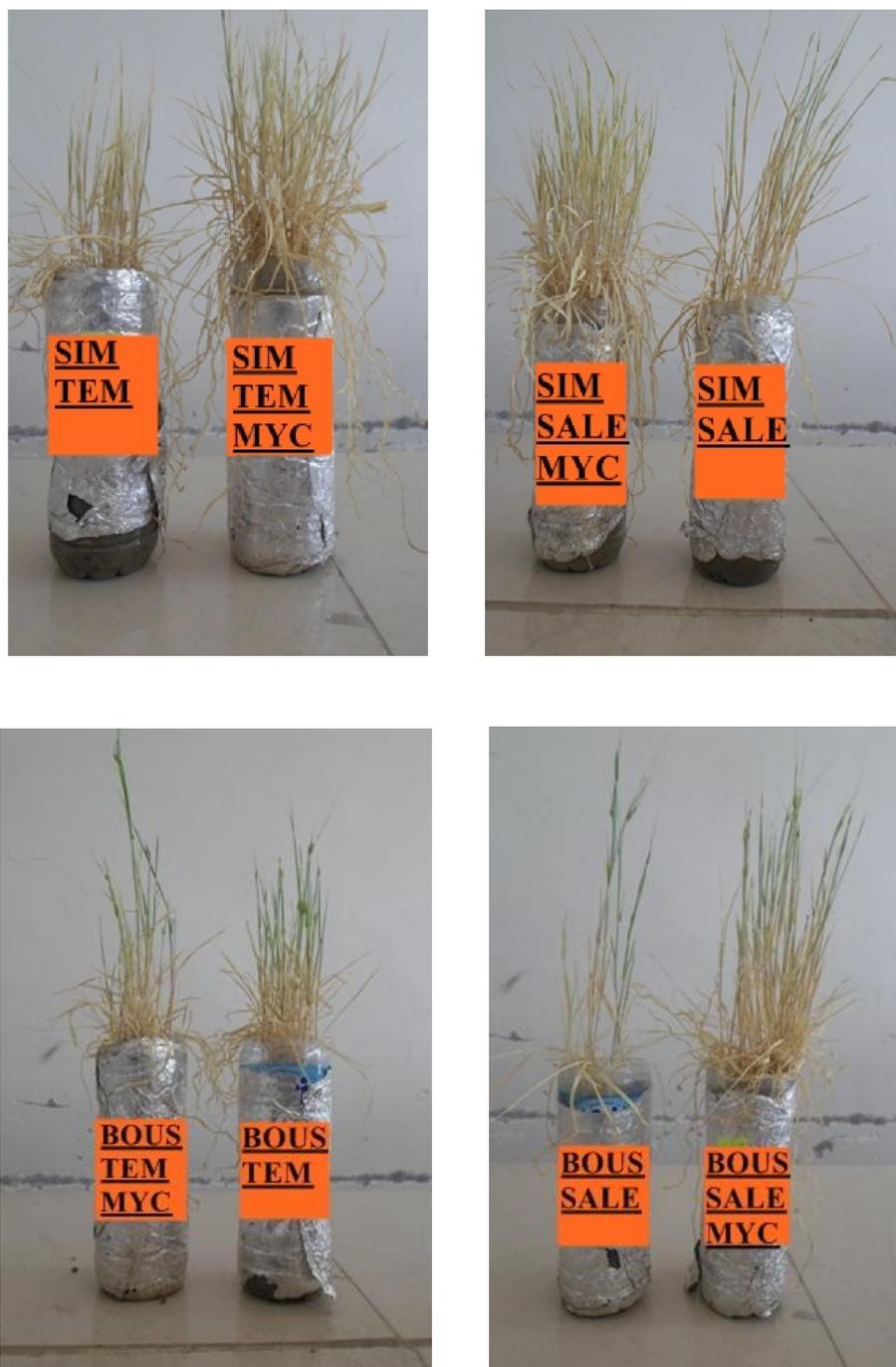


Figure 23 : Observation des plants au stade récolte

2.3. Matière sèche

Les résultats montrent qu'en conditions de salinité, la matière sèche du traitement mycorhizé est plus importante que celle du traitement non mycorhizé, ceci est vérifié pour les deux variétés étudiées. Pour le témoin, la production de matière sèche est plus élevée au niveau du traitement mycorhizé uniquement pour la variété Siméto, alors que pour la variété Boussalem la production de matière sèche ne paraît pas être influencée par la mycorhization (Figure 24).

La variété Siméto a présenté un poids de matière sèche plus élevé que celui de Boussalem au niveau de tous les traitements étudiés.

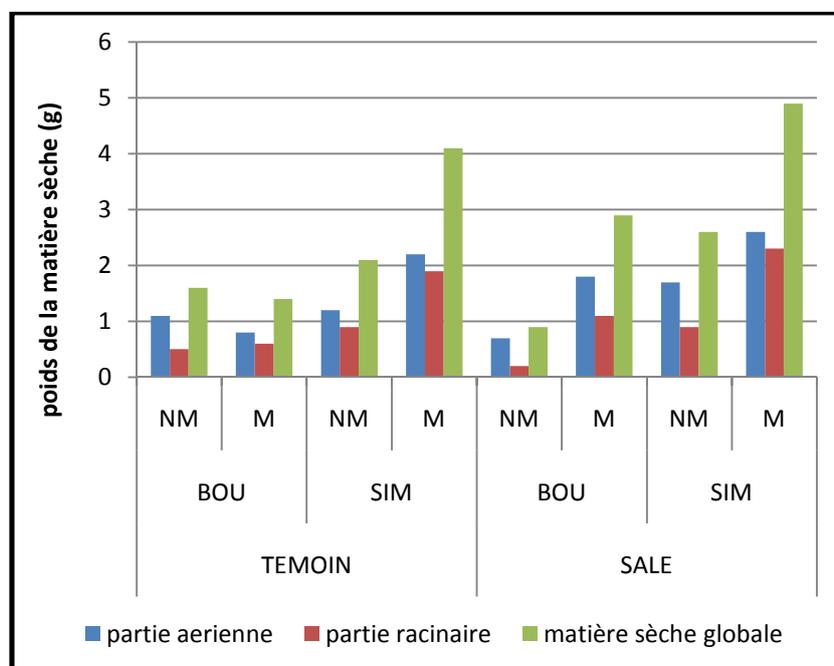


Figure 24 : Evolution de la matière sèche par variété et par traitement (NM : non mycorhizé ; M : mycorhizé) (Bou : Boussalem ; SIM : Simeto)

3. Les paramètres de mycorhization

3.1. Nombre des spores/100g de sol

L'apport d'inoculum étranger a eu un effet positif sur le nombre de spores par 100g de sol en conditions de salinité alors qu'en conditions témoin cet effet n'apparaît pas. Le sol prélevé au niveau de la variété Siméto a présenté un nombre de spores plus élevé que celui prélevé au niveau de la variété Boussalem.

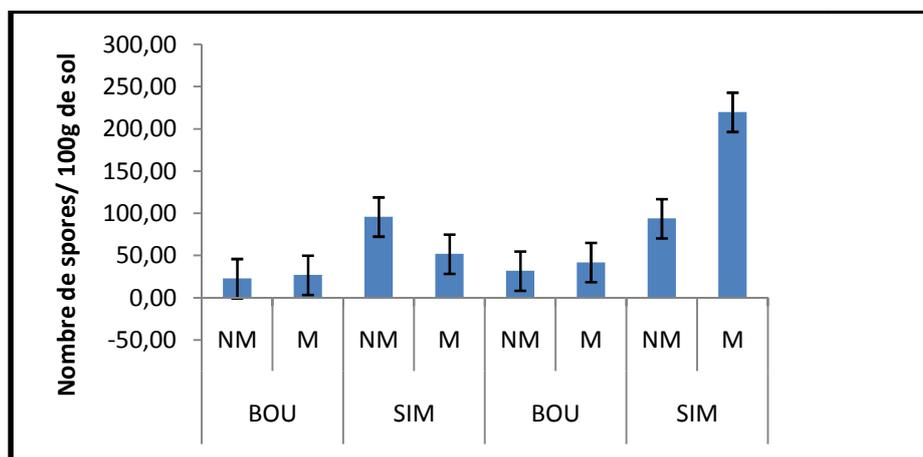


Figure 25 : Evolution du nombre de spores par variété et par traitement (NM : non mycorhizé ; M : mycorhizé) (Bou : Boussalem ; SIM : Simeto)

3.2. Intensité de mycorhization

Une légère amélioration de l'intensité de mycorhization globale est observée au niveau des traitements inoculés, mais l'effet traitement est non significatif.

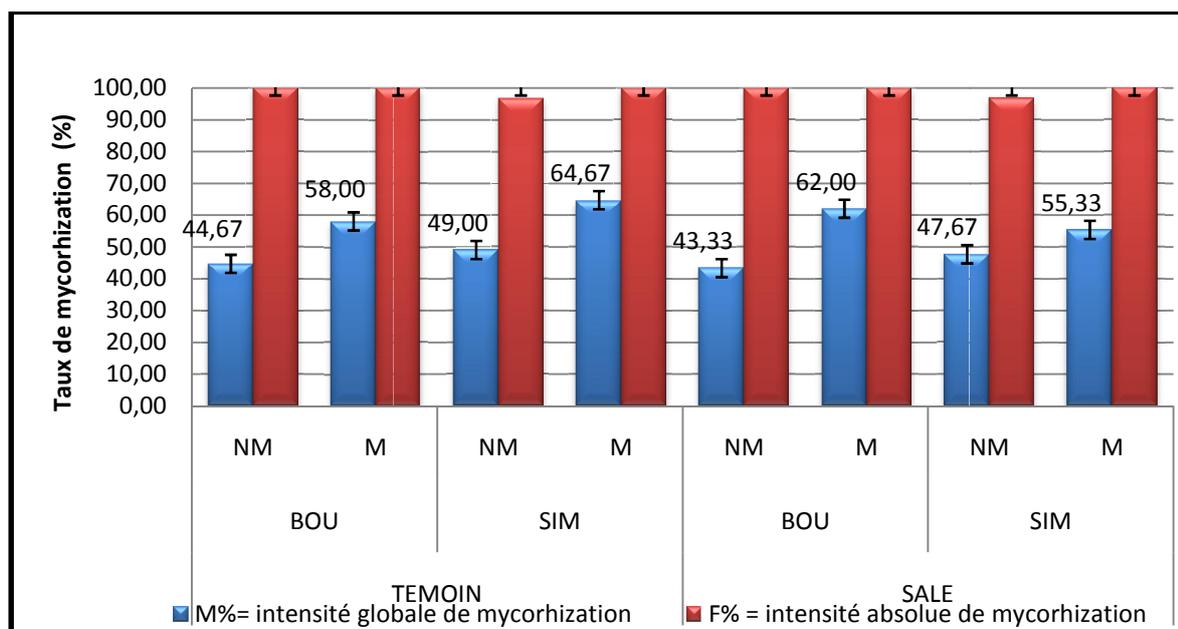


Figure 26 : Evolution de l'intensité mycorhizienne (NM : non mycorhizé ; M : mycorhizé) (Bou : Boussalem ; SIM : Simeto)

3.3. Intensité arbusculaire

L'apport de l'inoculum naturel a eu un effet positif sur l'intensité arbusculaire globale et absolue pour les deux variétés étudiées dans les conditions témoin (en absence de salinité). Cependant dans les conditions salées, les plantes ont mieux réagi avec l'inoculum locale, puisque le non mycorhizé a donné de meilleurs résultats comparativement au traitement mycorhizé. La variété Siméto a présenté l'intensité arbusculaire globale et absolue la plus élevée au niveau de tous les traitements (Figure 27)

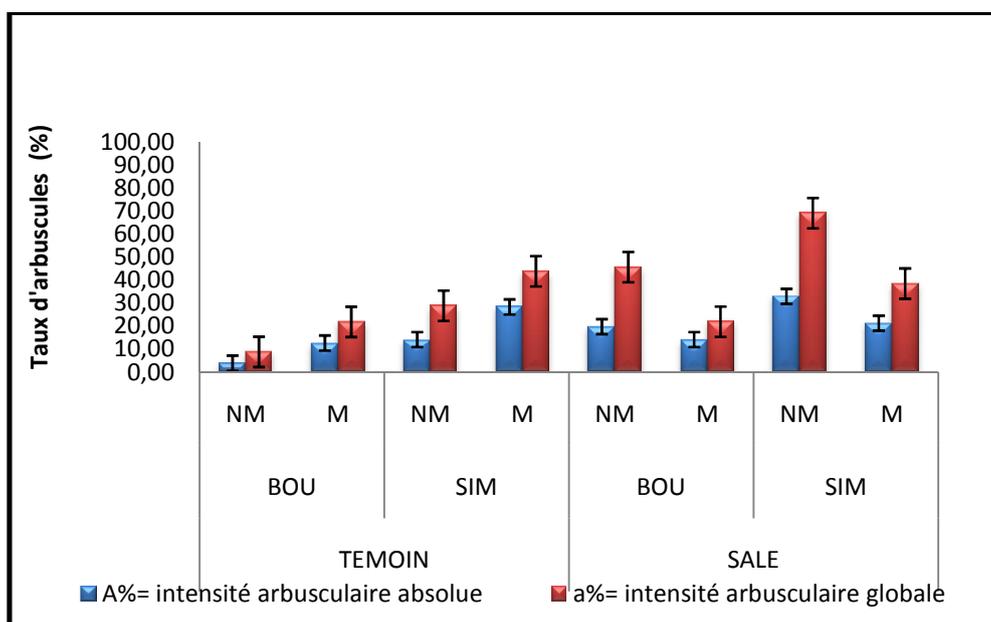


Figure 27 : Evolution de l'intensité arbusculaire par variété et par traitement (NM : non mycorhizé ; M :mycorhizé) (Bou.Boussalem ; SIM .Simeto)

3.4. Biodiversité des champignons mycorhiziens

L'étude de la biodiversité sur la base de l'identification morphologique des spores a permis de recenser sept genres de champignons mycorhiziens, répartis au niveau des traitements étudiés (Figure 28). Une grande variabilité de la biodiversité est observée entre les traitements étudiés. La biodiversité est plus importante au niveau du traitement salé, surtout au niveau de la variété Siméto. En effet quatre et cinq genres sont observés respectivement au niveau de cette variété en traitements non mycorhizé et mycorhizé. Une dominance de l'abondance relative des Glomeraceae est observée au niveau du traitement témoin, qui diminue en traitement salé avec l'apparition des genres *Septoglomus* et *Rhizophagus* au niveau du traitement mycorhizé de la variété Boussalem, de même l'apparition des genres *Acaulospora*, *Dentiscutata* et *Diversispora* est observé pour la variété Siméto.

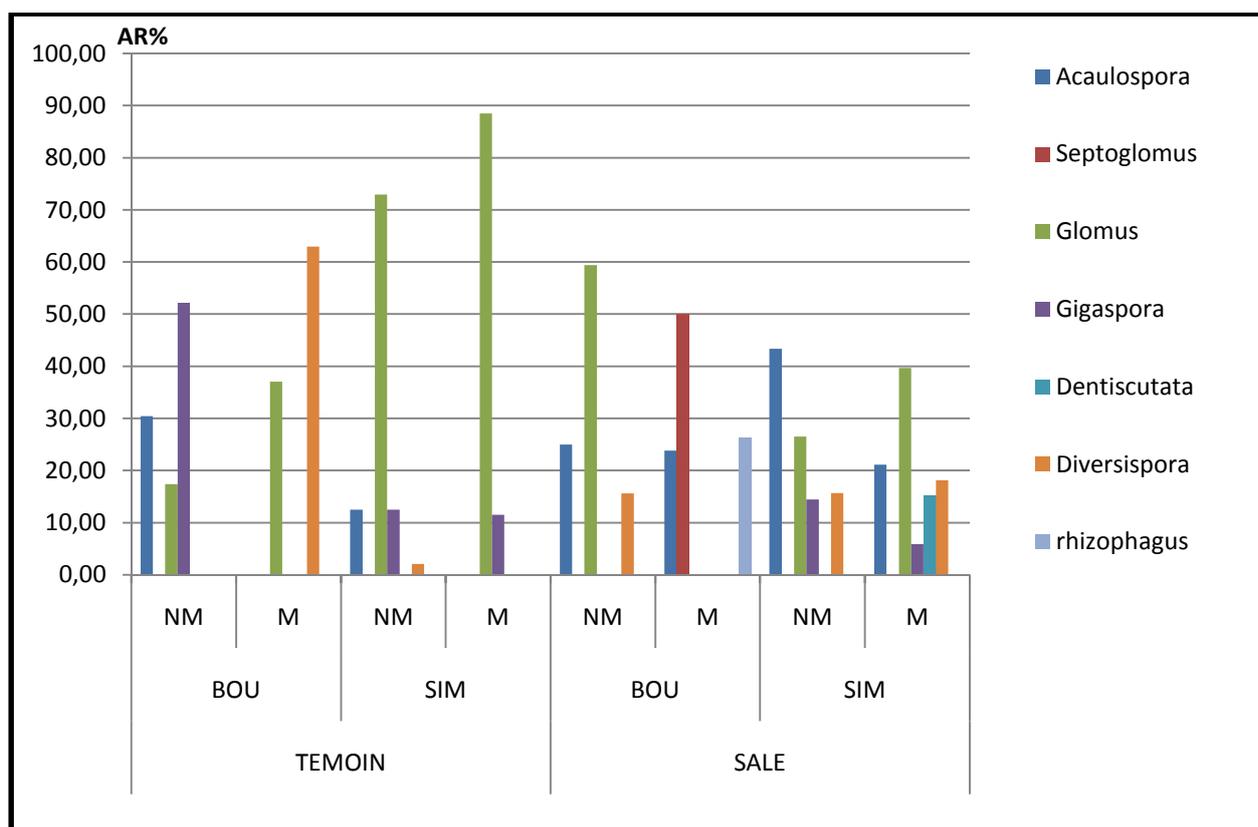


Figure 28 : Répartition de la biodiversité selon l'abondance relative des genres de CMA par variété et par traitement.
(NM : non mycorhizé ; M : mycorhizé) (Bou : Boussalem ; SIM : Simeto)

Discussions

Le nombre de spores de CMA augmente dans le traitement salé, ceci est rapporté par Dalpé, (2005) qui signalent une corrélation positive entre le nombre de spores et la concentration saline du sol, de même certains auteurs signalent un nombre élevé de spores de CMA trouvés dans la rhizosphère des plantes halophytes (Aliasgharzadeh et al., 2001, Landwehr et al., 2002).

La sporulation est une forme de résistance qui permet aux champignons mycorhiziens de survivre dans les différentes conditions environnementales, l'inhibition de la germination des spores et de la croissance des hyphes dans un milieu salin aura pour conséquence l'augmentation de la population des spores (McMillen et al., 1998). Ces populations ont révélé dans notre essai salé, spécifiquement le genre *Septoglomus* et *Rhizophagus* avec une abondance relative respective de 50% et 26% au niveau de la variété Boussalem mycorhizée, et le genre *Dentiscutata* (15%) au niveau de la variété Siméto mycorhizé, ces genres sont apportés par l'inoculum de l'ail triquetre (*Allium Triquetrum*) (Figure 28). L'effet salinité a affecté également la biodiversité au niveau de l'essai non mycorhizé, c'est-à-dire l'inoculum locale. Le stress salin a ainsi augmenté l'abondance des genres *Glomus* pour la variété Boussalem, alors que chez Siméto, c'est *Acaulospora* et *Diversispora* qui se sont accrus.

Une amélioration similaire de l'intensité de mycorhization globale est observée pour les deux variétés étudiées, mais l'intensité arbusculaire montre une différence de comportement variétal, puisqu'au stade étudié qui correspond à 120 jours après semis, la variété Siméto a présenté la meilleure interaction avec l'inoculum local et exogène du sol et a produit la plus grande quantité de matière sèche. Ce qui révèle son aptitude à former des mycorhizes avec les CMA locaux et apportés, malgré sa mycorhization tardive, comme c'est démontré dans les travaux de Zoulim (2017), réalisés dans les mêmes conditions que ceux de notre essai. La variété Boussalem est par contre précoce dans sa mycorhization.

Dans l'optique d'optimiser l'utilisation des mycorhizes pour réduire les effets du stress salin sur le rendement du blé et l'absorption d'éléments nutritifs, il est important de choisir la bonne combinaison plante/champignon (Daei et al., 2009).

Les différences des comportements variétales sont recensés par des travaux dans le domaine du blé, en effet Essiane Ondo O. (2014) montre clairement sur des variétés anciennes du blé, que cet effet variétal varie en fonction du stade de développement végétatif. Il signale

également que cet effet est particulièrement important en début de végétation, s'estompent au stade Epiaison, puis réapparaît au stade Maturité des épis.

Les composantes du rendement de blé commencent à se développer dès le stade six feuilles (Hay, 1999). De ce fait les variétés du blé qui se mycorhizent tardivement pourraient être limitées dans leur possibilité de bénéficier des avantages de la symbiose mycorhizienne (Singh *et al.*, 2012), ce qui n'est pas le cas de Siméto.

La reconduction d'un essai expérimental, après une année d'inoculation, montre un effet positif sur la levée des plants et donc sur le démarrage de l'essai. Après 120 jours, un effet traitement apparaît sur la production de la matière sèche, plus prononcé au niveau de la variété Siméto. Un effet variétal est ainsi observé au niveau de l'interaction plante-champignons qui s'explique mieux par la biodiversité de CMA localisée au niveau de la rhizosphère de chaque variété étudiée. Malgré la mycorhization tardive de la variété Siméto, elle interagit avec une diversité de genres de CMA plus élevée que Boussalem.

L'effet de la salinité est bien illustré par le nombre de spores prélevés, mais l'effet mycorhization n'apparaît pas à travers les paramètres de mycorhization et ceci est en relation avec le stade de prélèvement.

L'utilisation des mycorhizes est d'une importance particulière sous contrainte saline, cependant l'expression de la symbiose dépendrait du génotype de la plante hôte et de celui du champignon considéré en plus des conditions culturales.

Pour que l'inoculum ait une efficacité optimale et durable, il est nécessaire d'utiliser des stratégies comme la mycorhization contrôlée, qui est un ensemble de techniques consistant à isoler, cultiver, sélectionner, multiplier, incorporer et suivre le champignon dans le sol afin de produire des plants « biologiquement améliorés » par optimisation de la symbiose.

En agriculture, le XXe siècle aura été celui de la chimie, le XXIe siècle sera celui de la biologie.

La salinité des sols réduit l'apport de nutriments pour la plante. Ce phénomène de dégradation est surtout observé dans les régions arides et semi arides, où se trouve le pole céréaliier algérien.

L'utilisation de champignons mycorhiziens permet en majorité une meilleure utilisation des réserves nutritives des sols tout en réhabilitant les sols dégradés biologiquement. Son étude s'inscrit donc dans une démarche de durabilité, surtout dans le contexte économique et écologique actuel.

Pourtant l'inoculation mycorhizienne n'est pas pratiquée au niveau local, ce qui est due en grande partie à un manque de promotion et de diffusion auprès des utilisateurs potentiels. Le défi est alors d'inverser cette tendance.

L'utilisation de ces microorganismes et les progrès réalisés au Cuba et en Inde sont très motivants. Notons toutefois que leurs efforts de recherche sont souvent appuyés par leurs gouvernements respectifs, ce qui a permis de développer des biotechnologies adaptées aux conditions de ces pays.

Le diagnostic de la population de champignons mycorhiziens est un outil pertinent pour mieux gérer et orienter les pratiques culturales favorables à la vie microbienne souterraine.

L'initiation à cette recherche constitue pour moi un premier pas fondamental dans mon domaine d'étude : **production végétale et agriculture durable.**

References bibliographiques

ABBOTT, L.K., & ROBSON, A.D. 1991. Factors influencing the occurrence of vesicular-arbuscular mycorrhizas. *Agriculture, ecosystems & environment*, 35(2), 121-150.

Abdelly C., M. Lachâal, C. Grignon, A. Soltani & M. Hajji, 1995. - Association épisodique d'halophytes stricts et de glycophytes dans un écosystème hydromorphe salé en zone semi-aride. *Agronomie*, 15, 557-586.

Aboulkhair KS, El-Sokkary IH (1994) Effect of salinity, boron and sodium on the growth and root infection by VAM, *Rhizobium* and *Frankia* of seedlings of three tree species. *J AgricSci Egypt* 19:2969–2980

Adholeya. A, Reena S. and Beri, S. (2008). Production of AMF's and growing needs in plant production, Working groups 2 and 4 meeting. *Dans* European Coopération in the field of Scientific and Technical Research. Meeting Cost 870: Mycorrhiza application in sustainable agriculture and natural systems.

Alem C., M. Labhilili, K. Brahmi, M. Jlibene, N. Nasrallah, & A. Filali Maltouf, 2002. - Adaptations hydrique et photosynthétique du blé dur et du blé tendre au stress salin. *C. R. Biologies*, 325, 1097-1109.

Aliasgharzadeh .N. Saleh Rastin N. Towfighi H. Alizadeh A. 2001: Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in saline soils of the Tabriz Plain of Iran in relation to some physical and chemical properties of soil *Mycorrhiza* 11:119–122. DOI 10.1007/s005720100113

Allen R.D., 1995. Dissection of oxidative stress tolerance using transgenic plants. *Plant Physiol.* 107:1049-1054.

André, S., Neyra, M. & Duponnois, R. (2003). Arbuscular mycorrhizal symbiosis changes the colonization pattern of *Acacia tortilis* spp. *raddiana* rhizosphere by two strains of rhizobia. *Microbial Ecology*, 45: 137-144

Anonyme, (1999) Analyse des contraintes liées à la cerealiculture de développement de la filière céréale, pp 8-10.

Anonyme, (2003) II : Le blé dur : qualité, importance et utilisation dans la région des hauts plateaux (Tiaret et Tissemsilt).: ITGC. 7p

Barea, J-M., Azcón, R. and Azcón-Aguilar, C. (2002). Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality. *Antonie van leeuwenhoek*, vol. 81, p. 343-351.

BAYUELO J et al ., 2002:Salinity tolerance of Phaseolus species during germination and early seedling growth. *Crop Sci.*, pp2184-2192.

BELFAKIH et al, G. Appl. Biosci, 2013 : effet de la salinité sur la paramètres morpho-physiologiques de deux variétés de bananier. Journal of applied biosciences 70 :5651 5662 ISSN 1997- 5902.

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/>.

Blaszkowski, J. 2012. Le Glomeromycota. 1: 7-297

Bonfante P., Genre A. 2010. Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications* 1: 48.

Bonfante, 2001. At the Interface Between Mycorrhizal Fungi and Plants: the Structural Organization of Cell Wall, Plasma Membrane and Cytoskeleton. *The Mycota.* 9: 45-61

Boswell .E.P, R.T. Koide, D.L. Shumway and H.D. Addy., 1998.Winter wheat cover cropping, VA mycorrhizal fungi and maize growth and yield. *Agriculture Ecosystem and Environnement* 67: 55-65.

Bothe H. 2012. Arbuscular mycorrhiza and salt tolerance of plants. *Symbiosis.* 58:7 16.

Boullard .B.1968.Les mycorhizes (monographie), Masson et Cie Eds saint Germain, Paris. 135p.

Boyeldieu J, (1992) : Amélioration génétique, production. Ed. TA .pp 72 111.Campus Inra - Agro Montpellier.

BOZZINI A. (1988). « Origin, distribution, and production of durum wheat in the world». Dans Fabriani G. et C. Lintas (éd). *Durum: Chemistry and Technology.* AACC (Minnesota), États-Unis. p. 1-16

Calvet R., 2003. Le sol, propriété et fonction, phénomènes physiques et chimiques. Tome 2. Ed. France. Agricole : 511 P.

Cauderon Y, (1982) : Origine et évaluation des blés, Industrie céréales n°16, p5-6.

CHAISE L., FERLA A. J., HONORE A. et MOUKHLI R, 2005 :L’impact du changement climatique sur l’agriculture en Afrique. Atelier Changement Climatique. ENPC

Chandrasekaran M, Boughattas S, Hu S, Oh SH, Sa T. 2014. A meta analysis of arbuscular mycorrhizal effects on plants grown under salt stress. *Mycorrhiza.* 24:611 625.

Chiffлот V., 2008. *Etude moléculaire des champignons mycorrhiziens arbusculaires dans un système agrisylvicole.* Maitre en Sciences, Université Laval, Québec, 75p.

Clerget, Y. (2011) .Biodiversité des céréales Origine et évolution. In La biodiversité des céréales et leur utilisation par l’homme. Société d’Histoire Naturelle du Pays de Montbéliard. Extrait de la vidéoconférence du Service éducatif du Muséum Cuvier de la Ville de

Montbéliard « La biodiversité des céréales et leur utilisation par l'homme » publié dans le bulletin 2011 de la Société d'Histoire Naturelle du Pays de Montbéliard. 1-16 p.

CNCC (2009): Centre National de Contrôle et de Certification des Semences et des Plants, 2009

CNIS (2016) : Centre national de l'informatique et des statistiques des douanes

Colmer T.D., Epstein E. and Dvorak J., 1995. Differential solute regulation in leaf blade of various age in salt sensitive wheat and a salt tolerant wheat x *Lophopyrum elongatum* (Host) A. Löve amphiploid. *Plant Physiol*, 108: 1715-1724.

Cronquist, A. 1981. An Integrated System of Classification of Flowering Plants. Columbia University Press, New York.

G. Daei, M. Ardekani , F. Rejali , S. Teimuri , M. Miransari. Atténuation du stress de la salinité sur le rendement du blé, les composantes du rendement et l'absorption des nutriments utilisant les champignons mycorhiziens arbusculaires dans des conditions de terrain. *Plant Physiol.*, 166 (2009), pp. 617-625

Dalpé Y., 2005. Les Mycorhizes: un outil de protection des plantes mais non une panacée. *Phytoprotection*. Volume 86.p.53-59.

Daoud Y. et Halitim A., 1994. Irrigation et Salinisation au Sahara Algérien. *Sécheresse*, 5,3: 151-160.

Declerck, 2014. Gestion intégrée du système sol/plante. Document non publié, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.

Deirdre, C.R., Killham K., Bending G.D., Baggs E., Weih M. and Hodge A. 2009. Mycorrhizas and biomass crops: opportunities for future sustainable development. *Trends in Plant Science*. 14: 542-549

Destrait F., Defense T., 2011. Des céréales pour nourrir le monde. *Défis Sud*, 100 :10-12.

Devisme B.A., 2009 Implications des communautés bactériennes ferri réductrices et des paramètres environnementaux dans le fonctionnement et la qualité des sols de rizières (Thaïlande et Cote d'Ivoire), thèse de doctorat en sciences du sol de l'université de Nancy 1.234p.

Douaoui A., Hartani T., 2007. Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Cheliff. *Economies d'eau en système irrigués au Maghreb*. Actes du troisième atelier régional du projet Sirma, 5p.

Duponnois, R., Founoune, H., Masse, D. & 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.

Duponnois, R., Plenchette, C., Prin, Y., Ducouso, M., Kisa, M., Bâ, A.M., Galiana, A (2007). Use of mycorrhizal inoculation to improve reforestation process with Australian *Acacia* in Sahelian ecozones. *Ecological engineering*, 29: 105-112.

ESSIANE ONDO, O. 2014. *Caractérisation d'une collection de variétés anciennes de blé pour leur réponse à la mycorrhization et impact sur la qualité du grain.* Thèse de doctorat. Université de Bourgogne. Dijon, France. 35 pages

Evelin H, Kapoor R, Giri B. 2009. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. *Annals of Botany* **104**: 1263–1280

FAO 2017 : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'Agriculture (FAO) *Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales (publiée le 05/10/2017)*

FAO, 2010. Global Forest Resources Assessment 2010. Main Report. FAO.

FAO, 2014. [Http://www.faostat.com /](http://www.faostat.com/)

FAO, 2015. World fertilizer trends and outlook to 2018. *Food and Agriculture Organization of the United Nations.* En ligne. <http://www.fao.org/3/a-i4324e.pdf>. Consulté le 25/07/2015

FAOSTAT, 2008 : Editeur technique : DANILO MEJIA FAOSTAT www.faostat.fao.org.

Febles – González, J. M., Tolón-becerra, A., Lastra-Bravo, X. and Acosta-Valdés, X. (2011). Cuban agricultural policy in the last 25 years. From conventional to organic agriculture. *Land Use Policy*, p. 1-13

Fernández, F. (2003) Avances en la producción de inoculantes micorrízicos arbusculares. In Rivera, R. et Fernández, K., *El Manejo eficiente de la simbiosis micorrízica, una vía hacia la agricultura sostenible. Estudio de caso: El caribe.* (Chap. 3 p. 97-110). La Habana, édition INCA.

Fitter, A.H., 1977. Influence of mycorrhizal infection on competition for phosphorus and potassium by two grasses. *New Phytologist* **79**:119-125

FORSTER B. P., PHILLIPS M. S., MILLER T.E., BAIRD E. and POWELL W., 1990. Chromosome location of genes controlling tolerance to salt (NaCl) and vigour in *Hordeum vulgare* and *H. chilense*. *Heredity*, 65 : 99-107.

Fortin JA , Plenchette C, Piche Y (2008), les mycorhizes la nouvelle révolution verte, édition Multi Mondes.

FRANK, A. 1885. Über die auf Wurzelsymbiose beruhende Ernährung gewisser Bäume durch unterirdische Pilze. *Berichte der Deutschen botanischen Gesellschaft*, 3: 128-145.

Gadallah M.A.A., 1999. - Effects of praline and glycinebetaine on *Vicia faba* responses to salt stress. *Biol. Plant.*, **42**, 249-257.

Gagné, S. et McNicoll, H. (2010). Les inoculants mycorrhiziens: une technologie au service de l'agriculture. Communication orale. Journée d'information scientifique grandes cultures, 18 février 2010, Drummonville.

Gandolfi A, Sanders IR, Rossi V, Menozzi P., 2003. Evidence of recombination in putative ancient asexuals. *Molecular Biology and Evolution* 20: 754-761.

Ghassemi F. Jakeman A.J. and Nix H.A.1995. Salinisation of Land and Water Resources. University of New South Wales Press Ltd.

GIANINAZZI, S., GIANINAZZI-PEARSON, V., & TROUVELOT, A. 1989. Potentialities and procedures for the use of endomycorrhizas with special emphasis on high value crops. *Biotechnology of fungi for improving plant growth*, (16), 41.

GIANINAZZI, S., GOLLOTTE, A., BINET, M.N., VAN TUINEN, D., REDECKER, D., & WIPF, D., 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20(8): 519–530. doi: 10.1007/s00572-010-0333-3. PMID: 20697748.

Gianinazzi Pearson, V., 1989. In vitro enhancement of spore germination and early hyphal growth of a vesicular-arbuscularmycorrhizal fungus by host root exudates and plant flavonoids. *Symbiosis (Rehovot)*. 7:243-250.

González, M. (2010). Bioproducts, science or necessity? *In* LABIOFAM, G.E. *Biological products*.

Gosling .P, Hodge A, Goodlass G and Bending G.D., 2006. Arbuscularmycorrhizal fungi and organic farming .*Agriculture, Ecosystems and environnement* 113:17-35.

Government of India (2012). Overview of progress (2007-2012), Achievements, Plans for 2012-2017, 6th Asian Biotechnology and Development Conference. In Research and Information System for Developing Countries. http://ris.org.in/images/RIS_images/pdf/6th%20ABDC%20PPT/country%20paper%20SRR.df (Page consultée le 29 janvier 2014).

Guerbault S (2009), Les mycorrhizes outils d'une horticulture et d'une agriculture durables. *Jardins de France*. 497: 19-25

Hagemeyer., 1996-Salt. In *Plant Ecophysiology*. New York : John Wiley & Sons, Inc. p176 181. ISBN.

Hallman, J., A. Quadt-Hallman, W.F. Mahaffee et J.W. Kloepper (1997). Bacterial endophytes in agricultural crops. *Can. J. Microbiol.*, **43**: 895-914.

Hamel, D. and Plenchette, C. (2007). *Mycorrhiza in Crop Production*. Street, Binghamton, NY, Haworth Food & Agricultural Products Press, New York, 326 p.

Hamza M., 1967. Influence de diverses concentrations de chlorure de sodium sur la croissance de jeunes plantes de *Triticum sativum*. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 176: 1997 2000. Hamza M., *C. R. Acad. Sci. Paris*, 176, (1967), 1997-2000.

Hasegawa P.M., Bressan R. A., Zhu J. K. and Bohnert H. J., 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 51, 463-499.

HAY, R.K.M. 1999. Physiological control of growth and yield in wheat: analysis and synthesis. In Crop yield. Physiological processes. *Edited by D.L. Smith and C. Hamel. Springer, Berlin.* pp. 1–38.

Hervé Le Deit et al. 2004. LES HALOPHYTES : PLANTES DES MILIEUX SALES

Hervieu B., R.Capone, S. Abis. 2006. The challenge posed by the cereals sector in the Mediterranean. *Ciheam analytical note*, N°9: 14 pages.

Hibbett, D.S., Binder, M., Bischoff, J.F., Blackwell, M., Cannon, P.F., Eriksson, O.E., Huhndorf, S., James, T., Kirk, P.M., Lucking, R., Thorsten Lumbsch, H., Lutzoni, F., Matheny, P.B., McLaughlin, D.J., Powell, M.J., Redhead, S., Schoch, C.L., Spatafora, J.W., Stalpers, J.A., Vilgalys, R., Aime, M.C., Aptroot, A., Bauer, R., Begerow, D., Benny, G.L., Castlebury, L.A., Crous, P.W., Dai, Y.C., Gams, W., Geiser, D.M., Griffith, G.W., Gueidan, C., Hawksworth, D.L., Hestmark, G., Hosaka, K., Humber, R.A., Hyde, K.D., Ironside, J.E., Koljalg, U., Kurtzman, C.P., Larsson, K.H., Lichtwardt, R., Longcore, J., Miadlikowska, J., Miller, A., Moncalvo, J.M., Mozley Standridge, S., Oberwinkler, F., Parmasto, E., Reeb, V., Rogers, J.D., Roux, C., Ryvarden, L., Sampaio, J.P., Schussler, A., Sugiyama, J., Thorn, R.G., Tibell, L., Untereiner, W.A., Walker, C., Wang, Z., Weir, A., Weiss, M., White, M.M., Winka, K., Yao, Y.J. and Zhang, N. (2007) A higher-level phylogenetic classification of the Fungi. *Mycological Research*, 111 (5): 509-547.

Honrubia M. 2009. Las micorrizas: una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*. **66S1**: 133-144.

Hopkins W. 2003. *Physiologie végétale*. Bruxelles, Edition De Boeck, pp 288-314.

Hosny M, Gianinazzi-Pearson V, Dulieu H., 1998. Nuclear DNA content of 11 fungal species in Glomales. *Genome* 41: 422-428. Jacquelinet, 1986

Hu Y., J. Fromm & U. Schmidhalter, 2005.- Effect of salinity on tissue architecture in expanding wheat leaves. *Planta*, **220** (6), 838-48

J.A.Fortin (2013), les mycorrhizes en agriculture et horticulture : le model canadien, revue jardins de France de la société nationale d'horticulture de France et de ses sociétés adhérentes, numéro 622, pp14-15

Jansa , J., A. Mozafar, G. Kuhn, T. Anken, R. Ruh., I. Sanders and E. Frossard, 2003. Soil tillage affects the community structure of mycorrhizal fungi in maize roots. *Ecology Application* **13**:1164-1176

Jasper D. A., L. K. Abboth and A. D. Robinson. 1991. The effect of soil disturbance on vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in soil different vegetation types. *New Phytol.* 118 : 471 - 482.

Johnson, N.C., Zak, D.R., Tilman, D., Pflieger, F.L., 1991. Dynamics of vesicular-arbuscular mycorrhizae during old field succession. *Oecologia* 86, 349-358.

Joner, E.J. & Leyval, C. (2003). Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza. *Environmental Science & Technology*, 37: 2371-2375.

Juge, C., J. Samson, C. Bastien, H. Vierheilig, A. Coughlan, and Y. Piche. 2002. Breaking dormancy of spores of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus irregulare*: a critical cold-storage period. *Mycorrhiza*. 12:37-42.

Juniper S, Abbott L. 1993. Vesicular-arbuscular mycorrhizas and soil salinity. Review. *Mycorrhiza*. 4: 45-57.

Kabir , Z. and R.T. Koide, 2000. The effects of dandelion or a cover crop on mycorrhizal inoculum potential, soil aggregation and yield of maize. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 78:167-174

Karmous C., 2007. Contribution à l'étude des mécanismes de tolérance à la salinité au stade juvénile chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : aspects physiologique, biochimique et moléculaire. Thèse de doctorat en agronomie et science de la production végétale. INAT, Tunis : 211p.

Katerji N., Mastrorilli M., Rana G., 2006. Analysis and improvement of water use efficiency for crops cultivated in the Mediterranean regions: the state of the art. WEMED Project Report, CIHEAM Bari, Italy, 32 p.

Kayani S.A., H.H. Naqvi & I.P. Ting, 1990. - Salinity effects on germination and mobilization of reserves in jojoba seed. *Crop Sci.*, 30, 704-708.

Koul, R. (2011). Mycorrhizal intervention to boost agri outcome. *In BioSpectrum. Biopharma.* <http://www.biospectrumindia.com/biospecindia/news/157150/mycorrhizal-intervention-boost-agri-outcome> (page consultée le 29 janvier 2014).

Landwehr M, Hildebrandt U, Wilde P, Nawrath K, Tóth T, Biró B, Bothe H (2002) Le champignon mycorrhizien arbusculaire *Glomus geosporum* dans les sols salins européens, sodiques et de gypse. *Mycorrhiza* 12: 199-211.

Laurence J-T. (2014). Les inoculants mycorrhiziens pour une agriculture québécoise plus productive et moins dépendante aux engrais minéraux phosphatés. 99 pp

Le Tacon, F., T. Le Tacon, V. Mauron, Y. Rousseau, M. Backer and D. Bouchard, 1999. Fertilisation raisonnée et mycorhize. 4^{ème} rencontre de la fertilisation raisonnée. Blois, novembre-décembre 1999, pp 211-222

Leake, J., D. Johnson, D. Donnelly, G. Muckle, L. Boddy and D. Read, 2004. Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystem functioning. *Canadian Journal of Botany* **82**:1016-1045

Lerat, S., L. Lapointe, Y. Piché, H. Vierheilig, 2003. Variable carbon-sink strength of different *Glomus mosseae* strains colonizing barley roots. *Canadian Journal of Botany* **81**:886-889

Leyval, c., Jooer, B.J. (2001). Bioavailability of heavy metals in the mycorrhizosphere. In: Trace elements in the rhizosphere. CRC Press: 165-185.

MADR (2004) : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural ; *Rapport sur la situation du secteur agricole*

MADRP, (2014) Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche. *Bilan de la campagne céréalière 2013/2014*

MADRP, (2015) Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche. *Bilan de la campagne céréalière 2014/2015*

Marie-Line.H. (2013), Mycorhizes: Diagnostic et Inoculation revue jardins de France de la société nationale d'horticulture de France et de ses sociétés adhérentes, numéro 622, pp8-9

Marqués, J.L.Á. (2008). Los biofertilizantes como componentes de los sistemas integados de nutricion vegetal. In Univesidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. *Monografias de la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos*

Matiru, V.N. & Dakora, F.D. (2004). Potential use of rhizobial bacteria as promoters of plant growth for increased yield in landraces of African cereal crops. *African Journal of Biotechnology* **3**: 1-7

Mc Millen B.G., Juniper S et Abbott L.K, 1998. Inhibition of Hyphal growth of a vesicular arbuscular fungus in soil containing sodium chloride limits the spread of infection from spores. *Soil Bio. Biochem.* **30**: 1639-1646

Mezni M., Albouchi A., Bizid E. et Hamza M., 2002. Effet de la salinité des eaux d'irrigation sur la nutrition minérale chez trois variétés de luzerne pérenne (Medicagosativa). *Agro*, **22**,283-291.

Miller R.M., Jastrow J.D., 1992- The role of mycorrhizal fungi in soil conservation. In : *Mycorrhizae in sustainable agriculture.* G.J. Bethlenfalvay et R.G. Linderman, Eds., ASA Special Publication n° 54, pp 29-44.

Morton, J.B., 2000. Evolution of endophytism in arbuscular mycorrhizal fungi of Glomales. In: C.W. Bacon and J.H. White (Eds) *Microbial Endophytes*, pp. 121-140. Dekker, New-York

MOSSE, B. 1956. Fructifications of an Endogone species causing endotrophic mycorrhiza in fruit plants. *Annals of Botany*, 20(2), 349-362.

Mosse B, 1973. Advances in the study of vesicular-arbuscular mycorrhiza. *Annual Review of Phytopathology*. 11:137-209.

Mosse, B. 1981. Vesicular arbuscular mycorrhizal research, Research Bulletin 194, Hawaiï. p. 81

Munns R., Tester M., 2008. Mechanisms of salinity Tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, Vol.59; pp: 651–681.

Munns R., 2002. - Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ.*, **25**, 239-250.

Netendo G. W., Onyango J. C., Beck E., 2004. Sorghum and salinity: 2. Exchange and Chlorophyll Fluorescence of Sorghum under Salt Stress. *Revue CSSA*. 44: 806-811p.

Newman, E.I (1988). Mycorrhizal links between plants : their functioning and ecological significance. *Advances in Ecological Research*, 18: 243-270.

Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Ris, E. A., Boller, T. and Wiemken, A. (2005). Communitystructure of arbuscular mycorrhizal fungi at different soil depths in extensively and intensively managed agroecosystems. *New phytologist*, vol. 165, p. 273-283

Oehl F, Souza FA, Sieverding E. 2008. Revision of *Scutellospora* and description of five new genera and three new families in the arbuscular mycorrhiza forming *Glomeromycetes*. *Mycotaxon* 106: 311–360.

Orcutt D.M. and Nilsen E.T. ,(2000): Physiology of plants under stress. John Wiley & Sons Inc., New York, NY, USA.

Peterson L, Massicotte H, Melville L. 2004. Mycorrhizas: Anatomy and Cell Biology. Ottawa, CA: NRC Research Press.

Phillips JM, Hayman DS (1970), Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55:158–160

Piccard E., 1988 : Sélection du blé dur. L'intégration des biotechnologies : Revue n°68, p28-38.

Porcel R, Aroca R, Ruiz-Lozano JM. 2011. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **32**:181–200

Porcel, R, R Aroca and J.Manuel Ruiz-Lozano. 2012.Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. Areview. *Agronomy for Sustainable Development*. 32: 181-200

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

Ricroch, A., Dattée, Y. & Fellous, M. (2011).Biotechnologie végétale : environnement, alimentation, santé. Ed du Vuibert. Paris. 170-182p.

Rillig, M.C. & Steinberg, P.D. (2002). Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification? *Soil Biology & Biochemistry*, 34: 1371- 1374.

Rillig, M.e. and D.L. Mummey. 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*. 171: 41-53.

Rivera, R. (2003). Resultados de las campañas de validación. In Rivera, R. et Fernández, K., El Manejo eficiente de la simbiosis micorrízica, una vía hacia la agricultura sostenible. Estudio de caso : El caribe. (chap. 4 p. 113-131). La Habana, édition INCA.

Rivera, R. (11 février 2014). Efficace del biofertilizante ECOMIC. Courrier électronique à Laurence Jochems-Tanguay: laurence.jochems.tanguay@usherbrooke.qc.ca

Ruíz, L, Rivera, R. y Simo, J. (2014). Nuevo método de inoculación con el biofertilizante micorrízico EcoMic en el cultivo de la yuca. In INCA. *Red Temática de Micorrizas*.

Ruíz-Lozano JM, Porcel R, Azcón C, Aroca R.2012. Regulation by arbuscular mycorrhizae of the integrated physiological response to salinity in plants: new challenges in physiological and molecular studies. *Journal of Experimental Botany*. **63**: 4033-4044

SAADOLLAH et al., 2005: Evaluation of salt-tolerant genotypes of durum wheat derived from in vitro and field experiments, *Elsevier, Field Crops Research*, pp345–354.

Saidi, J. (2004). Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du bas Cheliff. Thèse de Doctorat d'Etat en Science Agronomiques, INA, El Harrach, 181p.

Samba, R.T., Sylla, S.N., Neyra, M., Gueye, M., Dreyfus, B. & Ndoye, I. (2002). Biological nitrogen fixation in *Crotalaria* species estimated using the ¹⁵N isotope dilution method. *African Journal of Biotechnology*, 1: 17-22

Scannerini .S et Bonfante-Fasolo.P., 1982 .Données actuelles sur la cytologie des mycorrhizes, Dans : les mycorrhizes, partie intégrante de la plante. Biologie et perspectives d'utilisation, INRA Eds .13 : 25-40.

Schilling, A.S., Abaye A.O., Griffey C.A., Branna D.E., Alleya M.M. et Pridgena T.H., 2003: Adaptation and Performance of Winter Durum Wheat in Virginia. *Agron J.*, 95.pp.642-651.

Schüßler, A., D. Schwarzott and C. Walker, 2001. A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological Research*, **105**: 1413 1421.

Schwarzott, D. and A. Schüßler, 2001. A simple and reliable method for SSU rRNA gene DNA extraction, amplification and cloning AM fungal spores. *Mycorrhiza***10**: 203-207.

Selmi R., 2000. Fin du mythe de l'autosuffisance alimentaire et place aux avantages comparatifs. *Revue Afrique Agriculture*. N° 280.Pp.30-23. IN: Evaluation de la qualité d'un germoplasme de blé dur (*Triticum durum Desf*): appréciation de l'aptitude technologique et biochimique. Ait Kaki.S. (2001). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar. Annaba.

Simard, S.W., Durall, D.M. (2004). Mycorrhizal networks : a review of their extent, function, and importance. *Canadian Journal of Botany*. 82: 1140-1165

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.

Smith SE, Read DJ. 2008. *Mycorrhizal symbiosis*. Cambridge, UK: Academic Press.

Smith, S.E. and D.J. Read, 1997. *Mycorrhizal symbiosis* Academic Press. London.

SOLTNER D., 1998 : Les grandes productions végétales : céréales, plantes sarclées, prairies. Sainte-Gemme-sur-Loire, Sciences et Techniques Agricoles. 436p.

St-Arnaud, M., C. Hamel, B. Vimard, M. Caron, and J.A. Fortin. 1996. Enhanced hyphal growth and spore production of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus irregulare* in an in vitro system in the absence of host roots. *Mycological Research*. 100:328-332.

Suarez, D.L. 1989. Impact of agricultural practices on groundwater salinity. *Agric., Ecosystems & Environment*. 26:215-227.

TELLAH S., 2005 : Etude du comportement de 19 génotypes d'orges (*Hordeum vulgare* L) dans les conditions de la Mitidja. *Rev. Céréaliculture* N°45,p12.

The Energy and Resources Institute (TERI) (2013). Mycorrhizal technology Say 'no' to soil pollutants. *In* The Energy and Resources Institute (TERI). *7th International conference on mycorrhiza*.

Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. 418: 671-677

Tisserant E, Kohler A, Dozolme-Seddas P, Balestrini R, Benabdellah K, Colard A, Croll D, Da Silva C, Gomez SK, Koul R 2011. The transcriptome of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* (DAOM 197198) reveals functional tradeoffs in an obligate symbiont. *New Phytologist* 193: 755–769

Toth G, 2014. European Soils Portal – Soils Data and Information systems. En ligne. <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/themes/Salinization/>. Consulté le 03/05/2015.

Trouvelot A, Kough JL, Gianinazzi-Pearson V (1986), Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. *In*: physiology and genetics aspects of mycorrhizae. Gianinazzi-Pearson V et Gianinazzi S (Eds), 1st ESM, INRA Press, Paris, 217-221 p.

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.

Vavilov N.L., 1934. Studies on the origin of cultivated plants . Bull. Appl. Bot and plant breed, XVI: 1- 25.

Voets L, de la Providencia IE, Declerck S. 2006. Glomeraceae and Gigasporaceae differ in their ability to form hyphal networks. *New Phytologist* **172**: 185-188.

Zaghouane O., Merabti A., Zaghouane-Boufenar F., Aitabdellah F., Amrani M. et Djender Z., 2006. Durum quality and progressing by rural woman in the region of high plateau in Algeria. ITGC / ICARDA. 38 p.

Sites internet visités

Invam: <http://invam.wvu.edu/the-fungi/classification/glomaceae>. Consulter le 28/09/2017

Blaszkowski: <http://www.agro.ar.szczecin.pl/%7Ejblaszkowski/Species%20descriptions%20of%20AMF.html>

ITALPOLLINA : entreprise française de production de biofertilisants

1. L'Analyse granulométrique du sol suivant la méthode normalisée AFRON NF X 31-107

- **Pesée :**

La prise d'essai varie en fonction de la texture de l'échantillon déterminée lors de la description du profil. Il faut peser :

- 5g de terre pour les échantillons à texture argileuse.
- 10g de terre pour les échantillons à texture moyenne.
- 20g de terre pour les échantillons à texture sableuse.
- Pour savoir si c'est du sol argileux ou bien sableux on façonne un boudin avec le sol.
- Si il se casse facilement donc sableux.
- Si c'est contraire donc argileux.
- D'après l'expérience le sol est donc sableux.
- Déterminer l'humidité résiduelle en faisant sécher à l'étuve à 105°C.
- Une prise d'essai de 10g de terre et cela pendant 24 heures.
- Calculer la teneur en eau en pesant l'échantillon avant et après passage à l'étuve.
- Noter la valeur obtenue qui constitue l'humidité résiduelle.

- **destruction de la matière organique :**

- La prise d'essai est introduite dans un bêcher de 600 ml de forme haute, en suite mouiller l'échantillon par un jet de pissette d'eau distillée.
- Ajouter 50ml d'eau oxygénée à 20 volumes par petite fraction pour éviter le débordement de la mousse dans le cas des échantillons riches en matière organique.
- Laisser reposer une nuit.
- Porter au bain de sable, couvrir le bêcher d'un verre de montre et laisser évaporer en évitant l'ébullition qui décomposerait rapidement l'eau oxygénée.

- Agiter périodiquement le bêcher pour faire descendre la mousse.
- Ajouter au besoin quelques gouttes d'éthanol.
- Ne jamais laisser l'échantillon aller a sec.
- Quand la mousse a disparu, la réaction est terminée. Le traitement peut durer plusieurs heures.
- Si l'échantillon est très humifère, il peut nécessiter de nouvelles additions d'eau oxygénée.
- Ajouter périodiquement 10ml d'eau oxygénée et continuer l'attaque jusqu'à la disparition de la mousse.
- Si l'échantillon n'est pas carbonaté, faire passer le contenu du bêcher dans une fiole d'agitation d'un litre au moyen d'eau distillée sans dépasser le volume de 500ml.

- **prélèvement de différentes fractions granulométriques :**

- A- Taux de l'argile +limons fins : il faut commencer par le prélèvement de cette fraction.
 - Déterminer le temps de sédimentation selon la température lue sur le thermomètre plongé dans l'éprouvette témoin contenant l'eau et l'héxamétaphosphate de sodium (prélever a 10 cm de profondeur après 4min 48secondes si la température est de 20°C)
 - Récupéré le contenu de la pipette dans une capsule tarée et faire sécher a l'étuve a 105°C (P1)
- B- Mesure de l'argile : il faut remettre en suspension les particules par agitation énergique
 - Déterminer le temps de sédimentation selon la température (prélever a 10 cm de profondeur après 8 heures de sédimentation à 20°C).
 - Le volume prélevé est transféré dans une capsule tarée et séchée à l'étuve.
- C- Les fractions plus grossières, sable grossiers, sable fins et limons grossier sont déterminés par tamisage après lavage des fractions fines déterminées par la sédimentation.

La somme de ces 5 fractions granulométriques minérales est égale à 100%.

2. Analyse de la conductivité électrique

Elle est mesurée selon la méthode (d'AFNOR NF X31- 108).

- Peser 20g de sol tamisé au travers d'un crible de 2mm.
- Porter dans un bêcher de 250ml, ajouter 100 ml d'eau distillée.
- Agiter pendant 2 minutes avec un agitateur magnétique.
- Laisse reposer pendant 30 minutes.
- Filtrer.
- Refilerez pour obtenu un filtrat clair.
- Ajouter 2 gouttes d'héxamétaphosphate de sodium a 0.1%, ce produit évite la précipitation de CaCO_3 .
- La solution est prête pour être mesurée à l'aide d'un conductimètre.

3. Analyse du potentiel d'hydrogène (PH)

- Peser 10g de sol criblé à 2mm
- Porter dans un flacon de 250 ml puis ajouter 50 ml d'eau distillée
- Mise de la solution sur l'agitateur horizontale pendant 10 minutes
- une fois mélangé, laissé reposer pendant 2 heures
- puis mesuré le PH à l'aide d'un PH-mètre

4. Coloration au bleu de trypan selon la méthode de Philipe et Hyman

Le traitement des 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' H_2O_2 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.