الجهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique
جامعة باجي مختار - عنابة
Université Badji Mokhtar -Annaba

Faculté des Sciences

Département de Biologie

Thèse de Doctorat en Sciences Biologiques

Option : Biologie Végétale

Biotechnologie de l'inoculation mycorhizienne : Production et application en cultures maraîchères. Cas de la pomme de terre

Présentée par
AOUISSI Nora

Devant le jury composé :

Président : Pr. LAIFA Aziz (Université Badji Mokhtar, Annaba)
Directrice de thèse : Dr. MEDDAD-HAMZA Amel (Université Badji Mokhtar, Annaba)
Co-Directeur : Pr. DJAMAI Rachid (Université Badji Mokhtar, Annaba)
Examinateur : Pr NASRI Hichem (Université Chadli Bendjedid, El-Tarf)
Examinateur : Pr. HOUHAMDI Moussa (Université 08 mai 1945, Guelma)
Examinatrice : Dr. HOUD-CHAKER Kahina (Université Chadli Bendjedid, El-Tarf)

Année Universitaire : 2017/2018

Dédicace.

Je dédie ce modeste travail,

A mes chers parents, la lumière de mes yeux, qui pour leurs aides, leurs encouragements et surtout leurs immenses sacrifices, ont été derrière la réussite de mes études.

Qu'ils trouvent dans ce travail, un témoignage de leur bonne éducation, le fruit de leur espoir ainsi que la grande affection que je ressens envers eux

A mon mari et ma fille et à ma belle-famille Titah.

A mes frères Mehdi et le petit ange Zaki sans oublier ma sœur Rym.

A ma sœur adorée Imen Guerroui

A mon très chers oncles Guerroui Djamel, Guerroui Bachir et Guerroui Ali

A tous ceux qui portent les noms de Aouissi et Guerroui

Et enfin à tous ceux que j'ai connu et aimé.

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier le Docteur **Meddad Amel** pour avoir dirigé et suivi ce travail, pour ses précieux conseils, ses encouragements et sa disponibilité.

Ma profonde gratitude va au Professeur **Djamai Rachid** qui a fait preuve d'une très grande disponibilité et surtout d'avoir toujours cru en moi.

Je remercie vivement le Professeur ***Laifa* Aziz** de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance

Je remercie également le Professeur **Nasri Hichem et le** Docteur **Houd-Chaker Kahina** de l'université Chadli Bendjedid de Tarf ainsi que le Professeur **Houhamdi Moussa** de l'université du 08 mai 1945 de Guelma qui ont bien voulu accepter d'examiner ce travail.

J'exprime ma gratitude à mon très cher oncle le Professeur **Guerroui Said**, Vice-Recteur chargé de la Formation Supérieure de la Post-Graduation, de l'Habilitation Universitaire et de la Recherche Scientifique Université Badji Mokhtar de Annaba.

Un remerciement particulier à Monsieur **Khirouni Moufid**, Responsable du laboratoire agronomique de FERTIAL de Annaba qui a accepté nos échantillons pour la réalisation des analyses physico-chimiques des sols.

Mes remerciements vont également à Melles **Dafri Ahlem**, **Fetnaci Imen** et **Boumaaza Imen** pour leur aide technique précieuse et aux étudiants docteurs et doctorants du Laboratoire de Recherche « Sols et Développement Durable ».

Mes sincères remerciements vont également à mon mari et à mes beaux-parents qui m'ont toujours encouragé et aidé.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidée à concrétiser ce travail et je leur exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude.

Résumé

Biotechnologie de l'inoculation mycorhizienne : Production et application en cultures maraîchères. Cas de la pomme de terre

Les engrais de synthèse utilisés dans le domaine de l'agriculture constituent une source de nutriments qui assure la croissance des plantes et contribue à une augmentation des rendements agricoles. Cependant, leur utilisation excessive de la part des agriculteurs entraine de sérieux problèmes pour l'environnement et la santé humaine.

Les mycorhizes sont des associations symbiotiques entre des champignons et des plantes hôtes et qui confèrent à ces dernières plusieurs avantages dont notamment bonne nutrition minérale. Les champignons mycorhiziens à arbuscule(CMA) présentent alors une alternative efficace de manière à développer une agriculture durable et moins dépendante des intrants chimiques.

A cet effet, une expérience en conditions réelles de culture a été établie dans un champ agricole situé dans la région de Dréan, wilaya d'EL TAREF (Nord-Est algérien) afin d'évaluer l'impact de l'inoculation mycorhizienne sur une culture maraichère : la pomme de terre. Trois doses de fertilisant chimique, correspondant à 0, 50 et 100% de la dose recommandée ont été appliquées en présence ou non de l'inoculant mycorhizien commercial.

Les résultats ont révélé que l'inoculation a eu des effets bénéfiques sur la croissance des plants de pomme de terre (jusqu'a +55% de la hauteur, +67% du poids sec aérien et +58% du poids sec racinaire) et sur le rendement. Une augmentation significative a été observée au niveau de la colonisation racinaire (+47%), de la teneur en chlorophylle (+41%) et en sucre totaux (+32%) en phase végétative.

En termes de qualité des tubercules, un accroissement significatif de la teneur en amidon, en protéines et élément minéraux a été enregistrés.

Mots clés : Mycorhizes, champignon mycorhizogène à arbuscule, pomme de terre, cultures maraichères, réduction de fertilisation chimique.

Summary

Biotechnology of mycorrhizal inoculation: Production and application in vegetable crops. Potato case.

Synthetic fertilizers used in agriculture are a nutrient source that ensures plant growth and contributes to an increase in agricultural yields. However, their excessive use by farmers causes serious problems for the environment and human health.

Mycorrhizae are symbiotic associations between fungi and host plants, which confer on the latter several advantages as a good mineral nutrition, the mycorrhizal mushrooms with arbuscular (AMC) present then an effective alternative to develop a sustainable agriculture and less dependent on chemical inputs.

For this purpose, an experiment in real conditions of culture was established in an agricultural field located in the region of Dréan, wilaya of EL TAREF (Northeast Algeria) to evaluate the impact of mycorrhizal inoculation on a market gardening culture: Potato. Three doses of chemical fertilizer corresponding to 0, 50 and 100% of the recommended dose were applied in the presence or absence of the commercial mycorrhizal inoculant.

The results revealed that the inoculation had beneficial effects on the growth of the seed potatoes (up to + 55% of the height, + 67% of the aerial dry weight and + 58% of the root dry weight) and on performance. A significant increase was observed in root colonization (+ 47%), chlorophyll content (+ 41%) and total sugar (+ 32%) in the vegetative phase.

In terms of tuber quality, a significant increase in starch, protein and mineral content was recorded.

Key words: Mycorrhizas, mycorrhizal fungus with arbuscula, potato, vegetable crops, reduction of chemical fertilization.

ملخص

التكنولوجيا الحيوية للتلقيح للميكورايزا : الإنتاج والتطبيق في محاصيل الخضروات. حالة البطاطا

الأسمدة الاصطناعية المستخدمة في الزراعة هي مصدر غذائي يضمن نمو النبات ويساهم في زيادة المحاصيل الزراعية. ومع ذلك، فإن استخدامها المفرط من قبل المزارعين يسبب مشاكل خطيرة للبيئة وصحة الإنسان.

الميكورايزا هي ارتباطات تكافلية بين الفطريات والنباتات المضيفة التي تعطي هذه الأخيرة العديد من المزايا ، بما في ذلك التغذية المعدنية الجيدة٠تعد بديلا فعالا من أجل تطوير الزراعة المستدامة التي هي أقل اعتمادا على الأسمدة الكيميائية.
تحقيقا لهذه الغاية ، تم إنشاء تجربة في ظل ظروف حقيقية في حقل زراعي يقع في منطقة الذرعان ، ولاية الطارف (شمال شرق الجزائر) لتقييم أثار التلقيح الميكوريزي على زراعة : البطاطس. تم تطبيق ثلاث جرعات من الأسمدة الكيميائية الموافق لـ 0 و 50 و 100٪ من الجرعة باستعمال الكمية الاعتيادية في وجود أو عدم وجودالميكورازات
.
أوضحت النتائج أن التلقيح كان له آثار مفيدة على نمو نباتات البطاطا (حتى + 55٪ من الطول ، + 67٪ من الوزن الجاف و + 58٪ من وزن الجذر الجاف) و على الأداء. لوحظت زيادة معنوية في استعمار الجذر (+ ٪47) ومحتوى الكلوروفيل (+ 41٪) والسكر الكلي (+ ٪32) في الطور الخضري. من حيث جودة الدرنات ، تم تسجيل زيادة كبيرة في محتوى النشا والبروتين والمعادن.

Sommaire

Résumés……....

1. Introduction générale 1

Chapitre I Synthèse bibliographique……..……4

1 Etat des connaissances sur la pomme de terre 4

1.1 Historique..... 4

1.2 Taxonomie et origine..... 4

1.3 Aspect botanique 5

1.3.1 Appareil végétatif..... 5

1.3.2 Appareil souterrain..... 6

1.3.2.1 Structure interne du tubercule 6

1.3.2.2 Structure externe du tubercule..... 6

1.4 Cycle de reproduction..... 6

1.4.1 Cycle sexué 6

1.4.2 Cycle végétatif 7

1.5 Les variétés de la pomme de terre..... 9

1.6 Composition biochimique du tubercule..... 9

1.7 Les exigences de la plante 10

1.7.1 Exigences climatiques 10

1.7.1.1 La température..... 10

1.7.1.2 La lumière 11

1.7.1.3 L'alimentation en eau 11

1.7.1.4 Exigences édaphiques 11

1.7.1.5 Exigences en éléments fertilisants..... 11

1.8 Production de la pomme de terre 12
1.8.1 Production mondiale..... 12
1.8.2 Production de la pomme de terre en Algérie. 13
1.8.3 Evolution de la production de pomme de terre de consommation..... 14
1.8.4 Evolution de la production de semences de pommes de terre 14
1.8.5 Les principales wilayas productrices de la pomme de terre 15
1.8.6 Les principales variétés cultivées en Algérie..... 16

2 La symbiose mycorhizienne 17
2.1 Historique..... 17
2.2 Les mycorhizes : une association symbiotique plante-champignon 17
2.2.1 La symbiose ectomycorhizienne 18
2.2.2 Les ectendomycorhizes 18
2.2.3 Les endomycorhizes 19
2.3 Les mycorhizes à arbuscules……..…….20
2.3.1 Structure des mycorhizes arbusculaires……..…20
2.3.2 Colonisation des racines par les champignons mycorhiziens arbusculaire…....…22
2.3.3 Taxonomie des espèces de champignons mycorhiziens à arbuscules……..……...24
2.3.4 Importance des Champignons mycorhiziens à arbuscules…….……..25
2.3.4.1 Bénéfices pour le champignon mycorhiziens à arbuscules……..…….25
2.3.4.2 Benefices pour la plante…….……27

3 Impact de l'agriculture moderne sur les mycorhizes 31
3.1 La fertilisation 32
3.2 Le travail du sol..... 32
3.3 Les rotations de cultures 32
3.4 Les pesticides 33

Chapitre II Matériel et Méthodes 34

1.Situation géographique du site expérimental 34

2. Climat 34

2.1. Température 35

2.2. Pluviométrie 35

3. Matériel végétal 36

4. Matériel fongique 36

5. Dispositif expérimental et application des traitements 36

6. Conduite culturale 38

6.1. Préparation du sol 38

6.2. Plantation 38

6.3. Système d'irrigation 39

6.4. Entretien phytosanitaire de la culture 39

7. Paramètres mesurés 39

7.1. Paramètres liés à la croissance végétative 40

7.1.1. La hauteur des tiges 40

7.1.2. Poids frais et sec des feuilles / racines 40

7.1.3. Teneurs en chlorophylles 40

7.1.4. Dosage des sucres totaux dans les feuilles 40

7.2. Paramètres liés au rendement 41

7.2.1. Nombre de tubercules par plant 41

7.2.2. Rendement par catégories de poids ..... **Error! Bookmark not defined.**

7.2.3. Rendement par plant 41

7.2.4 Rendement total / ha 41

7.3. Paramètres liés à la qualité des tubercules 41

7.3.1. Dosage de l'amidon 41

7.3.2. Dosage des protéines 42

7.3.3. Dosage du phosphore 42

7.3.4. Dosage de l'azote 42

7.3.5. Dosage du potassium 43

7.4. Paramètres liés aux mycorhizes 43

7.4.1. Coloration des fragments de racines 43

7.4.2. Mise en évidence du potentiel mycorhizogène du sol 45

7.4.2.1. Préparation du dispositif 45

7.4.2.2. Coloration et observation du système racinaire 46

7.4.2.3. Calcul du pouvoir mycorhizogène 47

7.5. Analyses physico-chmiques du sol 47

7.6. Analyse statistique 48

Chapitre III Résultats et discussion 49

1. Paramètres physiques et physico-chimiques des sols 49

1.1 Propriétés du sol avant plantation 49

1.2 Propriétés des sols après plantation. 50

1.3 Potentiel mycorhizogène du sol 51

2. Effet de la mycorhization sur la croissance de plants de pomme de terre 52

2.1 Taux de mycorhization des racines des plants de pomme de terre 53

2.2. Longueur de la tige principale 55

2.3. Biomasses aériennes et racinaires 55

2.4 Teneurs en chlorophylle 56

2.5. Teneurs des feuilles en sucres 57

3. Effet de la mycorhization sur le rendement 58

3.1. Nombre de tubercules par plant 59

3.2. Rendement par catégories de poids. 60

3.3. Rendement total 61

4. Effet de la mycorhization sur la qualité des tubercules de pomme de terre 63

4.1 Teneurs des tubercules en amidon 63

4.2 Teneurs des tubercules en protéines 64

4.3. Teneurs des tubercules en azote 65

4.4. Teneurs en phosphore des tubercules 66

4.5 Teneurs des tubercules en potassium 67

Conclusions et perspectives……69

Références bibliographiques.....

Liste des figures .....

Liste des tableaux .....

Annexes .....

Introduction

1. Introduction générale

L'agriculture moderne fait face à de nombreux défis, la population mondiale en constante augmentation force les agriculteurs à rendre leurs terres de plus en plus productives. À l'heure actuelle, la productivité élevée de l'agriculture intensive est grandement dépendante des intrants chimiques, en particulier des engrais qui enrichissent les sols d'éléments nutritifs nécessaires à la croissance des plantes **(Childers et *al.*, 2011).**

La pomme de terre *(Solanum tuberosum L., Solanales Solanaceae)* est le tubercule le plus important au monde, cultivée dans plus de 125 pays et consommée presque quotidiennement par plus d'un milliard de personnes **(FAO, 2013)** et fait partie des principaux végétaux des produits qui permettent de lutter contre la faim dans le monde (**Lutaladio & Prakash, 2010).** C'est l'une des cultures les plus exigeantes en engrais, en raison de son système racinaire peu profond et peu développé qui limite son champ d'exploration et d'exploitation des nutriments. Ces cultures ont besoin de stratégies adéquates pour contrôler les maladies afin de maximiser le rendement.

Tous ces produits chimiques pourraient avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine. Il existe un besoin croissant de systèmes intégrés de culture de pommes de terre qui combinent différentes stratégies de gestion avec une utilisation réduite d'engrais minéraux et de pesticides **(Maynard & Hochmuth, 2007).**

Les chercheurs reconnaissent qu'il n'existe pas de solution unique, mais selon plusieurs d'entre-eux, un virage vers une agriculture plus productive et moins dépendante des intrants chimiques phosphatés ne pourra se faire sans une meilleure gestion des interactions biologiques dans les agrosystèmes, comme les mycorhizes **(Plenchette et *al.*, 2005).** Les pratiques culturales intensives ont souvent altéré la communauté microbienne des sols, ne permettant plus aux plantes cultivées de profiter pleinement des propriétés de ces micro-organismes **(Fortin et *al.*, 2008).**

Des études antérieures ont montré que les mycorhizes peuvent être bénéfiques dans les écosystèmes agricoles **(Wang et *al.*, 2005).** Elles sont des symbiotes associées aux racines et montrent de forts effets de croissance pour la plupart des plantes, y compris presque toutes les

cultures comestibles, en augmentant la contribution du phosphore disponible du sol et d'autres nutriments minéraux mobiles essentiels à la croissance des plantes. Ils sont des acteurs clés de la gestion durable des systèmes agricoles **(Smith & Read, 2008).** Dans plusieurs pays, les pratiques d'inoculation se sont avérées être une solution très efficace pour augmenter les rendements des cultures et réduire leurs besoins en intrants de phosphate **(Hamel & Plenchette, 2007).**

L'utilisation de champignons mycorhiziens arbusculaires (AMF) pour améliorer la croissance de la pomme de terre a fait l'objet de plusieurs études (**Hijri, 2006 ; Douds et *al.*, 2007 ; Wu et *al.*, 2013)** qui ont montré l'efficacité de ces microorganismes.

Bien que les champignons mycorhiziens soient omniprésents dans les sols naturels, les pratiques culturales perturbent le plus souvent leurs populations et leur diversité. Dans ces conditions, les nombreuses expériences conduites depuis plus de 10 ans au Canada et ailleurs dans le monde 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 et des rendements accrus. L'utilisation de ces *inocula* permet de réduire l'utilisation d'engrais phosphatés de 25% et même jusqu'à 50 % selon les sols, les espèces végétales et leurs cultivars, ce qui représente pour le producteur des gains significatifs en rendement et en retour sur les investissements, accompagnés de réduction substantielle des fertilisants **(Fortin, 2013).**

En Algérie, le secteur de la pomme de terre dans tous ses aspects de semences et de consommation occupe désormais une position stratégique dans la nouvelle politique du renouveau agricole et rural, où sa culture reste parmi les espèces maraîchères qui sont fondamentales pour la stratégie alimentaire **(FAO, 2015).** Il serait intéressant d'étudier les bénéfices potentiels des inoculums mycorhiziens commerciaux dans cette culture qui pourraient ouvrir un marché très attractif pour ces produits.

Inspiré par les succès qui ont été réalisés, en conditions réelles de culture, l'objectif de ce projet est de déterminer l'effet de l'inoculation mycorhizienne sur la culture de pomme de terre.

En présence de trois doses de fertilisant chimique, soient 0%, 50% et 100% de la quantité recommandée couramment par les agriculteurs.

Notre étude vise à évaluer l'efficacité d'un inoculum commercial sur la croissance des plants de pomme de terre dans un premier temps, puis par la suite, déterminer si l'inoculation de champignons mycorhiziens arbusculaires permet d'augmenter le rendement en pomme de terre et d'améliorer la qualité du produit récolté en étudiant quelques paramètres biochimiques des tubercules.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

1 Etat des connaissances sur la pomme de terre

1.1 Historique

La pomme de terre (*Solanum tuberosum L.*) est l'une des plantes tubéreuses les plus produites et les plus consommées au monde. La culture a une origine probable au Pérou (Amérique du Sud), d'où on pense qu'elle a été introduite dans le reste du monde par des expéditions de guerre, l'expédition et le transport **(Spooner *et al.*, 2005).** Aujourd'hui, plus de 5000 variétés de pommes de terre sont présentes dans différentes parties du monde; la majorité d'entre eux est principalement confinée en Amérique du Sud **(Zaheer & Akhtar, 2016).**
La pomme de terre est classée comme la troisième culture la plus produite et consommée après le riz et le blé et près d'un milliard de personnes dans le monde la consomment sous différentes formes **(Anwar *et al.*, 2015)**

En Algérie, la pomme de terre a probablement été introduite une première fois au XVIème siècle par les Maures andalous qui ont propagé les autres cultures dans la région tels que la tomate, poivron, maïs, tabac ; puis elle est tombée dans l'oubli n'ayant pas suscité d'intérêt. Dans la deuxième moitié du XIXème siècle, les colons vont la cultiver pour leur usage, car les algériens y sont réticents malgré les disettes successives. C'est la dernière grande famine des années 1930 à 1940 qui viendra à bout de cette opposition **(Meziane, 1991).**
Après l'indépendance, la pomme de terre est devenue un produit important pour la consommation locale. La demande en cette culture s'est alors accrue ; elle représente la première culture maraîchère de point de vue superficie et production **(FAO, 2008).**

1.2 Taxonomie et origine

La pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) appartient à la famille des Solanacées, genre *Solanum* **(Quezel & Santa, 1963).** On pensait autrefois que la pomme de terre était issue d'une plante sauvage unique, l'espèce *Solanum tuberosum* L. ; dès 1929, les botanistes avaient montré que l'origine était plus complexe et que l'on retrouvait parmi les ancêtres des espèces de pomme de terre cultivées, des plantes sauvages différentes **(Dore *et al.*, 2006).**

La classification botanique de la pomme de terre est présentée par **Hawkes (1990) :**

- Règne : *Métaphytes* (Végétaux supérieurs)
- Embranchement : *Spermatophytes*
- Sous-embranchement : *Angiospermes*
- Classe : Dicotylédones
- Sous-classe : *Asteridae*
- Ordre : Polemoniales
- Famille : *Solanaceae*
- Genre : *Solanum* L.
- Sous-Genre : *Potatoe* (G. Don) D'Arcy
- Section : *Petota* Dumort
- Sous-section : *Potatoae*
- Super-série : *Rotata*
- Série/Groupe : *Tuberosa* (cultivées)
- Espèce : *tuberosum*
- Sous-espèce : *tuberosum*

1.3 Aspect botanique

La pomme de terre est une plante herbacée, tubéreuse à feuilles caduques (elle perd ses feuilles et ses tiges aériennes dans la saison froide), à port dressé, qui peut atteindre un mètre de hauteur, plus ou moins étalé avec l'âge. C'est une plante vivace grâce à ses tubercules, à condition que le climat leur permettent de survivre à la saison froide **(Burkart et *al.*, 1987)**

1.3.1 Appareil végétatif

Le système racinaire est fasciculé et très ramifié ; il a tendance à s'étendre superficiellement mais peut s'enfoncer jusqu'à 0.8 mètre de profondeur. Il est constitué de racines adventives qui apparaissent à la base des bourgeons du tubercule ou sur les nœuds des tiges enterrées ; pour cette raison, le tubercule doit être planté à une profondeur pour permettre une formation adéquate des racines et des rhizomes. Les racines connaissent une croissance rapide depuis les premiers stades de développement jusqu'au moment où commence la formation des tubercules **(Arvy et *al.*, 2007)**

1.3.2 Appareil souterrain

Le système souterrain représente la partie la plus intéressante de la plante puisqu'on y trouve les tubercules qui confèrent à la pomme de terre sa valeur alimentaire. L'appareil souterrain comprend le tubercule mère desséché et des tiges souterraines ou stolons **(Bernhards, 1998).**

1.3.2.1 Structure interne du tubercule

D'après une coupe longitudinale d'un tubercule à maturité on observe de l'extérieur vers l'intérieur les organes suivants : Le périderme est la peau du tubercule ou le tissu de revêtement qui devient ferme et imperméable aux produits chimiques, gazeux et liquides en maturité et protéger le tubercule contre les micro-organismes et la perte d'eau. Les lenticelles assurent la communication entre l'extérieur et l'intérieur du tubercule et la respiration de cet organe. Après en trouve le cortex et la zone péri-médullaire qui présente les plus gros grains d'amidon en enfin la moelle qui contient des grains d'amidon de moindre taille que le péri-médullaire. **(Kechid, 2005).**

1.3.2.2 Structure externe du tubercule

A l'extrémité apicale du tubercule, ou couronne, se trouve le bourgeon terminal tandis qu'à l'opposé, du côté proximal (talon), se trouve le point d'attache du stolon, l'ombilic.
Les yeux, disposés régulièrement sur le tubercule suivant une phyllotaxie spiralée, correspondent à l'emplacement des bourgeons axillaires. Des lenticelles parcourent la surface du tubercule et jouent un rôle essentiel dans la respiration du tubercule **(Rousselle *et al.*, 1996).**

1.4 Cycle de reproduction

1.4.1 Cycle sexué

Le fruit est une baie sphérique ou ovoïde de 1 à 3 cm de diamètre, il contient plusieurs dizaines de graines qui sont l'outil de création variétale **(Larousse agricole, 2002).** La germination est épigée et les cotylédons sont portés au-dessus du sol par le développement de l'hypocotyle. Quand la jeune plante atteint quelques centimètres de hauteur, les stolons commencent à se développer d'abord au niveau des cotylédons puis aux aisselles situées au- dessus de sol et

s'enfoncent dans le sol pour donner des tubercules à la présence des conditions favorables **(Boufares, 2012).**

1.4.2 Cycle végétatif

La durée du cycle végétatif de la pomme de terre varie de 90 à 150 jours ; elle dépend de l'état physiologique des tubercules qui sont plantés, de l'ensemble des facteurs agroclimatiques et des variétés utilisées **(Rousselle et *al.*, 1996).**

a. Germination : Après la plantation du tubercule, ses germes s'allongent jusqu'à atteindre le niveau du sol, ce qui constitue le stade de la levée. Dans le même temps, les racines commencent leur élongation et leur ramification.

b. Croissance végétative: Les germes poursuivent leur croissance au-dessus du sol en devenant des tiges feuillées. Les bourgeons aériens des tiges donnent des rameaux, et les bourgeons souterrains généralement des stolons.

c. Tubérisation: Selon les variétés et les conditions du milieu pour une même variété, les stolons cessent leur élongation et leurs extrémités se renflent pour former les ébauches des tubercules. Les ébauches différenciées vont grossir en emmagasinant des réserves formées à partir des métabolites synthétisés par la plante au niveau du feuillage. Le grossissement des tubercules s'arrête pendant la sénescence de la plante qui se traduit classiquement par le jaunissement progressif des feuilles, de la base vers le sommet de la plante et conduit au dessèchement total du système aérien.

d. Repos végétatif : Pendant leur grossissement, les tubercules se trouvent dans un état de repos végétatif et leurs bourgeons sont incapables de croître pour donner des germes (phase de dormance). Ce repos continue après la récolte pendant une période d'environ 3 à 4 mois. A la fin de ce repos, la croissance des germes redevient possible, ce qui constitue le point de départ d'un nouveau cycle de végétation.

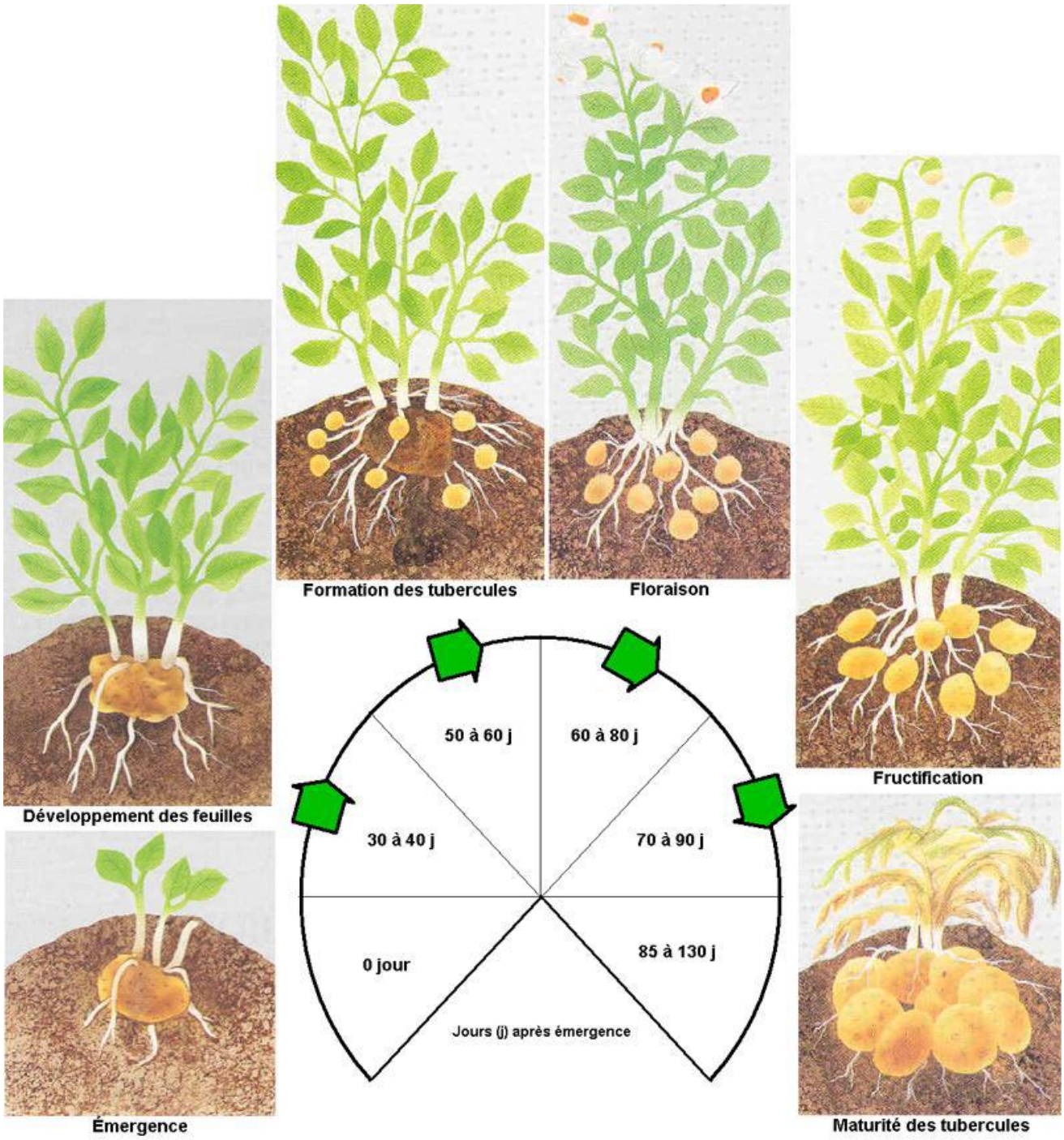

Figure 1 : Stades de développement de la pomme de terre (Soltner, 2005)

1.5 Les variétés de la pomme de terre

Le nombre de variétés de la pomme de terre est extrêmement élevé, chaque variété possède une description officielle basée sur de nombreux caractères morphologiques et physiologiques lui permettant d'être toujours identifiable et différentiable visuellement des autres variétés **(Peron, 2006)**:

- **Pomme de terre primeur :** limiter le nombre de tubercules au profit de leur grosseur et d'une extrême précocité ; les principales variétés utilisées sont *Nicola, Diamant, Roseval, Yesmina, Timate* et *Charlotte*.

- **Pomme de terre plant :** nombre élevé de tubercules de calibre moyen et d'une bonne précocité.

- **Pomme de terre de consommation (marché du frais) :** un nombre élevé de tubercules d'un calibre moyen à grand, sans toutefois dépasser le calibre supérieur. Les variétés les plus utilisées sont *Desirée, Spunta, Diamant, Lisetta* et *Kondor*.

- **Pomme de terre de consommation (transformation industrielle) :** un rendement élevé en tubercules et amidon.

1.6 Composition biochimique du tubercule

Les caractéristiques morphologiques, chimiques et biochimiques du tubercule de pomme de terre varient principalement en fonction de la variété, mais dépendent également des techniques culturales, des conditions climatiques et de l'âge physiologique de la pomme de terre. Les pourcentages présentés dans ce chapitre sont des valeurs moyennes, la composition biochimique étant influencée par les différents paramètres précités **(Delaplace, 2007)**

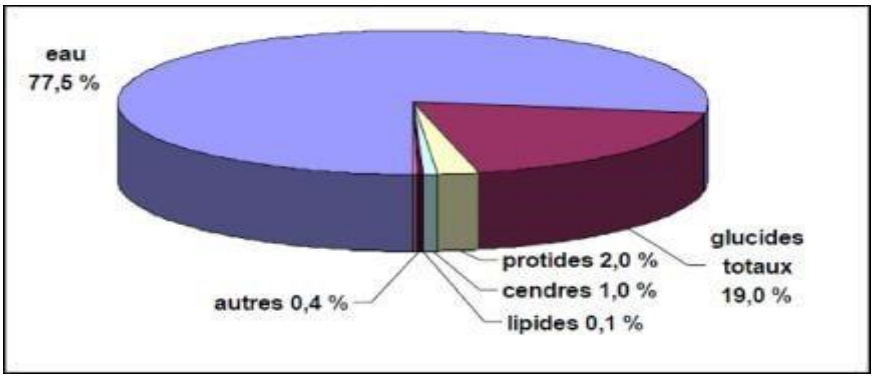

Figure 2 : Représentation graphique de la composition biochimique moyenne d'un tubercule de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la matière fraîche totale **(Delaplace, 2007).**

Le tubercule de pomme de terre est un organe de stockage contenant à maturité une moyenne de 77,5 % d'eau. La matière sèche, exprimée en pourcentage de la matière fraîche, se répartit globalement en 19 % de glucides totaux (principalement amidon, saccharose, glucose, fructose, cellulose brute et substances pectiques), 2,0 % de protides (protéines, acides aminés libres et bases azotées), 1,0 % de cendres (majoritairement du potassium) et 0,1 % de lipides. Des acides organiques (acides citrique et ascorbique entre autres), des substances phénoliques (acides chlorogénique et caféique, pigments, etc.) complètent cette composition, mais ne sont présents qu'en faible quantité dans le tubercule **(Mattila & Hellström, 2007).**

1.7 Les exigences de la plante

1.7.1 Exigences climatiques

La pomme de terre est cultivée avec succès à une altitude de 1000 m. On peut dire que son aire d'adaptation va des régions subtropicales aux régions plus froides, elle résiste le mieux sous les climats tempérés, humides et brumeux **(Laumonnier, 1979**).

1.7.1.1 La température

Elle influence beaucoup le type de croissance. Les hautes températures stimulent la croissance des tiges ; par contre les basses températures favorisent davantage la croissance du tubercule. La pomme de terre est très sensible au gel. Le zéro de végétation est compris entre 6 et 8 °C. Les

températures optimales de croissance des tubercules se situent aux alentours de 18 °C le jour et 12 °C la nuit. Une température du sol supérieure à 25 °C est défavorable à la tubérisation **(Bamouh, 1999).**

1.7.1.2 La lumière

La lumière intervient par son effet photopériodique dans l'induction de la tubérisation et par son intensité dans l'activité photosynthétique. Les photopériodes courtes sont plus favorables à la tubérisation et les photopériodes longues plus favorables à la croissance. La plupart des cultivars utilisés dans les régions à climat tempéré ont des photopériodes critiques comprises entre 13 et 16 heures **(Rousselle et *al*., 1996).**

1.7.1.3 L'alimentation en eau

La pomme de terre comme toutes les plantes, assure sa croissance et son développement d'une part par les produits élaborés par la photosynthèse et d'autre part, par l'eau et les éléments minéraux puisés dans le sol. En comparaison avec d'autres cultures, la pomme de terre est très exigeante en eau; une quantité d'eau entre 500 et 700 mm d'eau est requise selon le climat pour obtenir un rendement élevé pour une variété dont le cycle de croissance est de 120 à 150 jours **(Wolfe, 1982).**

1.7.1.4 Exigences édaphiques

La pomme de terre préfère les sols siliceux ou silico-argileux, légers, assez frais et profonds. Elle s'accommode avec des terres acides dont le pH est assez bas (5.5 à 6). Il n'y a que les terrains très argileux, froids et humides au printemps et en automne, secs et compacts en été, ou trop calcaires qui ne lui conviennent pas **(Gauthier, 1991).**

1.7.1.5 Exigences en éléments fertilisants

D'après **Doorenbos et Kassam, (1980),** les besoins de la pomme de terre en macronutriments sont de 120 kg ha^{-1} d'azote, 80 kg ha^{-1} de P_2O_5 et 160 kg ha^{-1}de K_2O. Les éléments tels que le potassium et surtout le phosphore doivent parvenir au végétal par diffusion **(Barber, 1995),** c'est

à dire les racines des végétaux créent un courant de diffusion des ions; ce courant est renforcé lors d'une demande importante de la part de la plante, ou si le pouvoir d'absorption de la racine est élevé. L'importance de ce transfert dépend du rapport entre ce qui est apporté par le sol et ce qui est demandé par la plante. Les cinétiques de l'exportation des éléments minéraux montrent une absorption intense de K_2O. Les tubercules en exportent 1.5 fois plus que l'azote et 4 à 5 fois plus que le P_2O_5 **(Perrenoud, 1993).** La pomme de terre s'est avérée comme une culture indicatrice pour la disponibilité du potassium à cause de ses besoins élevés **(Roberts & Mc Dole, 1985).**

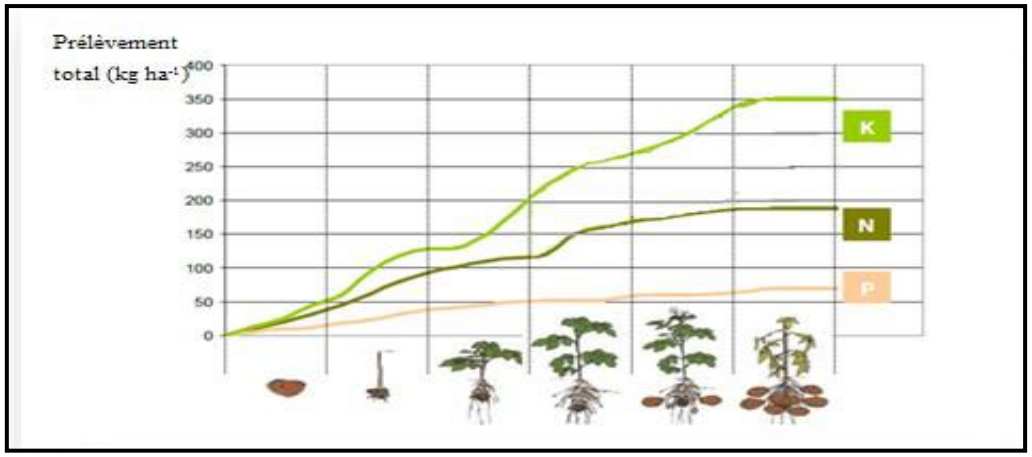

Figure 3 : **Évolution de l'absorption des éléments nutritifs majeurs par la pomme de terre (Harris, 1978)**

1.8 Production de la pomme de terre

1.8.1 Production mondiale

En 2013, la production mondiale de pommes de terre a été estimée à 368.1 millions de tonnes, pour une surface cultivée de 19.4 millions d'hectares, soit un rendement moyen de 18.9 tonne par hectare. Ce chiffre n'inclut pas les plants (semences) qui représentent 32.2 millions de tonnes. C'est la chine qui occupe le premier rang des pays producteurs avec une production atteignant 88.9 millions de tonnes en 2013 **(FAO, 2015).**

L'Asie et l'Europe sont les deux principaux continents producteurs de la pomme de terre du monde. Ils ont fourni plus de 80% de la production mondiale en 2007. Au continent américain,

bien que la région latine présente une surface récoltée nettement supérieure, c'est l'Amérique du nord qui obtient de loin les rendements les plus élevés avec plus de 36 tonnes/ha **(FAO, 2008).**

Tableau 1 : Production de la pomme de terre par continent (FAO, 2008)

Continents	**Surfaces récoltées (ha)**	**Quantités (tonnes)**	**Rendements (qtx/ha)**
Asie et Océanie	8743857	187182946	15.68
Europe	7439553	128608372	17.28
Amérique du Nord	615032	22626288	36.78
Afrique	1503145	16308530	10.84
Amérique latine	662434	15985825	16.61
Totaux	19264021	320711961	16.64

1.8.2 Production de la pomme de terre en Algérie.

En Algérie, la filière pomme de terre dans tous ses volets semences et consommation occupe aujourd'hui une place stratégique dans la nouvelle politique du renouveau agricole et rural, où sa culture reste parmi ceux qui occupent une place primordiale tant par l'importance alimentaire, les superficies qui lui sont consacrées, les emplois qu'elle procure que par les volumes financiers qui sont mobilisés annuellement pour sa production **(FAO, 2015).**

A l'inverse de la production de pomme de terre de consommation qui a connu une augmentation remarquable ces dernières années, la production de semences de cette culture connaît depuis longtemps, une stagnation avec une production médiocre qui est destinée essentiellement à l'arrière-saison et une partie de la tranche primeur, d'où la nécessité de recourir aux importations qui couvrent la moitié des besoins nationaux 220 000 tonnes/an, soit un coût d'importation qui varie entre 65 et 70 millions d'Euros selon les années. Ces semences importées ne présentent pas souvent les qualités requises pour nos conditions édapho-climatiques, et dans certains cas les semences importées sont à des âges physiologiques très avancés ce qui influencera leur rendement. Pour prendre en charge ce problème, une enveloppe budgétaire importante lui est consacrée notamment pour la production des semences ; avec la construction de trois laboratoires

modernes, l'introduction de nouvelles techniques comme la culture in vitro et la culture hors-sol, qui représentent des technologies modernes utilisées pour de nombreuses cultures.

1.8.3 Evolution de la production de pomme de terre de consommation

L'Algérie occupe la deuxième place en Afrique après l'Égypte, dans la production de la pomme de terre en Afrique pour l'année 2010 **(FAO, 2015).**

Les chiffres présentés indiquent que la production nationale a dépassé le seuil de trois millions de tonnes durant l'année 2010, pour une superficie estimée à 126 milles hectares. La moyenne par hectare a atteint 26 tonnes (tableau 2).

Tableau 2 : Production algérienne de la pomme de terre de consommation (MADR, 2014)

Années	Pomme de terre de consommation (Qx)
2008	19707280
2009	24408 380
2010	30825205
2011	36400694
2012	39126314
2013	45506341
2014	43548761

1.8.4 Evolution de la production de semences de pommes de terre

La production qui enregistre un accroissement de 11 830 94 tonnes entre 2008 et 2014. Malgré cette nette augmentation des rendements, la production nationale n'arrive pas à satisfaire les besoins nationaux en semences. Il est à rappeler que 80% des besoins en semences sont importés

pour un montant de 60 millions d'Euros. Il faut signaler également que l'auto-approvisionnement en semences représenterait un taux variant entre 10 et 20% de la production locale, ce volet ne concernant que la tranche d'arrière-saison et une partie de la tranche primeur (tableau 3).

Tableau 3 : Production algérienne de semences pomme de terre (MADR, 2014)

Années	Pomme de terre de semences (Qx)
2008	2 003 300
2009	1 952 190
2010	2 177 910
2011	2 221 242
2012	3 068 444
2013	3 359 039
2014	3 186 394

1.8.5 Les principales wilayas productrices de la pomme de terre

La superficie occupée par les cultures maraîchères varie chaque année entre 380.000 et 400.000 ha, dont 100.000 à 130.000 ha emblavés en pommes de terre, soit 26% de la superficie maraîchère totale **(MADR, 2010).** Il est à relever aussi que l'on assiste, depuis quelques années, à l'augmentation de cette culture par l'occupation de nouvelles zones où elle était pratiquement inconnue. Les zones de production sont réparties selon quatre zones géographiques : littoral, sublittoral, atlas tellien et hautes plaines (tableau 4).

- **Primeur :** Boumerdes, Tipaza, Skikda, Alger, Mostaganem, Tlemcen.
- **Saison :** Ain-Defla, Mascara, Mila, Souk Ahras, Boumerdes, Mostaganem, Sétif, Tizi Ouzou, Tiaret, M'Sila, Tlemcen, Batna, Chlef, Bouira, El-Oued.

- **Arrière saison :** Ain-Defla, Mascara, Guelma, Chlef, El Oued, Tlemcen, Mostaganem, Djelfa.

Tableau 4 : Les principales wilayas productrices de pomme de terre (MADR, 2006)

Wilayas	**Surfaces (hectares)**	**Production (quintaux)**
Ain Defla	15 230	320 000
Mascara	9 050	208 700
Tlemcen	7 505	197 900
El Oued	7 392	181 800
Mostaganem	6 668	159 500
Chlef	4 015	115 200
Boumerdes	3 600	93 200
Skikda	3 212	57 100
S/Total	66 672	1 333 408
T/ Algérie	98 825	2 180 900

1.8.6 Les principales variétés cultivées en Algérie

Cent vingt variétés sont inscrites au catalogue algérien des espèces et variétés cultivées. Cette inscription est obligatoire pour leur commercialisation, elle est précédée de deux ans au cours desquels sont évalués les caractères d'utilisation, le rendement, le comportement vis-à-vis des parasites par le service de contrôle et certification des semences. Les principales variétés cultivées en Algérie sont : *Spunta* (à chair blanche), *Désirée* (à chair jaune), *Bartina, Lisita* **(DSA Tlemcen, 2008).** Les variétés sont déterminées par :

- La forme du tubercule
- La couleur de la peau et de la chair
- La durée de conservation
- La date de mise sur le marché
- La durée de culture

2 La symbiose mycorhizienne à arbuscules

2.1 Historique

Depuis leur extension dans l'écosystème terrestre, les plantes ont adopté des stratégies en relation avec leur pouvoir d'adaptation. Parmi celles-ci, les systèmes racinaires ont établi des relations mutualistiques, avec des microorganismes telluriques, désignées sous le nom de mycorhizes. Ces dernières sont apparues sur terre il y a environ 400 millions d'années **(Simon et *al.*, 1993)** et sont considérées comme étant à l'origine de la flore terrestre **(Selosse & Le Tacon, 1998).** Ces relations symbiotiques sont caractérisées par un état d'équilibre physiologique permettant aux symbiotes impliqués, d'en retirer des bénéfices mutuels. Parmi ces interactions, les plus fréquentes sont celles qui intéressent plus de 90 % des plantes terrestres (**Sanders et *al.*, 1996**) et qui font intervenir un groupe de champignons de la classe des Glomeromycètes : ce sont les champignons mycorhiziens à arbuscules, connus depuis la fin du 18^{e} siècle **(Strullu, 1991).**

Ces champignons sont cosmopolites et colonisent la majorité des familles de plantes, depuis les Bryophytes jusqu'aux Angiospermes **(Boullard, 1990 ; Demars & Broener, 1995)** et particulièrement les plantes à valeurs économiques importantes. Ces microorganismes à haut niveau d'organisation dans cette association, déterminent les conditions de liaison dans lesquelles le champignon peut croître, se reproduire et évoluer **(Morton, 1993).**

2.2 Les mycorhizes : une association symbiotique plante-champignon

Les mycorhizes sont des associations symbiotiques entre des champignons du sol et les racines des plantes. Le principal fondement physiologique de cette symbiose est un partage bidirectionnel d'éléments nutritifs. La plante fournit au champignon des composés carbonés produits par la photosynthèse et en retour, le champignon approvisionne la plante en éléments minéraux et en eau provenant du substrat **(Smith & Read, 2008).**

La majorité des plantes supérieures terrestres vivent en étroite symbiose avec les champignons. Il s'agit d'un phénomène fondamental et universel qui s'élabore au niveau du système racinaire des plantes vasculaires et des bryophytes. Les organes résultant de cette association sont appelés mycorhizes. D'origine gréco-latine, le terme mycorhize (« mukês » pour champignon et « rhiza »

pour racine) décrit de nombreuses et diverses associations racine-champignon. Actuellement, on définit les mycorhizes comme étant des associations symbiotiques contractées par les racines des végétaux avec certains champignons du sol. On les trouve dans de nombreux environnements et leur succès écologique reflète une forte diversité des capacités génétiques et physiologiques des champignons endophytes (**Bonfante et *al.*, 2009**).

Cette symbiose est obligatoire dans les conditions naturelles, c'est-à-dire que ni le champignon ni l'arbre ne peuvent vivre indépendamment l'un de l'autre **(Strullu, 1991).** Tout comme dans le cas des Lichens, la plante verte effectue la photosynthèse et le champignon approvisionne le couple en eau et en éléments minéraux à partir du substrat. Il existe plusieurs types de mycorhizes, certaines sont très spécifiques et ne se développent qu'avec quelques espèces végétales comme les Ericacées, alors que d'autres sont plus généralistes et sont largement distribuées dans les divers écosystèmes du globe **(Fortin et *al.*, 2008).**

D'après la morphologie, on distingue différents types de mycorhizes :

2.2.1 La symbiose ectomycorhizienne

Les ectomycorhizes du grec ektos, à l'extérieur chez lesquelles les champignons se développent essentiellement autour de la racine, en formant un manchon mycélien ; de ce manteau part un réseau d'hyphes qui se développe entre les cellules corticales de la racine (réseau de Hartig) sans jamais entrer à l'intérieur de ces dernières. Ce type d'association est représenté surtout chez les essences forestières des régions tempérées et de la forêt boréale, mais il a été décrit aussi chez quelques espèces tropicales de la famille des Dipterocarpaceae, Euphorbiaceae, Cesalpiniaceae, Myrtaceae et Fagaceae **(Redhead, 1980).**

2.2.2 Les ectendomycorhizes

Les ectendomycorhizes sont des formes intermédiaires qui possèdent à la fois les caractéristiques des ectomycorhizes, c'est-à-dire, un réseau de Hartig bien développé et un manteau fongique plus ou moins épais, ou absent dans quelques cas, et les caractéristiques des endomycorhizes soit la pénétration à l'intérieur des cellules corticales par les hyphes **(Yu et *al.*, 2001)**. Ces derniers,

présentent à l'intérieur des cellules différents degrés de prolifération. Ils sont soit très courts (mycorhizes monotropoïdes), ou sous forme de pelotons (mycorhizes arbutoïdes).

2.2.3 Les endomycorhizes

A l'inverse des ectomycorhizes, les hyphes des endomycorhizes pénètrent à l'intérieur des cellules où leur prolifération conduit à la formation d'arbuscules ou de pelotons. Le réseau de Hartig et le manteau fongique sont absents, seul un lâche réseau d'hyphes extraracinaire entoure les racines. Il existe plusieurs types d'endomycorhizes qui diffèrent en de nombreux points. Les plus connus sont, les endomycorhizes à arbuscules, les endomycorhizes éricoïdes et les endomycorhizes orchidoïdes (figure 4).

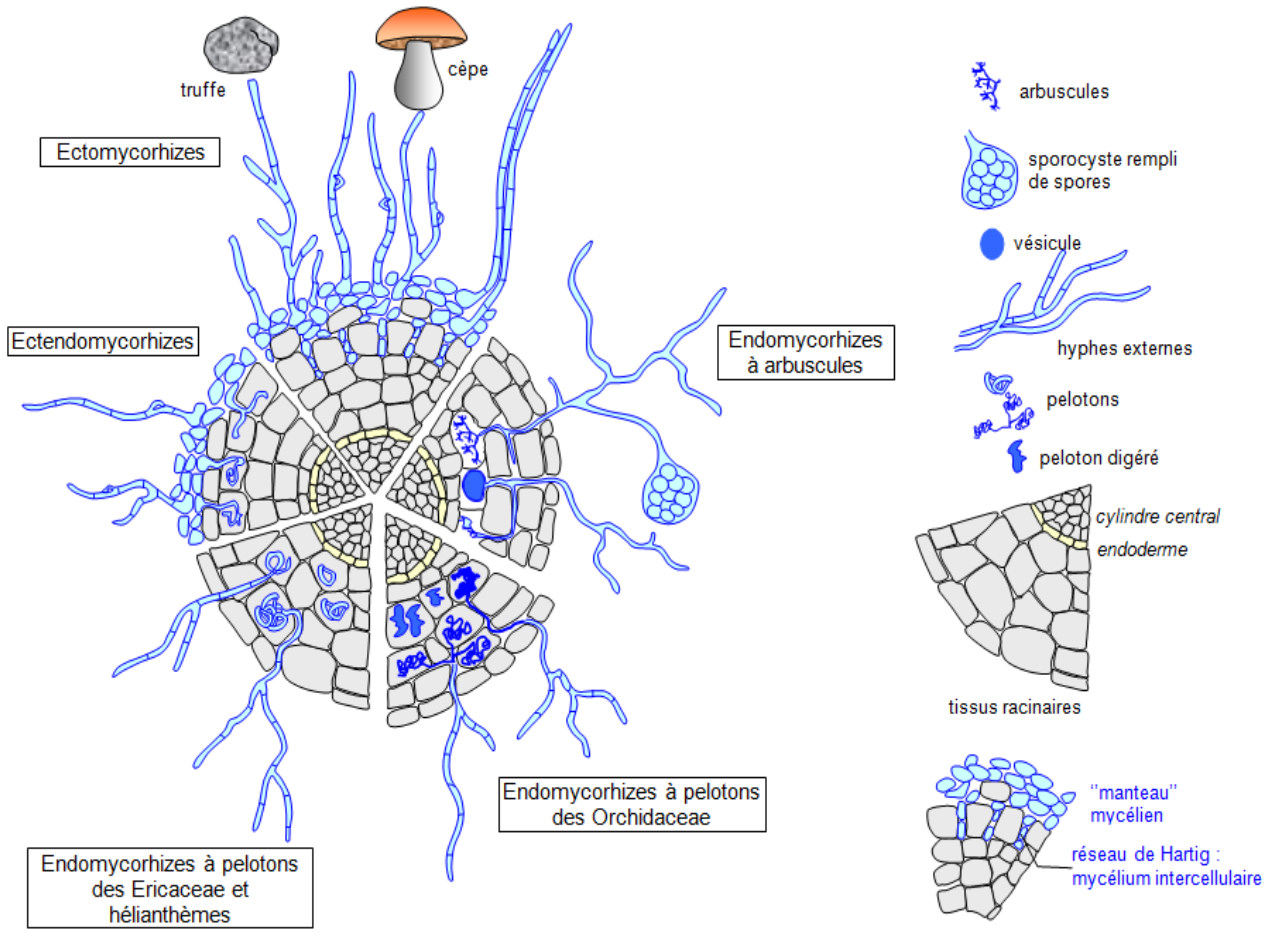

Figure 4 : Principaux types mycorhiziens représentés sur une coupe transversale de racine (Le Tacon, 1985)

2.3 Les mycorhizes à arbuscules.

Les mycorhizes à arbuscules font partie des endomycorhizes, le type de mycorhizes le plus ancien et le plus répandu. Ils impliquent plus de 200 espèces de champignons microscopiques qui appartiennent au phylum des *Glomeromycota* **(Schüßler et *al.*, 2001).** Ces champignons forment des symbioses avec les racines d'environ 80 % de plantes vasculaires de la planète **(Smith et *al.*, 2003; Fortin et *al.*, 2008).** Les fougères, les lycopodes, plusieurs des conifères, les monocotylédones, les dicotylédones et la majorité des plantes à fleurs sont tous pourvus de mycorhizes arbusculaires **(Fortin et *al.*, 2008).**

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) sont des symbiotes obligatoires, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent pas se développer en l'absence d'une plante hôte. Pour établir la mycorhization, les champignons mycorhiziens à arbuscules doivent coloniser le système racinaire d'une plante par son mycélium. Chez les mycorhizes à arbuscules, le partage des nutriments entre la plante et le champignon se produit au niveau d'une structure unique, nommée arbuscule. Cet organe très ramifié en forme de petit arbuste est développé par le champignon à l'intérieur des cellules corticales des racines de la plante. L'importante surface de ces structures facilite les échanges de nutriments. Rattaché aux arbuscules, un important réseau mycélien extra-racinaire colonise le sol. Le champignon développe également au niveau de la racine des structures de réserve appelées vésicules et produit des spores au niveau du mycélium (figure 5). Les hyphes (à l'extérieur et à l'intérieur des racines), les vésicules et les spores permettent aux champignons de survivre en l'absence de la plante hôte et de se reproduire **(Hopkins, 2003; Smith & Read, 2008).** Par conséquent, toutes ces structures sont considérées comme des propagules pouvant former de nouvelles mycorhizes.

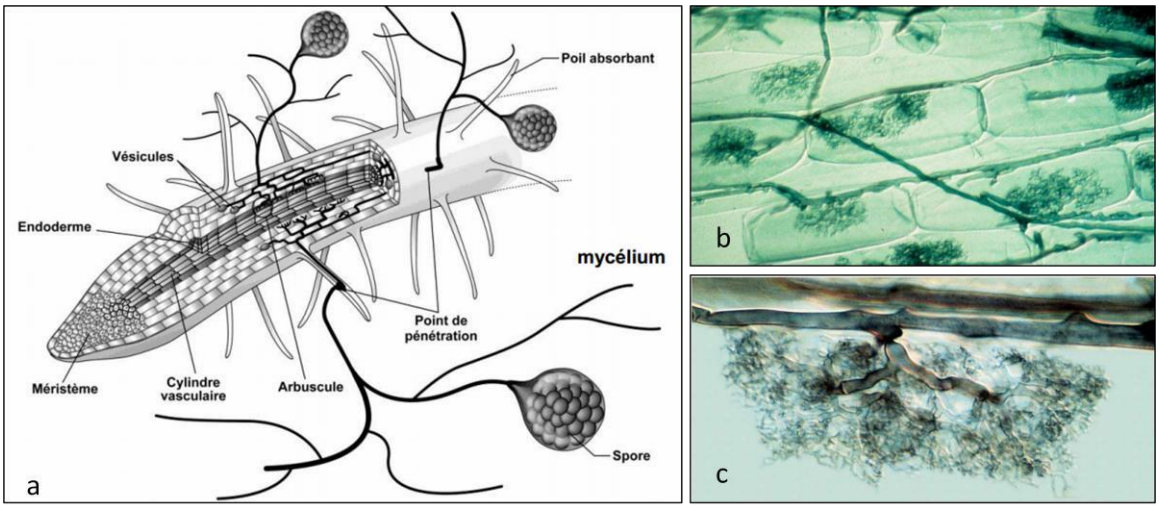

Figure 5 : (a) Représentation schématique des mycorhizes arbusculaires; (b) Photo du mycélium intracellulaire et des arbuscules; (c) Photo d'un arbuscule (compilation d'après Fortin et *al.*, 2008)

Leur croissance est essentiellement hypogée, mais certains champignons mycorhiziens arbusculaires formant des sporocarpes, fructifient à la surface du sol **(Redecker & Schüßler, 2014).** La reproduction des CMA est asexuée et est assurée par les spores. Cependant, quelques groupes se reproduisent par les hyphes ou les fragments racinaires déjà colonisés. On utilise le terme propagule pour désigner ces structures puisque elles servent toutes à la propagation de l'espèce **(Fortin et *al.*, 2008).** Leurs spores multinuclées et riches en globules lipidiques et protéiques sont relativement grandes. Elles se rencontrent séparées ou dans des sporocarpes **(Redecker & Schüßler, 2014)** avec un diamètre compris entre 22 et 1050µm **(Souza, 2015).**

2.3.1 Structure des mycorhizes arbusculaires

Les principales structures sont : les spores, les hyphes, l'*appressorium*, les vésicules et les arbuscules.

a. Les spores

La spore est une structure unicellulaire de forme généralement globoïde à paroi épaisse formée de plusieurs couches de différentes textures reliées au réseau filamenteux par une hyphe suspenseur de morphologie variée. Les caractères morphologiques étant réduits et varient souvent selon la maturité des spores étudiées **(Blaszkowski, 2008).**

b. L'hyphe

Les hyphes sont des filaments mycéliens intra ou extra-racinaires permettant aux champignons d'explorer le sol et de coloniser la plante hôte. La pénétration du mycélium dans les cellules du cortex racinaire se fait par l'intermédiaire de l'haustorium (suçoir), gonfle en formant des vésicules ou se ramifie en donnant une forme arborescente **(Luttge et *al*., 2002**).
Le mycélium intracellulaire est en relation avec des hyphes externes à la racine qui diffusent dans le sol. Elles augmentent ainsi considérablement le volume de sol exploré par la racine.

c. L'appressorium

Les hyphes adhèrent ensuite à la racine et différencient au contact du rhizoderme une structure spécialisée appelée : appressorium. Ce dernier constitue un renflement elliptique de 15 à 80 µm du filament mycélien **(Glenn *et al.*, 1985)** dont la paroi imprégnée de mélanine s'épaissit localement et assure le maintien d'une pression osmotique très élevée **(Duhoux & Nicole, 2004)**. La formation de cet organe est considérée comme l'évènement le plus décisif dans la reconnaissance et la colonisation de la plante-hôte **(Giovanetti & Sbrana, 1998).** Il est formé en présence des racines de l'hôte après 36 heures d'interactions entre la plante et le champignon. Ensuite, la pénétration du champignon est caractérisée par la production localisée d'hydrolases qui vont dégrader la paroi de la plante et provoquer, sous l'influence de la pression hydrostatique élevée, la progression d'un filament intrusif **(Duhoux & Nicole, 2004).**

d. Les vésicules

Certaines hyphes perforent la paroi cellulaire et pénètrent à l'intérieur de la cellule, se dilatent à leur extrémité pour former d'énormes ampoules inter ou intracellulaires, en général dans les couches superficielles de la racine (épiderme et exoderme). Ce sont les vésicules **(Dexheimer, 1997).** Ces dernières ont des parois épaisses de forme variée et sont caractéristiques de l'espèce fongique, jouent un rôle dans le stockage des réserves et la propagation du champignon **(Duhoux & Nicole, 2004).**

e. Les arbuscules

L'hyphe de pénétration se ramifie un grand nombre de fois pour réaliser une structure rappelant un petit arbre ou un tronc **(Dexheimer, 1997),** ce sont les arbuscules. Il s'agit de suçoirs très ramifiées enveloppées par une membrane péri-arbusculaire d'origine végétale, qui entoure une

paroi fongique très mince, dont la composition est légèrement différente de la cellule. Les cellules envahies contiennent d'avantage de plastes et de mitochondries et leurs noyaux deviennent enflés et multilobés, mais elles reprennent un aspect normal après la sénescence et la disparition de l'arbuscule **(Davet, 1996).** Elles sont de deux types Arum et Paris dépendant du génome de la plante **(Giovanetti & Sbrana, 1998).**

L'arbuscule a pour rôle d'augmenter de 2 à 3 fois la surface de contact entre la cellule et l'hyphe. Il exerce une influence sur la cellule-hôte dont le volume du cytoplasme peut augmenter de 20 à 25 % **(Hopkins, 2003).** On attribue à cette interface un rôle dans le transfert du phosphore et du carbone entre les deux partenaires **(Gobat et *al.*, 2003).** La croissance intracellulaire de l'arbuscule est généralement importante alors que les cellules de la plante hôte apparaissent hypertrophiées.

La durée de vie des arbuscules est courte. Ils deviennent sénescents au bout de 2 à 15 jours, se résorbent progressivement jusqu'à ce qu'il ne reste que le tronc **(Brundrett, 2008).** Cette même cellule peut être à nouveau envahie par un autre arbuscule **(Duhoux & Nicole, 2004).**

2.3.2 Colonisation des racines par les champignons mycorhiziens arbusculaires

L'établissement de la symbiose entre la plante et le champignon mycorhizien s'effectue via un échange de signaux moléculaires. La reconnaissance entre le champignon et la plante-hôte met en jeu les exsudats racinaires et fongiques : les flavonoïdes et les strigolactones, substances chimiques émises par la plante-hôte, vont stimuler l'activité métabolique du champignon (**Stevenin et *al.*, 2012 ; Gavériaux, 2012)**. Elles vont induire chez le CMA l'expression du gène Myc puis de facteurs Myc. Ces facteurs vont induire des déformations dans les cellules de l'hôte pour l'établissement de la symbiose, ainsi que la croissance des hyphes colonisant les racines **(Stevenin et *al.*, 2012).** Une spore de champignon germe, le mycélium croît en direction de la racine, et lorsque le champignon perçoit la présence d'une plante hôte, il manifeste une réaction typique de ramification intense des hyphes appelée « branching »

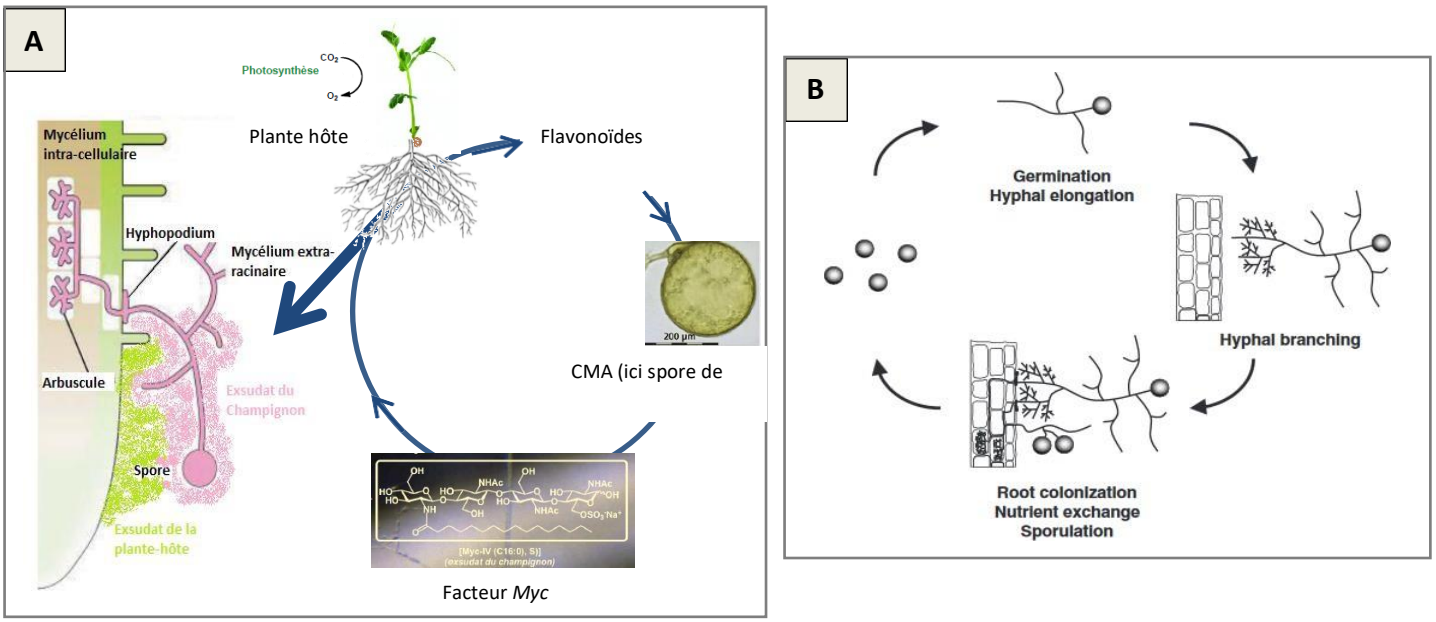

Figure 6 : Schématisation de l'établissement de la symbiose mycorhizienne (A) et du cycle de vie des CMA (B) (Akiyama, 2007)

Les hyphes adhèrent ensuite aux parois externes des cellules de la racine, formant un hyphopodium, avant de les perforer en sécrétant des enzymes qui vont détruire la cellulose, les hémicelluloses et les pectines constituants ces dernières. Une fois à l'intérieur de la cellule, les hyphes se ramifient par dichotomie en donnant des hyphes ayant un diamètre de plus en plus petit ; à partir d'un hyphe initial de 10 µm de diamètre, les dernières ramifications peuvent atteindre moins de 1µm de diamètre. L'ensemble de ces ramifications prend une forme de petit arbre : les arbuscules, lieux des échanges symbiotiques, qui donnent le nom à ces champignons **(Gavériaux, 2012 ; Garbaye, 2013).**

Les arbuscules sont des structures spécialisées dans le transfert de l'eau et des éléments nutritifs entre le champignon et la plante; pour le phosphore le transfert s'effectue sous forme d'ions orthophosphates via des transporteurs spécialisés insérés dans les membranes cellulaires à l'interface entre la plante et le champignon. Les sucres provenant de la plante sont conduits en sens opposé par des transporteurs d'hexoses qui sont d'autres canaux spécialisés **(Karandashov & Bucher, 2005 ; Garbaye, 2013).**

Après différentiation des structures intra-racinaires, le champignon produit des spores à partir de son mycélium extra-racinaire **(Akiyama et *al.*, 2007).** Tous ces mécanismes de communication moléculaires sont encore peu connus mais la recherche progresse régulièrement grâce notamment aux progrès de la génomique **(Garbaye, 2013).**

2.3.3 Taxonomie des espèces de champignons mycorhiziens à arbuscules

Les premières descriptions de la diversité des champigons mycorhiziens étaient basées sur les caractères morphologiques des spores (couleur, forme, taille, ornementations). Ces critères ont abouti à la classification des CMA en six genres **(Morton & Benny, 1990).**

La taxonomie basée sur des analyses moléculaires, en particulier sur l'analyse de la sous unité ribosomique de l'ARN 18S, a permis de constituer l'arbre phylogénétique des Glomyromycètes (figure 7). Cet embranchement compte à ce jour plus de 250 espèces décrites regroupées en 4 ordres : les *Glomerales*, les *diversisporales* et deux lignées plus anciennes ; les *Paraglomerales* et les *Archeosporales* (tableau 5). La famille *Entrophosporaceae* dont la position dans la taxonomie deschampignions mycorhiziens n'est pas encore totalement définie, est décrite comme étant une *familia incertae sedis* (famille de position incertaine) n'appartenant à aucun des 4 ordres précédemment cités **(Redecker & Schüßler, 2014).**

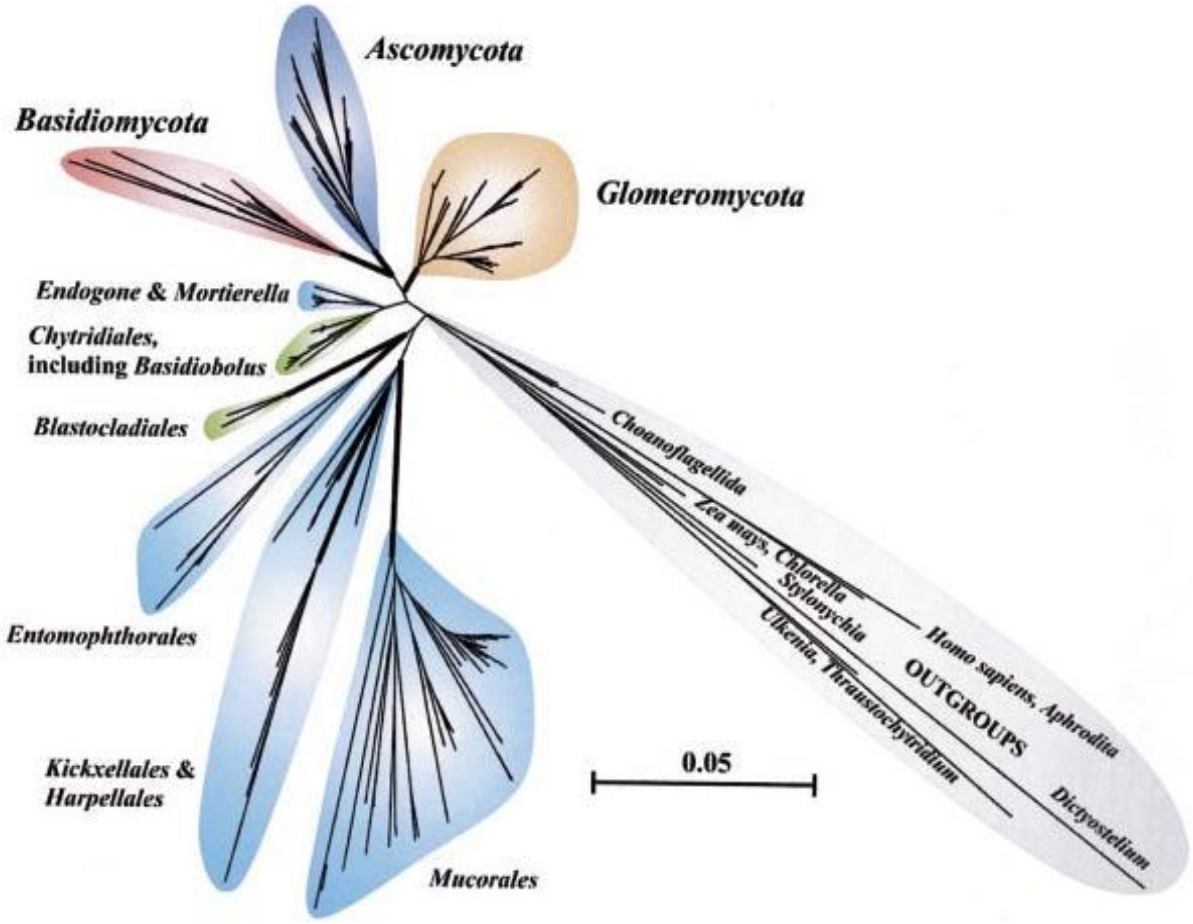

Figure 7 : Phylogénie des champignons mycorhiziens (Schüβler et *al.*, 2001).

Tableau 5 : Classification des Glomeromycota (Redecker & Schüßler, 2014)

Ordres	Familles	Nombre approximatif d'espèces
Glomerales	*Glomeraceae*	108
	Claroideoglomeraceae	6
Diversisporales	*Diversisporaceae*	10
	Gigasporaceae	53
	Acaulosporaceae	38
	Pacisporaceae	7
Archaeosporales	*Archaeosporaceae*	2
	Ambisporaceae	9
	Geosiphonaceae	1
Paraglomerales	*Paraglomeraceae*	3
Familia incertae sedis	*Entrophosporaceae*	3

2.3.4 Importance des champignons mycorhiziens à arbuscules

2.3.4.1 Bénéfices pour le champignon mycorhiziens à arbuscules

Les champignions mycorhiziens à arbuscules sont caractérisés par un transfert bi-directionnel de nutriments. Le champignon mycorhizien (hétérotophe) reçoit de la plante (autotrophe) des molécules carbonées issues de la photosynthèse. En échange, celui-ci lui procure les éléments minéraux (dont le phosphore et l'azote) et l'eau ainsi que d'autres nutriments puisés dans le sol (ammonium, certains oligoéléments tels que le cuivre et zinc) (figure 8). Les CMA dépendent entièrement de leurs partenaires pour le carbone et sont incapables de compléter leur cycle de vie en dehors de la symbiose.

Des études menées dans les années 1970 en utilisant le $^{14}CO_2$ marqué ont montré qu'une partie du ^{14}C marqué passe des racines des plantes mycorhizées aux structures fongiques puis aux hyphes extraracinaires **(Ho & Trappe, 1973; Bevege & Bowen, 1975; Hirrel & Gerdemann,**

1979). Le carbone alloué au partenaire fongique sous forme d'hexoses est utilisé dans la croissance intra et extraracinaire du mycélium et dans la respiration. Ce transfert bidirectionnel implique donc des processus complexes au niveau de l'interface symbiotique. La localisation de ces transports, la nature des molécules transférées et les mécanismes de transfert ne sont pas encore complètement définis.

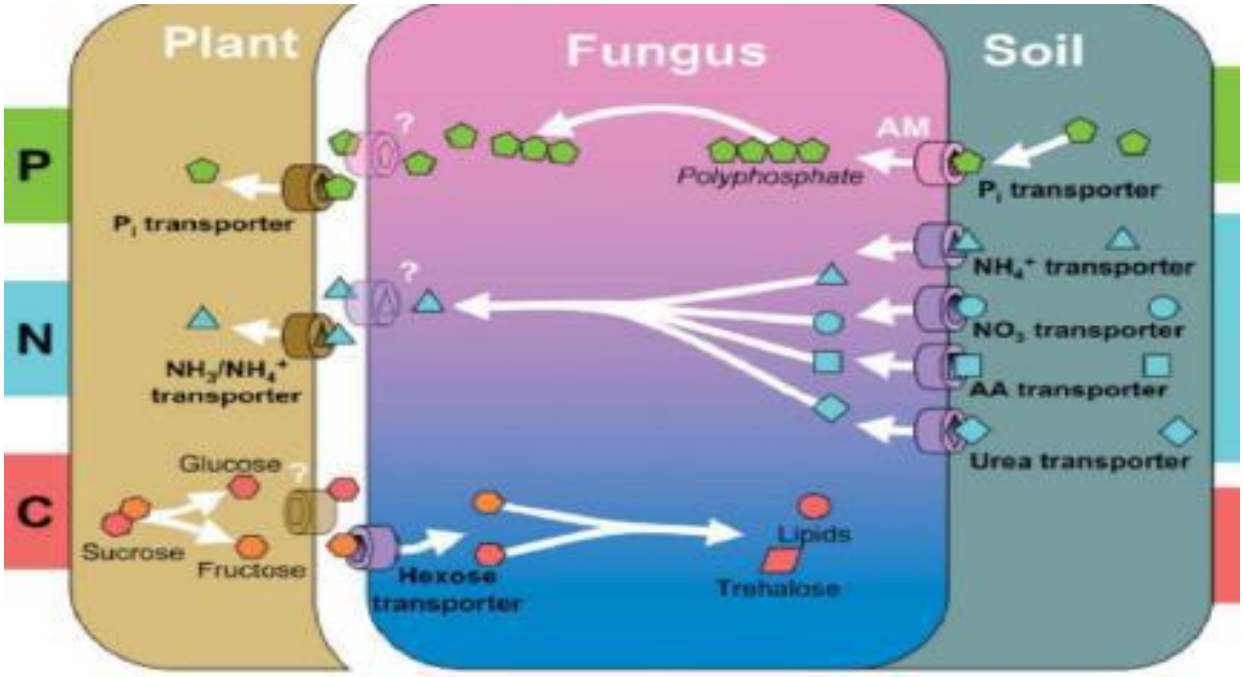

Figure 8 : Schéma récapitulant les principaux processus d'échanges de nutriments dans l'ensemble des symbioses mycorhiziennes (Bonfante & Genre, 2010).

Les interfaces entre les trois compartiments sol, champignon et racine sont représentées. Le P inorganique (Pi) et les formes d'N organique ou inorganique, tels que NH_4^+, NO_3^- et les acides aminés (AA), sont prélevés dans le sol par des transporteurs spécialisés localisés dans le mycélium extra-racinaire. NH_3/NH_4^+ et Pi après hydrolyse des groupements poly-phosphate (Poly-P) chez les champignons mycorhiziens arbusculaires sont importés au niveau de l'interface symbiotique au niveau des arbuscules chez les CMA vers les cellules végétales grâce à des transporteurs spécifiques. Les transporteurs d'hexoses importent le carbone (C) de la plante jusqu'au champignon.

L'établissement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules présente un coût énergétique pour l'hôte : il a été estimé que près de 20 % du carbone fixé par la plante durant la photosynthèse est alloué au partenaire fongique sous forme de divers hexoses (glucose, mannose, galactose, fructose, xylose, saccharose) **(Jakobsen & Rosendahl, 1990; Schüßler et *al.*, 2006; Helber et**

***al.*, 2011 ; Doidy et *al.*, 2012).** Une telle perte énergétique ne peut correspondre à un caractère sélectif adaptatif bénéfique que s'il est compensé par un apport très efficace en eau et en éléments minéraux apportés par le champignon **(Walder et *al.*, 2012).** Pour éviter qu'un des deux partenaires ne prenne l'avantage sur l'autre, une régulation fine des échanges et de l'invasion des tissus par le champignon est mise en place par la plante **(Kiers et *al.*, 2011; Balzergue et *al.*, 2011).**

2.3.4.2 Bénéfices pour la plante

a. Amélioration de la croissance et la nutrition des plantes

La stratégie naturelle de l'acquisition des éléments nutritifs par les plantes terrestres est la symbiose avec les champignons mycorhiziens à arbuscules. Le réseau hyphale externe des CMA joue un rôle important dans l'absorption des éléments nutritifs, surtout ceux de faible mobilité dans le sol comme le phosphore (P). L'amélioration de l'absorption des éléments nutritifs chez les plantes mycorhizées conduit, dans la plupart des cas, à une amélioration de la croissance végétative.

Le réseau hyphale agit comme une extension des racines de la plante hôte, améliorant son efficacité d'explorer le sol **(Gilroy & Jones, 2000).** La longueur des hyphes peut atteindre 111 $m.cm^{-3}$ de sol augmentant ainsi la surface d'échange entre la plante et son environnement. **(Miller et *al.*, 1995).**

La croissance des plantes est liée à la disponibilité du phosphore inorganique dans la rhizosphère de la plante **(Holford, 1997).** Le phosphore est un composant essentiel de l'adénosine triphosphate (ATP) des acides nucléiques et des phospholipides membranaires. Le phosphore est aussi inclus dans la phosphorylation des protéines qui est un mécanisme fondamental dans la modulation de l'activité des protéines. Compte tenu de la concentration très faible du phosphore dans la solution du sol qui dépasse rarement 8 µM **(Barber et *al.*, 1962),** les plantes ont souvent recours aux champignons mycorhiziens arbusculaires pour améliorer son absorption **(Smith et *al.*, 2000).** Les hyphes mycorhiziennes extra-racinaires absorbent le phosphore et le transporte rapidement aux structures mycorhiziennes dans les racines où il sera libéré dans l'espace péri-arbusculaire adjacent aux cellules corticales racinaires **(Smith & Smith, 1990).** La contribution des mycorhizes dans l'amélioration de l'absorption du phosphore a été démontrée par plusieurs auteurs **(Fraga-Beddiar & Le Tacon, 1990 ; Marschner & Dell, 1994; Smith et *al.*, 2011).**

L'azote est un élément indispensable à la vie de la plante. Il entre dans la synthèse de nombreuses molécules telles que les phospholipides, les coenzymes, les nucléotides et les acides aminés. Les CMA prélèvent l'azote sous sa forme ammonium **(López-Pedrosa et *al.*, 2006)** et acides aminés **(Cappellazzo et *al.*, 2008)** en utilisant des transporteurs spécifiques localisés au niveau des hyphes extra-racinaires. Il peut également accélérer la dégradation de la matière organique afin d'en augmenter la biodisponibilité pour les plantes **(Hodge et *al.*, 2001).** Une fois prélevé, l'azote est transporté jusque dans les hyphes intra-racinaires sous forme d'arginine **(Jin et *al.*, 2005).**

Le potassium est impliqué dans l'activation des enzymes et le transfert d'eau et des solutés dans les tissus conducteurs (xylème et phloème) des plantes ainsi que dans la régulation de l'ouverture des stomates **(Mahouachi et *al.*, 2006).**

Le calcium est un composant de la structure des membranes cellulaires et joue le rôle de médiateur secondaire dans la réponse des plantes à certains stress biotiques ou abiotiques **(Mc Ainsh & Pittman, 2009).**

Le magnésium est un composant essentiel des chlorophylles et joue le rôle de coenzymes ainsi qu'un rôle fondamental dans la photosynthèse et la stabilisation des nucléotides et des acides nucléiques.

Marschner et Dell (1994) et **Clark et Zeto (2000)** ont trouvé que les CMA peuvent améliorer la nutrition des plantes en potassium, calcium et magnésium. Toutefois, les travaux de **Lambert et *al.* (1979)** et de **Buttery et *al.* (1988)** ont montré des réponses contradictoires des plantes mycorhizées envers l'absorption de ces éléments.

b. Protection contre le stress biotique et abiotique

Bien que la fonction principale de la symbiose mycorhizienne est l'amélioration de la nutrition minérale des plantes, cette symbiose est connue aussi pour ses rôles dans l'amélioration de la tolérance des plantes envers les stress biotiques et abiotiques. Plusieurs études ont montré le rôle joué par les CMA dans la protection des plantes sous les stress abiotiques tels que la salinité **(Giri et *al.*, 2008),** la température **(Abdel Latef & Chaoxing, 2011),** le calcaire **(Labidi et *al.*,**

2011), la sècheresse **(Ruiz-Sánchez et *al.*, 2010)** et le compactage du sol **(Miransari et *al.*, 2008).** Ils sont aussi impliqués dans l'atténuation des effets néfastes des polluants tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques **(Verdin et *al.*, 2006; Debiane et *al.*, 2008 et 2009)**, les fongicides **(Campagnac et *al.*, 2010)** et les éléments traces métalliques **(Firmin et *al.*, 2015).** De même, les CMA interviennent dans l'amélioration de la résistance à certaines maladies cryptogamiques **(Dalpé, 2005).**

c. Biostabilisation du sol

Les hyphes des champignons mycorhiziens à arbuscules étant présents en quantité importante dans les sols, **(Miller et *al.*, 1995).** Ils possèdent la propriété d'agir sur la macroagrégation des constituants du sol et donc sur sa stabilité **(Tisdall, 1991).** En effet, ces hyphes excrètent une glycoprotéine, la glomaline, permettant l'agglomération des microagrégats d'un diamètre inférieur à 250 µm pour former des macroagrégats stables supérieur à 250 µm (**Tisdall, 1994 ; Wright & Upadhyaya, 1998)**. La concentration de la glomaline dans les sols dépend de la plante hôte et du champignon associé **(Rilling et *al.*, 2002).** La stabilité du sol ainsi produite permet de lutter contre l'érosion, la perte de nutriments et la matière organique par lixiviation, qui sont à l'origine d'une baisse de productivité en agriculture **(Schreiner & Bethlenfalvay, 1995).**

3 Impact de l'agriculture moderne sur les mycorhizes

L'intensification de l'agriculture moderne s'est généralement réalisée au détriment des mycorhizes **(Van der Gast et *al.*, 2011).**Les pratiques culturales favorisées dans l'agriculture intensive moderne ont eu des incidences directes et indirectes sur la formation des mycorhizes en endommageant les structures des CMA et en créant des conditions plus ou moins favorables pour leur croissance et leur reproduction **(Willis et *al.*, 2013).** La fertilisation, le travail du sol, les rotations de cultures, l'emploi de pesticides et la sélection génétique des nouveaux cultivars sont autant de pratiques qui ont eu des impacts néfastes sur la formation des mycorhizes.

3.1 La fertilisation

Pour augmenter la croissance et le rendement des cultures, les agriculteurs pratiquant une agriculture conventionnelle ont souvent recours aux engrais minéraux phosphatés. L'apport de ces engrais augmente instantanément l'offre de phosphore disponible aux plantes. Lorsque la concentration de phosphore biodisponible est supérieure au besoin de la plante, la dépendance de celles-ci aux mycorhizes sur le plan nutritionnel est considérablement réduite. Ainsi, dans les sols fortement concentrés en phosphore, il est montré que la colonisation des racines des plantes est réduite, voire inhibée **(Grant et *al.*, 2005; Hijri et *al.*, 2006).** L'interaction entre P et N affectent différemment la germination des spores, la croissance des racines et la longueur des racines colonisées **(Bressan, 2001)**

Cependant les engrais de ferme comme le fumier et le compost qui libèrent plus lentement les éléments nutritifs ne semblent pas avoir les mêmes impacts négatifs sur les mycorhizes. Au contraire, lorsque ces engrais ne sont pas surutilisés, ils permettent de stimuler la communauté des CMA **(Gosling et *al.*, 2006).**

3.2 Le travail du sol

Les formes conventionnelles d'agriculture emploient régulièrement des charrues pour travailler les sols. Les labours ont plusieurs utilités, entre autres celles de niveler les terres, de contrôler les mauvaises herbes et d'incorporer les engrais **(Chifflot, 2008).** Le labour affecte toutefois radicalement le potentiel mychorizogène du sol en détruisant le réseau mycélien des champignons et en enfouissant en profondeur les propagules. Ces perturbations physiques réduisent l'abondance des CMA de la couche supérieure du sol, là où se trouvent majoritairement les racines des plantes hôtes **(Oehl et *al.*, 2005).**

3.3 Les rotations de cultures

Les systèmes agricoles conventionnels, principalement basés sur la monoculture répétant année après année la culture d'une même plante, mènent à la sélection d'un nombre réduit d'espèces de CMA **(Burrows & Pfleger, 2002).** La densité des spores et des hyphes de CMA et leur capacité à coloniser les racines sont plus importantes dans des sols avec des plantes formant une symbiose

avec les CMA par rapport à des sols nus ou avec des plantes non mycorhiziennes **(Jansa et *al.* ,2002)**

Johnson (1992) avance que la monoculture ne sélectionne que des espèces peu ou pas avantageuses pour la culture. Selon lui, cela expliquerait en partie la chute des niveaux de production agricole, Il est reconnu que les rotations de culture permettent de maintenir une certaine biodiversité des CMA. Toutefois, les plantes agricoles n'ont pas toute la même dépendance aux mycorhizes et leur choix pour les rotations influencera le potentiel mycorhizogène du sol.

3.4 Les pesticides

L'intensification de l'agriculture s'est accompagnée de l'usage de nombreux pesticides. L'impact de ces produits sur les mycorhizes est souvent complexe et difficile à mesurer **(Gosling et *al.*, 2006)**. Leurs effets dépendent du type de produit, de la dose et de leur temps d'action. Plusieurs pesticides, en particulier les fongicides, peuvent avoir un impact direct sur la colonisation et la sporulation des CMA et même aboutir à leur disparition **(Fortin et *al.*, 2008).** Les fongicides servants à enrober les semences sont probablement les plus dommageables pour les mycorhizes **(Plenchette et *al.*, 2005).**

Chapitre II
Matériel et méthodes

1. Situation géographique du site expérimental

L'expérience a été lancée sur un champ agricole privé se situant dans la localité de Dréan, commune de la wilaya d'El-Tarf, distant de 24 Km de Annaba, de coordonnées géographiques latitude 36° 41' 00''Nord et longitude 7° 45' 00''Est (figure 9).

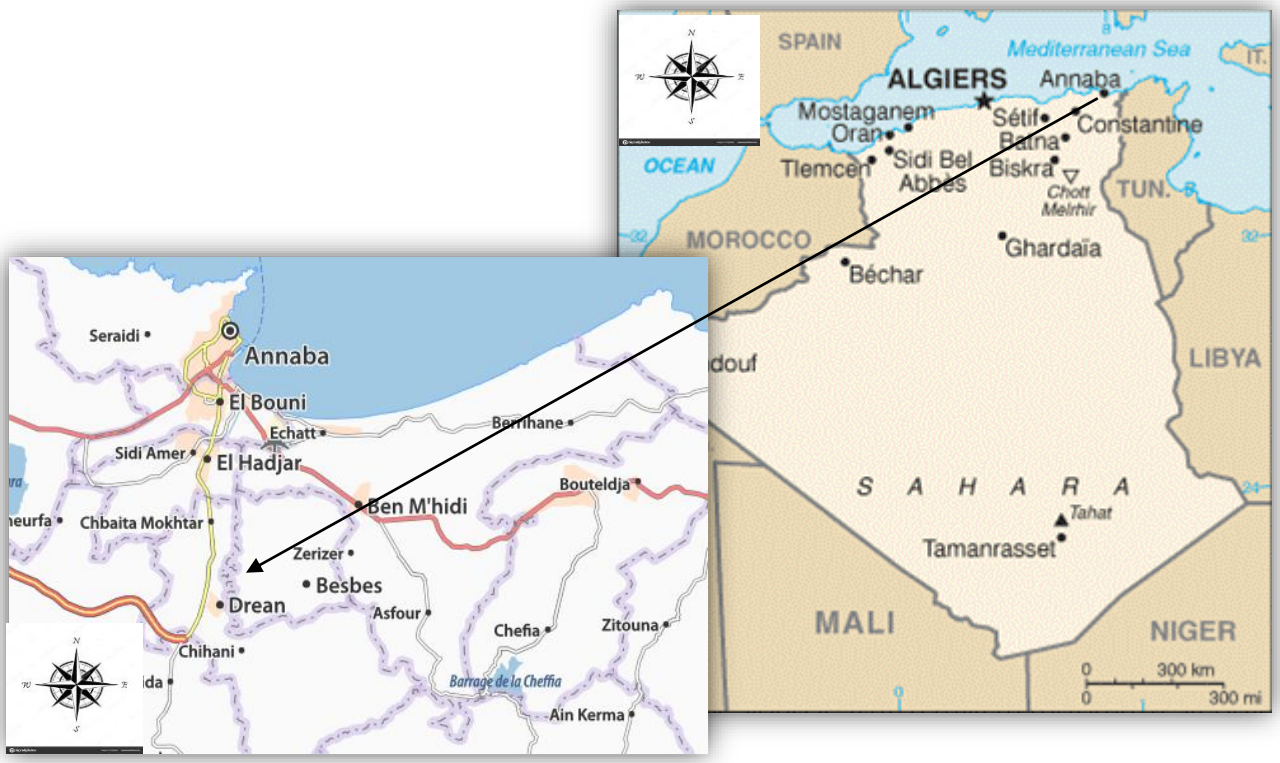

Figure 9 : Localisation du site expérimental **(Google Earth)**

2. Climat

La région de Dréan est soumise à un climat de type méditerranéen caractérisé par une alternance d'une saison humide avec un été chaud et sec **(Emberger, 1971)**. Les données climatiques correspondant à la période de notre travail nous ont été aimablement fournies par la station d'observation météorologique de Annaba-Les Salines.

2.1. Température

Les données mensuelles de la région d'étude révèlent que les températures minimales varient entre 8 °C et 12 °C durant la période de plantation tandis que les maximales étaient entre 16 °C et 23 °C (figure 10).

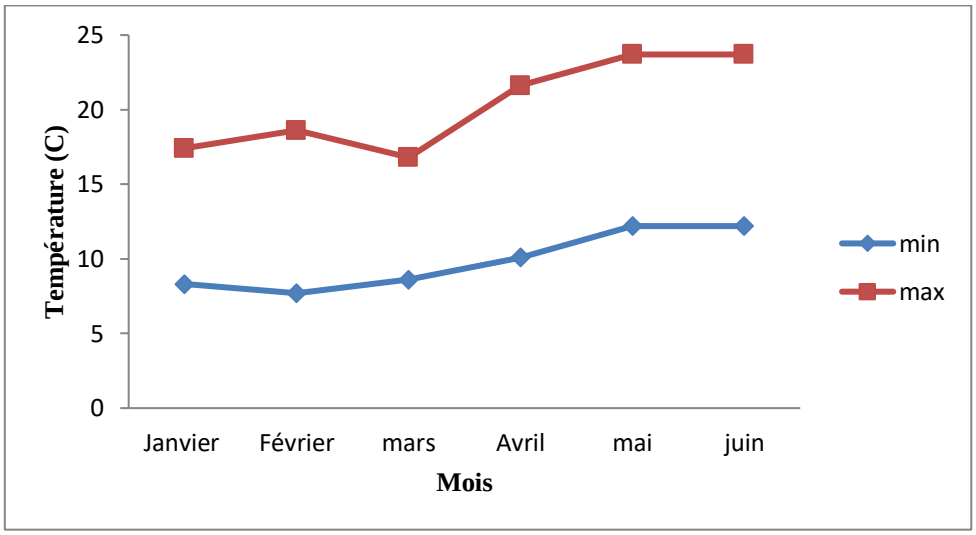

Figure 10. Moyennes des températures minimales et maximales enregistrées dans la région d'étude (janvier à juin 2014).

2.2. Pluviométrie

Les pluies en Algérie sont d'origine orographique **(Seltzer, 1946),** le gradient altitudinal de la température va donc fortement conditionner les précipitations dans cette région.

Le mois le plus arrosé durant la période de plantation a été le mois février avec 149 mm avec une décroissance remarquable de mars jusqu'à mai (figure 11).

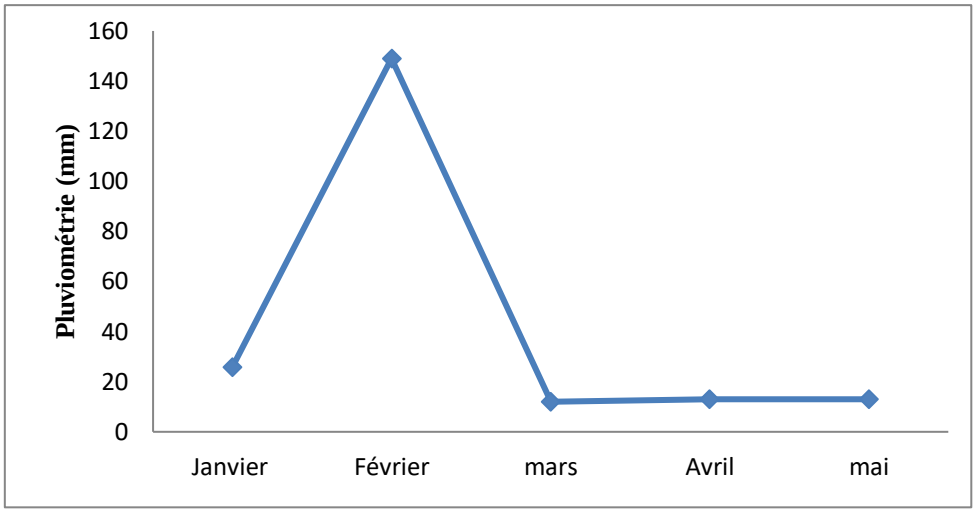

Figure 11. Moyennes mensuelles des précipitations enregistrées au niveau de la région de d'étude (janvier à juin 2014).

3. Matériel végétal

L'étude a été menée sur une variété de pommes de terre : *Spunta* originaire de Hollande, à croissance rapide donnant des tubercules à gros calibre. Les caractéristiques de cette variété sont présentées dans l'Annexe 1

4. Matériel fongique

Le matériel fongique utilisé est un inoculum mycorhizien de commerce Symbivit, produit par une société française spécialisée dans le développement et la distribution de produits mycorhizogènes. Sumbivit est un produit présenté sous forme de granulés à base de champignons mycorhizogènes, il contient des propagules de six (6) espèces différentes de champignons mycorhiziens, appartenant au genre *Glomus*.

5. Dispositif expérimental et application des traitements

La plantation a eu lieu le 13 janvier 2014 et la récolte s'est effectuée le 13 juin 2014.Le dispositif en bloc aléatoire complet a été utilisé. Il comporte trois (3) blocs correspondant au nombre de

répétition, chaque bloc contient tous les traitements ; la répartition des traitements au sein d'un même bloc s'est faite d'une manière aléatoire par tirage au sort.

On trouve dans un bloc six parcelles associées par paire, chacune est constituée de quatre rangs distants de 75 cm et six rangées avec un espacement de 20 cm entre les plants. Les traitements qui ont été appliqués sont :

- inoculés avec Symbivit et non (témoins) sur des parcelles ou aucun apport chimique n'a été effectué (0% NPK)

- inoculé et non sur des parcelles ayant été enrichies en doses d'engrais localisées (50 % NPK) correspondant à 30 g/plant

- inoculé et non avec 100% (NPK), soit 60 g/plant.

Une bordure de 1 m entourant chaque parcelle a été prévue pour palier à toute interférence.

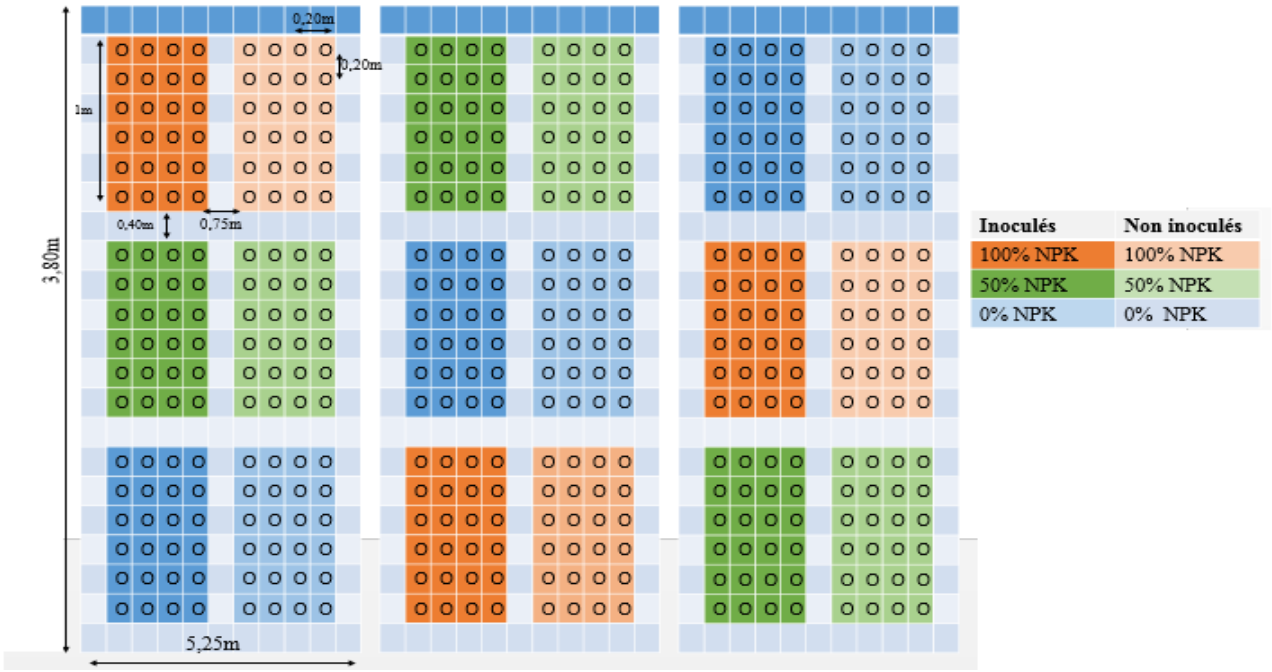

Figure 12 : Plan du dispositif expérimental

6. Conduite culturale

6.1. Préparation du sol

A l'aide d'une charrue à soc, un labourage a été effectué sur le sol pour la préparation des lits de plantation, des sillons d'une dizaine de centimètre ont été creusés.

Figure 13. Préparation des lits de plantation

6.2. Plantation

La plantation a été réalisée manuellement le 13 janvier 2014, les tubercules ont été déposés dans les sillons préparés auparavant.

Figure 14. Plantation de la pomme de terre.

6.3. Système d'irrigation

Une irrigation bien conduite doit satisfaire les besoins de la culture en quantité et au moment voulu, pour cela le système d'irrigation au goutte-à-goutte a été utilisé dans cette étude à raison de deux applications par semaine.

6.4. Entretien phytosanitaire de la culture

Au besoin, des applications de pesticides ont été faites pour le contrôle et la lutte contre les mauvaises herbes, les insectes et les maladies cryptogamiques. Les traitements phytosanitaires appliqués dans les expériences (tableau 6).

Tableau 6. Les traitements phytosanitaires appliqués

Pesticides	**Actions**	**Périodes** **(en jours après la plantation)**
Fongicides	Ridomil (4% Métalaxyl - 64% Mancozèbe)	37 – 45 – 70 - 89
Herbicides	Sencor (métribuzine 75 %)	13
Insecticides	Mageos (15% d'alphaméthrine)	44

7. Paramètres mesurés

Après trois mois de culture en phase végétative, cinq plantes ont été sélectionnées aléatoirement dans chaque parcelle afin d'effectuer les mesures liées à la croissance des plants de pomme de terre.

Après la récolte, le rendement par traitement, les poids frais et sec de la partie aérienne et racinaire et la hauteur des tiges des échantillons choisis au hasard ont été déterminés. Ces observations ont porté sur un échantillon de cinq plants choisis aléatoirement dans chaque parcelle élémentaire.

7.1. Paramètres liés à la croissance végétative

7.1.1. La hauteur des tiges

Afin de suivre la croissance des plants, nous avons mesuré la longueur des tiges principales à l'aide d'un mètre-ruban

7.1.2. Poids frais et sec des feuilles / racines

Apres avoir prélevé 5 échantillons frais, nous avons pesé la matière fraîche (MF) puis mis à l'étuve à 105 °C pendant 72 h, elle est ensuite repesés pour déterminer le poids de matière sèche (MS).

7.1.3. Teneurs en chlorophylles

La mesure de la concentration de la chlorophylle a été réalisée avec un SPAD-mètre qui est un appareil portatif largement utilisé pour la mesure rapide, précise et non-destructive des concentrations de chlorophylles des feuilles. Les mesures avec le SPAD-502 produisent des valeurs de SPAD relatives qui sont proportionnelles à la quantité de chlorophylles présentent dans la feuille.

7.1.4. Dosage des sucres totaux dans les feuilles

La teneur des feuilles en sucres totaux est déterminée selon la méthode **Dubois et *al.*, (1956)** dont le principe repose sur la réaction suivante : l'acide sulfurique concentré provoque à chaud le départ de plusieurs molécules d'eau à partir des oses. Cette déshydratation s'accompagne par la formation d'un hydroxy-méthylfurfural (HMF) dans le cas d'hexose et d'un furfural dans le cas d'un pentose. Ces composés se condensent avec le phénol pour donner des complexes colorés (jaune-orangé). L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration des oses. La densité optique est mesurée à 488 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

7.2. Paramètres liés au rendement

7.2.1. Nombre de tubercules par plant

Après l'arrachage des plantes, nous avons choisi cinq plantes représentatives au niveau de chaque parcelle élémentaire, puis on a compté le nombre de tubercules / plant.

7.2.2. Rendement par catégories de poids

Selon le poids des tubercules, nous avons déterminé trois catégories de tubercules de pomme de terre: les tubercules à petit, moyen et grand calibre.

7.2.3. Rendement par plant

Nous avons pris cinq plants pour chaque parcelle élémentaire, le poids des tubercules de chaque plant a été effectué ainsi que la moyenne du rendement par plant.

7.2.4 Rendement total / ha

Après la récolte au niveau de chaque parcelle, le rendement de chaque traitement a été calculé. Le rendement est estimé en rapportant la production de la zone de récolte à l'hectare dans chaque parcelle élémentaire.

7.3. Paramètres liés à la qualité des tubercules

7.3.1. Dosage de l'amidon

Le dosage de l'amidon est réalisé sur les tubercules séchés à l'étuve pendant 7 jours à 70 °C. Le protocole d'extraction est réalisé comme suit : l'amidon est extrait selon la méthode décrite par **Hedge & Hofreiter (1962).** Elle consiste à broyer les tubercules à froid dans un mortier en porcelaine dans de l'éthanol 80%. Le broyat liquide ainsi obtenu est centrifugé à 30000 g

pendant 10 min à 2 °C. Le surnageant est rejeté, le culot est recueilli, il est solubilisé dans une solution d'acide perchlorique 30%. Le mélange est incubé pendant 8 heures pour solubiliser l'amidon. En effet, c'est l'amylose qui est dosée sur l'extrait et qui interagit avec l'iode (I_2) pour donner une coloration bleue. À 0.5 ml de la solution d'amidon, on ajoute 0.5 ml du réactif d'iode et 1 ml d'acide perchlorique 30%. L'absorbance est mesurée au spectrophotomètre (Type Camspec M330 UV / Vis) à une longueur d'onde de 620 nm. Les résultats sont exprimés en mg / g de matière fraiche.

Préparation du réactif d'iode : 0.06 gr d'iode dissous dans 10 ml d'eau distillée en présence de 0.6 gr de KI, cette solution représente une solution qui sera conservée au réfrigérateur. Le réactif est préparé en mélangeant à chaque fois 0.1 ml de la solution stockée avec 9.9 ml de HCl 0.05 M.

7.3.2. Dosage des protéines

La teneur en protéines des tubercules de pomme de terre a été estimée après la récolte en utilisant la technique de **Lowry et *al.* (1951),** les lectures d'absorbance ont été prises à 660 nm.

7.3.3. Dosage du phosphore

Cette analyse a été effectuée au laboratoire selon la méthode colorimétrique où l'échantillon à analyser est séché dans l'étuve à 70°C pendant 48 à 72 heures, puis broyé. Après refroidissement progressif, on place 0,5 g de matière sèche dans une capsule en porcelaine mise à son tour dans un four à moufle dont la température est augmentée progressivement pour atteindre 500 °C. Après refroidissement, les cendres récupérées sont soumises à une attaque acide par l'acide chlorhydrique à 2N. Par la suite, les échantillons préparés sont soumis à une analyse colorimétrique.

7.3.4. Dosage de l'azote

Le dosage de l'azote a été effectué par la méthode Kjeldhal qui consiste en une minéralisation de la matière organique à chaud par de l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) en présence de

catalyseurs ($CuSO_4$ et K_2SO_4). Après une distillation dans la première solution d'acide borique 4 %, nous dosons l'azote total après une titration avec de l'acide sulfurique (H_2SO_4) à 0,05 N.

7.3.5. Dosage du potassium

L'extraction du potassium des tubercules se fait par la méthode de minéralisation. 200 mg de la poudre végétale sont introduites dans un ballon dans lequel est ajouté 10 ml d'un mélange bi-acide (HNO_3 – $HClO_4$) avec un rapport de 10/4. La minéralisation est complète quand le contenu du ballon est décoloré. Le liquide est récupéré dans des tubes à essais après avoir rincé le ballon avec de l'eau distillée chaude et acidifiée par l'HCl. Le dosage se fait par photométrie à flamme.

7.4. Paramètres liés aux mycorhizes

7.4.1. Coloration des fragments de racines

Pour la détection de la colonisation des racines par les CMA, un traitement et une coloration préalable des racines sont nécessaires. La méthode de **Philips et Hayman (1970)** a été utilisée, elle consiste à traiter les racines préalablement lavées à la potasse (KOH) à 10 % pour vider les cellules, puis les colorer au bleu Trypan (0,03 %) à chaud pendant une demi-heure de temps (figure 15).

Figure 15. Schéma de coloration des échantillons racinaires

Le taux de la colonisation mycorhizienne a été estimé selon la méthode de **Trouvelot et *al.* (1986)**. Une trentaine de fragments de racines d'environ 1 cm de longueur prélevés de chaque échantillon coloré ont été disposés parallèlement entre lame et lamelle, à raison d'une quinzaine de fragments par lame, dans une goutte de glycérol. 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 selon un barème de classe et d'estimer ainsi le degré de la colonisation mycorhizienne de chaque fragment au moyen de six classes notées de 0 à 5 (figure 13) et la richesse arbusculaire par quatre classes notées A0, A1, A2 et A3 (figure16) .

Cette méthode calcule cinq paramètres de la colonisation :

F % : Fréquence de 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 colonisation du cortex racinaire (proportion du cortex colonisé estimée par rapport au système radiculaire entier et exprimée en %). Elle reflète l'importance de la colonisation du système racinaire.

m % : Intensité de 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 radiculaire entier (proportion du système racinaire renfermant des arbuscules, exprimée en %).

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

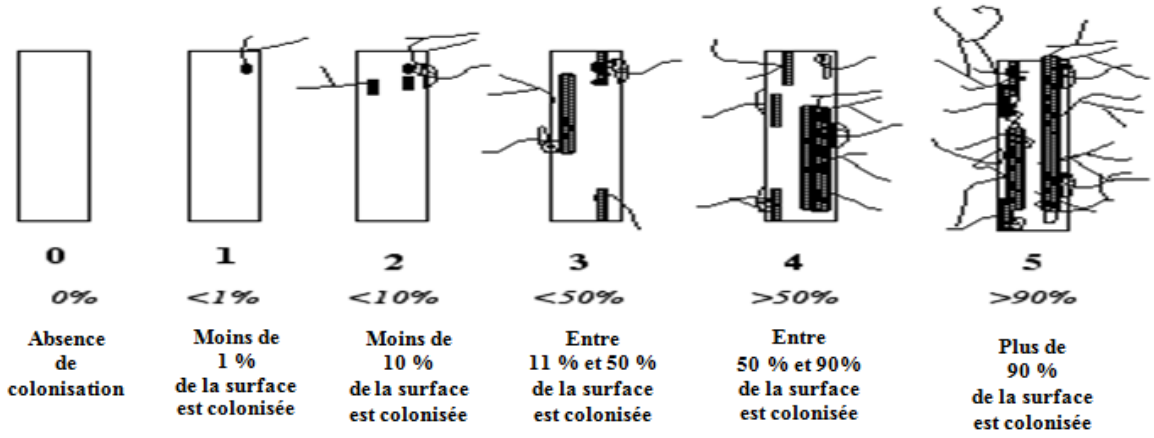

Figure 16. Echelle d'intensité de colonisation du cortex racinaire

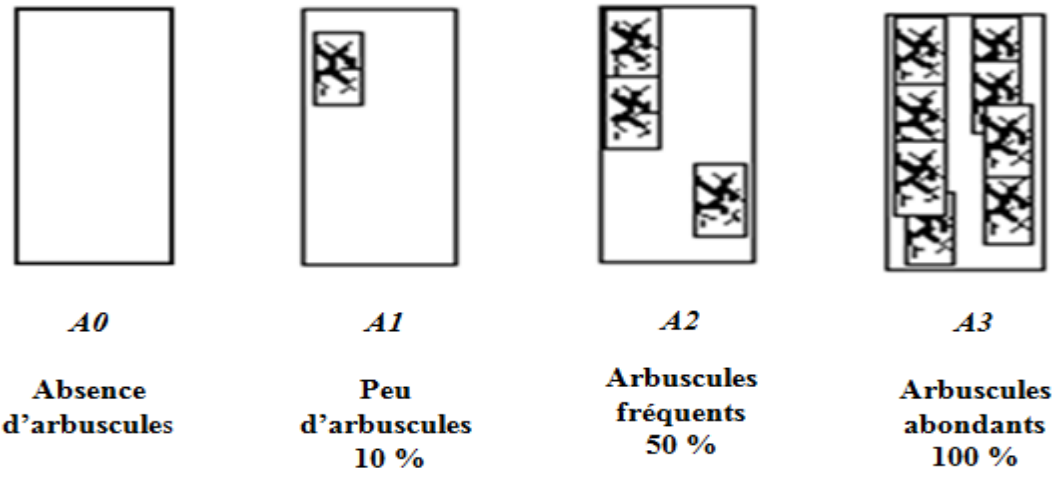

Figure 17. Echelle d'évaluation de la présence des arbuscules

7.4.2. Mise en évidence du potentiel mycorhizogène du sol

Le potentiel mycorhizogène traduit la richesse du sol en propagules (spores, mycéliums, fragments de racines colonisés) aptes à générer une mycorhization. Une partie des sols prélevés ont servi à déterminer ce potentiel en utilisant la technique du nombre le plus probable (Most Probable Number : MPN **(Alexander, 1965).** Cette technique adoptée aux CMA est basée sur l'utilisation d'une série de dilutions successives de sol.

7.4.2.1. Préparation du dispositif

Le sol recueilli a été mélangé avec le même sol stérilisé pour faire cinq dilutions en série (1/10) et cinq répétitions par niveau de dilution dans des pots de 50 ml ; les témoins contiennent du sol stérile. Les dilutions ont été préparées comme suit :

- Dilution 10^{-1}: 30 g de sol non stérile + 270 g de sol stérile = 300 g (1).

A partir de ces 300 g de mélange, 250 g vont être répartis dans les cinq (5) répétitions à raison de 50 g par pot. Des 50 g restants, on prélève 30 g qui serviront d'inoculum pour la dilution qui suivra (10^{-2}).

- Dilution 10^{-2}: 30 g (1) + 270 g de sol stérile = 300 g (2)
- Dilution 10^{-3}: 30 g (2) + 270 g de sol stérile = 300 g (3)
- Dilution 10^{-4}: 30 g (3) + 270 g de sol stérile = 300 g (4)
- Dilution 10^{-5}: 30 g (4) + 270 g de sol stérile = 300 g (5)

Une graine de trèfle pré-germée axéniquement a été plantée dans chaque sac. Elle a été préalablement désinfectée par immersion dans de l'eau oxygénée pendant 2 minutes puis rincée abondamment. Les plantes ont été cultivées en serre (température moyenne de 18-22 °C, humidité relative de 60-70%, lumière du jour de 14 heures) et arrosées avec de l'eau distillée tous les 3 jours.

Après six semaines, le système racinaire entier par plante a été récolté et coloré selon la méthode de **Philips & Hayman (1970).** Des racines mycorhizées ou non mycorhizées ont été enregistrées pour les 5 répétitions à chaque niveau de dilution et le MPN des propagules par 50 g de sol a été estimé selon **Cochran (1950).** La lecture de la table se fait en définissant la dernière dilution (P1) pour laquelle la mycorhization est observée dans les cinq répétitions. Si ce cas ne se présente pas, la dernière dilution dans laquelle il y a le maximum de plants mycorhizés est prise. Le nombre de racines colonisés dans les deux dilutions successives représente donc le P2 et le P3. Les trois valeurs P1, P2, P3 sont reportées sur la table de **Cochran** (Annexe 2) pour en déduire un nombre qui servira à la détermination du MPN pour 50 g de sol initial. Le nombre de propagules par kilogramme de sol est alors calculé en multipliant ce nombre par le facteur de dilution de P2.

7.4.2.2. Coloration et observation du système racinaire

Après sixsemaines, le système racinaire entier est récolté et coloré selon la méthode de **Philips et Hayman (1970)** précédemment décrite, mais étant donné l'âge jeune des plantules, 15 minutes au KOH et 10 minutes au bleu de Trypan suffisent pour mettre en évidence la mycorhization. Le système racinaire de chaque plant, mis dans une boîte de Pétri est observé à la loupe binoculaire. La plante est jugée mycorhizée lorsque le système racinaire présente au moins un point de colonisation (pénétration d'un hyphe dans la racine). Une notation est mentionnée, soit 1 ou 0 selon qu'il y a ou n'y a pas d'infection mycorhizienne visible.

7.4.2.3. Calcul du pouvoir mycorhizogène

Cette estimation se fait par l'intermédiaire de la table d'Alexender (1965) à partir des racines mycorhizées ou non obtenues pour chacun des niveaux de dilutions et pour les 5 répétitions. La lecture de la table se fait en définissant la dilution la moins concentrée (P_1) pour laquelle la mycorhization est observée dans les cinq répétitions et si ce cas ne se présente pas, on prend celle où on trouve le maximum de plants mycorhizés. Le nombre de plants colonisés dans les deux dilutions successives représente P_2 et P_3. Les trois valeurs P_1, P_2 et P_3 seront reportées sur la table pour en déduire un nombre qui servira à la détermination du MPN pour 50 g de sol initial, en multipliant ce nombre par le facteur de dilution de P_2, le nombre de propagules par kilogramme de sol est alors calculé.

7.5. Analyses physico-chmiques du sol

Un prélèvement d'environ un (1) kg de sol a été effectué avant le labours de la terre pour déterminer les caractéristiques physico-chimiques du substrat de culture, après la récolte on a prélevé la même quantité de chaque parcelle afin d'étudier l'effet des différents traitements sur le substrat. Les échantillons de sol sont séchés à l'air, tamisés à 2 mm et conservés.

Les paramètres mesurés sont :

- pH_{eau} , pH_{KCl} et la conductivité électrique (CE) sur une suspension sol-eau (1/5)

- Granulométrie déterminée par tamisage humide **(AFNOR, 1990)**

-Teneur en matière organique dans le sol, estimée à partir du taux de carbone organique (C) qui peut être déterminé par titrage par la méthode Anne modifiée **(Guy, 1978)**

-Teneurs en calcaire total sont déterminées par calcimétrie volumétrique **(Dermech *et al.*,1982)** dont le principe consiste à décomposer les carbonates de calcium sous l'action d'un acide fort (HCl) dilué au 1/3 et à mesurer le volume du CO_2 dégagé.

-Teneur en calcaire actif déterminée par la méthode Drouineau **(Mathieu & Pieltain, 2003).** Il est dosé en se basant sur la propriété du calcium de se combiner aux oxalates pour donner l'oxalate de calcium insoluble. L'excès de solution d'oxalate est ensuite dosé par une solution de permanganate de potassium en milieu sulfurique.

-Azote total (N%) déterminé par la méthode de Keldjahl décrite par **Bonneau et Souchier (1994)**. Elle consiste à une minéralisation de la matière organique azotée par l'acide sulfurique concentré à chaud. L'azote transformé en ammoniac est fixé par l'acide sulfurique à l'état de sulfate d'ammonium

- Dosage des cations échangeables sur extrait à l'acétate d'ammonium se fait par un auto-analyseur colorimétrique (SKALAR)

7.6. Analyse statistique

Pour les paramètres mesurés dans les expériences en champ, une analyse de variance (ANOVA) avec modèle linéaire général (GLM) a été utilisée pour déterminer l'effet des facteurs. Pour les niveaux de colonisation racinaire dans l'étude de la biodiversité, une ANOVA à un seul facteur a été effectuée.

Les comparaisons entre les moyennes ont été effectuées avec le test Tukey Honestly Significant Difference (HSD) au niveau de signification $P < 0,05$.

Le logiciel utilisé pour les analyses statistiques des résultats est le Minitab16.

Chapitre III
Résultats et discussion

1. Paramètres physiques et physico-chimiques des sols

Il était important de déterminer les paramètres physiques et physico-chimiques du sol avant et après la culture de la pomme de terre afin d'évaluer l'impact de mycorhization combinée avec les différents traitements d'NPK sur le sol.

1.1 Propriétés du sol avant la plantation

Les analyses de sols effectuées sur la parcelle n'ayant pas reçu de fertilisants chimiques (P_0) ont permis de donner les résultats suivants (tableau 7).

La texture du sol de la parcelle expérimentale P_0 est argileuse, c'est une terre lourde, difficile à travailler que ce soit en périodes sèches ou humides.

Le pH du sol est de 7.1, ce type de pH est neutre et donc très compatible avec l'activité des microorganismes du sol ainsi que la croissance et le développement racinaire des plantes.

La teneur en matières organiques du sol est légèrement inférieure à 1%, ceci peut être considéré comme quantité faible et par conséquent le sol est pauvre.

Avec une conductivité électrique (CE) de 70 µS/cm, le sol est pauvre en sels solubles et par conséquent n'est pas considéré comme salé.

La capacité d'échange cationique (CEC) est de 42.63 meq/100g de sol, c'est une valeur relativement élevée, elle est liée à la richesse du sol en argiles qui sont des particules fines capables de retenir une quantité importante de minéraux. Il faut noter tout de même, la quantité importante d'ions Ca^{++} (35.55 meq/100g de sol) qui domine les éléments au niveau des bases échangeables.

Dans ce sol, les quantités d'azote et de phosphore peuvent être considérées comme faibles.

1.2 Propriétés des sols après plantation.

La texture des sols des différentes parcelles expérimentales reste inchangeable après applications des fertilisants chimiques.

A 0% NPK, que ce soit pour les racines inoculées ou non, le pH reste invariable avec des valeurs autour de 7.1 (P_0 et P_1). Cependant, il a été remarqué qu'à mesure que le pH diminue (P_3, P_4, P_5 et P_6) lorsque la quantité de fertilisants augmente, l'acidité est plus importante à 100% NPK. Les pH des sols sont toujours compatibles avec l'activité biologique du sol.

Les teneurs en matières organiques des sols se situent autour de 1% dans pratiquement toutes les parcelles, ceci reste considéré comme quantité faible, même malgré l'apport de fertilisants chimiques.

Les valeurs de la conductivité électrique mesurées montrent une augmentation proportionnelle de salinité par rapport aux apports de NPK, elles sont légèrement plus importantes dans les sols non inoculés. D'une manière générale, elles ont plus que doublées par rapport à P_0, mais ces valeurs (1.99 µS/cm NI+50% NPK et 2.23 µS/cm 100% NPK) restent tout de même faibles et ne permettent pas de dire que les fertilisants ont provoqué une salinisation des sols des parcelles expérimentales.

La capacité d'échange cationique est restée pratiquement stable après l'apport des fertilisants chimiques et quelle que soit la nature des racines inoculés ou non avec des valeurs autour de 43 meq/100g de sol. Concernant les bases échangeables, l'ion Ca^{++}reste l'élément dominant par rapport aux autres avec des valeurs entre 35 et 36 meq/100g de sol.

Malgré les apports en fertilisants chimiques, les teneurs en azote et phosphore n'ont pas évolué énormément et restent faiblement supérieures à P_0.

En conclusion sur les résultats du suivi sur l'état d'évolution des propriétés des sols avant et après l'apport des fertilisants chimiques et la plantation, nous pouvons dire que les analyses effectuées sur les paramètres étudiés n'ont pas révélé des changements appréciables pouvant soutenir la thèse que les ajouts ont eu un impact important sur la qualité des sols (tableau 7).

Tableau 7: Paramètres physiques et physico-chimiques du sol avant et après la culture de pomme de terre

Parcelles / Paramètres	P0 Avant plantation	P1 I+0% NPK	P2 NI+0% NPK	P3 I+50% NPK	P4 NI+50% NPK	P5 I+ 100% NPK	P6 NI+100% NPK
pH_{eau}	7.1	7.2	7.1	6.88	6.74	6.29	6.32
CE (µS/cm)	70	85	87	192	199	184	223
M.O (%)	0.952	1.094	1.137	1.012	1.059	1.093	1.149
N (%)	0.062	0.069	0.066	0.083	0.078	0.087	0.075
P (ppm)	13.6	24	32.6	32	20.8	29.6	34.2
K^+ (meq/100g)	0.99	0.94	1.18	1.2	1.01	1.07	1.34
Ca^{++} (meq/100g)	35.55	37.43	36.79	36.28	37.67	37.25	35.91
Mg^{++} (meq/100g)	5.22	4.53	4.76	5.04	4.57	4.71	4.91
Na^+ (meq/100g)	0.87	0.36	0.78	0.71	0.46	0.62	0.72
CEC (meq/100g)	42.63	43.26	43.51	43.23	43.71	43.65	42.88
Argile (%)	44	44	44	44	44	44	44
Limons (%)	24	24	24	24	24	24	24
Sables (%)	28	28	28	28	28	28	28

1.3 Potentiel mycorhizogène du sol

Le nombre de propagules le plus probable (MPN : Most Probable Number) apte à générer une mycorhization dans le sol du champ a été calculé avant et après la culture (tableau 8). D'après les résultats le nombre était de 650 propagules/Kg avant le début de l'expérience.

Après la récolte le nombre a augmenté pour tous les traitements, avec un nombre maximum des propagules chez le traitement I+50% NPK 2200 propagule/kg de sol.

Tableau 8 : Pouvoir mycorhizogène des parcelles avant et après la culture de pomme de terre

Parcelles	MPN (nombre de propagules/Kg de sol)
Avant la récolte	650
Non inoculé+0% NPK	1840
Non inoculé+50% NPK	1560
Non inoculé+100% NPK	1600
Inoculé+0% NPK	1550
Inoculé+50% NPK	2200
Inoculé+100% NPK	1850

Nos résultats sont similaires à ceux d'**Azcón-Aguilar et *al.* (2003)** qui ont démontré que l'inoculation endomycorhizienne des racines de l'olivier augmente significativement le nombre de propagules endomycorhiziens infectieux dans le sol.

D'après **Plenchette et Perrin (1989)** et Plenchette **(2005),** la réponse des plantes à la mycorhization est non seulement fonction de l'espèce de champignon mycorhizien mais également de la mycotrophie de la plante hôte ce qui favorise une augmentation du potentiel infectieux mycorhizogène du sol. Dans le même contexte, ils ont mentionné que le potentiel infectieux mycorhizogène d'un sol caractérise non seulement la population de champignons endomycorhiziens présents dans le sol sous forme de spores, de mycélium et de morceaux de mycorhizes, mais aussi le fait que cette population est apte à former des mycorhizes dans les conditions du sol en question.

2. Effet de la mycorhization sur la croissance de plants de pomme de terre

L'expérience en plein champ et dans des conditions réelles avait pour objectif d'évaluer l'impact de la mycorhization par les CMA sur la culture de pomme de terre.

Les résultats ont montré que la mycorhization a amélioré les différents paramètres de croissances de plants, soit la longueur de la tige principale, la biomasse aérienne et racinaire, la teneur en chlorophylle et la teneur en sucre totaux.

2.1 Taux de mycorhization des racines des plants de pomme de terre

L'observation microscopique montre la présence de structures spécifiques de CMA (arbuscules, vésicules et hyphes intra-racinaires) dans les racines colorées des plants de pomme de terre prélevés des différentes parcelles quelles que soient les doses du fertilisant chimique et les traitements par l'inoculum (figure 18).

Cependant, l'inoculum a augmenté le taux de mycorhization des plants inoculés par rapport aux témoins, le traitement I+ 0% NPK a présenté la valeur maximale avec un pourcentage de 47%, le plus bas niveau de colonisation a été enregistré chez le traitement NI+100% NPK avec un taux de 20%. L'apport d'engrais chimique n'a pas eu d'effet négatif sur le taux de colonisation des plants inoculés, mais a abaissé le pourcentage de colonisation des témoins.

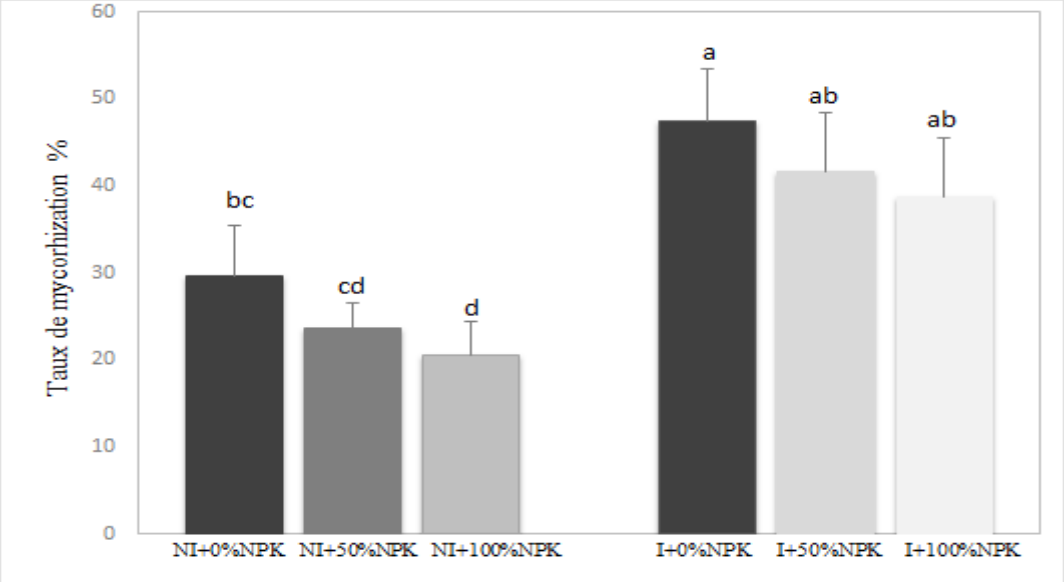

Figure 18 : Taux de colonisation par les CMA des racines de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans des niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p<0.05$).

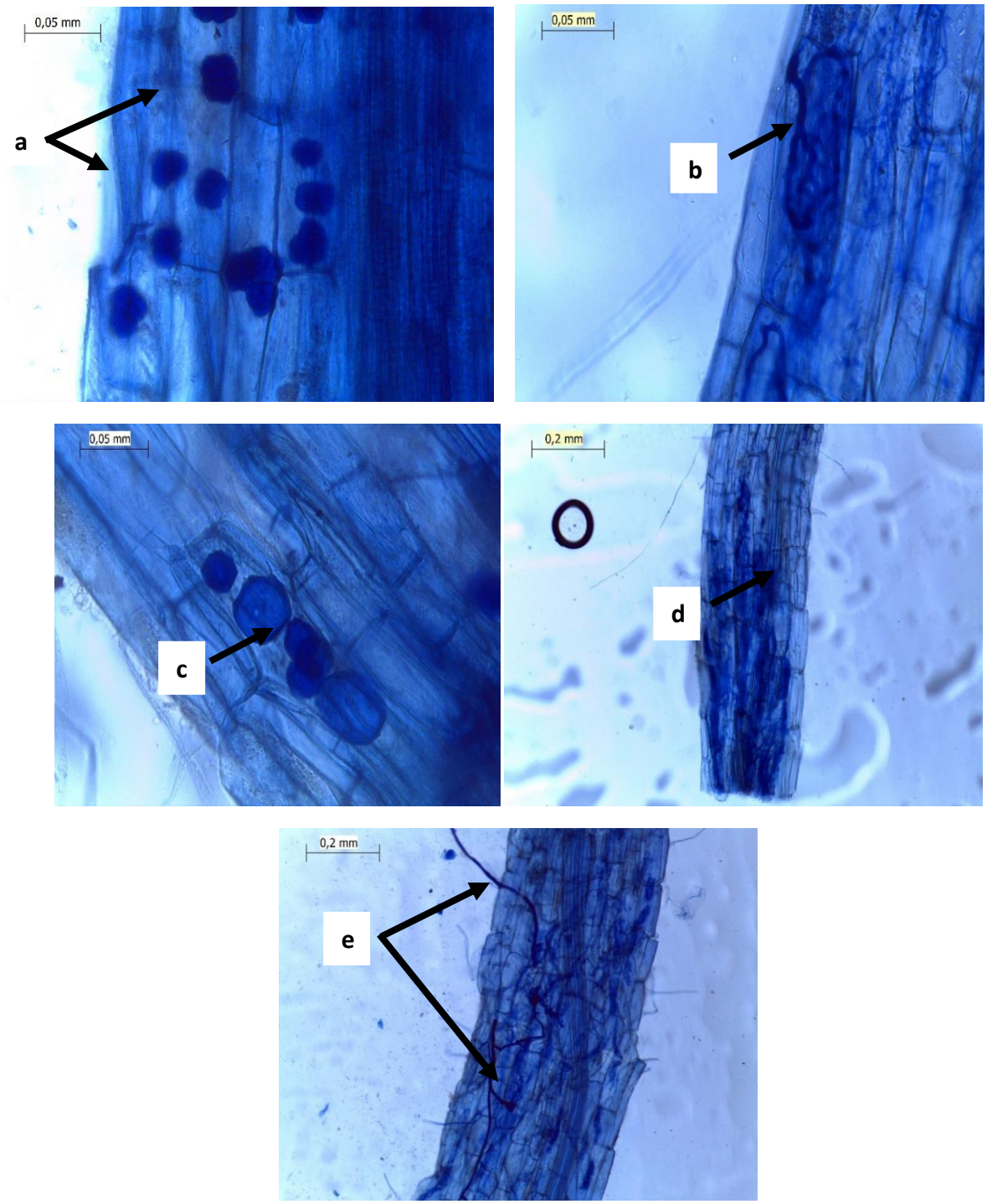

Figure 19 : Les manifestations de la colonisation desracines de pomme terre colorés par le bleu de trypan (a) : vésicules (b) mycélium intracellulaire (c) : spores (d) : arbuscule (e) : mycélium extracellulaire

2.2. Longueur de la tige principale

Après trois mois de culture, la longueur de la tige principale des plants de pomme de terre inoculés a nettement augmenté par rapport aux plants non inoculés et ceci avec les trois doses du fertilisant (0%, 50% et 100% de NPK). L'inoculum commercial associé à la moitié de la dose de NPK habituelle a donné le meilleur résultat avec un gain de 55,59%. Pour les traitements I+0%NPK et I+100%NPK, nous avons enregistré respectivement un gain de 17,32% et 29,41% (tableau 9).

2.3. Biomasses aériennes et racinaires

L'inoculation mycorhizienne a également marqué un effet important sur la biomasse aérienne fraiche et sèche des plants de pomme de terre, une augmentation significative ($p<0.05$) a été observée chez les plants inoculés par rapport aux témoins, soit respectivement de 17.88%, 67.74% et 59.77% pour les traitements 0%, 50% et 100% de NPK.

Les parties racinaires des plantes de pomme de terre cultivées en présence de mycorhizes et de fertilisants chimiques ont également connu un croissement significatif de leur biomasse fraîche et sèche, notamment pour les traitements pour les doses 50% et 100 % de NPK.

D'une manière générale, l'apport supplémentaire en champignons mycorhizogènes à arbuscules a optimisé la croissance en phase végétative. Les traitements combinant l'inoculum et 50% et 100% de la dose de NPK habituelle, ont donné de meilleurs résultats. Ces résultats sont confirmés par des études sur la tomate **(Ziane, 2018)** sur la pastèque **(Hamza, 2014)** sur la laitue **(Baslam et *al.*, 2013)** sur le poivron **(Kaya et *al.*, 2009).**

En effet, une meilleure absorption des éléments minéraux pourrait contribuer à une amélioration de la croissance de la plante. Des études ont été réalisées dans le but de connaître l'impact des mycorhizes sur l'absorption de différents minéraux. Selon **Sohn et *al.* (2003)**, l'absorption des macronutriments (P, K, Mg et Ca) a été supérieure pour des boutures de chrysanthèmes mycorhizées comparativement aux boutures non mycorhizées et les mêmes résultats ont été obtenus avec les éléments Mn,Cu et Zn. **Strullu (1991)** attribue cet effet aux hyphes extra-matricielles du champignon qui permettent d'explorer un volume considérable du substrat, en

plus des arbuscules intra-matricielles qui augmentent la surface d'échanges et d'assimilation des sels minéraux en faveur de l'hôte.

Tableau 9 : Croissance des plants de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%).

Paramètres de croissance	Traitements					
	Inoculés			Non inoculés		
	0%NPK	50%NPK	100%NPK	0%NPK	50%NPK	100%NPK
Longueur de tige principale (cm plant^{-1})	27,50±4,38	41,92±4,63	45,71±7,40	23,44±1,96	28,87±4,37	35,32±4,24
Biomasse aérienne fraiche(g plant^{-1})	60,36±7,89	92,13±9,74	101,71±10,6	42,39± 7,72	50,98±11,40	68,44±7,19
Biomasse aérienne sèche(gplant^{-1})	17,12±4,18	23,08±5,10	26,44±6,35	10,74±0,88	13,63±2,99	19,48±2,69
Biomasse racinaire fraiche (gplant^{-1})	10,51±2,38	14,96±1,97	17,58±2,58	6,46±1,66	8,87±1,77	10,68±2,37
Biomasse racinaire sèche(gplant^{-1})	3,81±0,71	6,20±1,00	8,28±1,11	2,81±0,55	3,90±0,57	5,94±1,22

2.4 Teneurs en chlorophylle

Une augmentation de la photosynthèse a été enregistrée chez les plants inoculés par rapport aux plants non inoculés ; la mycorhization combinée ayant reçu la moitié de la quantité de fertilisant recommandée a été suffisante pour augmenter significativement la teneur en chlorophylle (59,40%), comme pour les plants ayant réceptionné la quantité complète d'engrais avec un gain de 41,75%. En absence de NPK, il a été enregistré une augmentation de 29,60% entre les échantillons mycorhizés et non mycorhizés.

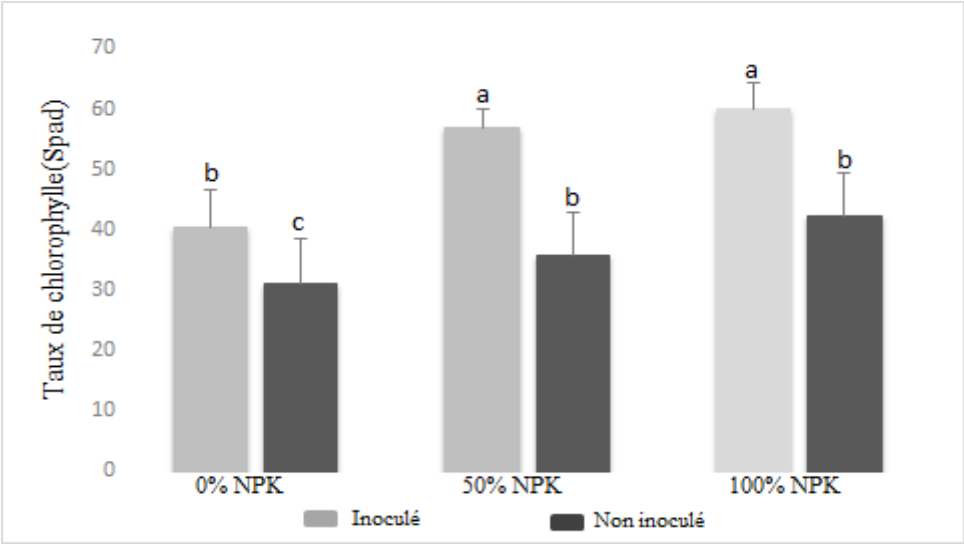

Figure 20 : Concentration en chlorophylle des plants de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives de la teneur en chlorophylle selon le test HSD de Tukey ($p<0.05$).

D'après **Ruiz et *al.* (1996)**, la symbiose mycorhizienne a augmenté l'échange gazeux des feuilles, ce qui induit une activité photosynthétique plus importante chez les plants inoculés. **Abdel Latef & Chaoxing (2011)** attribuent cette augmentation à l'absorption accrue de magnésium et d'azote par les hyphes des champignons entrainant une grande teneur en chlorophylle chez les plants inoculés, ou une augmentation dans l'activité des enzymes nécessaires à la synthèse de la chlorophylle **(Murkute et *al.*, 2006).**

2.5. Teneurs des feuilles en sucres

La concentration des feuilles en sucres varie selon les doses du fertilisant chimique que ce soit pour les plantes inoculés ou non inoculés. Les valeurs minimales ont été enregistrées chez les plants n'ayant pas reçu de fertilisant de NPK, soit 1,33 mg/ml pour les plants inoculés et 1,18 mg/ml pour les plants non inoculés. Une meilleure stimulation a été obtenue lorsque les mycorhizes sont associés à 50% de NPK où nous avons enregistré un gain de 32,85% avec une concentration de sucres totaux de 2,79 mg/ml. Les plants mycorhizés semés dans la parcelle qui a reçu la quantité complète de fertilisant chimique présentent un gain de 19,83% par rapport aux plants non mycorhizés.

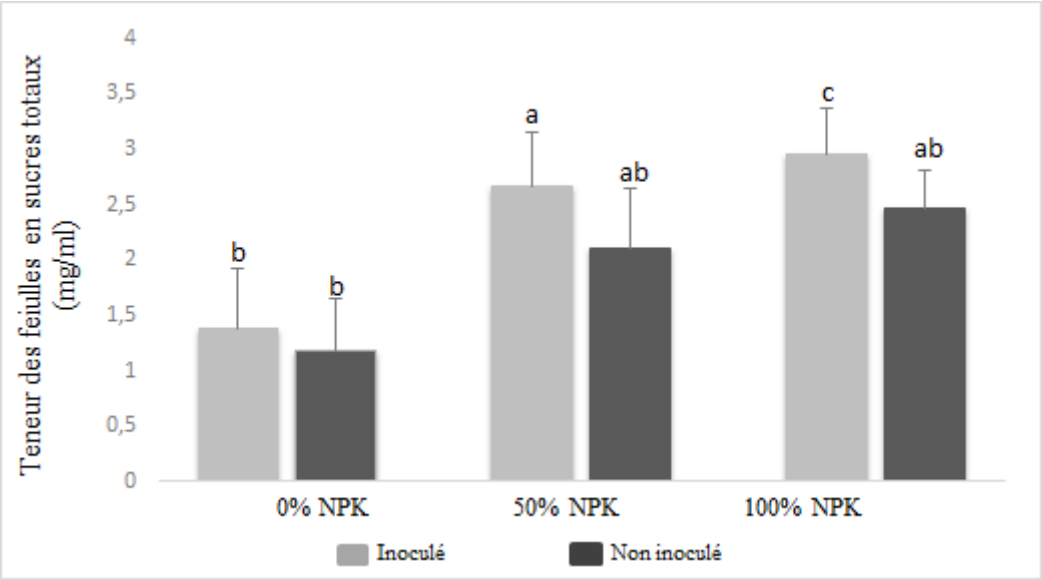

Figure 21 : Concentration des sucres totaux des plants de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives de la teneur en sucres totaux selon le test HSD de Tukey ($p<0.05$).

L'augmentation de la teneur des plants de pomme de terre en sucres pourrait être expliquée par le fait que les champignons mycorhiziens à arbuscules affectent la physiologie et la biochimie de la plante hôte **(Ruiz et *al.*, 1996)**.

En effet, les plantes répondent à la mycorhization par la synthèse des sucres totaux **(Tawaraya, 1996).** Cette augmentation de la teneur en sucres serait liée à une amélioration du taux de la photosynthèse induite par la mycorhization **(Azcón et *al.*, 1992**). La propriété des mycorhizes à prélever différents types d'éléments nutritifs notamment azotés suite à leur grande capacité d'absorption d'eau leur permet d'apporter un avantage décisif dans la compétition pour l'azote et d'accéder à des sources peu accessibles aux racines des plantes non mycorhizées (**Tobar et *al.*, 1994).**

3. Effet de la mycorhization sur le rendement

L'essai d'inoculation menée dans cette étude mesure l'efficacité de l'inoculant avec les différents traitements de NPK sur le rendement de la culture de la pomme de terre. Cette expérience vise également à évaluer le potentiel de l'inoculum mycorhizien à réduire la quantité d'engrais

minéraux phosphatés appliquée sur le champ agricole. Les résultats révèlent une augmentation significative du rendement plus précisément le nombre et le poids des tubercules ainsi que le rendement total. Cependant, une augmentation non significative a été enregistrée pour le calibre des tubercules.

3.1. Nombre de tubercules par plant

Apres six mois de culture, la totalité de la production a été pesée, le rendement par bloc calculé et les tubercules dénombrés. L'inoculum commercial a augmenté significativement le rendement chez tous les plants inoculés par rapport aux témoins dans tous les traitements.

En absence d'apport d'engrais chimique (NPK), le nombre de tubercules dans les parcelles inoculées était supérieur aux témoins, un gain de 10,09% a été observé. De même pour les parcelles traitées à 50% NPK, un gain de 38,12% a été enregistré pour les parcelles inoculées par rapport à leur témoin. Les parcelles inoculées à Symbivit et traitées à 100 % NPK ont donnés un gain de 28,06 %.

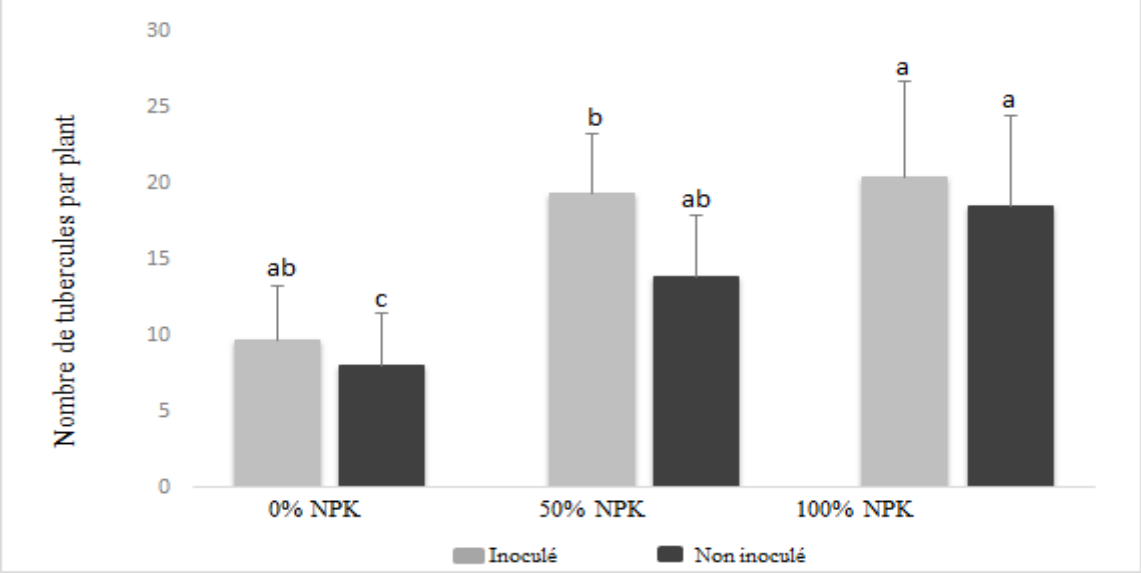

Figure 22 : Nombre de tubercules par plants inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives du nombre de tubercules selon le test HSD de Tukey ($p<0.05$).

3.2. Rendement par catégories de poids.

Les résultats présentées au tableau (10) expriment le rendement par catégorie de poids des tubercules des différentes parcelles ayant reçu les traitements. Une augmentation significative du nombre de tubercules a petit calibre (p<50g)a été enregistrée, un gain de 32% et 44% a été observé entre les plants inoculés et non inoculés des traitements 50 et 100% NPK, respectivement (tableau 10). Ce gain n'est que de 12% en absence de fertilisant chimique entre les plants mycorhizés et non mycorhizés.

Pour les tubercules à calibre moyen (50g<p<150g), les plants inoculés ont donné un nombre plus élevé de tubercules pour tous les traitements. Cependant, l'augmentation est significative pour les plants qui ont reçu 50 et 100% de la dose recommandée d'engrais chimique soit de 38 et 48% respectivement.

En absence d'apport en fertilisant chimique, aucune élévation significative a été observée concernant le nombre de tubercules a gros calibre (150g<p<250g) entre les plants inoculés et non inoculés.

Par ailleurs, les plants inoculés ont produit un nombre plus important de tubercules à gros calibre que les plants non inoculés pour les traitement 50 et 100% NPK (tableau 10). Un accroissement significatif de 42% pour le traitement (I+50% NPK) et 29% pour le traitement (I+100%NPK).

Tableau 10 : Rendement (nombre et poids) selon le calibre des tubercules de plants de pomme de terre de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%).

Traitements	**p<50g**		**50g<p<150g**		**150g<p<250g**		**Total**	
	Nombre (moyenne-écart type)	**Poids (kg)**	**Nombre (moyenne-écart type)**	**Poids (kg)**	**Nombre (moyenne-écart type)**	**Poids (kg)**	**Nombre**	**Poids (kg)**
I+0%NPK	35,41±2,45	4,30	41,21±1,45	11,5	14,04±6,47	3 ,45	100,66	19,25
NI+0% NPK	31,45±3,74	3,58	39,57±3,45	9,25	11,58±4,14	3,12	94,6	15,95
I+50%NPK	45,63±3,89	7,56	79,63±3,65	11,56	30,69±6,41	9,56	195,95	28,68
N I+50%NPK	34,45±57	4,23	57,36±4,89	9,89	21,24±2,11	8,65	161,05	22,67
I+ 100%NPK	65,14±4,32	6,47	89,57±5,47	12,69	40,45±36	13,36	235,16	32,52
NI+ 100%NPK	45,12±6,57	4,89	60,45±47,63	9,56	31,14±5,85	11,98	163,71	24,43

3.3. Rendement total

Le rendement total de chaque parcelle a été pesé après la récolte, les plants qui n'ont pas reçu des engrais chimiques inoculés ou non présentent le rendement le plus faible avec respectivement 40,33 Kg et 35,66 Kg. Un gain de 25% pour le traitement (I+50% NPK) a été enregistré pour les plants mycorhizés et 21% pour le traitement (I+100% NPK).

L'observation de l'ensemble des données concernant le rendement, démontre que l'utilisation des champignons mycorhiziens à arbuscules dans les productions de pomme de terre peut entraîner une hausse intéressante des rendements. L'augmentation du nombre de tubercules et plus précisément les nombre des tubercules à petit calibre a été également observé par **Douds et *al.* (2007)** et **Niemira *et al.* (1995)**.

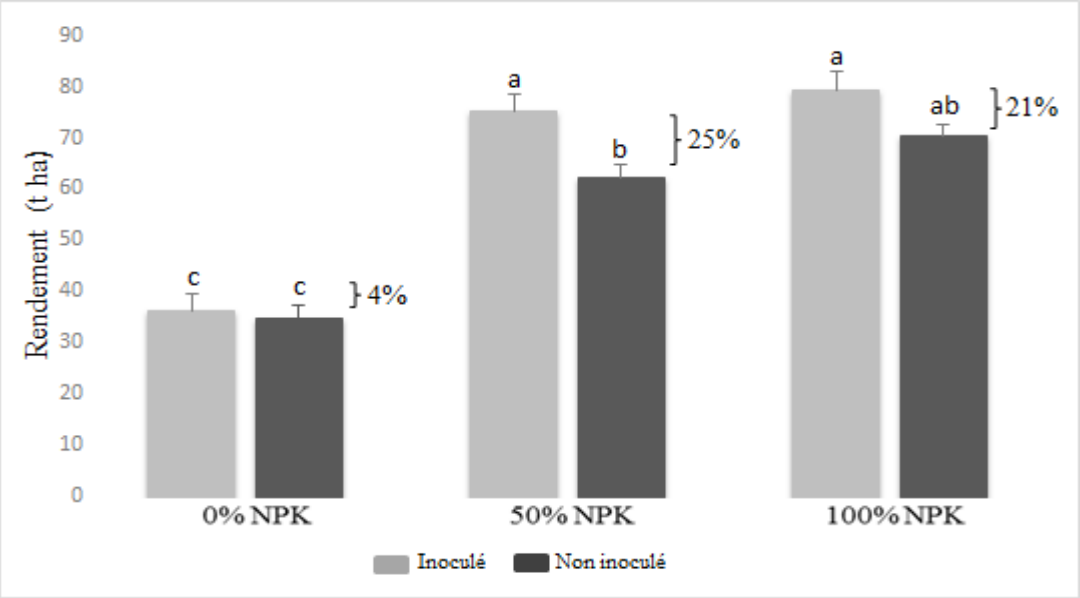

Figure 23: Rendement total des parcelles des tubercules inoculées et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives du rendement total selon le test HSD de Tukey ($p<0.05$).

Duffy et Cassells (2000) ont constaté que la mycorhization avec un inoculum de commerce, a augmenté la croissance et la production de tubercules de pomme de terre notamment les tubercules à petit calibre. Une augmentation du rendement total a été également observée par **Hijri (2006)** lors de l'étude sur plusieurs champs de culture de pomme de terre.

Rioux et Trépanier (2012) ont lancé un projet de recherche au Canada (Québec), afin d'évaluer l'impact de l'inoculation mycorhizienne en présence de 50, 75 et 100% de la dose de phosphore sur le rendement de la pomme de terre. Les résultats ont montré qu'une diminution de 25% de phosphore a apporté des différences significatives sur les rendements.

En effet, les plants de pomme de terre ont besoin d'un apport élevé de certains éléments minéraux tels que N, P, K, Ca, Mg et S pour un bon développement **(White et *al.*, 2008).** Cependant, l'efficacité des plantes de pomme de terre pour récupérer ces nutriments dans le sol est relativement faible **(Struik, 2007).** Par conséquent, l'inoculation avec l'AMF appropriée est considérée comme une alternative éco-efficace pour diminuer les apports élevés d'engrais chimiques.

4. Effet de la mycorhization sur la qualité des tubercules de pomme de terre

4.1 Teneurs des tubercules en amidon

La quantité d'amidon présente dans les tubercules de pomme de terre mycorhizés et non mycorhizés et en présence de plusieurs doses de NPK, est significativement différente. En effet un accroissement de 26% chez les tubercules inoculés qui n'ont pas reçu de fertilisants chimiques a été enregistré, il est de 28% pour les tubercules qui ont reçu la dose totale de NPK.

Chez les tubercules qui ont reçu la moitié de la dose fertilisant, l'apport en champignons mycorhiziens arbusculaires sous forme d'inoculum commercial, a favorisé la production d'amidon avec une augmentation de 47%.

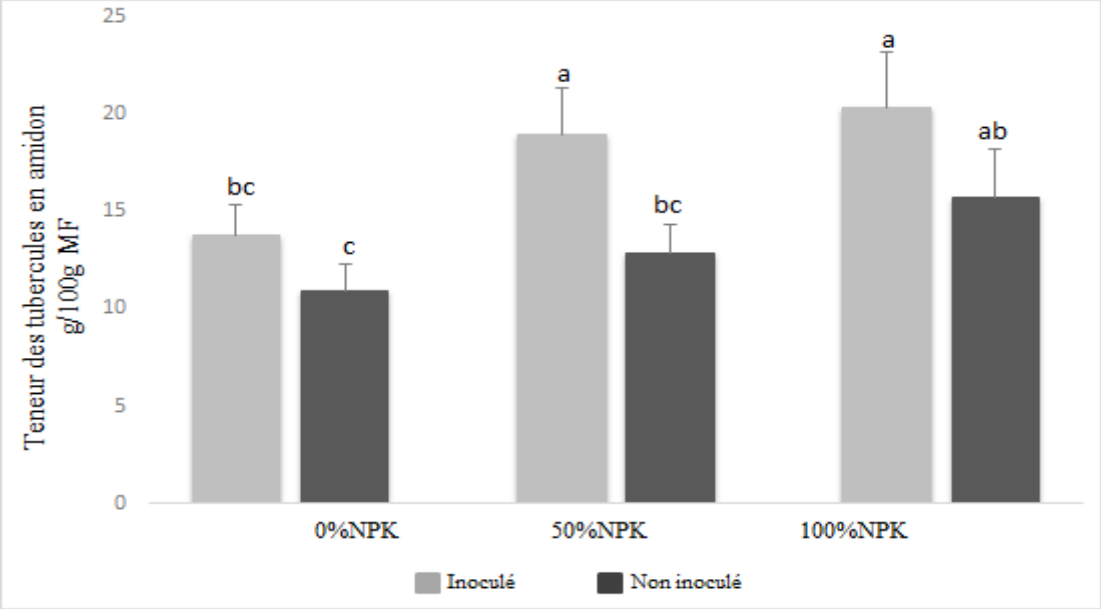

Figure 24 : Teneurs en amidon des tubercules de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives de la teneur en amidon selon le test HSD de Tukey ($p<0.05$).

L'amidon est un polysaccharide qui constitue l'une des sources les plus importantes d'énergie chez l'humain et l'animal, c'est la principale composante biochimique d'un tubercule de pomme

de terre **(Svihus et *al*., 2005).** La mycorhization a eu effet positif sur la teneur des tubercules en amidon, les mêmes résultats ont été observés par **Wu et Xia (2006)** et **Shinde et *al*. (2012).**

4.2 Teneurs des tubercules en protéines

En absence de fertilisants, la teneur en protéines des tubercules que ce soit inoculés ou non a été faible avec respectivement une moyenne de 0,95 g/100g et 0,68 g/100g.

Lors de l'ajout de la moitié et de la dose totale recommandée en NPK, la concentration en protéines a connu un accroissement important notamment chez les plants inoculés ou les mycorhizes ont provoqué un effet positif avec un gain de 38% pour le traitement (I+50% de NPK) et de 49% pour le traitement (I+100% de NPK).

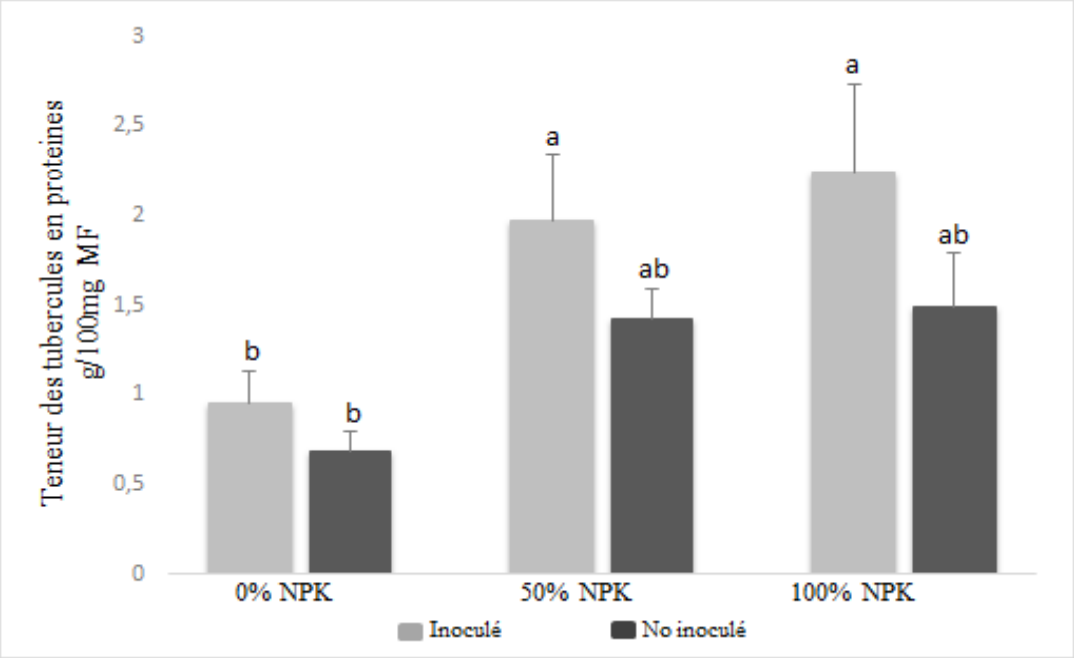

Figure 25 : Teneurs en protéines des tubercules de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives de la teneur en protéines selon le test HSD de Tukey ($p<0.05$).

La différence considérable de la teneur des tubercules inoculés en protéines comparée à ceux qui sont non inoculés a été également le résultat de l'étude de **Shinde et *al*. (2014)**, lorsqu'ils ont étudié l'effet des champignons mycorhiziens à arbuscules sur les changements biochimiques des

tubercules de pomme de terre. **Lenin et *al.* (2010)** ont mené une étude sur quatre différentes cultures légumineuse et les résultats étaient également les mêmes.

Krishna et Bagyaraj (1983), attribuent les niveaux croissants de protéines dans les plantes inoculées soit à la présence de protéines fongiques, soit à la stimulation infectieuse de la synthèse des protéines dans la plante hôte.

4.3. Teneurs des tubercules en azote

Les résultats montrent que la teneur des tubercules en azote varie selon les différentes doses de NPK et ceci, pour les plants inoculés et non inoculés. L'absence d'un apport en fertilisant chimique a influencé la teneur des tubercules en azote avec une valeur de 0,31% pour les plants inoculés et 0,24% pour les plants non inoculés.

Une augmentation de la teneur en azote a été enregistrée pour les tubercules qui ont reçu la moitié de la dose totale d'engrais chimique. Cependant, les plants mycorhizés ont donné un meilleur résultat comparé aux plants non mycorhizés avec un gain de 37%. La dose totale du fertilisant a provoqué un accroissement significatif que ce soit pour les plants inoculés ou non inoculés.

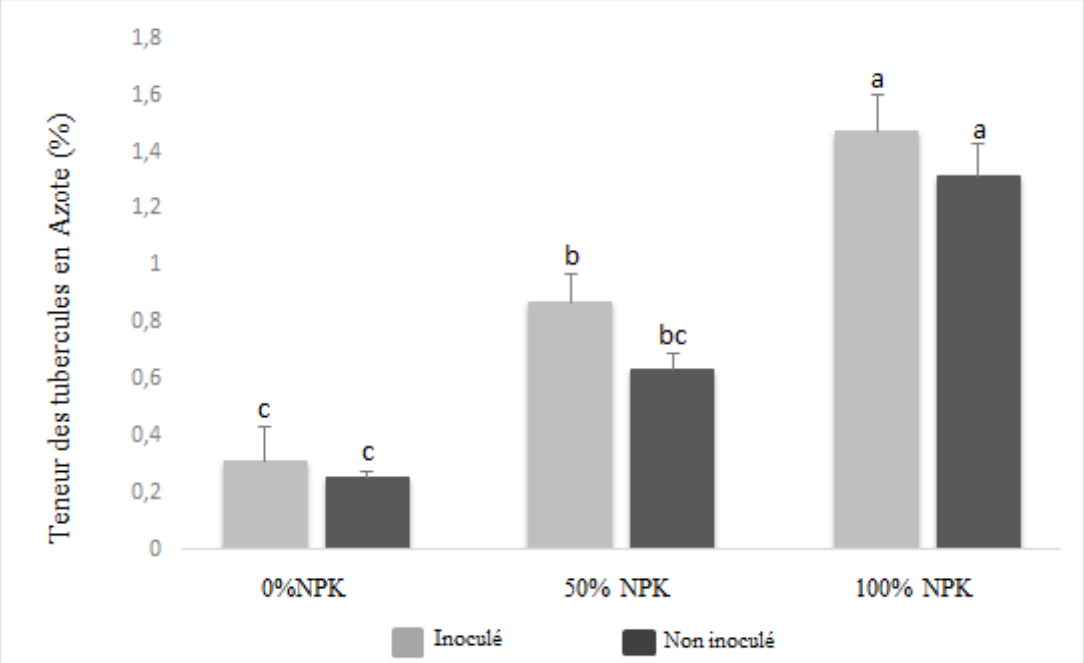

Figure 26 : Teneurs en azote des tubercules de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives de la teneur en azoteselon le test HSD de Tukey ($p<0.05$).

4.4. Teneurs en phosphore des tubercules

Les différentes doses de l'engrais chimique ainsi que l'inoculation mycorhizienne ont influencé la teneur des tubercules en phosphore, elle varie entre 0,36% et 0,31% pour les traitements (I+0% NPK) et (Non I+0% NPK).L'inoculum de commerce en combinaison avec 50% de NPK provoque une augmentation de 20% par rapport aux plants non inoculés, le mélange entre la dose totale du fertilisant et les mycorhizes a donné un gain de 6% seulement.

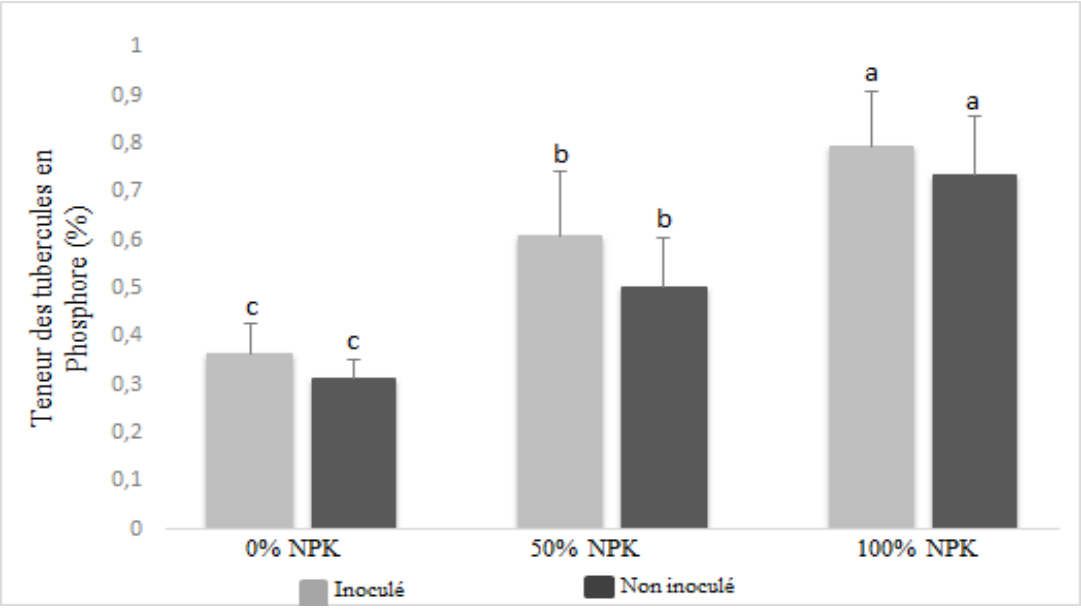

Figure 27 : Teneur en phosphore des tubercules de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives de la teneur en phosphore selon le test HSD de Tukey ($p<0.05$).

4.5 Teneurs des tubercules en potassium

Les résultats sont similaires concernant la teneur des tubercules en potassium, la dose 50% donne toujours les meilleurs résultats.

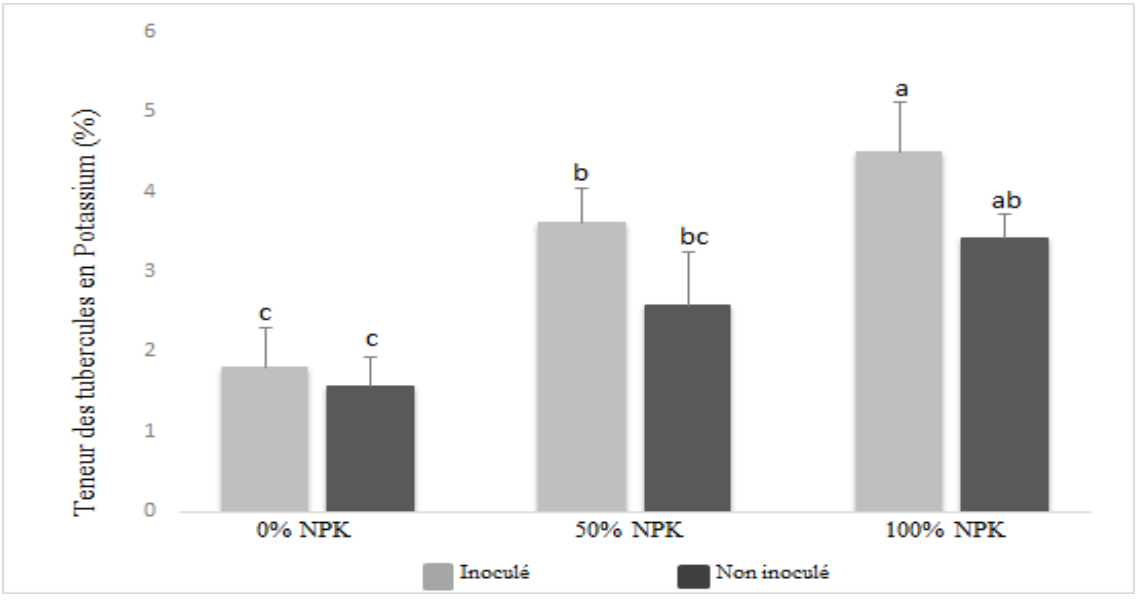

Figure 28 : Teneurs en potassium des tubercules de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives de la teneur en potassium selon le test HSD de Tukey ($p<0.05$).

Il est bien connu que les CMA améliorent l'absorption des éléments minéraux (azote, phosphore, potassium et micro-éléments) nécessaires à la croissance des végétaux **(Rabie et *al.*, 2005),** nos résultats corroborent avec ceux de **Shuab et *al.* (2017)** qui ont étudié l'influence des mycorhizes sur la nutrition minérale de la pomme de terre.

En effet, L'azote est disponible dans le sol sous forme de nitrate (NO_3) et d'ammonium (NH_4), ce dernier a une faible mobilité dans le sol, le mycélium extra-radical des champignons mycorhiziens joue un rôle clé pour son absorption par les racines ce qui explique la différence entre les tubercules inoculés et non inoculés **(Hodge et *al.*, 2010).**

Selon **Harrison et Van Buuren (1995**), le phosphore dans le sol est absorbé par une enzyme située dans l'hyphe extra-radical des champignons mycorhiziens. Le phosphate est ensuite condensé en polyphosphate (Poly-P) et transloqué vers la plante par l'écoulement cytoplasmique dans les hyphes intra-radicaux. L'infection mycorhizienne augmente également d'une manière significative l'absorption du potassium qui a un effet sur le rendement et la qualité des tubercules, il joue un rôle majeur dans synthèses et l'accumulation de l'amidon **(Karma et *al.*, 2009).**

Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

L'agriculture est la plus grande interface entre les hommes et l'environnement : l'humanité devra répondre aux demandes alimentaires toujours croissantes tout en en faisant face à une baisse de la dépendance en fertilisant chimique. Ceci implique le besoin de développer des stratégies qui optimisent la fertilité des sols et la diversité biologique, en créant des formes d'agrosystèmes qui respectent les processus écologiques naturels permettant d'assurer une productivité raisonnée.

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA), ont fait l'objet d'importantes recherches dans le but de connaître leur fonctionnement, tant au niveau fondamental qu'au niveau appliqué Notre études a été inspirée par les grandes réussites réalisées dans le domaine de l'inoculation mycorhizienne des pays développés qui utilisent depuis plusieurs années déjà cette biotechnologie à grande échelle, ce qui leurs permet d'augmenter les rendements agricoles et de réduire les besoins en intrants minéraux phosphatés de leurs cultures et d'assurer la durabilité des systèmes agricoles.

En effet, l'expérience menée en plein champs avait pour but d'évaluer l'effet de la mycorhization sur la production de la pomme de terre. Trois doses de NPK, correspondant à 0, 50 et 100% de la dose recommandée ont été appliquées en présence ou en absence de l'inoculant mycorhizien.

En premier lieu il était important d'évaluer les propriétés du substrat de culture avant et après la plantation, d'une manière générale, les propriétés physico-chimiques des sols n'ont pas subi de variations notables après la culture de pomme de terre (inoculé ou non) et l'utilisation des engrais chimiques par rapport à leur état initial. Au vu de tous les résultats obtenus, la modification la plus appréciable concerne la conductivité électrique (CE) des sols avec des valeurs atteignant trois à quatre fois celle de P_0. Les valeurs sont particulièrement importantes sur les parcelles ayant reçu les échantillons inoculés (50 et 100%), cependant ces valeurs restent inférieures aux normes requises et donc sans danger pour l'activité biologique dans les sols.

L'apport supplémentaire en CMA sous forme d'inoculum commercial a augmenté le pouvoir mycorhizogène du sol favorisant ainsi une bonne colonisation racinaire. Cependant, la présence de fertilisant chimique NPK a affecté négativement le degré de colonisation des racines de plants de pomme de terre. Les taux de mycorhization les plus élevés ont été obtenus après application de l'inoculum et en absence de NPK, favorisant ainsi la croissance et le développement des plants.

Dans nos essais, la croissance des différents organes des plants récoltés, estimée par la mesure de la biomasse des parties aériennes et racinaires (fraiche/sèche) et la hauteur de la tige principale, a été également affectée d'une façon positive par la mycorhization. En effet, les plants inoculés présentent toujours des résultats meilleurs par rapport aux plants non inoculés et plus précisément en combinant l'inoculum avec 50% de la dose d'NPK recommandée. La croissance des plants se traduit notamment par une teneur en chlorophylle et en sucres totaux plus importante.

La culture de la pomme a répondu positivement à l'inoculation mycorhizienne en termes de rendement (nombre de tubercules/plant, rendement total/parcelle) toutefois, on n'a pas enregistré une différence significative concernant le calibre des tubercules ceci pourrait être expliqué par le fait que les plants inoculés produisent un nombre plus important de tubercules à petit calibre.

Concernant la qualité des tubercules, nous avons constaté une meilleure teneur en amidon et en protéines par rapport aux plants les plants inoculés. Une meilleure teneur en éléments minéraux a été également mise en évidence.

À la lumière des divers constats qui ont été faits lors de cette étude, nous avons montré l'intérêt de l'utilisation de l'inoculation mycorhizienne dans la production de la pomme de terre, ces micro-organismes présentent un potentiel actuel pour réduire les applications d'engrais minéraux. De ce fait une diminution de la moitié de la dose de fertilisants chimiques habituellement utilisée par les agriculteurs pourrait être recommandée.

Afin de compléter et de poursuivre ce travail, des perspectives à la fois fondamentales et appliquées peuvent être envisagées :

- Une étude plus approfondie de l'effet de l'inoculation sur la production de la pomme de terre en étudiant l'impact d'autres paramètres abiotiques pouvant influencer la mycorhization tels que la température, l'hygrométrie, les éléments nutritifs minéraux ainsi que le type du substrat de culture.
- L'identification moléculaire des champignons micorhiziens arbusculaire présents dans les sols agricoles.
- Déterminer l'intérêt de la symbiose mycorhizienne à arbuscules dans la phytoremédiation des sols contaminés.

Références bibliographiques

Références bliographiques

A.

Abdel Latef AAH & Chaoxing H. (2011). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth, mineral nutrition, antioxidant enzymes activity and fruit yield of tomato grown undersalinity stress. *Scientia Horticulturae* 127(3): 228-233

Al-Karaki, G.N. (2013). The effect of arbuscular mycorrhiza fungi on the establishment of sour orange (Citrus aurantium) under different levels of phosphorus. *Acta Horticulturae*, 984: 103–108.

Akiyama, K. (2007). Chemical identification and functional analysis of apocarotenoids involved in the development of arbuscular mycorrhizal symbiosis. Bioscience, *Biotechnology, and Biochemistry. 71*, 1405–1414.

Alexander M (1965), Most Probable Number method for microbiol populations. *In* : *Black CA*, (Eds), Methods of soil analysis, part 2, chemical and microbiological properties. *American Soc. Argo.*, Madison, wis. 1467 – 1472.

Anwar, D., D. Shabbir, M.H. Shahid & W. Samreen. (2015). Determinants of potato prices and its forecasting: A case study of Punjab, Pakistan. University Library of Munich

Arvy, M. P.; Gallouin, F.; Ubillos, M. Á. M. Y. & Montalbán, J. M. (2007). Especias,aromatizantes y condimentos. Mundi-Prensa, 77

Azcon-Aguilar C, Palenzuela J, Roldan A, Bautsta S, Vallejo R & Barea JM (2003). Analysis of the mycorrhizal potential in the rhizosphere of representative plant species from desertification-threatened Mediterranean shrublands. *Applied Soil Ecology*, 22, 29-37

Azcon-Aguilar C, Encina CL, Azcón R & Barea JM (1994) Mycotrophy of Annona cherimola and the morphology of its mycorrhizae. *Mycorrhiza* 4, 161- 168

B.

Balzergue, C., Puech-Pagès, V., Bécard, G., & Rochange, S.F. (2011). The regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves early and systemic signalling events. *Journal of Experimantal Botany*. 62, 1049–1060

Bamouh H., (1999) Technique de production la culture de pomme de terre, bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA, N° 58, p.p.1-15

Barber S.A., Walker J.M., & Vasey E.H. (1962). Principles of ion movement through the soil to the plant root. Transaction Joint Meeting Commission IV and V International Soil Science, New Zealand. 121-124 pp.

Barber, S.A. (**1995).**Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. New York, John Wiley & Sons, 414p

Baslam, M., Esteban, R., García-Plazaola, J.I., & Goicoechea, N. (2013). Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) for inducing the accumulation of major carotenoids, chlorophylls and tocopherol in green and red leaf lettuces. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97: 3119–3128

Bernhards U., 1998. La pomme de terre Solanum tuberosum L. Monographie. Institut biotechnologies de la multiplication végétative. *Cahiers Agricultures,* 7 :447-458.

Bevege, D.I. & Bowen, G.D. (1975). Endogone strain and host plant difference in development of vesicular-arbuscular mycorrhizas. In: Endomycorrhizas (Ed. by F. E. Sanders, B. Mosse & P. B. Tinker), Academic Press, New York and London. 149-174 pp.

Bonfante P, Balestrini R, Genre A & Lanfranco L. 2009. Establishment and functioning of arbuscular mycorrhizas. In The Mycota, V: Plant Relationships, ed. H Deising, pp. 257–72. Berlin: Springer-Verlag. 2nd ed.

Bonfante, P., & Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications. 1*, 48.

Boullard B., 1990. Guerre et paix dans le règne végétal. Edition Marketing, 336 p.

Brundrett, M. (2008). Mycorrhizal associations. The Web Ressource. Version 2. http://www.mycorrhiza. Info/info.html.

Buttery B. R., Park S. J., Findlay W. I. & Dhanvantar B. N. (1988). Effects of fumigation and fertilizer on growth, yield, chemical composition, and mycorrhizae in white bean and soybean. *Canadian Journal of Plant Science*, *68*, 677-686.

Burkart, A. **(1987).** Leguminosae. In: CABRERA, A. Flora de la Provincia de Buenos Aires, Buenos Aires, v. 4, n. 3, p. 464- 484

Burton W. Glynn (1989). The Potato Longman Scientific & Technical, 1989 - 742 p.

C.

Campagnac, E., Lounès-Hadj Sahraoui, A., Debiane, D., Fontaine, J., Laruelle, F., Garçon, G., Verdin, A., Durand, R., Shirali, P., & Grandmougin-Ferjani, A. (2010). Arbuscular mycorrhiza partially protect chicory roots against oxidative stress induced by two fungicides, fenpropimorph and fenhexamid. *Mycorrhiza, 20*, 167–178

Cappellazzo, G., Lanfranco, L., Fitz, M., Wipf, D., & Bonfante, P. (2008). Characterization of an amino acid permease from the endomycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Plant Physiology, 147*, 429–437

Childers, D. L., Corman, J., Edwards, M. and Elser, J. J. (2011). Sustainability Challenges of Phosphorus and Food: Solutions from Closing the Human Phosphorus Cycle. *BioScience*, 61(2) : 117-124.

Clark, R.B., & Zeto, S.K. (2000). Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *Journal of Plant Nutrition, 23*, 867–902.

D.

Dalpé, Y. (2005). Les mycorhizes : un outil de protection des plantes mais non une panacée. *Phytoprotection, 86*, 53–59.

Davet, P. (1996). Vie microbienne du sol et production végétale. Edition INRA. Paris, 380 p.

Debiane, D., Garçon, G., Verdin, A., Fontaine, J., Durand, R., Shirali, P., Grandmougin-Ferjani, A., & Lounès-Hadj Sahraoui, A. (2009). Mycorrhization alleviates benzo[a]pyrene-induced oxidative stress in an *in vitro* chicory root model. *Phytochemistry, 70*, 1421–1427.

Debiane, D., Garçon, G., Verdin, A., Fontaine, J., Durand, R., Grandmougin-Ferjani, A., Shirali, P., & Sahraoui, A.L.-H. (2008). *In vitro* evaluation of the oxidative stress and genotoxic potentials of anthracene on mycorrhizal chicory roots. *Environmental and Experimental Botany, 64*, 120–127.

Delaplace P. (2007). Caractérisation physiologique et biochimique du processus de vieillissement du tubercule de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). Université de Liège, Liège, Belgique.Thèse de Doctorat, 171p.

De Mars B.D. & R.E.J. Broener, (1995). A simple method for observing VAM withsuggestions for designing class activities. *J. of Biological Education*, 29 (3) : 209-214.

Dexheimer, J. (1997). Etude structurale et fonctionnelle des interfaces entre le champignon et la plante hôte. *Rev. For. Fr.* XLIX, 43-56.

Doidy, J., van Tuinen, D., Lamotte, O., Corneillat, M., Alcaraz, G., & Wipf, D. (2012). The *Medicago truncatula* sucrose transporter family: Characterization and implication of key members in carbon partitioning towards arbuscular mycorrhizal fungi. *Molecular Plant, 5*, 1346–1358.

Doorenbos, J. & Kassam, A.H. (1980). Réponse des Rendement à l'eau. Irrigation et de Drainage. Bulletin FONI Nr. 33, FAO, Rome, Italy

Doré C. & Varoquaux F. (2006). Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées .INRA.

Douds D., Nagahashi G., Reider C. & Hepperly P.R. (2007).Inoculation with Arbuscular Mycorrhizal Fungi Increases the Yieldof Potatoes in a High P Soil. *Biological Agriculture and Horticulture*, 25: 67–78.

Douds Jr., D.D., & Johnson, N.C. (2007). Contributions of arbuscular mycorrhizas to soil biological fertility. In: Soil biological fertility: a key to sustainable land use in agriculture, pp : 129-162. L.K., Abott, D.V., Murphy (eds.). Springer, Berlin, Allemagne

Duffy E.M. & Cassells A.C. (2000). The effect of inoculation of potato (Solanum tuberosum L.) microplants with arbuscular mycorrhizal fungi on tuber yield and tuber size distribution. *Appl. Soil Ecol.* 15: 137-144

Duhoux, E. & Nicole, M. (2004). Biologie végétale. Association et interactions chez les plantes. IRD. Ed., 166 p.

DSA Tlemcen, (2008). Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information, Recensement général de l'agriculture, Rapport général des résultats définitifs, 125p.

E.

Emberger L. (1971). Travaux de Botanique et d'Ecologie. Masson et Compagnie, Paris.

F.

FAO (2008). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO (2015). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations

Firmin, S., Labidi, S., Fontaine, J., Laruelle, F., Tisserant, B., Nsanganwimana, F., Pourrut, B., Dalpé, Y., Grandmougin, A., Douay, F. Shirali, P., Verdin, A., & Lounès-Hadj Sahraoui A. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungal inoculation protects *Miscanthus* × *giganteus* against trace element toxicity in a highly metal-contaminated site. *Science of The Total Environment, 527–528*, 91–99.

Fortin J. A., Plenchette C. & Piché Y. (2008). Les mycorhizes. La nouvelle révolution verte. Multi Monde Quac. (Eds.), Quebecs, 131 p.

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

Fraga-Beddiar, A., & Le Tacon, F. (1990). Interactions between a VA mycorrhizal fungus and Frankia associated with alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaetn.). *Symbiosis, 9*, 247-258.

G.

Garbaye J., (2013). La symbiose mycorhizienne, une association entre les plantes et les champignons. Ed. Quae, Versailles, 251 p

Gauthier J., (1991). Notions d'agriculture; le sol, les cultures, les élevages, l'économie et la gestion. Ed. Tech. Doc. Lavoisier, Paris, 575 p.

Gavériaux J.P., (2012). Les Glomeromycota – Mycorhizes VAM et Geosophon pyriformis (Kützing) Wettstein, Bull. Soc. Mycol. Nord Fr., n° 92, pp. 1-17

Gilroy, S., & Jones, D.L. (2000). Through form to function: root hair development and nutrient uptake. *Trends in Plant Science. 5*, 56–60.

Giovannetti, M. & Sbrana, C. (1998). Meeting a non-host: the behaviour of AM fungi. *Mycorrhiza,* 8:123-130.

Glenn. J.K. & M.H. Gold. (1985). Purification and characteriza- tion of an extracellular Mn(II)-dependent peroxidase from the lignin-degrading basidiomycete. Phanerochaete chrysosporium

Gobat, J.M.; **Aragno, M**. **& Matthey, W. (2003)**. Le sol vivant. Presses Polytechniques Universitaires Romandes, Lausanne, 568 p.

Grandmougin-Ferjani, A., & Sahraoui, A.L.H. (2011). Calcareous impact on arbuscular mycorrhizal fungus development and on lipid peroxidation in monoxenic roots. *Phytochemistry, 72*, 2335–2341.

Grant, C., Bittman, S., Montreal, M., Plenchette, C. & Morel, C. (2005). Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Canadian Journal of Plant Science,* 85 : 3-14.

H.

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

Hamza (2014) : Application des mycorhizes arbusculaires en culture maraîchère cas de la pastèque **(*Citrullus lanatus*)** Thèse de Magistère Biologie, Univ. Farhet Abbas Sétif.

Harris S., (1978). Minerai nutrition. p.195-243. Dans: Roberts, E.H. (Ed.) The potato crop. London Chapman et Hall. New York.

Harrison, M.J. & van Buuren, M.L. (1995). A phosphate transporter from the mycorrhizal fungus Glomus versiforme. *Nature,* 378, 626–629

Hawkes J.G., (1990). The potato, Evolution, Biodiversity and genetic resources .London, Belhaven Press. 259p.

Hedge J.E. & Hofreiter B.T., (1962). In: Methods in Car- bohydrate Chemistry. Vol.17, Whistler R.L. & Be- Miller J.N. (Eds.), Academic Press, New York, 420 pp.

Helber, N., Wippel, K., Sauer, N., Schaarschmidt, S., Hause, B., & Requena, N. (2011). A versatile monosaccharide transporter that operates in the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus* sp is crucial for the symbiotic relationship with plants. *The Plant Cell. 23,* 3812–3823.

Hijri I., Sykorova Z., Oehl F., Ineighen K. Mader P., Wiemken A. & Redecker D., (2006). Communities of arbuscular mycorrhizal fungi in arable soils are not necessarily low in diversity. *Molecular Ecology*,15: 2277–2289.

Hirrel, M.C., & Gerdemann, J.W. (1979). Enhanced carbon transfer between onions infected with a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus. *New Phytologist. 83*, 731–738.

Hodge, A., Helgason T. & Fitter A. H. (2010). Mini-review : Nutritional ecology of arbuscular mycorhizal fungi. *Fungal Ecology*, 3 : 267-273.

Ho, I., & Trappe, J.M. (1973). Translocation of 14C from Festuca Plants to their Endomycorrhizal Fungi. *Nature, 244*, 30–31.

Holford, I.C.R. (1997). Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Soil Research, 35*, 227–240.

Hopkins, 2003. Physiologie végétale. Edition de Boeck, 514 p.

J.

Jakobsen, I., & Rosendahl, L. (1990). Carbon flow into soil and external hyphae from roots of mycorrhizal cucumber plants. *New Phytologist. 115*, 77–83

Jin, H., Pfeffer, P.E., Douds, D.D., Piotrowski, E., Lammers, P.J., & Shachar-Hill, Y. (2005). The uptake, metabolism, transport and transfer of nitrogen in an arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist. 168*, 687–696.

K.

Karandashov V. & Bucher M., (2005). Symbiotic phosphate transport in arbuscular mycorrhizas. *Trends in Plant Science*, 10 (1) :.22-29

Kaya, C., Ashraf, M., Sonmez, O., Aydemir, S., Tuna, A.L., & Cullu, M.A. (2009). The influence of arbuscular mycorrhizal colonisation on key growth parameters and fruit yield of pepper plants grown at high salinity. *Scientia Horticulturae*, 121 : 1–6.

Kechid M., 2005 : Physiologie et Biotechnologie de la Micro tubérisation de la Pomme de Terre Solanum tuberosum. L. Thèse Magister en Biotechnologie végétale, Université Mentouri, Constantine

Kiers, E.T., Duhamel, M., Beesetty, Y., Mensah, J.A., Franken, O., Verbruggen, E., Fellbaum, C.R., Kowalchuk, G.A., Hart, M.M., & Bago, A. (2011). Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis. *Science, 333*, 880–882.

Krishna, K.R. et Bagyaraj, D.J. (1983). Growth and nutrient uptake of peanutinoculated with the mycorrhizal fungus Glomus fasciculatum compared with noninoculated ones. *Plant and Soil*, 77 : 405-408

L.

Labidi, S., Calonne, M., Ben Jeddi, F., Debiane, D., Rezgui, S., Laruelle, F., Tisserant, B., Ruiz-Sánchez, M., Aroca, R., Muñoz, Y., Polón, R., & Ruiz-Lozano, J.M. (2010). The arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances the photosynthetic efficiency and the antioxidative response of rice plants subjected to drought stress. *Journal of Plant Physiology, 167*, 862–869.

Lambert, D.H., Baker, D.E., & Cole, H. (1979). The role of mycorrhizae in the interactions of phosphorus with zinc, copper, and other elements. *Soil Science Society of America Journal*, *43*, 976–980.

Laumonnier R., (1979). Cultures légumières et maraichères. Tome 3. Haut feuille, Paris, 274p.

LÊ C. L., (1994). Apport de l'électrophorése dans l'identification des variétés de pomme de terre cultivées en Suisse. *Revue Suisse Agric.* 26(6) : 373-379.

Lenin M., Selvakumar G., Thamizhiniyan G. & Ra- jendiran R., (2010). GrowthandBiochemicalChanges of Vegetable Seedlings Induced by Arbuscular my- corrhizal Fungus. *Journal of Experimental Sciences*, 1: 27–31.

Le Tacon, F. (1985). Les mycorhizes : une coopération entre plantes et champignons. *La Recherche*, 16 : 624–632.

López-Pedrosa, A., González-Guerrero, M., Valderas, A., Azcón-Aguilar, C., & Ferrol, N. (2006). Gint AMT1 encodes a functional high-affinity ammonium transporter that is expressed in the extraradical mycelium of *Glomus intraradices*. *Fungal Genetics and Biology. 43*, 102–110.

Lowry D.H., Rosenrough H.J., Lawsfarr A. & Randal R.J., (1951). Protein measurement with the Folin- Phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 93: 265–275

Lutaladio NB & Prakash A. (2010). La pomme de terre : histoire et développement économique. *Cahiers de Nutrition et Diététique*, 45: 5-16.

Luttge U. Kluge M & Bauer G. (2002). Botanique ; traité fondamental, 3e édition Lavoisier, Tec et Doc, Paris.

M.

Maaitah, S.A., Mahadeen, A.Y. & Al-Karaki G.N. (2014). Response of Potted- Grown Tomato (Lycopersicon esculentum Mill var. Lorely F1) to AMF Inoculation with Organic and Inorganic Fertilizer. *American-Eurasian Journal of Agriculture & Environmental Sciences*, 14: 255–262.

M.A.D.R, (2006). Ministère d'agriculture, Direction de statistique de système d'information (D.S.A). Ministère d'Agriculture et Développement Rural

M.A.D.R, (2010). Ministère d'agriculture, Direction de statistique de système d'information (D.S.A). Ministère d'Agriculture et Développement Rural

Mahouachi, J., Socorro, A.R., & Talon, M. (2006). Responses of papaya seedlings (*Carica papaya* L.) to water stress and re-hydration: growth, photosynthesis and mineral nutrient imbalance. *Plant and Soil. 281*, 137–146.

Marschner, H., & Dell, B. (1994). Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil. 159*, 89–102.

Mattila P. & Hellström J. (2007). Phenolic acids in potatoes, vegetables, and some of their products. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20 : 152-160.

Maynard, D. N. & Hochmuth, G. J. (2007). Vegetables and the Vegetable Industry. In *Knott's Handbook for Vegetable Growers*, pp. 1-53. John Wiley & Sons, Inc.

McAinsh, M.R., & Pittman, J.K. (2009). Shaping the calcium signature. New Phytologyst. *181*, 275–294.

Meziane D., (1991). Histoire de la pomme de terre. *Cahiers de Nutrition et Diététique*, n°25 pp:29.

Miller, R.M., Jastrow, J.D., & Reinhardt, D.R. (1995). External hyphal production of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in pasture and tallgrass prairie communities. *Oecologia*. *103*, 17–23.

Miransari, M., Bahrami, H.A., Rejali, F., & Malakouti, M.J. (2008). Using arbuscular mycorrhiza to alleviate the stress of soil compaction on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth. *Soil Biology and Biochemistry*. *40*, 1197–1206.

Morton, J.B., & Benny, G.L. (1990). Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): a new order, Glomales, two new suborders, Glomineae and Gigasporineae, and

two new families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with an emendation of Glomaceae. *Mycotaxon*. *37*, 471–491.

Morton J.B., (1993). Problems and solutions for the integration of Glomalean taxonomy, systematic, biology and the study of endomycorrhizal phenomena. *Mycorrhiza,* 2: 97-109.

Moule C. (1972) : Les plantes sarclées et déverses. Ed. Ballière et fils , Paris .246p

Murkute, A., S. Sharma & S. Singh (2006). Studies on salt stress tolerance of citrus rootstock genotypes with arbuscular mycorrhizal fungi. *Horticulture Science, 33*: 70-76.

N.

Niemira B A, Safir G R, Hammer Schmidt R & Bird G W (1995). Production of prenuclear mini-tubers of potato with peatbased arbuscular mycorrhizal fungal inoculum. *Agro. J*., 87, 942-946.

P.

Perrenoud, S. (1993). Fertilizing for High Yield Potato. IPI Bulletin 8. 2 nd Edition. International Potash Institute, Basel, Switzerland.

Péron J Y., (2006). Références productions légumières, 2éme édition. Synthèse Agricole p 538-547.

Phillips, J.M., & Hayman, D.S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*. *55*, 158–161.

Plenchette C., Clermont-Dauphin C., Meynard J.M. & Fortin J.A., (2005). Managing arbuscularmycorrhizal fungi in cropping systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 65: 31–40.

Q.

Quézel P. & Santa S., (1962). Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales.Tome I. Editions Du' Centre National De La Recherche Scientifique .Paris 7. 636 p.

R.

Rabie GH. (2005). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of soil rhizosphere spiked with poly aromatic hydrocarbons.*Mycobiology*, 33: 41–50.

Redhead J.F., (1980). Mycorrhiza in natural tropical forest. In: Tropical Mycorrhiza Research, Mikola P. (ed.), Clarendon press, Oxford, pp. 127-142.

Redecker, D., & Schüßler, A. (2014). 9 *Glomeromycota*. In: Systematics and Evolution, pp : 251–269. D.J., McLaughlin, & J.W., Spatafora (eds.). Springer Berlin Heidelberg,Allemagne

Reust W., (1982). Contribution à l'appréciation de l'âge physiologique des tubercules de pommes de terre(Solanum tuberosum L.) et étude de son importance sur le rendement (thèse de doctorat). Zurich : Ecole Polytechnique Fédérale, 113 p.

Roberts, S. & R.E. Mc Dole. (1985). Potassium Nutrition of Potatoes. In: Potassium in Agriculture (Ed: R.S. Munson). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI. pp. 800-818

Rousselle P., Rousselle B. & Ellisseche D ., (1992) .La pomme de terre in Amélioration des espèces végétales cultivées.

Rousselle P., Robert Y. & Grossuer J.C. (1996). La pomme de terre production, Amélioration, Ennemis et Maladies. Utilisation. Edition Ŕ. Doun. P 278.

Rilling, J.K., Gutman, D.A., Zeh, T.R., Pagnoni, G., Berns, G.S., & Kilts, C.D. (2002). A neural basis for social cooperation. *Neuron. 35,* 395–405.

Rioux, J.A. & Trépanier, M. (2012). Utilisation de champignons endomycorhiziens arbusculaires dans la production de la pomme de terre. In Agrireseau, pomme de terre-documents. http://www.agrireseau.qc.ca/pdt/documents/Rapport%20final.pdf.

Ruiz-Lozano J.M. & Azcon R., (1996) Mycorrhizal colonization and drought stress as factors affecting nitratereductase activity in lettuce plants, *Agric. Ecosyst. & Environ.* 60 175–181

Ruiz-Lozano J.M., Azcon R. & Gomez M., (1996). Alle- viation of salt stress by arbuscular mycorrhizal Glomus species in Lactuca sativa plant. *Physiologia Plantarum*, 98: 767–772

S.

Sanders I.R., Clapp J.P. & Wiemken A., (1996): The Genetic diversity of AM fungi innatural ecosystems a key to anderstanding the ecology and functioning of themycorrhizal symbiosis. *New phytol.*,13: 123-134.

Schreiner, R.P., & G.J. Bethlenfalvay. (1995). Mycorrhizal interactions in sustainable agriculture. *Critical Reviews in Biotechnology. 15* : 271-285

Schüβler, A., Schwarzott, D., & Walker, C. (2001). A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological Research. 105* : 1413–1421.

Schüßler, A., Martin, H., Cohen, D., Fitz, M., & Wipf, D. (2006). Caracterization of a carbohydrate transporter from symbiotic glomeromycotan fungi. *Nature. 444* : 933–936.

Schüßler, A., & Walker, C. (2010). The Glomeromycota: A species list with new families and new genera. Libraries at The Royal Botanic Garden Edinburgh, The Royal Botanic Garden Kew, Botanische Staatssammlung Munich, and Oregon State University.

Selosse A. & Le Tacon F., (1997). Des mycorhizes à l'origine de la flore terrestre. *J. Bot. Soc. Bot. Fr.*, 3 : 21-25.

Seltzer P. (1946). Le climat de l'Algérie. Vol. 1, 219 p. Carbonel, Alger

B.P.Shinde & Manjusha Khanna (2014). Impact of AM fungi on biochemical changes in potato plants International Journal of Current Microbiology and Apllied Sciences. ISSN: 2319-7706 Volume 3 Number 7 (2014) pp. 1018-1027

Smith, S.E., & Smith, F.A. (1990). Structure and function of the interfaces in biotrophic symbioses as they relate to nutrient transport. *New Phytologist*. *114*, 1–38.

Smith, F.A., Jakobsen, I., & Smith, S.E. (2000). Spatial differences in acquisition of soil phosphate between two arbuscular mycorrhizal fungi in symbiosis with *Medicago truncatula*. *New Phytologist. 147*, 357–366.

Smith, S.E., Smith, F.A., & Jakobsen, I. (2003). Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. *Plant Physiology. 133*, 16–20.

Smith, S.E. & Read, D.J. (2008). Mycorrhizal symbiosis. Academic Press Cambridge ,Royaume-Uni.

Smith, S.E., Jakobsen, I., Grønlund, M., & Smith, F.A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: Interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiology. 156*, 1050–1057.

Sohn Bo Kyoon, Kim Kil Yong, Chung Soon Ju, Kim Wol Soo, Park Sun Mi, Kang Jong Goo, Rim Yo Sup, Cho Ju Sik, Kim Tae Hwan & Lee Jeong Hyun, (2003). Effects of thedifferent timing of AMF inoculation on plant growth and flower quality of chrysanthemum.

Soltner D., (2005). Les grandes productions végétales, phytotechnie spéciale-céréales-plantes sarclées-prairies .Collection Sciences et Techniques Agricoles 20eme édition 472P.

Souza, T. (2015). Handbook of Arbuscular Mycorrhizal Fungi.Springer.

Stévenin A, Boyer F-D, Beau J-M (2012) Highly selective formation of b-glycosides of N-acetylglucosamine using catalytic iron(III) triflate. Eur J Org Chem 2012: 1699–1702

Strullu D.G. & Plenchette C., (1991). Les mycorhizes en horticulture. PHM *Revue Horticole* 352: 50-55.

Spooner, D.M., K. McLean, G. Ramsay, R. Waugh & G.J. Bryan (2005). A single domestication for potato based on multilocus amplified fragment length polymorphism genotyping. *Proc. Nat. Acad. Sci*., 102(41): 14694-14699.

Struik, P. C. (2007). Above-ground and below-ground plant development. Pages 219-236 *in* D. Vreugdenhil, J. Bradshaw, C. Gebhardt, F. Govers, D. K. L. Mackerron, M. A. Taylor, H. A. Ross, eds. Potato biology and biotechnology: Advances and perspectives. Elsevier Science B.V., Amsterdam.

Svihus B, Uhlen AK & Harstad OM (2005). Effect of starch granule structure, associated components and processing on nutritive value of cereal starch. *Animal Feed Science and Technology*; 122 (3-4) : 303-320.

T.

Tawaraya, K., S. Watanabe, E. Yoshida, & T. Wagatsuma (1996). Effect of onion (Alliumcepa) root exudates on the hyphal growth of Gigaspora margarita. *Mycorrhiza* 6 (1) : 57-59

Tisdall, J.M. (1991). Fungal hyphae and structural stability of soil. *Soil Research 29,* 729–743

Tisdall, J.M. (1994). Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant and Soil.* 159, 115–121.

Tobar R., Azcón R., Barea J.M., (1994). Improved nitrogen uptake and transport from 15N-labelled nitrate by external hyphae of arbuscular mycorrhira under water-stressed conditions, New Phytol. 126 119–122.

V.

Van der Gast, C. J., Gosling, P., Tiwari, B. & Bending, G. D. (2011). Spatial scaling of arbuscular mycorrhizal fungal diversity is affected by farming practice. *Environmental Microbiology,* 13 (1) : 241-249.

Verdin, A., Sahraoui, A.L.H., Fontaine, J., Grandmougin-Ferjani, A. & Durand, R. (2006). Effects of anthracene on development of an arbuscular mycorrhizal fungus and contribution of the symbiotic association to pollutant dissipation. *Mycorrhiza*. *16*, 397–405.

Verhees J., 2002. Cell cycle and storage related gene expression in potato tubers (Thèse de doctorat). Wageningen : Wageningen Agricultural University, 133 p.

W.

Walder, F., Niemann, H., Natarajan, M., Lehmann, M.F., Boller, T., & Wiemken, A. (2012). Mycorrhizal networks: common goods of plants shared under unequal terms of trade. *Plant Physiology*. *159* : 789–797

Wang MY, Diao ZK, Liang MX & Liu RJ (2005). Advances in the study of AM fungal diversity in agroecosystems. *Acta Ecologica Sinica* 25: 2544–2549.

White J.A., Tallaksen J. & Carvat I. 2008. The effects of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation at a roadside prairie restoration site. *Mycologia*, 100 : 6-11

Willis, A., Rodrigues, B. F. & Harris, P. J. C. (2013). The Ecology of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Critical Reviews in Plant Sciences,* 32 : 1-20.

Wolfe, D.W.,E. Ferreres & R.E. Voss (1982). Growth and yield response of two potato cultivars to various levels of applied. *Water Irrig. Sci.*, 3: 211-222.

Wright, S.F., & Upadhyaya, A. (1998). A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil. 198*, 97–107

Wu F., Wang W., Ma Y., Liu Y., Ma X., An L. & Feng H., (2013). Prospectof beneficial microorganisms applied in potato cultivation for sustainable agriculture. *African Journal of Microbiology Research*,7: 2150– 2158..

Wu Qiang-Sheng & Ren-Xue Xia, (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions. *Journal of Plant Physiology*, 163: 417–425

Y.

Yu T.E., J.C., Egger K. N. & Petterson R.L. (2001) a. Ectoendomycorrhizal associations-characteristics and functions. *Mycorrhizas*, 11:167-177

Z.

Zaheer, K. & M.H. Akhtar (2016). Potato production, usage, and nutrition a review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 56(5) : 711-721

Ziane, 2018. Application des champignons mycorhiziens à arbuscules dans la culture de la tomate industrielle**.** Thèse de Doctorat Biologie, Univ. Badji Mokhtar Annaba.

Liste des figures

Figures	Titres	Pages
1	Stades de développement de la pomme de terre	8
2	Représentation graphique de la composition biochimique moyenne d'un tubercule de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la matière fraîche totale	10
3	Évolution de l'absorption des éléments nutritifs majeurs par la pomme de terre	12
4	Principaux types mycorhiziens représentés sur une coupe transversale de racine	19
5	(a) Représentation schématique des mycorhizes arbusculaires; (b) Photo du mycélium intracellulaire et des arbuscules; (c) Photo d'un arbuscule	21
6	Schématisation de l'établissement de la symbiose mycorhizienne (A) et du cycle de vie des CMA (B),	24
7	Phylogénie des champignons mycorhiziens	26
8	Schéma récapitulant les principaux processus d'échanges de nutriments dans l'ensemble des symbioses mycorhiziennes	28
9	Localisation du site expérimental	34
10	Moyennes des températures minimales et maximales enregistrées dans la région d'étude (janvier à juin 2014).	35
11	Moyennes mensuelles des précipitations enregistrées au niveau de la région d'étude (janvier à juin 2014).	36
12	Plan du dispositif expérimental	37

13	Préparation des lits de plantation	38
14	Plantation de la pomme de terre	38
15	Schéma de coloration des échantillons racinaires	43
16	Echelle d'intensité de colonisation du cortex racinaire	44
17	Echelle d'évaluation de la présence des arbuscules	45
18	Taux de colonisation par les CMA des racines de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)	53
19	Les manifestations de la colonisation desracines de pomme terre colorés par le bleu de trypan (a) : vésicules (b) mycélium intracellulaire (c) : spores (d) : arbuscule (e) : mycélium extracellulaire	54
20	Concentration en chlorophylle des plants de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)	57
21	Concentration des sucres des plants de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)	58
22	Nombre de tubercules par plants inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)	59
23	Rendement total des parcelles des tubercules inoculées et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)	62
24	Teneurs en amidon des tubercules de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)	63
25	Teneurs en protéines des tubercules de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)	64

26	Teneurs en azote des tubercules de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)	66
27	Teneur en phosphore des tubercules de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)	67
28	Teneurs en potassium des tubercules de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%)	68

Liste des tableaux

Tableaux	Titres	Pages
1	Production de la pomme de terre par continent	13
2	Production algérienne de la pomme de terre de consommation	14
3	Production algérienne de semences pomme de terre	15
4	Les principales wilayas productrices de pomme de terre	16
5	Classification des Gloméromycota (Redecker & Schüßler, 2014)	27
6	Les traitements phytosanitaires appliqués	39
7	Paramètres physiques et physico-chimiques du sol avant et après la culture de pomme de terre	51
8	Pouvoir mycorhizogène des parcelles avant et après la culture de pomme de terre	52
9	Croissance des plants de pomme de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%).	56
10	Rendement (nombre et poids) selon le calibre des tubercules de plants de pomme de terre de terre inoculés et non inoculés en présence des trois doses de NPK (0%, 50% et 100%).	61

Annexes

Annexe 1

Formule des calcules des paramètres de l'infection CMA définies par Trouvelot et *al.*, (1986).

1. La fréquence de mycorhization (F) :

F%= 100(N-n0) à / N

N : nombre de fragment observés

N0 : nombre de fragments sans traces de mycorhization.

2. L'intensité de mycorhization du cortex radiculaire (M et m) :

M%=(95 n5+70 n4 +30 n3 +5 n2 +n1)/N

M%=(95 n5+70 n4 +30 n3 +5 n2 +n1 / (N-n0)

M : l'intensité de mycorhization du cortex radiculaire entier.

m : l'intensité de mycorhization de la partie endomycorhizée du système racinaire.

n5, n4, n3, n2, n1 : sont respectivement les nombres de fragments notés dans les cinq classes de l'échelle d'intensité de colonisation du cortex radiculaire.

3. La teneur arbusculaire (A et a) :

a %=(100 m A3+50 m A2+ 10 m A3)/100 A %= a× M /100

a: la teneur arbusculaire dans la partie endomycorhizée du système racinaire.

A : la teneur arbusculaire dans le cortex radiculaire.

m A3, m A2, m A1 : sont le pourcentage de mycorhization de qualité arbusculaire donnée, calculés suivant le model :

m A1 = (95 n5 A1 + 70 n4 A1 +30 n3 A1 + 5 n2 A1) F/M (N-n0)

n5 A1, n4 A1, n3 A1, n2 A1 : sont respectivement les nombres de fragments notés dans les classes de l'échelle d'évaluation de la présence des vésicules et des arbuscules comme suit :

5 A1, 4 A1 ,3 A1, 2 A1, 1 A1.

Annexe 2

Table de Cochran (1950).

Table of Most Probable Numbers for Use with 10-Fold Dilutions and 5 Tubes per Dilution.

P_1	P_2	Most probable number for indicated values of P_3					
		0	1	2	3	4	5
0	0	-	0,018	0,036	0,054	0,072	0,090
0	1	0,018	0,036	0,055	0,073	0,091	0,11
0	2	0,037	0,55	0,074	0,092	0,11	0,13
0	3	0,056	0,074	0,093	0,11	0,13	0,15
0	4	0,075	0,094	0,11	0,13	0,15	0,17
0	5	0,094	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19
1	0	0,020	0,040	0,060	0,090	0,10	0,12
1	1	0,040	0,061	0,081	0,10	0,12	0,14
1	2	0,061	0,082	0,10	0,12	0,15	0,17
1	3	0,093	0,10	0,13	0,15	0,17	0,19
1	4	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,22
1	5	0,13	0,15	0,17	0,19	0,22	0,24
2	0	0,045	0,068	0,092	0,12	0,14	0,16
2	1	0,068	0,092	0,12	0,14	0,17	0,19
2	2	0,093	0,12	0,14	0 ,17	0,19	0,22
2	3	0,12	0,14	0,17	0,20	0,22	0,25
2	4	0,15	0,17	0,20	0,23	0,25	0,29
2	5	0,17	0,20	0,23	0,26	0,29	0,32
3	0	0,078	0,11	0,13	0,16	0,20	0,23
3	1	0,11	0,14	0,17	0,20	0,23	0,27
3	2	0,14	0,17	0,20	0,24	0,27	0,31
3	3	0,17	0,21	0,24	0,28	0,31	0,35
3	4	0,21	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40
3	5	0,25	0,29	0,32	0,37	0,41	0,45
4	0	0,13	0,17	0,21	0,25	0,30	0,36
4	1	0,17	0,21	0,26	0,31	0,36	0,42
4	2	0,22	0,26	0,32	0,38	0,44	0,50
4	3	0,27	0,33	0,39	0,45	0,52	0,59
4	4	0,34	0,40	0,47	0,54	0,62	0,69
4	5	0,41	0,48	0,56	0,64	0,72	0,81
5	0	0,23	0,31	0,43	0,58	0,76	0,95
5	1	0,33	0,46	0,64	0,84	1,1	1,3
5	2	0,49	0,70	0,95	1,2	1,5	1,8
5	3	0,79	1,1	1,4	1,8	2,1	2,5
5	4	1,3	1,7	2,2	2,8	3,5	4,3
5	5	2,4	3,5	5,4	9,2	16	-

Annexe 3

Grille d'évaluation de l'infection

		1				2				3				4				5			
	0	A_3	A_2	A_1	A_0	A_3	A_2	A_1	A_0	A_3	A_2	A_1	A_0	A_3	A_2	A_1	A_0	A_3	A_2	A_1	A_0
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30																					
ToT																					