

# UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



## ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE, DE LA SANTE ET DE L'ENVIRONNEMENT

### FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2014      N° d'ordre : 095

#### THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Production et Protection des végétaux

Présentée par : M. Bathie SARR

## Évaluation des pratiques culturales sur la mycorhization et la production de trois variétés de Pomme de terre obtenues par vitrométhodes

Soutenue le 22/02/2014 devant le jury composé de :

<b><u>Président</u></b>	<b>M. Kandioura NOBA</b>	<b>Professeur Titulaire</b>	<b>UCAD, Dakar</b>
<b><u>Rapporteurs</u></b>	<b>M. Mbaye DIOP</b>	<b>Maître de Recherches</b>	<b>ISRA, Bambey</b>
	<b>M. Ibrahima NDOYE</b>	<b>Professeur Titulaire</b>	<b>UCAD, Dakar</b>
	<b>M. Samba Ndao SYLLA</b>	<b>Professeur Titulaire</b>	<b>UCAD, Dakar</b>
<b><u>Examineurs</u></b>	<b>M. Tahir Abdoulaye DIOP</b>	<b>Professeur Titulaire</b>	<b>UCAD, Dakar</b>
	<b>M. Abdoul Aziz MBAYE</b>	<b>Maître de Recherches</b>	<b>ISRA, St Louis</b>

---

**Directeur de thèse : M. Tahir Abdoulaye DIOP**

## THESE DE DOCTORAT

**Spécialité :** Production et Protection des végétaux

**Nom et prénoms du Candidat :** SARR Bathie

**Titre de la thèse :** Évaluation des pratiques agricoles sur la mycorhization et la production de trois variétés de Pomme de terre obtenues par vitrométhodes

**Date et lieu de soutenance :** 22/02/2014 Faculté des sciences et Techniques, UCAD Dakar

**Jury :**

<b>M. Kandiouura NOBA</b>	<b>Professeur Titulaire</b>	<b>Président</b>
<b>M. Mbaye DIOP</b>	<b>Maître de Recherches</b>	<b>Rapporteur externe</b>
<b>M. Ibrahima NDOYE</b>	<b>Professeur Titulaire</b>	<b>Rapporteur interne</b>
<b>M. Samba Ndao SYLLA</b>	<b>Professeur Titulaire</b>	<b>Rapporteur interne</b>
<b>M. Tahir Abdoulaye DIOP</b>	<b>Professeur Titulaire</b>	<b>Examineur</b>
<b>M. Abdoul Aziz MBAYE</b>	<b>Maître de Recherches</b>	<b>Examineur</b>

### Résumé

La pomme de terre (*Solanum tuberosum*) est la principale denrée alimentaire non céréalière. Elle est considérée comme la première production pouvant permettre la lutte contre la faim et la pauvreté dans le monde. Au Sénégal, elle constitue la quatrième production maraichère. Cependant, les besoins en consommation sont fortement dépendants de l'importation. A cela s'ajoute, l'envahissement d'un cortège de pathogènes pendant le semis des tubercules. Face à ces défis d'améliorer la production tout en préservant l'environnement, l'objectif général de notre étude était d'évaluer l'utilisation de certaines pratiques culturales sur la culture et la mycorhization de la pomme terre. Trois objectifs spécifiques étaient définis ; (i) déterminer l'efficacité des meilleurs couples symbiotiques dans la production de pomme de terre au champ ; (ii) évaluer l'impact des insecticides sur la mycorhization et le développement de la pomme de terre ; (iii) évaluer l'influence de la litière foliaire sur la mycorhization et le développement de la pomme de terre. Les vitroplants de trois variétés (Aïda, Atlas et Adessa) de pomme de terre sont utilisés dans les pratiques usuelles de sa production. Les données obtenues sont analysées avec le logiciel XLSTAT. La réponse à la mycorhization des trois variétés de pomme de terre montre une variabilité de comportement envers les souches inoculées. Les dépendances mycorhiziennes les plus significatives sont observées chez les couples Atlas-*Glomus mosseae* et Aïda-*Glomus mosseae*. Au champ, le comportement de ces couples performants est testé, dans les pratiques culturales usuelles. Après 50 jours de culture, un arrêt de croissance et l'apparition de maladies bactériennes sont observées, malgré l'inoculation des variétés par le *Glomus mosseae*. L'évaluation en serre des intrants chimiques montre que l'insecticide systémique (carbofuran) n'inhibe pas l'installation et le développement du champignon lorsqu'il est utilisé après 3 semaines d'inoculation. Par contre, l'insecticide de contact (chlorpyrifos-éthyl) est performant quant il est appliqué avant la symbiose. L'utilisation de fertilisants organiques à base de litière (*Hadwickia binata* ou *Azadirachta indica*) est aussi compatible à la mycorhization des racines de vitroplants de pomme de terre. Cet effet bénéfique est fonction de la dose et de la nature de la litière apportée. A la dose de 25 g la litière de *Hadwickia binata* favorise la production du nombre de minitubercules chez les deux variétés Aïda et Atlas mycorhizées. A la dose de 50 g elle stimule plus la production en biomasse aérienne. La litière d'*Azadirachta indica* à 50 g entraîne la production de calibre de minitubercules la plus significative chez Aïda mycorhizée et à 25 g, seul le nombre de minitubercules de la variété Atlas est amélioré de manière significative. L'ensemble de ces résultats permet de déceler d'une part, la période propice pour l'inoculation des champignons mycorhiziens des racines de pomme avec l'application des insecticides au sol et d'autre part, de savoir la nature et la dose de litières qui favorisent le meilleur rendement de pomme de terre.

**Mots clés :** *Solanum tuberosum*, champignon mycorhiziens arbusculaires, insecticide systémique, insecticide de contact, litières

## **Name and first name: SARR Bathie**

### **Summary**

The potato (*Solanum tuberosum*) is the main not cereal foodstuff. It is considered as the first production which can allow the fight against the hunger and the poverty in the world. In Senegal, it establishes the fourth truck-farming production. However, needs in consumption are strongly dependent on the import. Four specific objectives are defined; (i) to determine the best symbiotic couples of various varieties of potato and fungus MA in greenhouse; (ii) to estimate the efficiency of the successful couples in the usual conditions of production of potato; (iii) to estimate the impact of insecticides on the mycorrhization and the development of the potato; (iv) to estimate the influence of the foliar litter on the mycorrhization and the development of the potato. The vitroplants of three varieties (Aïda, Atlas and Adessa) of potato is used in the usual practices of his production. The obtained data are analyzed with the software XLSTAT. The mycorrhization of three varieties of potato shows a variability of behavior to the inoculated fungus. The most significant mycorrhization dependences are observed at the couples Atlas-*Glomus mosseae* and Aïda-*Glomus mosseae*.

The behavior of these successful couples in the field with the cultural practices gives low results onto the yield in tubers of potato. A stop of growth after 50 days of culture, accompanied with losses of yields and the appearance of bacterial diseases are observed in spite of the inoculation of the varieties by *Glomus mosseae*. The evaluation in greenhouse of the chemical inputs shows that the systematic insecticide (carbofuran) does not inhibit the installation and the development of the fungus when it is used after 3 weeks of inoculation. On the other hand the insecticide of contact (chlorpyrifos-éthyl) is successful quant it is applied before the symbiosis. The use of organic fertilizers with litter (*Hadwickia binata* or *Azadirachta indica*) is also compatible with a good expression of the mycorrhization of the roots of vitroplants by potato. This beneficial effect is a function of the dose and the nature of the brought litter. In the dose of 25 g the litter favorises the production of the number of minitubers to both varieties Aïda and Atlas. In the dose of 50 g this litter stimulates more the production in air biomass. The litter of *Azadirachta indica* in 50 g entraine the most significant production of calibre of minitubers at Aïda mycorrhizée and in 25 g, only the number of minitubers of the variety Atlas is significantly improved. All these results allows to reveal on one hand, the convenient period for the inoculation of mycorrhiziens fungus of the roots of apple with the application of insecticides on the ground and on the other hand, to know the nature and the dose of litters which favor the best yield on potato.

**Key words:** *Solanum tuberosum*, arbuscular mycorrhizal fungi, litter, insecticides, micropropagation

---

---

## DEDICACES

---

---

*A Allah, « le Connaisseur de ce qui est caché et de ce qui est apparent ».*

*A mon père, si j'ai eu le courage aujourd'hui de m'intéresser à la recherche, c'est grâce à ce moral de fer que tu m'as inculqué depuis mon enfance. Je suis fier d'être ton fils et j'espère ne pas te décevoir. Que Dieu te garde aussi longtemps pour que tu continue de voir les œuvres de l'homme que tu as formé.*

*A ma mère, tu es toujours présente pour me remonter le moral. Merci pour tout l'amour que tu m'as toujours couvert.*

*A ma chère épouse Ndéye Téning FAYE, tu es la source de mon inspiration. Reçois ici toute ma reconnaissance pour ton soutien morale et ta sympathie pendant les durs moments de la vie. Que notre amour continue pour toujours.*

*A ma sœur Djické SARR, je ne pourrai jamais atteindre ce niveau sans ton apport financier et ton soutien moral. Que Dieu te garde pour que tu puisses un jour savourer le fruit de l'être que tu as toujours soutenu.*

*A M. Amath CISSE, vous avez été un père adorable pour moi. Vos qualités humaines imposent de vous du respect et de l'admiration. Pendant toutes ces années que j'ai vécues sous votre couverture, je ne me suis jamais senti étranger à votre famille, merci pour tout.*

*A Mme Oulimata DIOME CISSE, il m'est très difficile de vouloir exprimer en quelques mots toute la bonté en vous car tout ce que je vais dire a été surement dit ou redit. Néanmoins je vais tenter de restituer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à votre égard et à toute la famille Diomène.*

*A mon beau père M. Adama FAYE, les mots ne pourraient exprimer toute ma reconnaissance envers vous. Vos qualités humaines et votre rigueur dans le respect des valeurs font de vous un papa adorable. Et je ne saurai passer sous silence toute la tendresse manifestée par la famille fayène à l'endroit de mon fils.*

*A mes alter égo Mbaye SENE et Mbaye SECK, à travers vous j'ai appris à rester moi-même.*

*A mes frères et sœurs Amadou Niadiar SARR, Amath SARR, Pape SARR, Pape Malick FAYE, Birane FAYE, Malick FAYE, Joseph FAYE, Ndéye Sophie SARR, Ami Colè SARR, Rocky SARR, Ndéye Fatou FAYE, vos recommandations m'ont permis d'aller au delà de mes efforts. Restons toujours unis.*

*A mon Grand et ami Assane DIOME, tes encouragements et ton soutien m'ont été d'un grand apport.*

*A mes nièces, neveux et mon fils aîné, je vous exhorte à faire mieux que moi.*

*A mes compagnons de la fac, Diawar SARR, Ibrahima NDIAYE, Bamba NDIAYE, Ady DIENG, Pape BA, le chemin a été long et cahoteux, mais grâce à votre solidarité, je suis arrivé au bout du tunnel.*

---

---

## **REMERCIEMENTS**

---

---

*Aux membres du jury :*

- ❖ *A M. Kandioura NOBA, je vous exprime ma profonde reconnaissance pour l'honneur que vous me faites en acceptant encore de présider à la commission d'examen de ma soutenance. Je ne peux passer sous silence l'intérêt que vous accordez à mes travaux. Vos qualités intellectuelles et humaines imposent le respect et l'admiration.*
  - ❖ *A M. Mbaye DIOP, je vous exprime toute ma gratitude pour avoir accepté de juger ce travail. Soyez assuré de mon profond respect et recevez toute ma reconnaissance.*
  - ❖ *A M. Abdoul Aziz MBAYE, c'est un honneur que vous me faites de vous avoir dans mon jury pour profiter de votre pertinence scientifique. Je vous remercie très sincèrement.*
  - ❖ *A M. Samba Ndao SYLLA, je vous remercie pour l'opportunité que vous m'offrez à profiter de vos compétences avérées pour l'évaluation de ce travail.*
  - ❖ *A M. Ibrahima NDOYE c'est une fierté et un grand privilège pour moi de bénéficier de votre disponibilité pour avoir accepté de juger ce travail. Veuillez trouver ici l'expression de mes vifs remerciements.*
  - ❖ *Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadreur M. Tahir Abdoulaye DIOP qui a guidé ce travail malgré ses nombreux engagements. Sa rigueur et sa pertinence scientifiques m'ont permis de mener à bien ce travail. Dans le Laboratoire (LBC) outre les savoir faire acquis en biotechnologies végétales, il a développé en nous un esprit d'équipe et d'entreprenariat dans une atmosphère sympathique. Soyez assuré cher collègue de ma très haute considération.*
- A M. Meissa DIOUF qui m'a initié à la recherche, reçois ici toute ma reconnaissance pour tous les efforts que tu as consentis à l'encadrement de mon diplôme de DEA.*
- A Mme DIENG, la Proviseure du lycée de Sangalkan, à travers vous, je remercie tout le personnel de l'établissement pour leurs compréhensions et leurs encouragements dans l'accomplissement de ce travail.*

*Aux Membres du Laboratoire de Biotechnologies des Champignons :*

*A **Fatimata NDIAYE** et **Anicet MANGA** qui ont contribué pleinement dans la correction d'articles de ce travail.*

*Je remercie également **Dr. Adama DIOUF**, **Dr. Nalla MBAYE** et **Dr. Mansour THIAO** qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me conseiller..*

*Une mention spéciale est destinée à mes collègues : **Idy Carras SARE**, **Malick NDIAYE**, **El. Malick LEYE**, **Bassirou DIALLO**, **Demba DIAW**, **Ndiogou GUEYE**, **Adiouma DANGUE** et **Ndèye Fatou DEME**.*

*Aux techniciens, **Ousseynou GUEYE** et **Maurice SAGNA** pour vos contributions techniques.*

*A l'**Association des Producteurs de Sangalkam** qui ont mis gratuitement à notre disposition le matériel agricole et le site d'étude.*

Tous nos remerciements aux **FNRAA** (Fonds National pour la Recherche Agricole et Agro-Alimentaire) pour le soutien financier de ce travail.

---



---

<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>pages</b>
<b><u>Figure 1</u></b> : Caractéristiques morphologiques et cycle végétatif de la pomme de terre .....	7
<b><u>Figure 2</u></b> : Valeur énergétique de quelques aliments d'origine végétale .....	8
<b><u>Figure 3</u></b> : Teneur moyenne en vitamine C de quelques légumes.....	9
<b><u>Figure 4</u></b> : Dépendance mycorhizienne de trois variétés de pomme de terre en serre.....	47
<b><u>Figure 5</u></b> : Effet des champignons mycorhiziennes sur la biomasse aérienne de la pomme de terre en serre.....	49
<b><u>Figure 6</u></b> : Effet des champignons mycorhiziennes sur le nombre de minitubercules de la pomme de terre en serre .....	50
<b><u>Figure 7</u></b> : Effet mycorhization sur le pourcentage de levées des variétés Aïda et Atlas .....	66
<b><u>Figure 8</u></b> : Effet mycorhization sur la hauteur moyenne des plants de pomme de terre .....	67
<b><u>Figure 9</u></b> : Pourcentage du nombre de plantes atteintes de pourriture brune chez la pomme de terre mycorhizée .....	68
<b><u>Figure 10</u></b> : Effet des insecticides sur la colonisation mycorhizienne des racines de deux variétés de la pomme de terre ( <i>Solanum tuberosum</i> ) .....	79

---

---

**LISTE DES PHOTOS..... pages**

---

---

**Photo 1:** Aspect des vitroplants de Atlas en chambre de culture après 10 jours..... 42

**Photo 2 :** Production d'inoculum mycorhizien arbusculaire en serre..... 44

**Photo 3:** Aspect des vitroplants de Atlas après deux semaines de culture en serre..... 48

**Photo 4:** Puit d'irrigation utilisé au champ ..... 62

**Photo 5:** Dispositif d'irrigation utilisé au champ ..... 62

**Photo 6:** Inoculation au champ des plants de pomme de terre ..... 64

**Photo 7:** Désherbage et binage des parcelles de pomme de terre ..... 64

**Photo 8:** Aspect des tubercules infectés d'un pied de Aïda..... 69

**Photo 9:** Aspect des tubercules infectés d'un pied de Atlas ..... 69

---

---

**LISTE DES TABLEAUX..... pages**

---

---

**Tableau 1:** *Composition chimique de la pomme de terre pour 100 g de matière fraîche ..... 8*

**Tableau 2 :** *Relation entre les symptômes de la maladie et les mécanismes liés à la présence du pathogène dans la plante hôte (Pomme de terre)..... 15*

**Tableau 3 :** *Principaux ravageurs de la pomme de terre ..... 16*

**Tableau 4:** *Désinfection des germes de pomme de terre ..... 41*

**Tableau 5 :** *Caractéristiques physico-chimiques du sable de plage ..... 41*

**Tableau 6:** *Caractéristiques physico-chimiques du sol de culture ..... 55*

**Tableau 7:** *Caractéristiques morpho-agronomiques des variétés de pomme de terre étudiées ..... 56*

**Tableau 8:** *Schéma du dispositif expérimental ..... 58*

**Tableau 9:** *Effets du champignon mycorhizien *Glomus mosseae* sur le rendement (tonne / hectare) de deux variétés de pomme de terre cultivées au champ ..... 67*

**Tableau 10:** *Colonisation mycorhizienne racinaire de deux variétés de pomme de terre..... 74*

**Tableau 11:** *Caractéristiques des pesticides utilisés ..... 74*

**Tableau 12:** *Effet de deux insecticides sur la biomasse aérienne, le nombre et la calibre des minitubercules de deux variétés de Pomme de terre (*Solanum tuberosum*)..... 78*

**Tableau 13:** *Caractéristiques physico-chimiques des litières utilisées ..... 84*

**Tableau 14:** *Biomasse aérienne (BA) Nombre de minitubercules (NM) et le calibre des minitubercules (CM) de deux variétés de pomme de terre inoculées avec *Glomus mosseae* ..... 88*

**Tableau 15:** *Effet de la colonisation mycorhizienne de racine de pomme de terre à différente dose de litières..... 90*

**Tableau 16:** *Interaction entre variétés-inocula-litières..... 90*

---

---

**LISTE DES ANNEXES ..... pages**

---

---

**Annexe I Milieu de culture ..... i**

**Annexe I.1. Milieu de cultures pour croissance de vitroplants ..... i**

**Annexe I.1.1. MS standard (Murashing et Skoog, 1962).. ..... i**

**Annexe I.1.2. Milieu de base MS ..... i**

**Annexe I.1.3. Vitamine de Morel et Wetmore..... ii**

**Annexe II. Solution minérale de long Ashton (Hewitt, 1966)..... iii**

**Annexe III. Processus de la méthode Grindline Intersection. .... iv**

**Annexe IV. Méthode de Trouvelot (1965) ..... v**

**Annexe V. Page de garde Article Publié ..... vi**

**Annexe VI Page de garde Communication orale ..... vii**

**Annexe VII : Table de Cochran..... viii**

---

---

## *LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES*

---

---

°C : degré Celcius

**CDH** : Centre pour le Développement de l'Horticulture

**CFA** : Communauté Financière Africaine

**CO<sub>2</sub>** : dioxyde de carbone

**DDT** : Dichlorodiphényltrichloroéthane

**FAO** : Food and Agriculture Organisation (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)

**FNRAA** : Fonds National pour la Recherche Agricole et Agro-Alimentaire

**G.** : *Glomus*

**ISRA** : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

**KOH** : Hydroxyde potassium

**LBC** : Laboratoire de Biotechnologies des Champignons

**LSD** : Least Significant Difference (plus petite différence significative)

**m.a.** : matière active

**MA** : Mycorhizien Arbusculaire

**min** : minute

**NPK** : Azote, Phosphore, Potassium

**pH** : potentiel Hydrogène

**S.** : *Solanum*

**UCAD** : Université Cheikh Anta DIOP

**USA** : United States of America (Etats Unies d'Amérique)

**µg** : microgramme

**µm** : micromètre

**C/N** : Carbone/Azote

---

---

## *Table des matières*

---

---

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1/ Synthèse bibliographique</b> .....	<b>4</b>
<b>A/ Pomme de terre</b> .....	<b>4</b>
I. Généralités sur la pomme de terre.....	4
1. Origines et expansion .....	4
2. Systématique.....	5
2.1. Appareil aérien .....	5
2.2. Appareil souterrain .....	6
2.2.1. Description du tubercule .....	6
2.2.2. Composition chimique du tubercule.....	8
2.2.3. Valeur nutritive du tubercule.....	8
3. Différentes catégories de pomme de terre .....	9
4. Physiologie de la pomme de terre.....	10
4.1. Phase de croissance .....	10
4.2. Phase de tubérisation .....	10
4.3. Phase de dormance .....	10
4.4. Phase de germination.....	11
5. Exigences écologiques de la pomme de terre.....	11
5.1. Exigences climatiques .....	11
5.2. Exigences édaphiques.....	11
5.3. Exigences biotiques .....	12
6. Intérêt de la plante .....	12
6.1. Intérêt économique .....	12
6.2. Intérêt alimentaire.....	13
7. Contraintes liées à la production de la pomme de terre.....	13
7.1. Manque de semences de qualité .....	13
7.2. Pathologies et ravageurs de la culture .....	14
8. Lutte contre les ennemis de la culture .....	19
8.1. Bactéries .....	19
8.2. Champignons.....	19

8.3. Insectes, Acariens et Nématodes .....	20
II. Micropropagation de la Pomme de terre.....	22
1. Définition.....	22
2. Intégration de la micropropagation dans la culture de la pomme de terre .....	22
3. Facteurs limitants la micropropagation .....	23
4. Acclimatation des plants de pomme de terre.....	24
<b>B/ Mycorhization .....</b>	<b>25</b>
1. Notion de mycorhizes.....	25
2. Biologie des champignons MA .....	25
3. Rôle des champignons MA dans l’agriculture .....	26
3.1. Rôle des champignons MA sur la croissance des plantes .....	26
3.2. Rôle des champignons MA sur la protection des cultures.....	27
3.2.1. Mécanismes d’action protectrice des MA sur la plante.....	28
3.2.2. Mécanisme d’actions protectrices des MA contre le parasite .....	30
3.2.3. Mécanisme d’actions protectrices des MA sur le sol et sur la modification de la microflore.....	30
4. Mycorhization de la pomme de terre micropropagée .....	31
<b>C/ Matière Organique .....</b>	<b>32</b>
1. Généralité sur la litière .....	32
2. Constituants des résidus végétaux .....	33
3. Effet de la litière sur la croissance et la production des plantes .....	33
4. Matière organique et mycorhization.....	34
<b>D/ Pesticides.....</b>	<b>35</b>
1. Utilisation des pesticides au Sénégal.....	35
1.1. Produits utilisés.....	35
1.2. Fréquence d’utilisation des pesticides .....	35
1.3. Toxicité des pesticides.....	35
1.4. Modes d’action des pesticides .....	36
2. Impact des insecticides sur la mycorhization .....	36
<b>CHAPITRE 2/ Réponses de trois variétés de Pomme de terre à la mycorhization .....</b>	<b>38</b>
Avant propos.....	38
1. Introduction .....	39
2. Méthodologie .....	40
2.1. Matériel végétal .....	41

2.1.1. Germination .....	42
2.1.2. Procédé de désinfection des germes .....	41
2.1.3. Production de vitroplants.....	42
2.2. Matériel fongique .....	41
2.3. Inoculation des plants de pomme de terre .....	43
2.4. Dispositif expérimental.....	43
2.5. Paramètres mesurés .....	43
2.6. Analyse statistique.....	44
<b>3. Résultats .....</b>	<b>45</b>
3.1. Dépendance mycorhizienne.....	45
3.2. Biomasse aérienne .....	46
3.3. Nombre de minitubercules.....	47
<b>4. Discussion .....</b>	<b>49</b>
4.1. Développement végétal et Production.....	51
4.2. Mycorhization.....	49
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>51</b>
<b><i>CHAPITRE 3 / Comportement au champ de deux variétés de Pomme de terre .....</i></b>	<b>54</b>
Avant propos .....	54
<b>1. Introduction .....</b>	<b>55</b>
<b>2. Méthodologie.....</b>	<b>57</b>
2.1. Site expérimental .....	57
2.1.1. Caractérisation du sol .....	57
2.1.2. Potentiel mycorhizien du sol étudié.....	58
2.1.2.1. Préparation de l'échantillon.....	58
2.1.2.2. Conditions de culture.....	58
2.1.2.3. Observation et estimation du MPN .....	59
2.2. Matériel végétal .....	59
2.3. Matériel fongique .....	59
2.4 Dispositif expérimental et plantation.....	60
2.4.1. Aménagement et préparation des parcelles expérimentales .....	60
2.4.2. Dispositif expérimental.....	60
2.4.3. Plantation .....	61
2.5. Entretien.....	62
2.5.1. Irrigation .....	62

2.5.2. Traitement phytosanitaire .....	63
2.5.3. Fertilisation.....	63
2.5.4. Inoculation .....	63
2.6. Suivi des cultures.....	64
2.7. Paramètres mesurés .....	64
2.7.1. Pourcentage de levées des minitubercules .....	64
2.7.2. Croissance en hauteur .....	65
2.7.3. Aspect phytosanitaire .....	65
2.7.4. Rendement en tubercules.....	65
2.7.5. Fréquence de mycorhization .....	65
2.8. Analyses statistiques.....	65
<b>3. Résultats .....</b>	<b>66</b>
3. Paramètres de croissance des plantes .....	66
3.1. Pourcentage de levées des minitubercules.....	67
3.2. Croissance en hauteur.....	64
3.3. Aspect phytosanitaire .....	68
3.4. Rendement.....	69
3.5. Mycorhization.....	70
<b>4. Discussion .....</b>	<b>71</b>
4.1. Développement végétatif .....	71
4.2. Mycorhization.....	71
4.3. Protection phytosanitaire .....	72
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>73</b>
<b>CHAPITRE 4 /Effet de deux types d'insecticides sur la mycorhization arbusculaire et le développement de deux variétés de Pomme de terre (<i>Solanum tuberosum</i>).....</b>	<b>74</b>
Avant propos .....	74
<b>Introduction .....</b>	<b>75</b>
<b>2. Matériel et Méthode .....</b>	<b>76</b>
2.1 Matériel végétal .....	76
2.2. Matériel fongique .....	76
2.3. Pesticides utilisés .....	76
2.4. Conduite de la culture et dispositif expérimental .....	76
2.5. Paramètres mesurés .....	77
2.6. Analyse statistique.....	77

<b>3. Résultats .....</b>	<b>78</b>
3.1. La mycorhization .....	78
3.2. Développement végétale et production de minitubercules .....	79
3.2.1. Chez la variété Atlas .....	80
3.2.2. Chez la variété Aïda .....	80
<b>4. Discussion .....</b>	<b>82</b>
4.1. Mycorhization.....	82
4.2. Développement végétal et production de minitubercules .....	83
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>84</b>
<b><i>CHAPITRE 5/ Effet de la litière de deux espèces sylvicoles sur le développement et la mycorhization de plants de Pomme de terre.....</i></b>	<b>85</b>
Avant propos .....	85
<b>Introduction .....</b>	<b>86</b>
<b>2. Matériel et Méthodes.....</b>	<b>87</b>
2.1. Matériel .....	87
2.1.1. Matériel végétal .....	87
2.1.2. Matériel fongique .....	87
2.1.3. Litières .....	87
2.1.4. Analyse sol de culture.....	87
2.2. Méthodes .....	88
2.2.1. Paramètres mesurés .....	88
2.2.2. Analyse statistique.....	88
<b>3. Résultats .....</b>	<b>89</b>
3.1. Effet de la litière sur la biomasse aérienne .....	89
3.2. Effet de la litière sur la production de minitubercules.....	91
3.3. Effet de la litière sur la mycorhization .....	92
3.4. Interaction entre les différents traitements .....	93
<b>4. Discussion .....</b>	<b>94</b>
4.1. Croissance .....	94
4.2. Mycorhization.....	94
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>96</b>
<b><i>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</i></b>	<b>97</b>
1. Conclusion Générale.....	97
2. Perspectives .....	100

<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i> .....	100
<i>ANNEXES</i> .....	126

---

---

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

---

La pomme de terre cultivée, *Solanum tuberosum*, joue un rôle clé dans le système alimentaire mondial. Elle constitue une source importante de revenus et l'une des denrées de base de nombreux pays. Elle est la principale denrée alimentaire non céréalière dont la production mondiale a atteint le chiffre record de 325 millions de tonnes en 2007 (FAO, 2008). L'année internationale de la pomme de terre en 2008 a sensibilisé le monde sur son rôle crucial dans la résolution de problèmes d'ampleur planétaire et notamment la faim, la pauvreté et les menaces qui pèsent sur l'environnement. Pour garantir la sécurité alimentaire des générations présentes et futures, tout en préservant les ressources naturelles dont nous dépendons tous, le choix de la pomme de terre se justifie pour différentes raisons :

- La pomme de terre est cultivée dans plus de 125 pays et consommée quotidiennement par plus d'un milliard de personnes. Les pommes de terre sont cultivées sur plus de 200 000 km<sup>2</sup> de terre, du plateau du Yunnan, en Chine, aux plaines subtropicales de l'Inde, des régions montagneuses équatoriales de l'Uganda aux steppes de l'Ukraine,
- Elle nourrit ceux qui ont faim. Elle produit davantage d'aliments nutritifs sur moins de terre et dans des climats plus rudes que toute autre grande culture. Jusqu'à 85% de la plante est comestible pour l'homme, contre environ 50% pour les autres céréales,
- Les tubercules de la pomme de terre sont nourrissants grâce à leur richesse en glucides, ce qui en fait une bonne source d'énergie. De ce fait, elle constitue une excellente solution pour améliorer la qualité de la ration alimentaire et réduire le taux de mortalité dû à la malnutrition (Lutaladio et Prakash, 2010),
- La vie de centaines de millions d'habitants repose sur la pomme de terre dans les pays en développement. Sa production s'est considérablement développée en Afrique, en Asie et en Amérique latine, passant de 80 millions de tonnes en 1990 au record historique de 188 millions de tonnes en 2010 (FAO, 2012). En Afrique, malgré une production globale supérieure à celle de la patate douce, les superficies cultivées limitées par les conditions climatiques tropicales font que la pomme de terre ne représente que 3,5% de la production agricole, venant juste après la patate douce (5,5%) (CDE, 2009).

La culture de la pomme de terre est contrainte par l'attaque de nombreux pathogènes et ravageurs (champignons, bactéries, virus, vers et larves microscopiques, petits insectes

(Jouan et *al.*, 2001). Le mildiou causé par *Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary, est l'une des maladies les plus redoutables de cette culture. Elle est présente partout dans le monde, là où la culture de la pomme de terre existe et aujourd'hui encore, elle reste le principal facteur limitant à l'échelle mondiale (Duvauchelle et Andrivon, 1996). L'installation et l'évolution de la maladie sont très largement déterminées par les conditions climatiques, notamment l'humidité et la température (Harrison, 1992). Cependant, en Afrique c'est le flétrissement bactérien dû à la bactérie *Ralstonia solanacearum* qui est l'une des plus graves maladies de la pomme de terre (Sidikou, 2002).

Au Sénégal, le développement de la filière est freiné d'abord par la température élevée qui n'est pas souvent favorable à la pomme de terre. La température idéale de sa production se situe entre 15 et 20° C. Ensuite, le manque d'eau qui peut ralentir sa croissance surtout pendant les premières semaines de sa culture. Il ya également indisponibilité des semences au moment opportun et leur prix très élevé (plus de 50% du coût de la culture) (CDE, 2009). Chaque année quelques 60 000 tonnes de pomme de terre de consommation sont importées pour une valeur de 5 milliards de francs CFA (DH, 2012). A cela s'ajoute, malgré l'usage abusif des pesticides, l'envahissement d'un cortège de pathogènes pendant le semis des tubercules (Stevenson et *al.*, 2001).

Fort de ces constats, la disponibilité de semences de pomme de terre peut être assurée par la multiplication *in vitro* ou micropropagation. Cette méthode permet d'obtenir en peu de temps, plusieurs générations de vitroplants exempts de toute contamination (Ranalli 1997 ; Ndiaye et *al.*, 2001). Elle permet également d'assurer la permanence génétique (Dième et *al.*, 2011). Cependant, ces vitroplants sont fragiles au moment de leur acclimatation. D'où, il est suggéré de les inoculer par les champignons mycorhiziens arbusculaires pour améliorer leur capacité de résistance aux stress (Gianinazzi et *al.*, 1989 ; Boxus et *al.*, 1995).

C'est ainsi que l'exploitation des champignons mycorhiziens, représente un enjeu majeur pour une production végétale optimisée et limitant au mieux les intrants chimiques. Aux avantages bien connus des mycorhizes sur la croissance végétale, s'ajoutent plusieurs bénéfiques, notamment l'amélioration de la survie des plantes, de la microflore du sol et de la réduction des stress tant abiotiques que biotiques. Les mycorhizes arbusculaires constituent la symbiose végétale la plus répandue à l'échelle planétaire. Devant une telle panoplie d'avantages pour les plantes et l'environnement,

on pourrait croire que les mycorhizes représentent une panacée à plusieurs problèmes liés à la production et à la protection des végétaux (Dalpé, 2005).

Face à ces défis d'améliorer la production tout en préservant l'environnement, toute approche réaliste visant à réduire l'apport de pesticides et de fertilisants chimiques et à protéger les cultures et la qualité des sols mérite d'être exploitée.

Notre étude s'inscrit dans cette approche et a pour objectif général d'évaluer l'utilisation des pratiques culturales sur la production et la mycorhization de la pomme terre.

Nous nous sommes fixés les objectifs spécifiques suivants :

- Apprécier l'efficacité des meilleurs couples symbiotiques sur le rendement de trois variétés de pomme de terre sous les conditions de sa production au champ.
- Évaluer l'impact des insecticides (contact et systémique) sur la mycorhization et la production de la pomme de terre.
- Évaluer l'influence des litières foliaires (*Azadirachta indica* et *Hadwickia binata*) sur la mycorhization et la production de la pomme de terre.

Suite à cette introduction générale, un premier chapitre de synthèse bibliographique est réalisé. Il s'en suit quatre autres chapitres puis une conclusion générale est dégagée à la fin et des perspectives sont envisagées.

---

---

**CHAPITRE 1:**

*Synthèse Bibliographique*

---

---

## ***A/ POMME DE TERRE***

### **I. GENERALITES SUR LA POMME DE TERRE**

#### **1. Origines et expansion**

La culture de la pomme de terre est un héritage qui nous vient des Andes. Elle fût découverte au Pérou, pour la première fois en 1553 par l'Espagnol Pedro Cieza. C'est plus tard, en 1716, que l'ingénieur Français Frezier employa le terme « pomme de terre » pour désigner les tubercules (Lutaladio et Prakash, 2010).

Les pommes de terre se déclinent en plusieurs milliers de variétés qui présentent des divergences importantes notamment en termes de taille, de forme, de couleur et de qualité culinaire. Malgré cela, elles appartiennent toutes à une seule espèce botanique, *Solanum* (S.). Leurs origines remontent aux variétés développées par les cultivateurs précolombiens. Ces variétés locales andines présentent une extraordinaire diversité morphologique. Elles sont réparties dans l'ensemble de la cordillère des Andes, de l'Ouest du Venezuela au nord de l'Argentine, ainsi qu'au sud du Chili (Spooner, 2009). En dépit des longs débats dont ont fait l'objet les ancêtres sauvages de ces variétés locales, toutes les hypothèses convergent vers un groupe d'environ 20 taxons sauvages tubéreux (*Solanum* section *Petota*). Ils sont très similaires sur le plan morphologique. De ce fait, ils sont désignés sous le terme de complexe *S. brevicaule*, répartis du centre au nord de l'Argentine.

C'est dans la Cordillère centrale que les agriculteurs sont parvenus à sélectionner et à améliorer les premiers spécimens de ce qui allait donner, au fil des millénaires, une diversité inouïe de tubercules. L'espèce *Solanum tuberosum*, ne contient en réalité qu'une infime partie de la diversité génétique contenue dans les 5000 variétés de pommes de terre encore cultivées de nos jours dans les Andes (Salaman, 1985 ; IYP, 2008).

Rapportée en Europe par les conquistadors espagnols, la pomme de terre a d'abord suscité quelques hésitations avant d'être finalement largement adoptée par les agriculteurs. Du XVIII<sup>ème</sup> au XXI<sup>ème</sup> siècle, le colonialisme européen et l'émigration ont propagé la culture de la pomme de terre aux quatre coins du monde (Rios et al., 2007). Depuis les années 1990, la production s'est considérablement développée en Afrique, en Asie et en Amérique latine, passant de 80 millions de tonnes en 1990 au record historique de 180 millions de tonnes en 2009. En Afrique, malgré une

production globale supérieure à celle de la patate douce, les superficies cultivées limitées par les conditions climatiques tropicales font que la pomme de terre ne représente que 3,5% de la production agricole, venant juste après la patate douce (5,5%). La consommation annuelle par habitant est de 8 kg en Afrique, contre 11,7 kg en Asie, 20,6 kg en Amérique Latine, 58,4 kg aux USA, 79,3 kg en Europe, 80,3 kg dans les anciens pays de l'Europe de l'Est (Lutaladio et Prakash, 2010).

## 2. Systématique

La classification de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) est fonction de la morphologie et des caractéristiques florales. L'espèce appartient à la classe des Dicotylédones, à la sous-classe des Sympétales, à l'ordre des Solanales, à la famille des *Solanaceae* et au genre *Solanum*. Elle partage ce genre avec au moins 1000 autres espèces, entre autres la tomate, l'aubergine européen et l'aubergine africain. La pomme de terre comprend 1000 espèces dont plus de 200 sont tubéreuses (Hawkes, 1990). Seules 8 espèces sont cultivées pour la production des tubercules. Selon des études récentes, *Solanum tuberosum* est divisée en deux groupes de cultivars légèrement différents : *Andigenum*, adaptée aux jours courts et cultivée surtout dans les Andes, et *Chilotanum*, aujourd'hui cultivée dans le monde entier. On pense que le groupe *Chilotanum*, appelé également pomme de terre « européenne », est issu des cultivars andins introduits initialement au Chili puis, de là, en Europe au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle (Ovchinikova, 2011).

La pomme de terre est une plante tétraploïde et allogame qui, du fait qu'elle a la capacité de se propager végétativement à partir de ses organes souterrains, est considérée comme une plante vivace.

### 2.1. Appareil aérien

La partie aérienne de la plante est annuelle. Les tiges (2 à 12 selon le génotype) vertes, brunâtres ou même rougeâtres sont plus ou moins dressées et munies de côtes. Les feuilles sont alternes, composées imparipennées. Elles comportent 7 à 15 grandes folioles latérales primaires flanquées de folioles secondaires, de folioles intercalaires et de foliolules (**Figure 1**). Ces dernières se distinguent par leur mode d'insertion sur le rachis. Les feuilles sont disposées sur la tige à raison d'une feuille par nœud, chaque feuille portant à son aisselle un bourgeon axillaire latent.

La floraison est favorisée par certaines conditions de milieu comme les conditions sahéliennes (jours longs, fortes intensité lumineuse, températures élevées) (Sidikou et *al.*, 2002).

L'inflorescence est en cyme bipare qui peut comporter 8 à 10 fleurs. L'autogamie est quasi absolue. Les fleurs sont souvent stériles. La couleur des fleurs (blanche, mauve, bleutée, rouge violacé) caractérise les variétés.

Le fruit est un bais sphérique ou ovoïde de 1-6 cm de diamètre, de couleur verte brun violacé jaunissant à la maturité. Il peut contenir jusqu'à 200 graines (Rousselle et *al.*, 1996).

## 2.2. Appareil souterrain

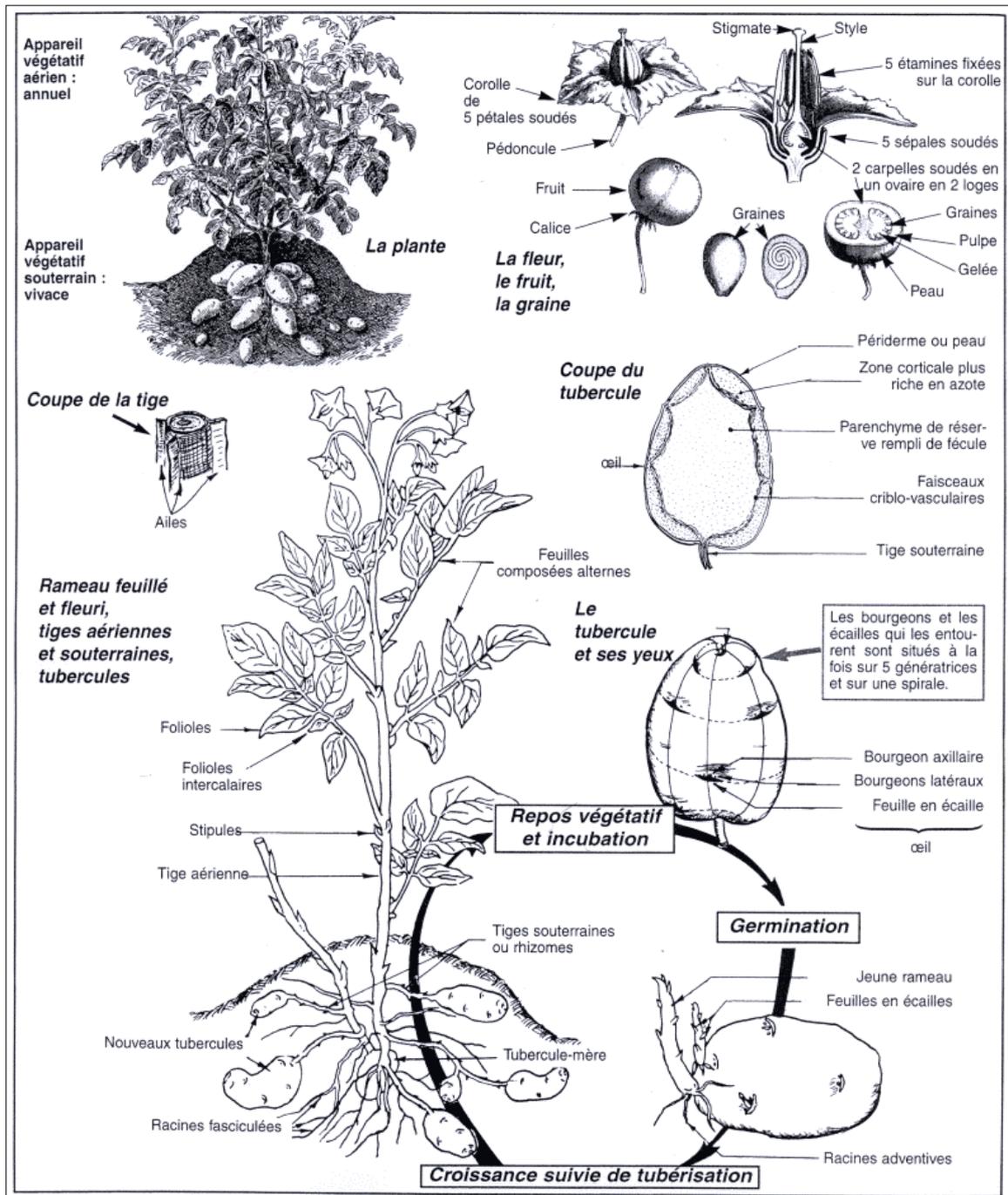
L'appareil souterrain comprend le tubercule mère desséché, les stolons (tiges souterraines diagéotropes) portant éventuellement des tubercules fils dans leur région subapicale ainsi que des racines adventives. Comme toute tige, il porte, à l'aisselle de feuilles avortées (les écailles), des bourgeons dormants situés au fond d'une dépression (l'œil), soulignée par la feuille écailleuse très réduite (**Figure 1**). L'appareil souterrain est la partie la plus intéressante de la plante puisqu'on y trouve les tubercules qui confèrent à la pomme de terre sa valeur alimentaire.

### 2.2.1 Description du tubercule

Le tubercule représente donc l'extrémité tubérisée de la tige souterraine. De forme plus ou moins arrondie ou allongée, il peut mesurer jusqu'à 10 cm de long sur 8 cm de diamètre. Il est recouvert de périoderme de couleur beige, rouge ou mauve foncée et parsemé de bourgeons à l'aisselle de minuscules écailles.

En coupe médiane, le tubercule de pomme de terre présente, de l'extérieur vers l'intérieur :

- un périoderme (peau) ;
- une zone corticale, peu épaisse, de couleur plus foncée et riche en azote, limitée intérieurement par des faisceaux libéro-ligneux ;
- un parenchyme de réserve très riche en amidon, dont la couleur et les qualités organoleptiques varient en fonction des génotypes (**Figure 1**).



**Figure 1** : Caractéristiques morphologiques et cycle végétatif de la pomme de terre (Soltner, 1980).

### 2.2.2 Composition chimique du tubercule

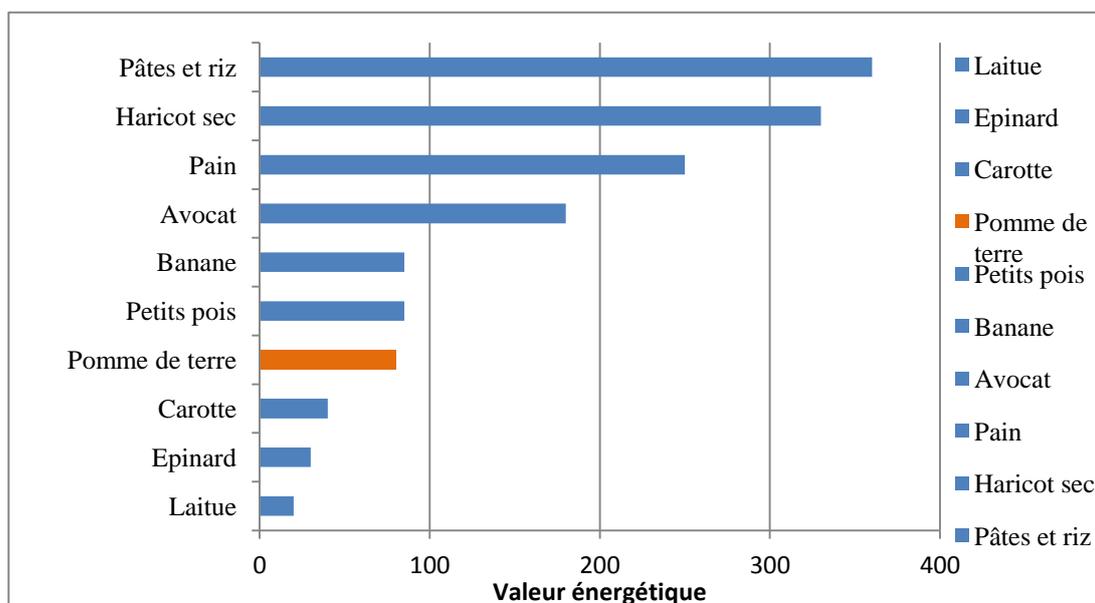
Il faut retenir que la pomme de terre fraîche est composée en moyenne de 20 % d'amidon et 80 % d'eau (**Tableau 1**).

**Tableau 1 :** Composition chimique de la pomme de terre pour 100 g de matière fraîche (Talbert et Smith, 1987)

Constituants	Teneur moyenne (g)	Écarts observés (g)
Eau	77,5	63 à 86
Matière sèche	22,5	13 à 30
Glucides	19,4	13 à 30
Protides	19,4	0,7 à 4,7
Lipides	2	0,02 à 0,96
Minéraux	1	0,4 à 1,9

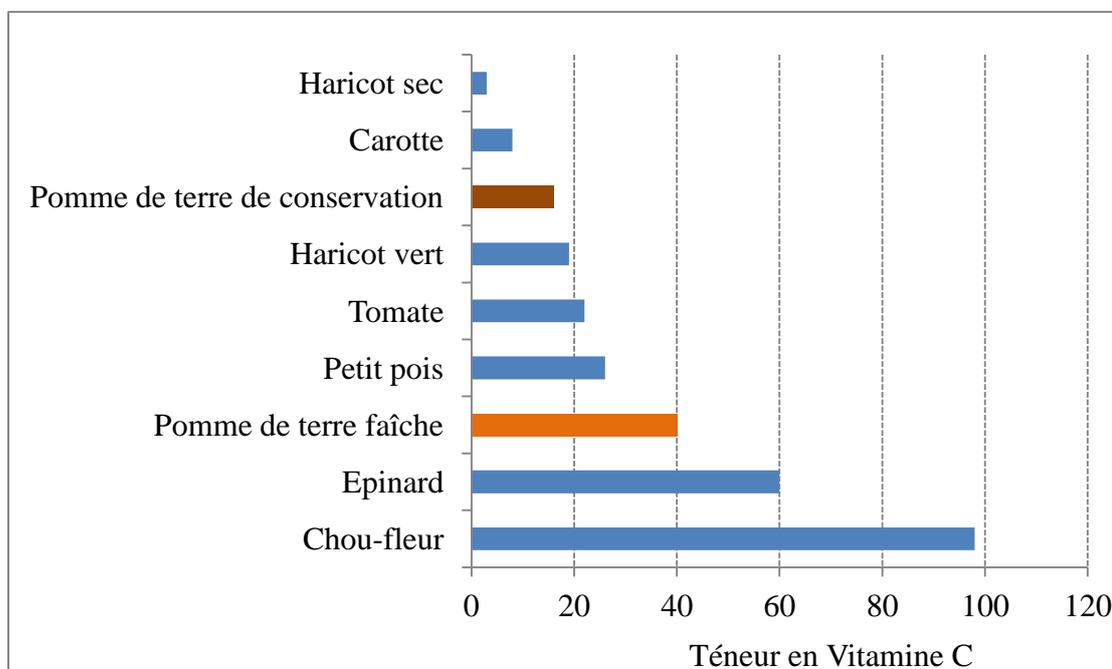
### 2.2.3. La valeur nutritive du tubercule

Parmi les légumes, la pomme de terre a une haute valeur nutritive. Le graphique suivant compare la valeur énergétique de 100 g de matières comestibles de quelques aliments (Rousselle et Robert, 1996) (**Figure 2**).



**Figure 2 :** Valeur énergétique de quelques aliments d'origine végétale

De plus, la teneur en vitamine C de la pomme de terre fraîche est également remarquable (**Figure 3**).



**Figure 3 :** Teneur moyenne en vitamine C de quelques légumes (Rousselle et Robert, 1996).

### 3. Différentes catégories de pomme de terre

Il y a quatre grandes catégories de pomme de terre en fonction de leur utilisation :

- Les plants ou semences, destinés à être plantés pour la production d'autres plants ou pour la production de pomme de terre de consommation ;
- Les pommes de terre de conservation (longue durée) ou potagère, destinées à la consommation directe ;
- Les primeurs (variétés hâtives) ;
- Les pommes de terre de transformation (féculières, frites, chips) destinées aux transformations industrielles.

Les potagères contiennent beaucoup d'eau et peu de matière sèche (17 à 18%). Les pommes de terre pour frites contiennent peu d'eau et un taux plus élevés de matière sèche (22 à 23%). Les féculières contiennent peu d'eau et beaucoup de matière sèche

(23 à 24%). Les variétés de pomme de terre cultivées sont nombreuses et chaque année une dizaine s'ajoute à la liste du catalogue officiel (FNPPPT, 1996).

#### **4. Physiologie de la pomme de terre**

Le cycle végétatif de la pomme de terre est très court (trois à quatre mois) et se déroule en quatre phases :

##### **4.1. Phase de croissance**

A partir d'un tubercule planté, les germes se développent en tiges aériennes feuillées ramifiées et en tiges souterraines munies de racines fasciculées. Pendant cette phase de croissance qui dure 3 à 4 semaines, la plante vit pratiquement sur les réserves du tubercule mère. Cependant, elle a besoin d'un apport d'eau et d'éléments nutritifs exogènes pour assurer un bon développement de l'appareil végétatif. Les besoins en eau de la plante augmentent avec la croissance foliaire et la tubérisation.

##### **4.2. Phase de tubérisation**

A partir d'un certain stade de développement de l'appareil végétatif, stade non décelable extérieurement, les extrémités des stolons se renflent en tubercules accumulant des réserves nutritives. Cette tubérisation se déroule jusqu'à l'arrachage de la plante ou la mort naturelle des parties aériennes.

Un pied de pomme de terre (issu d'un tubercule mère) donne plusieurs tubercules fils dont le nombre et la taille varient en fonction des génotypes et des conditions du milieu de culture.

La croissance et la tubérisation sont deux activités « antagoniste » de la plante. Cette phase de grossissement dure au moins 3 semaines au bout desquelles la récolte peut être effectuée.

##### **4.3 Phase de dormance**

Des tubercules venant d'être récoltés ne peuvent pas germer s'ils sont mis en terre. Il leur faut nécessairement une période de dormance, de vie ralentie (ou de repos végétatif) plus ou moins longue selon les variétés (en général 2 à 3 mois). La durée de la dormance est avant tout une caractérisation variétale, mais elle est également directement liée aux conditions de conservation dont la température est un facteur dominant. La durée de dormances varie entre 70 et 100 jours chez les variétés utilisées en Afrique de l'Ouest et conservées entre 30 et 35 °C. A titre d'exemple, si

ces mêmes variétés sont stockées au frais entre 12 et 15 °C, le réveil peut demander plus de 6 mois. Les tubercules stockés entre 4 et 6 °C voient leur cycle de développement pratiquement stoppé.

#### **4.4. Phase de germination**

Elle intervient après la période de dormance. Le réveil des tubercules se caractérise par l'apparition d'un premier bourgeon au niveau d'un œil de la couronne. Celui-ci se développe en germe grâce aux réserves du tubercule. Après 15 à 30 jours, d'autres yeux répartis sur tout le tubercule vont donner à leur tour des germes. C'est le stade optimal de plantation. Chaque germe se développe et va donner d'autres plants et d'autres tubercules fils, bouclant ainsi, le cycle végétatif.

### **5. Exigences écologiques de la pomme de terre**

#### **5.1. Exigences climatiques**

La pomme de terre est sensible au froid. Elle a un optimum de développement entre 15 et 25 °C. Les températures moyennes largement plus élevées de l'Afrique de l'Ouest sont un handicap qui est compensé par une forte intensité lumineuse favorisant la photosynthèse. Cependant, pour bien tubériser, la plante a besoin d'une thermo-période journalière prononcée c'est-à-dire des variations de températures entre le jour et la nuit (10 à 15 °C de différence).

Le développement végétatif est favorisé par des températures élevées (> 25 °C) et des jours longs (entre 14 et 18 h). Par contre, une photopériode inférieure à 12 h avec des températures aux alentours de 18 °C le jour et 12 °C la nuit favorise la tubérisation. L'ombrage de la culture est à proscrire et que le feuillage est détruit à -2°C. Ainsi, trois périodes de culture ont été définies : la culture hâtive (plantation octobre-novembre), la culture de pleine saison (plantation décembre-janvier) et la culture tardive (plantation février-mars).

#### **5.2. Exigences édaphiques**

La pomme de terre s'adapte aux sols légers (sableux ou sablo-limoneux) avec un pH légèrement acide de 5 à 6,5. Les sols à texture fine et battante (texture argileuse ou argilo-limoneuse) empêchent tout grossissement de tubercule. Une alcalinité excessive du sol peut causer le développement de la galle commune sur le tubercule.

### **5.3. Exigences biotiques**

La pomme de terre est une solanacée, d'où il faut impérativement la planter dans le sol qui n'a pas été cultivé avec une plante de la même famille (tomate, aubergine, piment, poivron,...) depuis au moins 3 ans. Ceci permet d'éviter la propagation d'agents pathogènes hôte. Il faut faire aussi la rotation de culture qui permet d'éviter l'infestation des sols par les nématodes et bactéries.

## **6. Intérêt de la plante**

### **6.1 Intérêt économique**

La pomme de terre représente une source croissante de revenus pour les ménages agricoles, et constitue une matière première prisée pour la fabrication de produits transformés. La quantité croissante de tubercules utilisés par l'industrie répond à la demande grandissante des secteurs de la restauration rapide, des snacks et des aliments préparés. L'essor des populations urbaines, la hausse des revenus, la diversification et la simplicité des modes de consommation de ces aliments, en sont les principaux moteurs. La farine de pomme de terre se mélange par exemple facilement à la farine de blé. Les gouvernements ont lancé des initiatives de réduction des importations coûteuses de blé en encourageant, par exemple, la consommation de pain préparé avec des farines de blé et de pomme de terre. Ce qui offre de nouveaux débouchés aux producteurs, aux transformateurs et aux vendeurs appartenant à la chaîne de valeur de la pomme de terre.

Au Sénégal, la pomme de terre, dont l'essentiel de la culture se concentre dans la zone des Niayes, est devenue une spéculation maraîchère importante tant par sa production que pour sa consommation. En effet, 90% de la production nationale est réalisée dans les régions de Thiès (61,86%) et de Dakar (31,66%). Cette culture constitue la quatrième production maraîchère du Sénégal après l'oignon, la tomate et le chou. Elle ne représente que 10% de la production nationale de légumes. Donc, les besoins en consommation de pomme de terre sont fortement dépendants de l'importation. L'analyse des coûts de production montre que la semence représente le tiers des importations, ce qui pèse lourdement sur la balance commerciale ; d'où la nécessité de développer une politique de production de semences de pomme terre dans notre pays (ANSD, 2010).

## **6.2 Intérêt alimentaire**

Consommée dans les Andes depuis environ 8 000 ans, la pomme de terre joue un rôle clé dans le système alimentaire mondial. C'est la principale denrée alimentaire non céréalière du monde. La pomme de terre est la première racine féculente consommée (93,01 g/personne/jour) au niveau mondial avant le manioc, les patates douces et les ignames (Anonyme, 2007). La pomme de terre est nourrissante (Lutaladio et Prakash, 2010). 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 19,4% 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.) (Rousselle et *al.*, 1996).

En raison de sa richesse en amidon, elle figure au quatrième rang des principales cultures vivrières, après le maïs, le blé et le riz (ONU, 2008). Ainsi, la pomme de terre constitue une excellente solution pour améliorer la qualité des régimes alimentaires et réduire les taux de mortalités dus à la malnutrition. La pomme de terre est bien plus qu'une simple culture vivrière destinée aux populations rurales pauvres. De ce fait, la pomme de terre est considérée par la FAO comme étant la première production pouvant permettre la lutte contre la faim et la pauvreté dans le monde. Ce constat est l'un des éléments ayant conduit à proclamer l'année 2008 « année internationale de la pomme de terre » (UNGA, 2008).

## **7. Contraintes liées à la production de la pomme de terre**

### **7.1. Manque de semences de qualité**

Le développement de la culture de pomme de terre en zone sahélienne se heurte à l'obtention et à l'approvisionnement aléatoire en semences de qualité souvent en inadéquation avec les périodes de mises en culture au champ (Jouan et *al.*, 1999). Les pays sahéliens dépendent, en effet, de l'extérieur sur ce plan, et ceci pour des raisons de disponibilité et de stockage des tubercules. Il n'existe qu'une gamme réduite de variétés adaptées à nos conditions agroclimatiques. De plus, des filières

commerciales structurées pour l'approvisionnement, la distribution et la conservation des semences sont fragiles. Dans toutes les zones de production, la plantation se fait entre novembre et décembre. De ce fait, la grande majorité des récoltes est donc effectuée entre Février et Mars. En considérant des rendements moyens de 22 tonnes/hectares (CDE, 2009), les quantités mises sur les marchés sont très conséquentes et risquent de faire baisser les prix.

L'utilisation des graines comme semences entraîne une très grande hétérogénéité génétique au sein des plantes. C'est pourquoi, le tubercule, organe de multiplication végétative est utilisé comme semence. Cependant, le tubercule de pomme de terre peut héberger un cortège de pathogènes.

## 7.2. Pathologies et ravageurs de la culture

La pomme de terre cultivée, *Solanum tuberosum*, est une plante très attaquée par de nombreux pathogènes et ravageurs des nématodes (Brodie et al., 1998), des champignons (Stevenson et al., 2001), des bactéries (Rouselle et al., 1987), des virus (Milne et al., 1988), des vers, des larves microscopiques et petits insectes (Jouan et al., 1980, 1985, 2001 ; Radtke et Rieckmann, 1991).

- Le mildiou de la pomme de terre, causé par *Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary, est l'une des maladies les plus redoutables de cette culture. Il peut détruire une culture entière de pomme de terre en moins de deux semaines. Les pertes de rendements peuvent atteindre 100% (Gauthier et al., 1998). Le mildiou reste le principal facteur limitant la production de pomme de terre à l'échelle mondiale (Duvauchelle et Andrivon, 1996). En Afrique, la maladie a été détectée pour la première fois en 1941 (Sediqui et al., 1997).

L'installation et l'évolution de la maladie sont très largement déterminées par les conditions climatiques, notamment l'humidité et la température (Harrison, 1992). D'où, *Phytophthora infestans* est très peu présent dans les cultures au Sahel en raison des températures trop élevées à basse altitude et de la faible humidité atmosphérique.

- Le flétrissement bactérien dû à la bactérie *Ralstonia solanacearum* est l'une des plus graves maladies de la pomme de terre en Afrique (Sidikou, 2002). Cette bactérie pathogène, dont la race 1, la plus polyphage, est largement présente sous les latitudes tropicales africaines. Elles trouvent même plusieurs hôtes d'attente au niveau des adventices (Tombet, 1995).

La maladie se manifeste généralement par un flétrissement brutal des feuilles puis de la plante entière. Il peut apparaître un jaunissement préalable, surtout aux heures les plus chaudes de la journée. Au niveau des tiges et des tubercules, une coupe transversale montre un brunissement des tissus vasculaires, avec un exsudat blanchâtre caractéristique (Kelman, 1998) (**Tableau 2**).

**Tableau 2** : Relation entre les symptômes de la maladie et les mécanismes liés à la présence du pathogène dans la plante hôte (Buddenhagen et Kelman, 1964).

Symptômes	Causes
<b>Symptômes externes</b>	
Au niveau des feuilles	
Flétrissement	Perturbation des mouvements d'eau due à la présence d'exopolysaccharides dans les vaisseaux, à la multiplication bactérienne et à la présence de tyloses.
Jaunissement	Perte de chlorophylles due à la diminution de l'apport minéral et d'eau ; et présence de métabolites inconnus de l'hôte et du pathogène
Epinastie foliaire	Augmentation d'AIA et d'éthylène (synthétisés par la plante hôte ou le pathogène)
Au niveau de la tige	
Racines adventices	Augmentation de la teneur en AIA
Rabougrissement	Ensemble des facteurs nommés ci-dessus
<b>Symptômes internes</b>	
Décoloration vasculaire	Tyrosine du pathogène et polyphénoloxydase de l'hôte
Tyloses	Augmentation du niveau en AIA
Dégradation de la cellulose des parois	Cellulase du pathogène

Une classification sommaire a été effectuée sur les principaux ravageurs et principales pathologies de la pomme de terre par Hélias (1999). Cet inventaire (**Tableau 3**) est valable pour les pays européens. Pour les pays tropicaux notamment, un travail d'inventaire et de hiérarchisation est à faire.

**Tableau 3 : Principaux ravageurs de la pomme de terre (Hélias, 1999)**

**Ravageurs animaux**

<b>Pucerons</b>	Puceron vert du pêcher Puceron vert et rose Puceron tacheté Puceron des germes de pomme de terre Puceron du nerpum Puceron de la bourdaine	<i>Myzus persicae</i> <i>Aulacrosiphum euphorbiae</i> <i>Aulacorthum solani</i> <i>Rhopalosiphoninus latysiphon</i> <i>Aphis nasturtii</i> <i>Aphis frangulae</i>	Vection virus Y, A, de l'enroulement et certaines souches S Vection virus Y, A, M (enroulement) Vection virus Y, A, M (enroulement) Vection virus de l'enroulement ? Vection virus Y, A, M partiellement virus S Vection virus M surtout (Virus Yet A)
<b>Coléoptère</b>	Doryphore Taupins	<i>Leptinotarsa decemlineata</i> <i>Agriotes obscurus</i> , <i>Agriotes lineatus</i>	Défoliation, baisse de rendement Galeries creusées par les larves dans les tubercules
<b>Lépidoptères</b>	Noctuelle de la pomme de terre Teigne de la pomme de terre	<i>Hydroecia</i> <i>Phthorimaea</i>	Attaque des tiges et parfois des tubercules Galeries dans les tiges et tubercules
<b>Nématodes</b>	Nématode (doré) à kystes bruns Nématode à kystes blancs Nématode à galles  Nématode ectoparasite	<i>Globodera rostochiensis</i> <i>Globodera pallida</i> <i>Meloidogyne chitwoodi</i> <i>Meloidogyne hapia</i> <i>Meloidogyne falax</i> <i>Trichodorus spp.</i> <i>Paratrichodorus spp.</i>	Retard de croissance, baisse de rendement Retard de croissance, baisse de rendement Boursouflures sur tubercules, baisse de rendement Boursouflures sur tubercules, baisse de rendement  Vection du virus du rattle Vection du virus du rattle

\*Ravageur de quarantaine

**Tableau 3 : Principaux ravageurs de la pomme de terre (Suite).**  
**Agents pathogènes**

<b>Bactéries</b>	Flétrissement bactérien Pourriture brune Jambe noire Gale commune	<i>Clavibacter michiganensis subsp.* sepedonicus</i> <i>Ralstonia solanacearum*</i> <i>Erwinia carotovora, Erwinia chrysanthemi</i> <i>Streptomyces spp.</i>	Flétrissement tardif de la plante ; pourriture vasculaire des tubercules jaunâtre à brune Flétrissement brutal de la plante ; pourriture annulaire brune des tiges et des tubercules Pourritures molles sur tiges et tubercules Liège et / ou pustule sur tubercules
<b>Virus</b>      <b>Viroïdes</b>	Virus de la mosaïque  Virus de l'enroulement  Virus A, X, M, S  Virus du rattle  Virus du Mop-top  Viroïde de tubercules en fuseau	PVY  PLRV (potato leaf roll virus)  PVA PVX PVM PVS  TRV (tobacco rattle virus)  PMTV  PSTVd (potato spindle tuber viroid)	Stries nécrotiques noires sur feuilles ; retard de croissance ; petits tubercules ; nécroses annulaires en cercle, peu profondes sur tubercules pour certaines souches du virus  Enroulement et durcissement des feuilles ; nanisme ; baisse de rendement ; nécroses interne possibles sous forme de réseau ou de tâche de rouille éparses  Mosaïque claire ; gaufrage des folioles  Décoloration internervaire en mosaïque ; nécroses tubercules possibles  Décoloration des nervures des folioles apicaux ; enroulement des folioles terminales  Léger éclaircissement des feuilles  Marbrures sur feuilles déformées et petites ; symptômes internes et externes sur tubercules ; anneaux nécrotiques proéminents sur tubercules ; lésions nécrotiques internes souvent en arc de cercles concentriques  Rabougrissement typique de la plante ; marbrures et choroses foliaires en forme de V ; lignes parallèles bien dessinées sur tubercules, fines en surface et se prolongeant à l'intérieur  Réduction de taille des tubercules, déformation (aspect fusiforme, yeux prédominants) feuilles vert sombre, légèrement frisolées, parfois enroulées en cuillères, aspect dressé et chétif des variétés sensibles

- Parasite de quarantaine

**Tableau 3c** : Principaux ravageurs de la pomme de terre : Agents pathogènes (suite)

<b>Champignons</b>	Mildiou	<i>Phytophthora infestans</i>	Taches brunes entourées d'un liseré jaune sur feuilles, duvet blanc sur la face inférieure des feuilles ; marbrures violacées-brunes en surface et à l'intérieur des tubercules
	Rhizochtone	<i>Rhizoctonia solani</i>	Manques à levée ou levée tardive ; tubercules aériens ; enrroulement du feuillage ; manchettes sur tige ; sclérose sur tubercule ; bouchons liègeux au niveau des lentilles ; chancre nécrotique à la base des tiges et sur les stolons
	Alternariose	<i>Alternaria soloni</i>	Taches brunes-noires nécrotiques aux contours anguleux sur feuilles ; pourriture sèche brune et affaissée sur tubercule, peu profonde et bien délimité du tissu sain à l'intérieur
	Sclérotiniose	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Pourriture blanchâtre à brunes sur tiges provoquant cassure des tiges et mort des feuilles ; formation de gros sclérose noirs
	Gale argentée	<i>Helminthosporium solani</i>	Tâche plus ou moins circulaire sur tubercules avec des reflets argentés, recouvertes de fines ponctuares noires
	Dartrose	<i>Colletotrichum coccoïdes</i> <i>Fusarium spp.</i>	Dessèchement des feuilles basales et plus tard, des tiges ; tâches grisâtres sur tubercules avec microsclérotés
	Fusariose - Pourriture sèche	<i>F. sulphureum</i> <i>F. roseum</i> var. <i>sambucinum</i> ; <i>F. solani</i> <i>F.oxyporum</i>	Plissement des tubercules en rides plus ou moins concentriques autour du point d'infection, recouverts de coussinets fructifères de couleur claire
	- Flétrissement fusariens	<i>F.oxyporum</i> ; <i>F.avenaceum</i> <i>F.solani</i> var. <i>eumartii</i>	Ponctuations internervaires plus claires évoluant en nécroses ; vaisseaux des racines, stolons et tiges se colorent en brun ; décoloration vasculaire des tubercules au point d'attache du stolon pouvant progresser sous forme de pourriture
	Verticilliose	<i>Verticillium dahliae</i> <i>Verticillium albo-atrum</i>	Jaunissement et flétrissement des feuilles de base, en partie seulement d'un côté et extension à l'ensemble de la plante ; brunissement de l'anneau vasculaire sur tubercule
	Galle verruqueuse	<i>Synchytrium endobioticum</i> *	Excroissance verruqueuses, crevassées en forme d'éponge sur les tubercules, les stolons et les tiges
	Pourriture grise	<i>Botrytis cinerea</i>	Tâches brun-noir souvent entourées d'un halo jaune, surtout à l'extrémité des feuilles, et sur tiges, recouvertes éventuellement d'un duvet gris foncé, dépressions cannelées sur tubercules
	Gangrène	<i>Phoma exigua</i> var. <i>foveata</i> ; <i>P.exigua</i> var. <i>exigua</i> )	Pourriture sèche en dépression (coup de pouce)
	Gale poudreuse	<i>Spongospora subterranea</i>	Pustules en forme de verrues claires devenant jaune blanc puis brun foncé, laissant échapper une masse brune pulvérulente (spores) ressemblant à de minuscules éponges. Vection du Mop-top

## 8. Lutte contre les ennemis de la culture

### 8.1 Bactéries

#### ➤ Le flétrissement bactérien

Dans les pays tropicaux, la principale voie pour limiter l'incidence de cette maladie est la création de variétés tolérantes ou résistantes. Diverses sources de résistances ont été trouvées chez les espèces sauvages apparentées à *Solanum tuberosum*. L'hybridation somatique a permis l'introduction de caractères de résistances à plusieurs pathogènes (Jadari et al., 2000 ; Gerungan et al., 2000). C'est ainsi qu'on peut mentionner l'obtention d'hybrides somatiques résistants à *R. solanacearum* entre *S. tuberosum* et *S. commersonii* (Laferrière et al., 1999) entre *S. tuberosum* et *S. stenotomum* et entre *S. tuberosum* et *S. Phureja*. Des tests de résistance à une souche africaine *R. solanacearum* effectués montrent que les variétés Désiré et Sahel sont résistantes, alors que Aïda est tolérante par contre Pamina est sensible (Sidikou, 2002).

Aucun produit phytosanitaire ne peut être utilisé pour arrêter les attaques bactériennes. Pour lutter préventivement contre les bactéries, il faut, avant la plantation, choisir des terrains indemnes, utiliser du plant certifié et vérifier si possible la non contamination de la source d'irrigation.

#### ➤ La gale commune

Elle est provoquée par des bactéries du genre *Streptomyces* et se manifeste sous la forme de lésions « ligneuses » à la surface des tubercules. Ces lésions déprécient la présentation des tubercules mais n'altèrent pas le goût et le rendement.

La lutte est principalement préventive et se fait par l'utilisation de variétés peu sensibles, l'allongement de la rotation, l'irrigation pendant la tubérisation et la préparation de sols modérément aérés.

### 8.2. Champignons

#### ➤ L'alternariose

Cette maladie se développe notamment lorsque la culture est dans des conditions défavorables (irrégularité de l'irrigation, déséquilibre des engrais, température plutôt élevées,...). Les spores sont dispersées par le vent et les irrigations. L'alternariose peut

être traitée par pulvérisation de mancozèbe à raison de 1,5 kg de matière active à l'hectare dans 600 à 800 litres d'eau/ hectare.

➤ **La fusariose**

Les champignons du genre *Fusarium* pénètrent dans les tubercules par les blessures occasionnées lors de la récolte, le champignon peut alors se développer durant la conservation. Il provoque des pourritures brunes internes qui, en se desséchant, font apparaître des stries concentriques. Du mycélium blanc (ou blanc-rosé) ainsi que des coussinets fructifères sont souvent présents à la surface des lésions. La fusariose peut être combattue en récoltant les tubercules bien matures, en évitant leurs blessures pendant la récolte ou lors du transport.

➤ **Le mildiou**

La priorité de la lutte contre le mildiou est d'empêcher l'installation de la maladie et, le cas échéant, de réduire au maximum la vitesse de propagation de l'agent pathogène. Au Sénégal, la lutte contre cette maladie ne peut donc s'envisager que de manière préventive. Elle repose sur un suivi rigoureux de la climatologie locale, une surveillance vigilante des parcelles. Les interventions doivent se faire avant toute période d'hygrométrie saturante longue (pluie, brouillards). La protection doit continuer tant qu'il reste des parties aériennes vivantes sur la parcelle. Les agriculteurs sont presque toujours amenés à traiter un grand nombre de fois chaque parcelle (jusqu'à huit ou dix fois), avec différents types de produits (de contact, pénétrants ou systémiques). Cette lutte contre le mildiou est très consommatrice en fongicides et son efficacité est menacée par les modifications des agents pathogènes. C'est pourquoi la voie de la résistante variétale est maintenant privilégiée.

### **8.3. Insectes, Acariens et Nématodes**

➤ **La Teigne**

*Phthorimea opercullella* est un petit papillon de 10 à 15 mm d'envergure qui pond ses œufs sur les tubercules. Après 8 jours, les larves apparaissent et se développent pendant deux semaines en creusant des galeries dans les tubercules avant de passer au stade de chrysalide qui donnera un nouvel adulte en une semaine. La teigne peut détruite très rapidement tout un stock de pommes de terre en conservation. Il est à noter qu'actuellement la teigne est présente au Sénégal, en Guinée et dans le Nord Niger.

La lutte contre la teigne se réalise de manière préventive et curative. La prévention consiste à allonger l'intervalle de rotation, à détruire les tubercules infectés. L'action curative au champ s'effectue par pulvérisation en végétation avec un insecticide de contact limitant ainsi la propagation du papillon.

➤ **Les sautereaux**

Les champs en végétation peuvent être attaqués par des sautereaux (criquets) et par des chenilles qui dévorent les feuilles. Il est important de traiter rapidement avec un insecticide de contact en cas d'attaques.

➤ **Les attaques des acariens**

Elles sont plus intenses lorsque le feuillage n'est pas mouillé lors des irrigations. Une irrigation supplémentaire par aspersion tous les 15 jours est souhaitable pour mouiller la végétation.

➤ **Les nématodes**

Ils sont de petits vers ronds invisibles à l'œil nu. On ne citera que les nématodes à galles *Meloidogyne* spp. qui provoquent des boursouflures sur les tubercules et des nodosités sur les racines. Les attaques aux champs se présentent sous forme de foyer où les plantes sont chétives. L'arrachage d'un pied et l'observation du système racinaire permettent de confirmer une attaque de nématodes. La lutte contre les nématodes est principalement préventive. Actuellement, il n'existe pas de variété de pomme de terre totalement résistant aux nématodes à galle.

Suite à ces différentes méthodes de luttés peu efficaces sur la protection de la culture de pomme de terre, l'accent a donc été mis sur la lutte génétique par la caractérisation de la sélection de matériel végétal (Hartman et Elphinstone, 1999 ; Charrier et *al.*, 1997).

Pour pallier ces problèmes phytosanitaires et d'hétérogénéités de descendances, Morel et *al.*, (1968) et par la suite, Nozeran et *al.*, (1977) ont mis au point une méthode de multiplication végétative *in vitro* ou micropropagation.

## II. MICROPROPAGATION DE LA POMME DE TERRE

### 1. Définition

La micropropagation ou multiplication *in vitro*, consistent à reproduire l'individu à l'identique et en masse, parallèlement donc avec un phénomène de rajeunissement de la plante, et dans un laps de temps relativement court par le contournement de la sexualité. Il s'agit d'une reproduction végétative en masse et rapide.

Les biotechnologies végétales ou « nouvelles technologies du règne végétal » se basent sur une propriété génétique fondamentale du monde végétal : la totipotence de la cellule végétale, c'est-à-dire sa capacité à reconstituer une plante entière. Elles font appel à diverses techniques biologiques dans le but d'augmenter les rendements et d'améliorer l'efficacité des génotypes utilisés et de leurs dérivés (Gautheret, 1959 ; White, 1963 ; Zryd, 1988).

### 2. Intégration de la micropropagation dans la culture de la pomme de terre

Mise en France par Nozeran et Bancilhon (1972), la multiplication végétative *in vitro* de la pomme de terre est aujourd'hui quasi universellement utilisée pour les premières générations de multiplication. En pratique, ces techniques ont démontré qu'elles offrent divers avantages par rapport aux méthodes de multiplications traditionnelles.

Cette méthode de bouturage conforme et rapide conduit à l'obtention d'un nombre important de plantes juvéniles. Elle permet de reproduire des plantes absolument saines, exemptes de toute infection bactérienne ou virale (Ranalli, 1997). Des collections de variétés saines peuvent aussi être maintenues au laboratoire tout en restant immédiatement disponibles pour des opérations de multiplication et de commercialisation. Par cette technique, il est possible d'assainir progressivement les variétés locales virosées ou vieillissantes mais adaptées aux conditions agro-climatiques du Sénégal (Dieng, 1993 ; Ndiaye, 2001).

Cependant, la micropropagation est sous la dépendance des facteurs externes : environnementaux, nutritionnels et hormonaux, mais elle est avant tout dépendante du génotype, donc des facteurs endogènes propres à chaque variété (Belliti et *al.*, 1994 ; Désiré et *al.*, 1995a).

### 3. Facteurs limitants la micropropagation

- **La photopériode**

Elle est le principal facteur externe. La lumière et l'obscurité agissent conjointement par leur durée et leur période d'exposition. Les jours longs (16 h de lumière et 8 h d'obscurité) induisent une meilleure micropropagation. Les jours courts (8/16h, jour/nuite) par contre, entraînent la formation des microtubercules (Charles et *al.*, 1995). Il est rapporté par Sidikou (2002) que les effets de la lumière varient en fonction des cultivars.

- **La température**

Elle a également une grande influence sur la micropropagation de la pomme de terre. Les températures idéales se situent entre 15 et 20 °C ceci même en l'absence de cytokinine. La température optimale de tubérisation est à 18 °C (Ellisseche, 2008), 20°C, voire 25 °C (Wang et Hu, 1982). Les températures plus élevées diminuent le rendement en perturbant la tubérisation et en provoquant des repousses. Quant aux basses températures (inférieures à 4 °C), elles inhibent fortement les réactions métaboliques (Hussey et *al.*, 1984).

- **Les facteurs nutritionnels**

Le saccharose intervient dans le processus de la tubérisation en induisant la synthèse de nombreuses protéines comme la patatine ou l'ADP glucose pyrophosphorylase (Jackson, 1999) Il intervient comme signal pour la régulation du niveau des enzymes impliquées dans le processus. Une bonne tubérisation requiert une concentration minimale de saccharose égale à 6% (Ewing, 1995). L'optimum de concentration en saccharose est fonction des génotypes et se situerait entre 6% et 10%, généralement 8% La concentration du saccharose entraîne l'induction et l'activation de l'expression des gènes dirigeant la synthèse de l'amidon et par là même l'accumulation de l'amidon dans les tubercules (Banfalvi et *al.*, 1999).

- **Les phytohormones**

Elles sont des régulateurs de croissance qui jouent un rôle complexe dans la transmission des stimuli environnementaux aux différents niveaux de la plante. Elles conditionnent également la réceptivité des tissus et cellules à ces stimuli.

Les travaux de Charles et *al.*, (1995) ont démontré un modèle de multiplication d'explants uninodaux de pomme de terre cultivés *in vitro* en absence de régulateur de croissance. En plus Vinterhalter et *al.*, (1997) ont montré que les vitroplants de pomme de terre n'exigent généralement pas d'hormones exogènes pour s'enraciner. Ils peuvent donc, se propagés sur milieu nutritif simple.

- **La variabilité génétique**

L'apport de la biotechnologie végétale dans le développement de la pomme de terre au Sahel nécessite l'utilisation de génotypes adaptés aux conditions locales. Il faut utiliser des génotypes peu sensibles aux conditions de températures élevées et au stress hydrique, principaux facteurs abiotiques caractérisant le climat sahélien. Une étude a été réalisée en serre pour identifier les génotypes de pomme de terre les mieux adaptés au stress hydrique. Les résultats obtenus montrent que les génotypes Désiré, Claustar, Aïda, Atlas présentent une bonne résistance au stress hydrique accompagnée de bons rendements en microtubérisation (Sidikou, 2002).

#### **4. Acclimatation des plants de pomme de terre**

Le transfert direct vers le plein champ des plantules cultivées *in vitro* n'est cependant pas possible. Ainsi, la mise au point de divers procédés permettant ce transfert a été nécessaire. C'est ainsi que les techniques d'acclimatation et d'enracinement en motte des vitroplants, des techniques de production de minitubercules, de production de vitro ou microtubercules ont vu le jour pour un transfert en plein champ. Chaque technique possède des avantages et des inconvénients. Parmi ces inconvénients, la fragilité des plants micropropagés pendant la phase d'acclimatation, ne milite pas en faveur d'une production soutenue en quantité et en qualité. En effet, ces plants sont très sensibles aux attaques des nématodes et des champignons (Schenk, 1981).

Avec l'émergence des biotechnologies, une attention particulière a été accordée au potentiel d'utiliser les champignons MA pour favoriser l'acclimatation et la survie des plantules micropropagées (Vestberg et Estaun, 1994 ; Vanna et Schuepp, 1996). D'où l'équipement précoce des vitroplants en flore mycorhizienne arbusculaire pendant leurs acclimations, suscite de nos jours beaucoup d'intérêt (Gianinazzi et *al.*, 1989 ; Rapparini et *al.*, 1994).

## **B/ MYCORRHIZATION**

### **1. Notion de mycorhizes**

Décrit pour la première fois par le botaniste allemand Frank en 1885, le terme mycorhize (du grec « mukes » = champignons et « rhiza » = racines) est une association mutualiste entre les racines d'une plante et les champignons symbiotiques du sol. Cette relation mutualiste est appelée symbiose mycorhizienne. Elle est l'une des associations les plus dynamiques au sein des écosystèmes terrestres (Smith et Read, 2008). En effet, les champignons mycorhiziens forment des symbioses avec près de 95% des plantes terrestres, colonisant des milieux tels que les forêts boréales, tempérées et tropicales ainsi que les toundras, les prairies et de nombreuses terres cultivées (Read et Perez-Moreno, 2003). Selon la position phylogénétique de leurs partenaires et selon leurs structures symbiotiques, plusieurs types de mycorhizes sont définis. Les deux formes de symbiose mycorhizienne les plus représentées sont la symbiose mycorhizienne arbusculaire (MA) et la symbiose ectomycorhizienne.

La symbiose mycorhizienne à arbuscules est de loin la plus répandue des symbioses mycorhiziennes. En effet, celle-ci est associée à plus de 80% des espèces de plantes terrestres actuelles essentiellement des espèces herbacées, et notamment des espèces cultivées importantes (Smith et Read, 2008). Cependant, il existe qu'environ 160 espèces de champignons formant des symbioses MA. Des données fossiles apportent la preuve de l'existence de cette symbiose il y a plus de 400 millions d'années, ce qui coïncide avec l'apparition des premières plantes terrestres (Selosse et Le Tacon, 1998). Il a donc été suggéré que les champignons MA auraient joué un rôle crucial dans la colonisation du milieu terrestre par les plantes. Ceci pourrait expliquer la distribution ubiquiste de cette symbiose MA dans le règne végétal ainsi qu'au sein des écosystèmes.

Les champignons MA sont regroupés sous l'embranchement des *Glomeromycota*, dans la classe des *Glomeromycetes*, ordre des *Glomerales* et la famille des *Glomeraceae* (Walker et Schübler, 2004).

### **2. Biologie des champignons MA**

L'établissement de la symbiose MA commence par la colonisation d'une racine compatible par les hyphes produites par les propagules de champignons MA (spores asexuées ou racines déjà mycorhizées). Si l'hyphes ne rencontre pas de racine après 2 à 4 semaines de croissance le champignon ne peut pas se développer et compléter son cycle

de vie. Dans ce cas, les spores peuvent se remettre en dormance après rétraction du protoplasme et réallocation des ressources en attendant de meilleures conditions. Suite à ce stade asymbiotique du champignon, le premier stade de la colonisation mycorrhizienne est la formation d'un appressorium à la surface de la racine à partir duquel le champignon peut pénétrer les tissus racinaires externe en 36 heures (Juge, 2009) pour former les structures intracellulaires spécialisées que sont les pelotons et les arbuscules (Requena et *al.*, 2007).

Lors du stade pré-symbiotique, c'est un dialogue chimique entre le champignon et la racine compatible qui permet la rencontre des deux partenaires. Des exsudats racinaires de la plante hôte induisent la germination des spores, la croissance et la ramification de l'hyphe (Buée et *al.*, 2000). Ce qui augmente les chances du champignon d'entrer en contact avec une racine. Le composé, induisant la ramification de l'hyphe, a été isolé et identifié par Akiyama et *al.*, (2005) comme étant une strigolactone. Ces composés induisent une réaction pré-symbiotique fongique caractérisée par une croissance des hyphes en continu, une augmentation de l'activité physiologique et mitochondriale ainsi qu'une ramification abondante des hyphes qui augmente ainsi les chances d'une rencontre avec l'hôte. En retour, les spores germées produisent des signaux diffusibles, appelés facteurs Myc, qui sont perçus par les racines des plantes même en l'absence de contact physique avec le champignon (Maillet et *al.*, 2011).

### **3. Rôle des champignons MA dans l'agriculture**

#### **3.1. Rôle des champignons MA sur la croissance des plantes**

L'effet majeur des champignons mycorrhiziens dans les écosystèmes non perturbés est l'amélioration de la croissance des plantes mycorhizées par rapport aux plantes non mycorhizées (Plenchette et *al.*, 1983). Ceci est assuré grâce à leur action de bio-fertilisant (Plenchette et *al.*, 2005). En effet, en explorant un plus vaste volume de sol, le mycélium des champignons MA permet de compléter la nutrition de la plante en éléments limitants. Dans certains cas de sols acides ( $\text{pH} < 5$ ), où ce sont des éléments comme Ca, Mg ou K qui sont déficients, les plantes mycorhizées montrent ainsi, des concentrations foliaires en ces éléments supérieures aux plantes non mycorhizées (Clark, 2000). Mais le plus souvent, ce sont les composés azotés et les phosphates qui sont les facteurs limitants pour la croissance de la plante. En plus, il a été bien montré, en utilisant des dispositifs à compartiments, que les hyphes extraradiculaires du champignon sont capables de prélever et de transporter ces éléments jusqu'aux racines,

en particulier le phosphore (Cooper et Tinker, 1978). Le phosphore est en effet prélevé sous forme d'orthophosphates (phosphate inorganique Pi) par les plantes. Or, cette forme minérale du phosphore est en quantité limitée dans le sol. Sous l'action du prélèvement racinaire, il se crée rapidement des zones d'appauvrissement autour des racines à cause d'un apport relativement lent en P de la part de la phase solide du sol et de la faible diffusion de P dans le sol. La présence du champignon est donc essentielle pour explorer le sol, à la recherche de cet élément peu mobile et fournir à la plante, ce dont elle a besoin pour se développer. Pour accéder aux pools de phosphore du sol inaccessibles aux plantes, les champignons MA seraient capables d'hydrolyser le P organique en P inorganique pour le transférer à la plante hôte (Koide et Kabir, 2000). L'amélioration du prélèvement des éléments limitants est ainsi associée à une augmentation de la biomasse des plantes mycorhizées.

L'absorption de certains oligo-éléments peu mobiles comme le cuivre, le fer, le manganèse et le zinc est améliorée chez la plante mycorhizée. Comme le phosphore, ces minéraux sont absorbés par les hyphes mycéliens et transloqués vers la plante. En effet, les champignons modifient les entrées et sorties des métaux de la plante. Cela se fait par une fixation des métaux dans les membranes cellulaires du champignon ou la sécrétion d'oxalates pour bloquer les ions métalliques dans les sols ou encore un stockage dans la plante entière. Les plantes mycorhizées s'adaptent mieux aux sols pollués que celles non mycorhizées (Cooper et Tinker, 1978 ; Ndiaye, 2011).

En plus de bénéficier d'une meilleure nutrition minérale, les plantes mycorhizées montrent aussi une meilleure résistance à divers stress dont les agents pathogènes (Alkaraki et *al.*, 2004).

### **3.2. Rôle des champignons MA sur la protection des cultures**

Le potentiel des champignons MA comme agent de lutte biologique a été répertorié chez des dizaines d'espèces cultivées de solanacées (Caron et *al.*, 1986 ; Matsubaru et *al.*, 1995). Ces solanacées associent avec plusieurs Gloméromycètes pour des affections d'origine principalement fongique et bactérienne. De ces investigations, des mécanismes d'action protectrice émergent, au niveau de la plante, du parasite et de la microflore du sol (Dalpé, 2005)

### 3.2.1. Mécanismes d'action protectrice des MA sur la plante

Pour protéger les plantes contre ces ennemis, les champignons mycorhiziens agissent directement sur la plante soit par une stimulation de croissance, soit par une transformation morphologique au niveau racinaire ou par l'induction ou la suppression de mécanismes de défense, notamment ceux impliquant plusieurs enzymes (Dalpé 2005).

#### ➤ **Stimulation de la croissance.**

L'acquisition d'une vigueur accrue grâce à une meilleure nutrition, permet à la plante de mieux tolérer les stress environnementaux dont ceux causés par diverses maladies (Azcon-Aguilar et Barea, 1996). Cette réduction de la susceptibilité aux infections n'est généralement efficace que lorsqu'une symbiose fonctionnelle s'établit préalablement à l'attaque des parasites. Dans la majorité des cas, ces derniers, une fois en contact avec leur hôte, envahissent nettement plus rapidement les tissus végétaux que les champignons mycorhiziens. Dans le cadre d'une analyse détaillée, Pinochet et *al.*, (1996) ont montré qu'effectivement, il existe un facteur de cause à effet entre la nutrition améliorée des plantes mycorhizées et leur résistance aux attaques de parasites. Cependant, ce facteur ne compte que pour une partie seulement de la protection. C'est la raison pour laquelle, dans le cas de la fusariose de la tomate, une nutrition optimale en phosphore n'atténue pas les symptômes de la maladie (Caron et *al.*, 1986). Ce qui indique clairement que d'autres mécanismes de protection viennent s'ajouter à la nutrition comme facteur de protection. De plus, les bénéfices de la mycorhization sur la protection contre les parasites apparaissent souvent une fois seulement que le parasite a envahi l'hôte. Ce qui indique qu'une diversité de mécanismes est impliquée dans la protection.

#### ➤ **Transformation morphologique racinaire**

Les hyphes mycorhiziens colonisant les racines, saturent davantage les sites d'infections disponibles. Ce qui limite donc, la pénétration de la racine par les hyphes d'un parasite. Ceci ralentit ou retarde le développement du parasite et diminue d'autant l'incidence de la maladie. La plante conservant intacte les zones colonisée par action systémique. Gamalero et *al.*, (2004) ont constaté chez la tomate que la mycorhization s'accompagne d'une protection accrue contre la pourriture racinaire causée par *Phytophthora fragariae*

Hickman. Or, on pourrait croire qu'une abondance de ramifications puisse fournir à un tel parasite davantage d'opportunité pour infecter les tissus racinaires.

➤ **Induction ou la suppression de mécanismes de défense**

La colonisation mycorhizienne prédispose les plantes à réagir rapidement aux attaques de parasites (Dugassa et *al.*, 1996 ; Singh et *al.*, 2000). Cette protection indirecte se traduit au niveau cellulaire par des réactions anatomiques, métaboliques et physiologiques. Elle peut être due à l'induction ou à la suppression de divers mécanismes de défense liés aux phytoalexines, phénols, peroxydases, chitinases,  $\beta$ -glucanases, lignification, déposition de callose et diverses autres protéines liées à la pathogenèse.

Une augmentation du taux de lignification des parois cellulaires de l'endoderme et des tissus vasculaires et un dépôt de callose est constatée chez certains couples « plante-mycorhize ». Cette lignification accrue constitue une barrière de protection pour la racine contre la pénétration de parasites. Elle s'accompagne également d'une accumulation de composés phénoliques vraisemblablement suivie d'une activité chitinolytique qui altère les parois, notamment de certains parasites fongiques (Benhamou et *al.*, 1994 ; Sylvia et Chellemi, 2001).

Les enzymes hydrolytiques chitinase et  $\beta$ -glucanase jouent un rôle de protection. Elles sont impliquées dans la dégradation des parois cellulaires. À ce titre, elles sont reconnues pour leur activité antifongique (Dumas-Gaudot et *al.*, 1996). Une hausse de l'activité des chitinases et  $\beta$ -glucanases a été observée chez les racines de légumineuses avant même tout contact racinaire avec *Glomus intraradices* Schenck & Smith (Volpin et *al.*, 1994) et au début de la colonisation, pour diminuer et pratiquement disparaître une fois la mycorhization établie et fonctionnelle (Lambais et Mehdy 1993; Spanu et *al.*, 1989). Cette activité est d'ailleurs principalement liée aux jeunes arbuscules dont la longévité n'atteint que 3-4 jours (Blee et Anderson, 1996). La dégradation continue des arbuscules intraracinaires entraîne une augmentation d'activité chitinolytique dans les couches profondes des cellules corticales ce qui peut directement affecter l'intégrité cellulaire des parasites (Benhamou et *al.*, 1994; Dehne et *al.*, 1978). La présence d'isoformes de chitinase nouvellement synthétisées et différentes de celles synthétisées par les parasites ont été détectées dans des racines de tabac et de tomates mycorhizées et parasitées (Cordier et *al.*, 1996; Dumas-Gaudot et *al.*, 1992), un mécanisme de défense spécifique aux parasites induit par les parois cellulaires de l'hôte (Pozo et *al.*, 1998).

Des champignons du genre *Fusarium* (F.) sont connus pour leur aptitude à synthétiser certaines mycotoxines sur la plante. L'espèce *F. sambucinum* produit une grande quantité de mycotoxine chez la pomme de terre. Une confrontation de cette espèce virulente avec le champignon mycorhizien arbusculaire *Glomus intraradices* in vitro en Pétri bicompartimenté et in situ sur des plants de pomme de terre a été réalisé par Ismail et al., (2009). Les résultats montrent que *Glomus intraradices* réduit significativement la croissance du champignon pathogène *F. sambucinum* in vitro et réduit considérablement l'intensité de la maladie dans les plants de pomme de terre. Cette réduction est due à un mécanisme de modulation de l'expression des gènes de virulent (Tri4 et Tri5) des mycotoxines du *F. sambucinum* par *Glomus intraradices*.

### **3.2.2. Mécanisme d'action protectrice des MA contre le parasite**

L'action sur le parasite se fait via une compétition directe avec les champignons mycorhiziens liée à la disponibilité de nutriments et de sites d'infection. Meyer et Linderman (1986) ont constaté dans la rhizosphère du maïs et du trèfle mycorhizés, une diminution des *Pseudomonas*, des actinomycètes et des *Streptomyces*. En résumé, une colonisation mycorhizienne bien établie entraîne des changements considérables des mécanismes de défense de la plante pour contrer l'action de certains parasites (Wyss et al., 1991 ; Guenoune et al., 2001).

### **3.2.3. Mécanisme d'action protectrice des MA sur le sol et sur la modification de la microflore**

L'action protectrice des champignons, à travers la structure et la qualité du sol, se fait par le biais d'une modification de la microflore et de l'augmentation du taux de matière organique.

La mycorhization affecte directement la quantité et la qualité des exsudats racinaires. La ramification intense des racines induite par la mycorhization s'accompagne d'une intensification des exsudats racinaires qui serait responsable de modifications de la microflore et d'interactions directes avec les parasites (Norman et Hooker, 2000). Les hyphes extraracinaires des mycorhizes à arbuscules peuvent constituer à eux seuls jusqu'à 80% de la masse microbienne avec près de 150 cm d'hyphes de sol (Kabir et al., 1997).

L'activité mycorhizienne se traduit généralement par une augmentation de la diversité et de l'abondance des microorganismes du sol, notamment parmi les antagonistes de

parasites (Linderman 2000 ; Secilia et Bagyaraj 1987 ; Thomas et *al.*, 1994). Des nombreuses composantes microbiennes de la rhizosphère, favorisent la croissance et la protection des plantes (Barea et *al.*, 2002; Gryndler et *al.*, 2000).

Les bactéries de la rhizosphère sont capables de produire des substances phytohormonales, tels que les sidérophores et l'acide indole acétique (Sequiera et *al.*, 1998). Ces derniers ont des actions antagoniques contre les délétères et les champignons phytopathogènes et stimulent la résistance des mycorhizes aux maladies.

Certaines composantes de cette microflore interagissent avec les MA à la manière d'agents de lutte biologique. C'est le cas du *Gliocladium virens* Mill. et du *Bacillus subtilis* (Ehrenberg) Cohn. Ces derniers stimulent à la fois la colonisation racinaire et réduisent l'incidence de la maladie, lorsqu'ils sont appliqués à une plante colonisée et parasitée (Bochow et Abou-Shaar, 1990 ; Paulitz et Linderman, 1991). En ce sens, plusieurs inocula mycorhiziens commerciaux sont maintenant offerts en combinaison avec un agent de lutte biologique reconnu. Cela permet afin, d'exploiter au mieux les pouvoirs conjoints de stimulateurs de croissance et d'agents de lutte biologique.

La qualité des sols repose sur des propriétés structurales, physiques et chimiques ainsi que sur les interactions complexes qui résultent de la diversité génomique et fonctionnelle des microorganismes qui les peuplent. L'évolution temporelle et spatiale de ces interactions créent des équilibres dynamiques soumis aux perturbations d'origine environnementale et humaine. Plusieurs maladies telluriques des plantes cultivées résultent d'une rupture des équilibres dynamiques entre les organes végétaux souterrains et les microorganismes bénéfiques du sol, au profit des microorganismes pathogènes. L'intérêt de la mycorhization dans la protection des cultures a été mis en évidence dans les travaux de (Harrier et Watson, 2004). Les exsudats racinaires de tomates mycorhizées indiquent une hausse significative des taux d'acides aspartiques et glutamique et une diminution des taux d'arginine, de glycine et de thréonine. Il en résulte une légère baisse du pH du sol probablement suffisante pour retarder la sporulation ou ralentir le métabolisme de plusieurs parasites.

#### **4. Mycorhization de la pomme de terre micropropagée**

La fragilité des plantes micropropagées, surtout lors des phases de sevrage ou d'acclimatation, ne milite pas en faveur d'une production soutenue en qualité comme en quantité. D'où l'équipement précoce des vitroplants en flore mycorhizienne arbusculaire

pendant les phases de micropropagation végétative ou d'acclimatation suscite de nos jours beaucoup d'intérêt (Rapparini et al., 1994). Pendant ces phases, l'inoculation mycorhizienne, assure une phytoprotection et augmente le taux de reprise des vitroplants (Boxus et al., 1995 ; Cassels et al., 1996). Les travaux de Ndiaye et al., (2005) ont montré des gains de poids de plus de 194% chez la variété Pamina, inoculée par *Glomus mosseae* en serre. Des résultats positifs similaires ont été obtenus sur la reprise et la croissance des vitroplants de pomme de terre par Vosatka (2000). Cependant, ces résultats montrent des effets sélectifs de la mycorhization sur la microtubérisation. Le nombre de tubercules et la biomasse varient en fonction de l'isolat fongique et du génotype de pomme de terre.

## **C. MATIÈRE ORGANIQUE**

### **1. Généralité sur la litière**

Les végétaux, organismes majoritairement autotrophes, font la synthèse de la matière vivante à partir du CO<sub>2</sub> et d'éléments biogènes (azote, phosphore, potassium). Ce processus est connu sous le nom de photosynthèse. Cette matière vivante, selon une échelle de temps variable, retourne au sol sous forme d'exsudats racinaires et foliaires ainsi que des débris (feuilles, rameaux, fruits et graines). Ces résidus constituent une litière temporaire et enrichissent la fraction légère de la matière organique du sol (Mangenot, 1980). En Afrique subsaharienne où les contraintes démographiques et socio-économiques font que les systèmes agraires manquent d'intrants, les résidus végétaux représentent pour les systèmes de culture une source importante d'éléments nutritifs (Musvoto et al., 2000). En effet, les litières foliaires ont permis de renouveler sans frais les conditions nécessaires à la restauration de la fertilité des sols par un transfert vertical d'éléments minéraux (Feller, 1995 ; Lal, 1998). L'utilisation des litières stimule l'activité et le développement des microorganismes du sol par un effet direct avec l'apport de substrat carboné dans les systèmes sol-végétation (Vance et al., 2001). Les travaux de (Diallo, 2005 ; Samba 2001) ont rapporté que l'apport de litière entraîne un enrichissement important de l'azote minéral du sol (ammonium et nitrate).

## 2. Les constituants des résidus végétaux

Les résidus végétaux sont constitués de plusieurs constituants.

- **La cellulose**

La cellulose est un polymère du glucose (ou polysaccharide de glucose), de formule  $(C_6H_{10}O_5)_n$  où  $n$  est compris entre 200 et 14 000. C'est un constituant principal des végétaux. La décomposition de la cellulose est lente et requiert un ensemble de cellulases essentiellement d'origine fongique et bactérienne (Parsiegla et *al.*, 2000).

- **L'hémicellulose**

L'hémicellulose est constitué de longues chaînes d'oses, plus courtes que celles de la cellulose.

- **La lignine**

La lignine est le deuxième biopolymère après la cellulose. La biomasse cumulée entre la cellulose et la lignine représente environ 70% de la biomasse totale.

Certains micro-organismes, en particulier les champignons dits de la pourriture blanche du bois sont capables de digérer le complexe lignine-hémicellulose-cellulose et d'améliorer la valeur nutritive des matériaux lignocellulosiques.

- **Les composés phénoliques**

Les effets des composés phénoliques diminuent généralement avec le vieillissement des litières. Les polyphénols sont une famille de métabolites secondaires des plantes.

## 3. Effet de la litière sur la croissance et la production des plantes

Chaque type de résidus influe, selon sa nature, sur la fourniture de l'azote. Ainsi, la qualité des résidus végétaux et leur capacité à fournir de l'azote sont généralement évaluées par le rapport C/N (Stevenson, 1984).

La croissance végétale est régulée, entre autres, par les flux des éléments nutritifs nécessaires au métabolisme de la plante. L'alimentation azotée des cultures se fait principalement par l'absorption de l'azote minéral. Cependant, l'absorption de cet élément dépend en premier lieu de sa teneur dans le sol. La disponibilité de nutriments apportée au sol résulte à la fois de la quantité et de la qualité des résidus utilisés (De Neve et *al.*, 1996). Ainsi, plusieurs études ont montré que la décomposition de la matière organique et la minéralisation de l'azote sont affectées par le rapport C/N des

résidus (Das SK et *al.*, 1993) ainsi que par leur teneur en lignine (Muller et *al.*, 1988) et en polyphénols (Palm et *al.*, 1991). Selon (Constantinides et Fownes, 1994) en dehors de la concentration initiale en azote total, la disponibilité de l'azote minéral dans le sol est affectée aussi par la concentration en polyphénols et lignine. La lignine est connue pour être récalcitrante à la décomposition microbienne tandis que l'effet négatif des polyphénols est lié à la complexation de l'azote des protéines et des pectines par les composés phénoliques solubles, ce qui le rendrait inaccessible pour les micro-organismes, retardant ainsi la décomposition et la minéralisation des résidus.

De nombreuses études menées au Sénégal ont montré l'importance de la matière organique dans les sols ferrugineux tropicaux (Pieri, 1989). L'incorporation de litières de qualités différentes a une relation directe sur la disponibilité de cet élément dans le sol et donc potentiellement sur la croissance végétale (Myers et *al.*, 1994). Les résultats de Diallo et *al.*, (2008) montrent que certaines litières foliaires utilisées (*Andropogon gayanus*, Kunth et *Eragrostis tremula*, Steud) ne fournissent pas de réserves organiques significatives pour permettre une bonne croissance des plantes testées. En revanche, d'autres comme *Faidherbia albida* et *Azadirachta indica* ont fait preuve d'un potentiel élevé pour améliorer la biomasse et les rendements du mil et du maïs.

Donc, le choix des litières foliaires dans les systèmes agricoles doit tenir compte de ces différents paramètres.

#### **4. Matière organique et mycorhization**

Le rôle de la symbiose mycorhizienne est fortement réduit voire supprimé avec l'apport élevé de fertilisants minéraux solubles. Ces derniers augmentent instantanément l'offre du sol en éléments biodisponibles. L'augmentation de la concentration en azote et en phosphore accroît la synthèse protéique et des composés phosphorylés par les plantes. Ce qui entraîne une diminution de la teneur en sucres solubles dans les racines. Or, le champignon se nourrit de ce sucre. La carence du sucre réduit le taux de colonisation mycorhizienne (Le Tacon et *al.*, 1999).

Par contre, les engrais de ferme (fumier, compost, résidus de culture, bois raméaux fragmentés) ne semblent pas avoir d'effets négatifs sur les champignons MA, et peuvent même les stimuler (Gosling et *al.*, 2006).

## **D. LES PESTICIDES**

### **1. Utilisation des pesticides au Sénégal**

#### **1.1. Produits utilisés**

L'agriculture sénégalaise utilise en moyenne annuellement 598 tonnes de pesticides solides et 1 336 560 litres de pesticides liquides pour une valeur de près de 10 500 000 000 de francs CFA. Au Sénégal, on note quelques 300 spécialités commerciales présentes ou utilisées contre 189 autorisées par le CILSS en Juin 2002. Ces 300 spécialités intéressent à peu près 8 matières actives (Sow et *al.*, 2004).

#### **1.2. Fréquence d'utilisation des pesticides**

Les fréquences d'utilisation des produits phytosanitaires varient d'un producteur à l'autre. Chez les grands producteurs, le traitement phytosanitaire est plus rationalisé car tenant compte des impératifs du marché extérieur. Par contre, au niveau des petits producteurs la fréquence d'utilisation des pesticides est conditionnée par la disponibilité du produit et les conditions parasitaires. En période de fortes attaques parasitaires, les traitements peuvent se faire jusqu'à trois fois dans la semaine. La moyenne est d'un traitement par semaine (Cissé et *al.*, 2001). Selon les travaux de Seck (2001), 61% des producteurs traitent chaque semaine. En plus, d'après les paysans, l'utilisation des produits phytosanitaires leur permet, mieux que la matière organique, de réaliser des productions précoces. Ce qui est un avantage considérable quand on sait qu'il y a une véritable course pour récolter, vendre très tôt et profiter des prix du marché avant qu'ils ne chutent.

#### **1.3. Toxicité des pesticides**

L'utilisation des pesticides suscite de nombreuses inquiétudes liées notamment à leur toxicité et à leur impact négatif sur l'homme et l'environnement. Parmi ceux-ci, on peut noter la contamination de la nappe phréatique, les phénomènes de résistance consécutifs à l'accoutumance des déprédateurs aux produits utilisés, la dégradation des ressources naturelles et l'effet de rémanence. La substance toxique peut rester active durant plusieurs jours, semaines ou mois. Suivant la matière active, un délai de traitement avant récolte est nécessaire pour que le produit toxique ne soit plus présent sur les fruits ou les légumes récoltés (Cissé, 2001).

#### 1.4. Modes d'action des pesticides

Le mode d'action des pesticides s'effectue soit par contact direct avec le ravageur ou par action systémique. Dans le premier cas, le produit est ingéré ou inhalé par le ravageur. La deuxième voie est indirecte, le produit est assimilé d'abord par la plante, puis sera véhiculé à l'intérieur de celle-ci par la sève et agira lorsque le ravageur consommera la plante.

#### 2. Impact des insecticides sur la mycorhization

Les insecticides et n'ont généralement pas d'effet adverse sur les champignons introduits. Ils peuvent même, dans certains cas stimuler la formation endomycorhizienne en limitant la prédation des champignons MA par des insectes ou des nématodes (Bird et al., 1974). Certains insecticides n'ont pas d'effet sur la symbiose des champignons MA, pendant que d'autres insecticides appliqués à doses recommandées, diminuent la colonisation de racine des plantes hôtes (Trappe et al.; 1984).

La dose d'application est généralement décisive. Le diméthoate appliqué jusqu'à 5 mg/l n'affecte pas la germination des spores de *Glomus mosseae*. Cependant, une dose de 0,5 mg/l de diméthoate augmente la germination de *Gigaspora roseae*. Par contre, 5 mg/l de diméthoate ont diminué la germination des spores de *Scutellospora castaneae*. Les champignons mycorrhiziens arbusculaires présentent une variabilité de réponse en fonction de la dose d'application de l'insecticide systémique (Menendez et al., 1998). Ce même auteur a montré aussi que les champignons endogènes sont plus sensibles aux effets des insecticides que les champignons exogènes. Ce phénomène a été démontré chez le soja inoculé par *Glomus mosseae* comparé au témoin non inoculé et sur sol non stérilisé. Une diminution du pourcentage de colonisation des racines de soja a été notée chez le soja non inoculé, mais aucun effet significatif n'a été observé sur la colonisation des racines de soja inoculée avec *G. mosseae*. Comme ce qui a été trouvé avec d'autres pesticides, les variations des effets des pesticides sur les champignons mycorrhiziens peuvent être attribués aux types de souches mycorrhiziennes impliquées (García-Romera et Ocampo 1988 ; Gerdemann et Trappe 1974). Il est connu que quelques acides organiques et sucres inhibent la germination de spore de quelques espèces de champignons et stimulent de développement des hyphes chez d'autres champignons. Cela peut expliquer les différents effets du même insecticide ou du groupe d'insecticides

sur la colonisation racinaire des champignons mycorhiziens (Habte et Manjunath, 1994 ; Trappe et *al.*, 1984).

Eu égard de ce qui précède on peut dire que selon la nature de la substance, il s'est avéré que les fongicides sont plus toxiques que les herbicides et les insecticides (Belkouri et *al.*, 2009).

---

---

## **CHAPITRE 2 :**

### **Réponse de deux variétés de la pomme de terre à la mycorhization**

---

---

Le but recherché dans cette expérience est de sélectionner les meilleurs couples symbiotiques en vue d'évaluer leur comportement au champ.

Une partie des résultats obtenus a fait l'objet d'une présentation orale aux journées doctoriales du 15 au 17 Décembre 2009 à l'Ecole Doctorale Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement de l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar.

## INTRODUCTION

La pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) a une exigence élevée en engrais phosphoré pour une croissance et un rendement optimal. D'où une carence en P réduit considérablement ces paramètres de productions (Balemi, 2009). Or, ces engrais sont aussi coûteux que polluants. Leur utilisation peut être réduite grâce à l'introduction de biofertilisants, les champignons MA. Ils sont particulièrement efficaces dans l'amélioration de l'absorption du phosphore. L'exploitation des bénéfices éventuels des inocula endomycorhiziens est donc, une voie prometteuse dans la culture de pomme de terre. Chez les plantes d'intérêt agronomique, on a souvent observé les bienfaits de la symbiose endomycorhizienne sur l'amélioration de la croissance, du rendement (Menge, 1982 ; Miller et al., 1986 ; Jeffries, 1987; Plenchette, 1991). Ces avantages sont dus à une meilleure nutrition phosphatée qui est une propriété des champignons mycorhiziens arbusculaires.

Leurs propriétés biofertilisantes et biostimulantes ont été démontrées chez la pomme de terre (Ndiaye et al., 2005). Cependant, les différentes espèces ou isolats de champignons MA peuvent varier dans leur efficacité à coloniser la plante hôte et à lui apporter des bénéfices. Cette variabilité a été largement explorée, notamment dans les cultures légumières. Ainsi, pour des plants de pomme de terre produits en conditions artificielles, *Glomus intraradices* s'est révélé plus efficace pour augmenter leur croissance et leur nutrition que *Glomus mossea* et *Glomus dimorphicum* (McArthur et Knowles, 1993).

En outre, les différentes espèces végétales vont varier également dans leur réceptivité à l'infection par les champignons MA et dans leur dépendance envers ces microorganismes. Cette dépendance mycorhizienne (DM) peut être définie comme le rapport de la matière sèche de plante mycorhizée sur la matière de plante non mycorhizée (Menge et al., 1982). La notion de dépendance mycorhizienne a été introduite par Gerdemann (1975) et sa valeur doit être comprise entre 0 et 100% (Plenchette, 1983a). Elle peut varier en fonction de l'habileté pour la plante à acquérir des nutriments (Smith et al., 1997). Cette habileté est, elle-même, une caractéristique fortement influencée par la géométrie du système racinaire de la plante. Les facteurs édaphiques du milieu de culture tels que le pH, la teneur en phosphore et la texture du

sol, influencent aussi la dépendance mycorhizienne (Mosse, 1972b). En effet, il est démontré que le rendement en tubercules de pomme de terre est significativement supérieur (40%) dans un sol comportant une microflore endomycorhizienne indigène, comparativement à un sol exempt de mycorhizes (Plenchette, 1983a).

C'est dans cette perspective que nous nous sommes fixés comme objectif de déterminer les meilleurs couples symbiotiques de différentes variétés de pomme de terre et de souches de champignons MA.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Matériel végétal

Le matériel végétal de base est constitué de tubercules des variétés Atlas, Aïda et Odessa. Ces tubercules ont été exportés de chez GERMICOPA en France.

#### 2.1.1. Germination

Les tubercules sont conservés au froid à 4 °C pendant 4 mois. Ils ont donc été mis en fin de phase de dormance. Pour accélérer le débourrement des germes en attente sur les tubercules, un prétraitement à l'acide gibbérellique leurs est appliqué selon la technique préconisée par Bryan (1990). Pour ce faire, les tubercules sont immergés et maintenus en agitation dans une solution de GA<sub>3</sub> à 10<sup>-2</sup> M pendant 10 mn. Ils sont ensuite essuyés, séchés puis placés dans une enceinte étanche et obscure. Le contenant est entreposé dans un local isotherme bien aéré à 25 °C.

#### 2.1.2. Procédé de désinfection des germes

Les germes sont délicatement prélevés des tubercules à l'aide de scalpel. Pour éviter une pénétration en profondeur du désinfectant qui provoquerait la brûlure voire l'altération létale des tissus des germes. Leur extrémité est obturée en les plongeant dans un bain de paraffine liquidifiée à 40°C en maintenu sous agitation. Les germes sont désinfectés en surface par passages successifs dans des bains spécifiques que nous avons résumés dans le tableau 4 ci-dessous.

***Tableau 4: Désinfection des germes de pomme de terre***

<b>Solution en agitation</b>	<b>Durée du traitement</b>
Eau distillée + 10-20 gouttes Tween 80*	10 min
Prétrempage dans Alcool 70 °C	10 sec
Désinfection à HgCl <sub>2</sub> à 0,1% + 10-20 gouttes de Tween 80*	5-10 min
Rinçage Eau distillée (x6)	5 min

N.B. \* Le Tween 80 est un agent mouillant ou surfactant qui augmente le pouvoir de pénétration du désinfectant. Le chlorure mercurique (HgCl<sub>2</sub>) est un produit stérilisant très efficace mis c'est un poison violent très difficile à éliminer. Ainsi les 6 rinçages successifs sont réalisés au lieu de 3 rinçages habituels.

Dès l'application du désinfectant les opérations se déroulent sous la hotte à flux laminaire pour éviter toute nouvelle contamination du matériel de base. Les germes sont maintenus immergés dans la dernière eau de rinçage mais lors de leur mise en culture, ils sont essuyés et récupérés sur papier Whatman stérilisé.

### **2.1.3. Production de vitroplants**

Les germes des trois variétés sont ensemencés sur du milieu de Murashige et Skoog (MS) (1962) dépourvus de régulateurs de croissance (**Annexe 1**). Le milieu est solidifié à l'agar à raison de 7 g l<sup>-1</sup>. Le pH est ajusté à 5,7. La culture est effectuée dans des bocaux d'une capacité de 660 ml contenant 50 ml du milieu MS de culture. Les bocaux et leur contenu ont été au préalable stérilisés à l'autoclave à 110 °C pendant 20 min.

Les germes sont découpés aseptiquement en fragments comportant chacun un nœud. Chaque fragment constitue donc une bouture mononodale. Chaque bouture monodale est introduite dans un tube de culture tout en respectant la polarité apico-basale originelle.

Les cultures sont entreposées dans une chambre de culture dont la température est de 28 °C. La photopériode est de 16 h de jour et l'intensité lumineuse équivalant à 101,4  $\mu\text{moles.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . L'humidité relative dans la chambre de culture est environ de 55%.

Au bout de 4 semaines de culture, les explants constitués sont découpés en autant de boutures uninodales (3 à 7) et repiquées dans un nouveau milieu de culture ayant les mêmes caractéristiques que le milieu MS précédant. Les vitroplants âgés de 10 jours et mesurant environ 7 cm sont utilisés comme matériel végétal.

Pour toutes les deux variétés, les vitroplants ont montré un développement végétatif satisfaisant sur milieu MS après 10 jours de culture (**figure 4**).



**Figure 4** : Aspect des vitroplants d'Atlas en chambre de culture après 10 jours

## 2.2. Matériel fongique

Le matériel fongique utilisé est constitué de 5 champignons mycorhiziens arbusculaires appartenant à la collection du Laboratoire de Biotechnologies des Champignons (LBC) au Département de Biologie Végétale de la Faculté des Sciences et Techniques (Dakar, Sénégal). Les caractéristiques qui permettent de distinguer ces souches sont les suivantes :

- *Glomus mosseae* (Nicholson & Gerd. Gerd. & Trappe) (DAOM 227 131), isolé à Diokoul au Sénégal.
- *Glomus aggregatum* (Schenke & Smith emend. Koske) (DAOM 227 128), isolé à Djignaki au Sénégal
- *Glomus fasciculatum* (Thaxter *sensu* Gerdemann Gerd.) (DAOM 227 130), isolé à Louga au Sénégal.
- *Glomus intraradices* (Schenk et Smith) (DAOM 197 198), isolé au Québec
- *Glomus manihotis* (Howeler, Sieverding & Schenk) (IR. 15), isolé au Dinderesso au Burkina Faso.

La production de l'inoculum des souches MA est effectuée en serre. Le maïs (*Zea mays* L.) est utilisé comme plante piège. Le substrat est constitué du sable grossier de plage pauvre en phosphore. Il est préalablement lavé à l'eau courante ensuite, stérilisé à 120 °C pendant 2 h puis mis dans des pots de capacité 1,5 kg. Les caractéristiques physico-chimiques du substrat sont présentées dans le tableau 5.

**Tableau 5** : Caractéristiques physico-chimiques du sable de plage

Constituants	Teneurs
argile	0,0
limon fin	0,0
limon grossier	0,0
sable fin	0,16%
sable grossier	98,2%
matière organique	0,0
C	< 0,08%
P (ppm)	16,00
N	0,073%
pH	8,0

L'inoculation est effectuée après levée des plants de maïs en apportant 10 g d'inoculum mycorhizien en contact avec les racines de la plante piège. Les plantes sont régulièrement arrosées avec un apport de 100 ml d'une solution nutritive de Long Aston (Hewitt, 1966) tous les 15 jours. La composition de cette solution est dans l'annexe II. Au bout 3 mois, la récolte des plantes est effectuée en prélevant d'une part le substrat qui sera séché et mis dans des sachets en plastique et d'autre part les racines qui sont soigneusement rincées et placées dans des tubes fermés (**Photo 2**).

Le degré de mycorhization des racines de maïs et la sporulation sont vérifiés sous loupe binoculaire par observations non destructives au grossissement x 40. L'ensemble des échantillons récoltés est conservé au froid à 4 °C jusqu'à utilisation.



**Photo 2** : Production d'inoculum mycorhizien arbusculaire en serre

La coloration des racines au bleu Trypan a montré la présence de structures typiques de champignons mycorhiziens après 3 mois de production d'inoculum en pots. Après tamisage humide et extraction des spores selon la méthode de Gerdemann et Nicolson, (1963), nous avons noté une sporulation profuse de tous les champignons testés (plus de 100 propagules mycorhiziennes pour 50 g de sol utilisé).

### **2.3. Inoculation des plants de pomme de terre**

L'inoculation est effectuée le jour de la transplantation de la pomme de terre en serre. Elle consiste à mettre 10 g d'inoculum dans un trou de 2 à 3 cm en contact du système racinaire de chaque plant.

### **2.4. Dispositif expérimental**

La réponse à l'inoculation de 5 souches de champignons MA : *Glomus mosseae* (Gm) ; *Glomus aggregatum* (Ga) ; *Glomus fasciculatum* (Gf) ; *Glomus manihotis* (Gn) ;

*Glomus intraradices* (Gi) est évaluée sur les variétés Aïda, Atlas et Odessa de la pomme de terre.

Pour chaque variété, le dispositif expérimental était totalement randomisé avec 5 répétitions. L'expérience a duré 3 mois et les paramètres suivants sont étudiés :

### **2.5. Paramètres mesurés**

➤ La dépendance mycorhizienne (DM) est évaluée selon la méthode de Plenchette et *al.*, 1983. Les racines prélevées sont colorées selon la technique de Phipps et Haymans (1970) afin de rendre facile l'observation des structures de l'infection mycorhizienne.

Les racines sont rincées soigneusement à l'eau de robinet afin d'éliminer les particules de sables. Elles sont placées ensuite, dans des tubes à essai puis, une solution de KOH 10% est ajoutée dans chaque tube. Les tubes sont portés à ébullition dans un bain-marie 95 °C pendant 1h pour décolorer les racines et vider les contenues des cytoplasmes racinaires. Le KOH est éliminé et une série de rinçage (4 fois) est effectué à l'eau.

Une solution de 0,5 g de bleu de Trypan est mélangée avec 100 ml de vinaigre (ou 100 ml de lactophénol d'amman) dans 900 ml d'eau distillée. Le colorant déjà préparé est versé dans les tubes pendant 30 min. Le colorant est éliminé et les racines sont séjournées dans de l'eau jusqu'à l'observation.

L'examen histologique est effectué en déposant les fragments de racines de 0,5 cm de longueur, sur une boîte de Pétri quadrillée avec quelques gouttes de glycérol (**Annexe III**).

Le pourcentage de colonisation des racines a été déterminé selon la méthode d'intersection développée par Giovanetti et Mosse (1980). Les racines colorées sont observées à la loupe binoculaire. À chaque intersection d'une racine avec la grille, on détermine la présence des structures fongiques.

La dépendance mycorhizienne est calculée selon la formule :

$$DM = \frac{(\text{Poids matière sèche mycorhizée}) - (\text{Poids matière sèche non mycorhizée})}{(\text{Poids matière sèche mycorhizée})}$$

- La biomasse sèche aérienne : les plantes sont récoltées, débarrassées de leur partie racinaire et séchées pendant 7 jours à 60 °C à l'étuve. La matière sèche aérienne est pesée.
- Le nombre moyen de minitubercules produit est évalué après la récolte.

## **2.6. Analyse statistique**

Elle est effectuée par le logiciel XLStat Pro 2011 (version 13.2, AddinSoft®) et les comparaisons entre les moyennes sont faites grâce au test de Fischer LSD au seuil de 5 %.

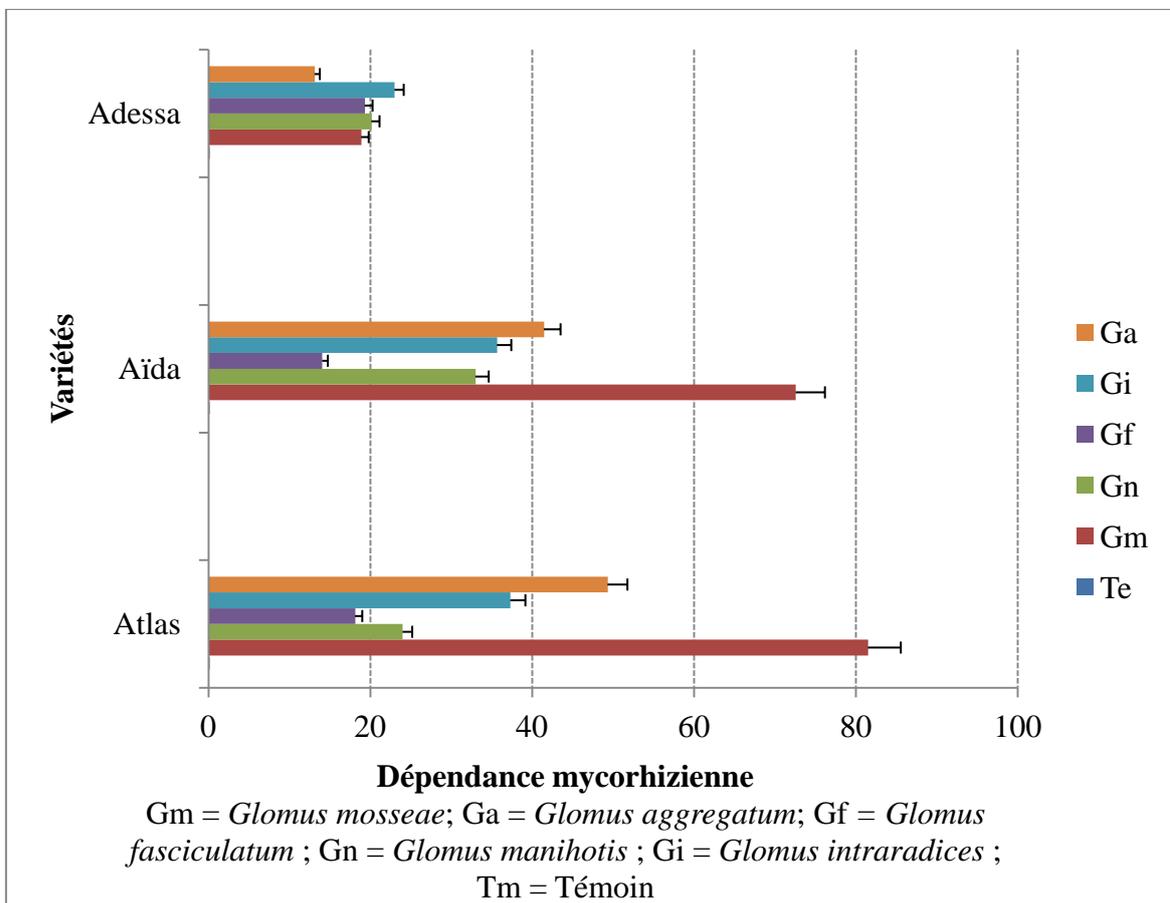
### 3. RESULTATS

#### 3.1. Dépendance mycorhizienne

Après trois mois de culture, les variétés de pomme de terre se sont révélées mycotrophes. La colonisation MA des racines, telle qu'observée à la loupe binoculaire, est constituée principalement d'hyphes intraracinaires enroulés et de vésicules caractéristiques de l'infection.

Les traitements témoins n'ont pas montré de propagules mycorhiziennes.

La dépendance mycorhizienne variable en fonction de la souche fongique et de la variété de pomme de terre (**Figure 4**).



**Figure 4 :** Dépendance mycorhizienne de trois variétés de la pomme de terre en serre

Les barres verticales représentent les écarts-types à la moyenne

### Chez Atlas

Les dépendances les plus élevées sont observées grâce la souche *G. mosseae* 81,51%, suivie de *G. aggregatum* 49,33% et *G. intraradice* 37,32%. Les souches *G. manihotis* et *G. fasciculatum* ont les plus faibles dépendances avec respectivement 24% et 18,12%.

### Chez Aïda

Pour la variété Aïda, la dépendance la plus élevée est notée également avec la souche *G. mosseae* 72,58%. La plus faible dépendance mycorhizienne (14%) observée avec la souche *G. fasciculatum*.

### Chez Adessa

Les dépendances mycorhiziennes sont toute inférieures à 40%. La plus grande est obtenue avec le *G. aggregatum* (34,12%) et la plus petite valeur est observée avec *G. mosseae* (14,88%).

## 3.2. Biomasse aérienne

Les plants de pomme de terre montrent un développement végétatif satisfaisant tout au long de leur culture. Aucun signe de nécrose n'est constaté. La photo 3 montre l'aspect des plants de la variété d'Atlas.



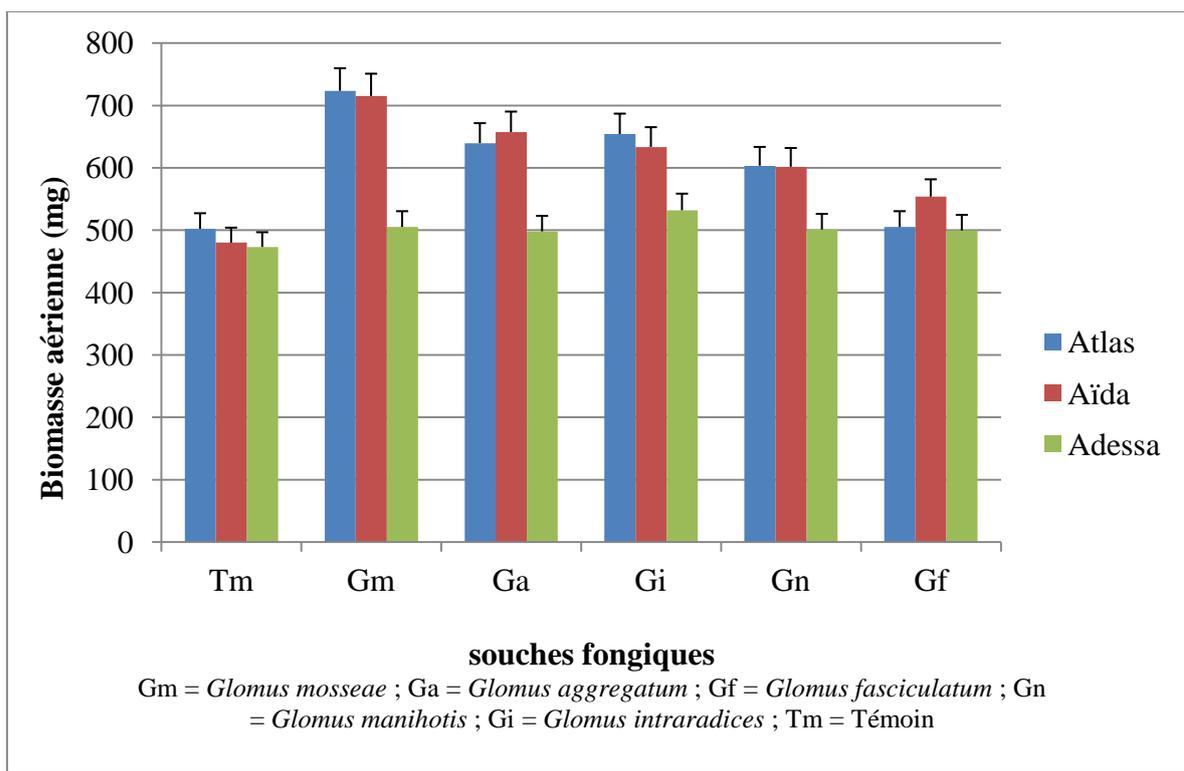
**Photo 3** : Aspect des vitroplants d'Atlas après deux semaines de culture en serre

La biomasse sèche des plants inoculés est significativement supérieure à celle du témoin pour toutes les variétés. Cependant, elle varie en fonction de la souche inoculée.

Chez la variété Atlas, la souche *G. mosseae* stimule significativement la biomasse aérienne des plants. Sa production atteint plus de 723,32 mg. L'inoculation des autres souches induit également de fortes augmentations de biomasses qui restent inférieures à celle entraînée par *G. mosseae*. Cependant, leurs effets restent inférieurs à ceux entraînés par *G. mosseae*.

Au niveau des plants d'Aïda inoculés, une stimulation de la biomasse aérienne est également observée, comparés au témoin. Les souches de champignons les plus efficaces sont *G. mosseae* et *G. aggregatum* qui entraînent une augmentation respective de 715,06 et 657,23 mg de biomasse.

Chez la variété Adessa, la biomasse la plus significative est obtenue avec la souche *G. intraradices*, 531,86 mg suivie de celle de *G. mosseae*, 505,1 mg. Les champignons *G. fasciculatum*, *G. manihotis* et *G. aggregatum* n'influent pas significativement la biomasse des plants (**Figure 5**).



**Figure 5:** Effet des champignons mycorhiziens sur la biomasse aérienne de la pomme de terre en serre.

Les barres verticales représentent les écarts-types à la moyenne

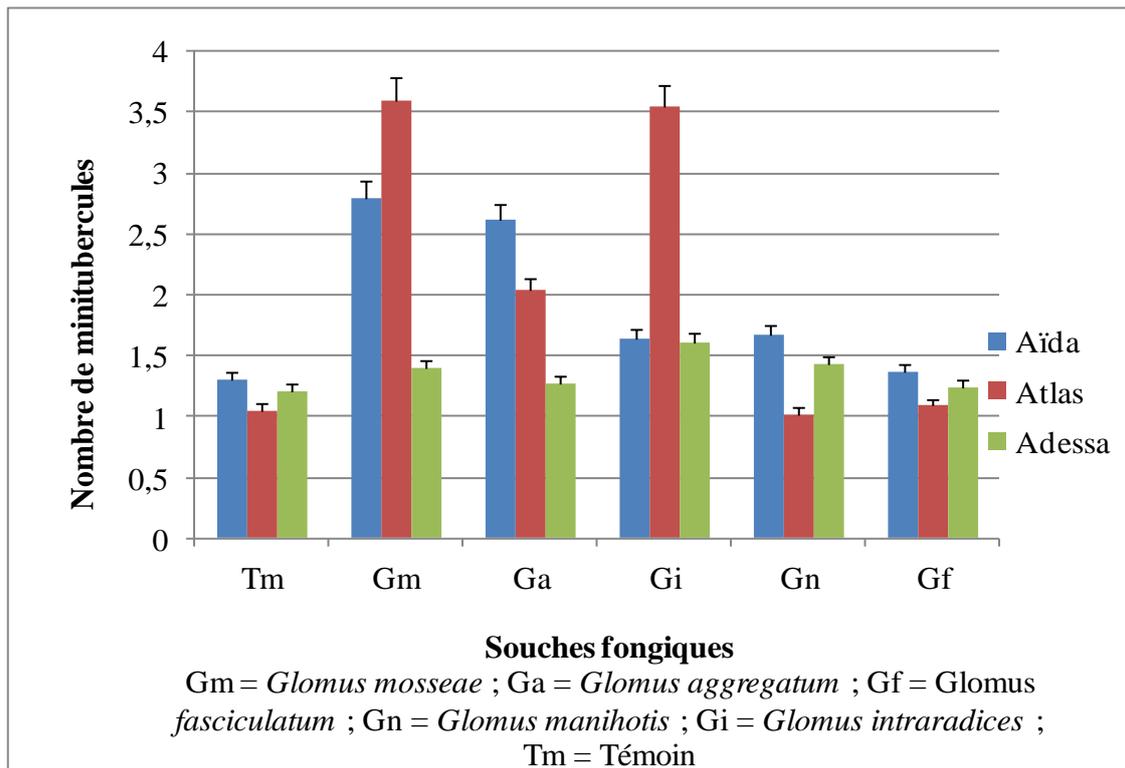
### 3.3. Nombre de minitubercules

Les traitements inoculés ont influencé significativement le nombre de minitubercules produits par toutes les variétés comparés aux témoins. Cet impact positif présente cependant une variabilité en fonction de la souche symbiotique.

Chez la variété Aïda les deux souches *G. mosseae* et *G. aggregatum* ont respectivement 2,80 et 2,72 minitubercules par plant en moyenne. L'effet des autres souches ne présentent pas de différence significative par rapport à leurs témoins.

Chez Atlas, se sont les deux souches *G. mosseae* et *G. intraradices* qui entraînent la production la plus significative en minitubercules.

Cependant, chez la variété Adessa, c'est la souche *G. intraradice* qui entraîne l'augmentation la plus significative du nombre de minitubercule (**Figure 6**).



**Figure 6 :** Effet des champignons sur le nombre de minitubercules de la pomme de terre en serre

Les barres verticales représentent les écarts-types à la moyenne

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Développement végétal et Production

L'inoculation de la pomme de terre avec les cinq souches fongiques a positivement stimulé la biomasse aérienne des vitroplants. Cependant, la réponse varie selon la variété et la souche inoculée.

Les variétés Atlas et Aïda ont plus bénéficié de l'introduction des inocula endomycorhiziens que la variété Adessa. Ces résultats obtenus en serre démontrent que les différentes variétés de pomme de terre peuvent présenter une variabilité de réponse de croissance, suite à l'inoculation endomycorhizienne (Desilets et *al.*, 1997 ; Desilets et Dugas, 1998).

Parmi les souches utilisées, *G. mosseae* a entraîné une production de matière plus importante suivie de *G. aggregatum*. Des résultats similaires ont été obtenus par les travaux de Vosatka et Gryndler, (2000) et Ndiaye et *al.*, (2005). Ailleurs, en conditions artificielles *G. intraradices* s'est révélé plus efficace pour augmenter la croissance et la nutrition des plants de pomme de terre que *G. mosseae* et *G. dimorphicum* (McArthur et Knowles, 1993b).

La production de minitubercules est stimulée par les champignons mycorhiziens. Cet effet positif sur le nombre de minitubercules peut s'expliquer par une accumulation de réserves au niveau des tubercules grâce l'amélioration du réseau hydrominérale par le champignon (Niemira et *al.*, 1995; Louche Tessandier et *al.*, 1999). Cet effet varie également selon le symbiote fongique et la variété de pomme de terre.

La production de minitubercules des variétés Atlas et Aïda a été plus améliorée par l'introduction des inocula endomycorhiziens que celle de la variété Adessa. Cet impact positif est plus marqué avec les souches *G. mosseae* et *G. aggregatum*.

Ailleurs, Niemira et *al.* (1995) ont démontré que la colonisation par le *Glomus intraradices*, avec de petites unités d'infection, engendrait une production plus uniforme et plus élevée de stolons et de minitubercules nucléaires de pomme de terre. Graham et *al.* (1976) avaient également observé en chambre de croissance que la colonisation par le *Glomus fasciculatum* favorisait la production d'un plus grand nombre de tubercules.

## 4.2. Mycorhization

Les vitroplants de pomme de terre étudiés sont mycotrophes après les 3 mois de culture. Cette compatibilité des champignons mycorhiziens avec les vitroplants de pomme de terre a été constatée en milieu contrôlé précédemment par Ndiaye *et al.*, (2005).

Nous avons observé une absence de colonisation mycorhizienne des racines des vitroplants au niveau des traitements témoins. Cela montre que la démarche adoptée a bien maintenu le système de culture hors contamination fongique.

Nos résultats indiquent également des différences significatives entre les niveaux de colonisation endomycorhizienne atteints chez les différentes variétés de pomme de terre utilisées. La variété Atlas s'est montrée plus compatible à la mycorhization suivie à celle d'Aïda. La variété Adessa a la plus faible dépendance mycorhizienne. Cette variabilité intraspécifique a déjà été démontrée chez plusieurs espèces cultivées (Smith *et al.*, 1992), dont la pomme de terre (Bhattarai et Mishra, 1984).

D'autres parts, les cinq souches ont différemment colonisé les racines des plants de pomme de terre. Cette colonisation est plus significative avec la souche *G. mosseae* suivie de *G. aggregatum*. Selon la variété, Atlas et Aida, semblent avoir grandement profité de la mycorhization avec la souche *G. mosseae* et *G. aggregatum*. Donc la pomme de terre montre une spécificité d'hôte pour la symbiose mycorhizienne.

La dépendance mycorhizienne observée chez toutes les variétés n'a pas atteint les 100%. Les travaux antérieurs de Déziel (2000) portant sur la mycorhization de la pomme de terre nous révèlent que cette espèce, bien que faiblement colonisée par les champignons MA, peut présenter des réponses morphologiques et physiologiques notables en présence des symbiotes fongiques. Cette dépendance notée pour une meilleure croissance peut être, entre autres, expliquée par la faible densité racinaire de la plante par rapport à son fort potentiel de croissance. En outre la différence de la dépendance observée au sein de la même variété a été décrite par plusieurs études (Koide *et al.*, 1988 ; Bryla et Koide, 1990 ; Khalil *et al.*, 1994 ; Sampath Kumar *et al.*, 2002 et Diop *et al.*, 2003).

## 5. CONCLUSION

Les trois variétés Aïda, Atlas et Adessa s'adaptent bien aux conditions locales du Sénégal.

Les résultats de nos travaux montrent que l'inoculation des racines de plants pendant la phase de transplantation améliore la croissance et production de minitubercules de pomme de terre. Les différentes espèces de champignons testées n'ont pas le même niveau d'efficacité envers les variétés testées. La dépendance mycorhizienne est plus observée avec les deux variétés Atlas et Aïda. La souche *Glomus mosseae* est plus compatible avec ces deux variétés que les autres souches testées.

Ces inocula endomycorhiziens, appliqués dans la culture de la pomme de terre, pourraient améliorer les rendements ou, du moins, permettre une réduction des intrants chimiques, notamment des engrais. Cette pratique pourrait également contribuer à améliorer la qualité des tubercules en offrant une protection contre les maladies telluriques et en limitant le développement des infections.

---

---

### **CHAPITRE 3 :**

#### ***Comportement au champ de deux variétés de pomme de terre importées (Atlas et Aïda)***

---

---

#### **Avant -propos**

Cette étude est le fruit d'une collaboration entre l'association des producteurs de Sangalkam et le Laboratoire de Biotechnologies de champignons (LBC) de l'UCAD. Les meilleurs couples sélectionnés dans l'expérience en serre, sont testés au champ à Sangalkam dans les itinéraires techniques utilisés par les producteurs en y intégrant la biotisation.

Les résultats ont fait l'objet d'une présentation orale aux journées doctorales du 15 au 17 Décembre 2009 à l'École Doctorale Sciences de Vie, de la Santé, et de l'Environnement de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (**Annexe VI**).

## INTRODUCTION

La pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) est la cible de nombreux microorganismes pathogènes. Parmi ceux-ci, les bactéries responsables de la gale commune (*Streptomyces* sp.) et de la pourriture molle (*Pectobacterium* sp.) les champignons responsables du rhizoctone brun (*Rhizoctonia solani*) et du mildiou (*Phytophthora infestans*). Ces pathogènes entraînent une baisse du rendement.

L'utilisation intensive et systématique de pesticides pose des problèmes environnementaux (pollution des nappes phréatiques et pollution aérienne, présence de résidus dans les sols et les végétaux) et de santé humaine aussi bien pour l'utilisateur que pour le consommateur. Or, la place importante des pesticides dans la production de pomme de terre ne fait plus de doute. D'où la nécessité d'élargir la filière vers une production intégrée.

A l'heure du développement durable et face aux exigences nutritionnelles, aux contraintes phytosanitaires de la culture de la pomme de terre, l'utilisation des champignons mycorhiziens représente un enjeu majeur.

L'exploitation du potentiel microbiologique des sols et en particulier celui des champignons mycorhiziens arbusculaires permet une meilleure adaptation de la culture des tubercules de pomme de terre. Plusieurs travaux ont démontré l'efficacité des champignons mycorhiziens arbusculaires dans l'amélioration de la culture de pomme de terre (Ndiaye et *al.*, 2004 ; Al-karaki et *al.*, 1999). La symbiose mycorhizienne arbusculaire concerne plus de 80% des plantes terrestres et la presque totalité des plantes cultivées. Elle conduit à une meilleure croissance et à une meilleure résistance à divers stress biotiques et abiotiques pour le partenaire végétal. Les champignons MA améliorent la nutrition hydrique et minérale de la plante grâce à des transferts d'eau et des éléments minéraux, en particulier le phosphore et l'azote vers la plante hôte. Il en résulte une amélioration de la croissance et du rendement des plantes mycorhizées.

La mycorhization permet de quantifier l'amélioration de la croissance et de la nutrition de la plante même dans les conditions habituelles de sa fertilisation. On enregistre également une modification positive du comportement de la plante face à des pathogènes du sol (Dalpé, 2005). En plus, cette protection est non seulement locale mais également systémique. Cela a été démontré chez la tomate et l'orge colonisé par *Glomus*

*mosseae* contre *Phytophthora parasitica* et par *Glomus versiforme* contre *Ralstonia solanacearum*.

L'intégration des microorganismes bénéfiques décrits ci-dessus en culture de pomme de terre est une initiative soutenue par l'association des producteurs de Sangalkam.

C'est dans ce contexte que nous nous sommes intéressés à évaluer l'efficacité des inocula endomycorhiziens (MA) à améliorer les rendements et la qualité de différents cultivars de pomme de terre sous des conditions usuelles de sa production.

Les objectifs spécifiques suivants sont déclinés :

- Produire de l'inoculum de champignons mycorhiziens arbusculaires
- Produire de la pomme de terre dans les itinéraires techniques de sa culture au Sénégal à partir de semences importées.
- Évaluer l'efficacité de la symbiose *Solanum tuberosum* / champignon mycorhizien arbusculaire au champ.

## 2. METHODOLOGIE

### 2.1. Site expérimental

Le site d'expérimentation de notre étude se situe dans la zone des Niayes à Sangalkam. Il se trouve précisément dans un domaine agricole que l'État a attribué à la Fédération des Maraîchers (FPMN) de la zone. Il comporte des parcelles de terre pour la production, ainsi que des infrastructures de stockage et de conditionnement de fruits et légumes.

#### 2.1.1 Caractérisation du sol

Les parcelles sont situées sur des sols sablo-limoneux qui sont relativement riches en matière organique et localisés en dépression inter-dunaire (**Tableau 6**). Les parcelles étaient mises en jachère après une culture céréalière sous pluies. Ce qui nous amène à considérer nos essais comme faisant partie d'une rotation de type « céréale-jachère-pomme de terre » qui constitue en principe une bonne pratique culturale.

**Tableau 6 :** *Caractéristiques physico-chimiques du sol de culture.*

<b>Constituants</b>	<b>Teneurs</b>
argile	5,4%
limon	5,8%
sable	89%
carbone	0,3%
azote total	0,02%
potassium total	333,5 ppm
phosphore total	41,4 ppm
phosphore assimilable	2,1 ppm
calcium	1,03 ppm
magnésium	0,3 ppm
pH (H <sub>2</sub> O)	6,0

## 2.1.2. Potentiel mycorhizien du sol étudié

### 2.1.2.1. Préparation de l'échantillon

La richesse des propagules mycorhiziennes arbusculaires du sol de Sangalkam est déterminée. Dix prélèvements de sol ont été faits au niveau de l'horizon 0-15 cm de la rhizosphère. Une partie de chaque échantillon de sol est stérilisée à l'autoclave à 120 °C pendant 2 heures. Un mélange de sol stérilisé et non stérilisé d'un même échantillon est mis dans un bécher à l'aide de spatule pour effectuer des dilutions.

Les dilutions sont comprises entre  $10^{-1}$  et  $10^{-6}$  :

1) Dilution  $10^{-1}$  : 30 g de sol non stérilisé + 270 g de sol stérilisé soit = 300 g

A partir des ces 300 g de mélange, 250 g sont prélevés et répartis dans les cinq répétitions à raison de 50 g par pot et sur les 50 g restant, 30 g sont prélevés pour les dilutions suivantes :

2) Dilution  $10^{-2}$  : 30 g du sol 1) +270 g de sol stérilisé

3) Dilution  $10^{-3}$  : 30 g du sol 2) +270 g de sol stérilisé

4) Dilution  $10^{-4}$  : 30 g du sol 3) +270 g de sol stérilisé

5) Dilution  $10^{-5}$  : 30 g du sol 4) + 270 g de sol stérilisé

6) Dilution  $10^{-6}$  : 30 g du sol 5) + 270 g de sol stérilisé

### 2.1.2.2. Conditions de culture

Avant la mise en culture, les graines de maïs sont désinfectées à l'eau de javel (90%) pendant 4 min puis rincées abondamment à l'eau stérilisée. Elles ont été imbibées pendant 20 mn dans de l'eau distillée stérilisée avant d'être prégermées dans des boîtes de Pétri contenant de l'eau gélosée (1%). Les boîtes sont incubées à l'obscurité pendant 24 h à 30 °C. Après germination, les plantules sont repiquées dans des multipots contenant le sol à raison d'une par pot. Les plantules remises régulièrement à la capacité au champ sont transférées dans une chambre de culture avec une photopériode de 12 h et une température de 26 °C pendant 6 semaines.

### 2.1.2.3. Observation et estimation du MPN

Après 6 semaines de culture, les plants de maïs sont récoltés et les racines sont colorées par la méthode de Philips et Hayman (1970).

L'estimation du nombre le plus probables de propagules mycorhiziennes (ou MPN) se fait par la table de Cochran (1950) à partir des résultats d'observation (mycorhize ou non) obtenus pour les cinq répétitions de chaque dilution de sol.

La lecture de la table se fait en prenant la dernière dilution pour laquelle la mycorhization est observée au niveau des 5 répétitions. Si ce cas ne se présente pas, c'est la dernière dilution présentant le plus grand nombre de plants mycorhizes qui est considérée. On reporte le nombre de plants mycorhizés de cette dilution et des 2 dilutions suivantes (p2 et p3), on obtient un nombre de trois chiffres qui reporté sur la table. Cette dernière nous fournit un coefficient et on obtient le MPN pour 50 g de sol initial en multipliant ce coefficient par le facteur de dilution de p2. L'écart type correspondant est obtenu en utilisant la table de Cochran (**Annexe vii**).

## 2.2. Matériel végétal

Le matériel végétal comprend des semences de deux variétés de pomme de terre Atlas et Aïda importées de chez Germicopa. Les caractéristiques de ces deux variétés sont présentées dans le (**Tableau 7**).

**Tableau 7:** Caractéristiques morfo-agronomiques des variétés de pomme de terre étudiées.

Spécifications Caractéristiques	AIDA	ATLAS
origines génétiques	Spunta x Vivaks	Spunta x José
maturité	demi-tardive mais maturité précoce	relativement tardive
tubercule	oblongs allongés, chair jaune clair	oblong, très gros calibre, chair jaune
maladies	bonne résistance au mildiou du feuillage	sensible aux virus de l'enroulement
plante	taille moyenne, port demi-dressé	taille haute, port dressé

### 2.3 Matériel fongique

Le matériel fongique servant à l'inoculation appartient à la collection du Laboratoire de Biotechnologies des champignons (LBC) de l'UCAD. Il s'agit de la souche de champignons mycorhiziens arbusculaires : *Glomus mosseae*, Nicolson et Gerd. ; Gerd. et Trappe : isolé à Diokoul au Sénégal (DAOM 227 131).

La production d'inoculum mycorhizien arbusculaire est réalisée comme le processus précédemment décrit le chapitre 1.

### 2.4. Dispositif expérimental et plantation

#### 2.4.1. Aménagement et préparation des parcelles expérimentales

Cette opération comprend les labours, le traçage et la délimitation des parcelles.

Les labours sont réalisés en deux temps. Un premier est effectué pour l'enfouissage des résidus de jachère et un second avant plantation pour la préparation du lit de semis.

Le travail du sol est réalisé au moyen d'une charrue à disques (offset) de diamètre 60 mm, en 2 passages croisés chaque fois.

#### 2.4.2. Dispositif expérimental

Le champ d'expérimentation a été gracieusement mis à notre disposition, de même que l'eau et le matériel pyrotechnique (tracteur, arrosoirs, produits phytosanitaires).

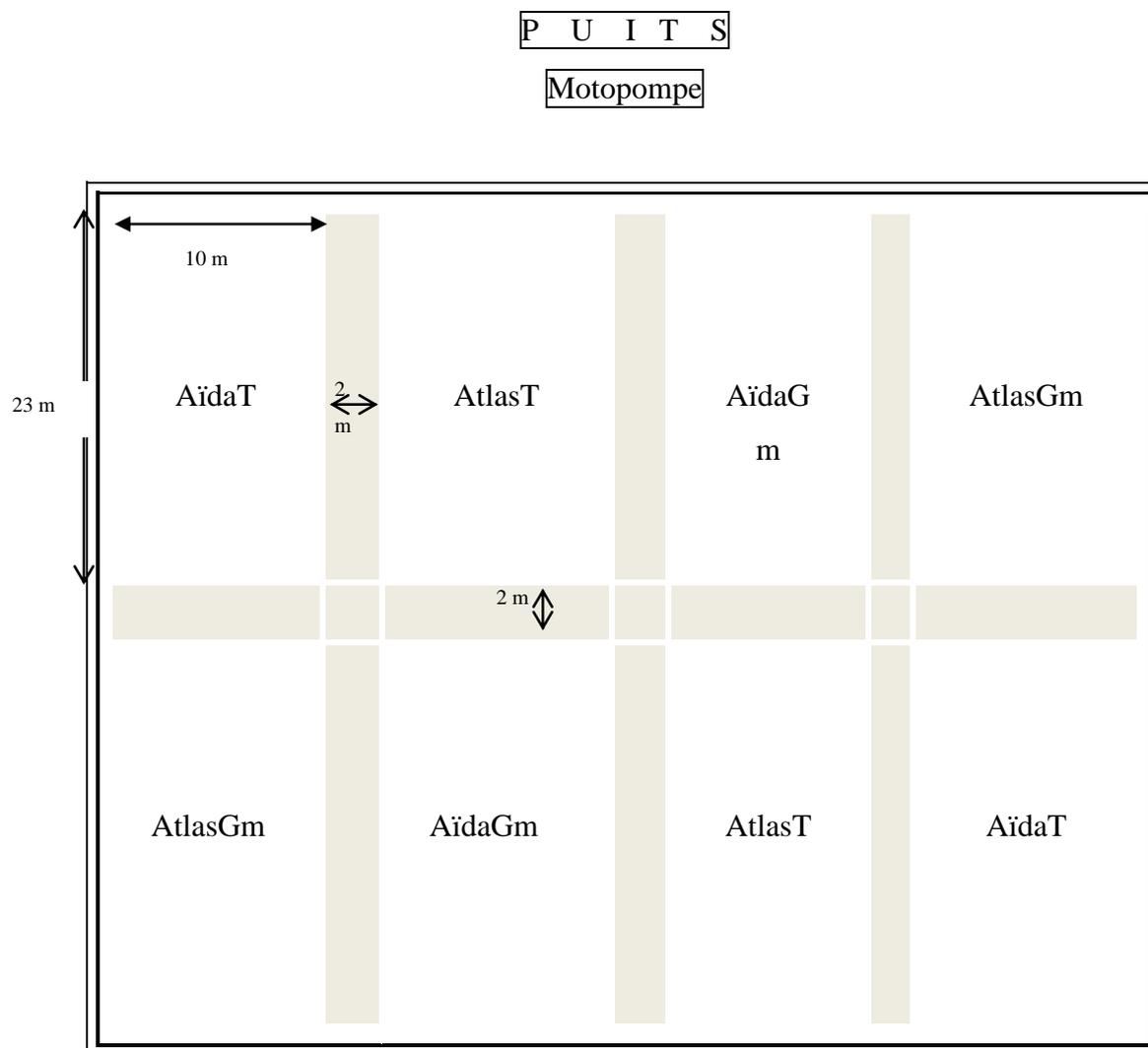
Le semis est effectué suivant un dispositif en blocs complètement randomisés ou blocs de FISCHER. Deux blocs sont délimités contenant chacun 4 parcelles élémentaires faisant lieu d'unité expérimentale par traitement. Les traitements suivants sont effectués :

- Aïda témoin,
- Aïda + *Glomus mosseae*,
- Atlas témoin,
- Atlas + *Glomus mosseae*.

Chaque traitement est répété deux fois, ce qui fait 8 parcelles élémentaires (**Tableau 8**).

Les dimensions des parcelles sont : 10 m x 23 m, avec des intervalles de 2 m entre les parcelles et de 2 m entre les blocs.

**Tableau 8 : SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL**



T= Témoin, Gm= *Glomus mosseae*

### 2.4.3. Plantation

Après une période de pré-germination de 2 semaines, les tubercules de calibre 28/35 mm sont plantés dans des sillons peu profonds de 10 cm. Les écartements suivants ont été respectés : 0,60 m entre les lignes et 0,30 m sur la ligne.

## 2.5. Entretien

### 2.5.1. Irrigation

Le système d'irrigation mis en place est le « goutte à goutte ». Le réseau d'irrigation, partant d'un puits d'une profondeur d'environ 10 m (hauteur d'eau 2,5 m), est constitué d'une motopompe de 10 m<sup>3</sup>/h qui dessert une rampe en PE ø 50 munie de gaines à goutteurs à écartement régulier de 60 cm (**Photo 4**).



**Photo 4** : Puit d'irrigation utilisé au champ

La rampe divise le dispositif en 2 blocs de 4 parcelles sur l'axe de la pompe (**Photo 5**).



**Photo 5** : Dispositif d'irrigation utilisé au champ

La pomme de terre demande de l'eau à tous les stades de sa végétation, surtout durant la phase de tubérisation. Il lui faut des arrosages réguliers, bien répartis, sans période de sécheresse. L'irrigation influe beaucoup sur le rendement et la qualité.

Les besoins en eau (pertes comprises) sont en moyenne de l'ordre de 50 m<sup>3</sup>/j. Par rapport à la superficie emblavée et au débit de la motopompe, la durée d'irrigation journalière est de 1h. La dose d'irrigation est apportée d'abord en 2 fois pendant 2 semaines après le semis, ensuite 3 fois à partir de 15 jusqu'à 75 jours après semis, enfin 2 fois de 76 à 90 jours après semis. Les pré-irrigations sont effectuées à 5, 3 et 1 jours avant semis.

### **25.2. Traitement phytosanitaire**

Le programme de traitement phytosanitaire mis en place comporte :

- un 1<sup>er</sup> traitement aux insecticides Spiphor: 50 g/kg de matière active, appliqué à 5 jours avant plantation
- un 2<sup>ème</sup> traitement au Furadan : 50 g/kg, appliqué en couverture, 35 jours après plantation.

### **2.5.3. Fertilisation**

Compte tenu des apports de la jachère précédente et de l'enfouissage des résidus de récolte dont a bénéficié le terrain, aucune fumure organique n'a été apportée.

Un engrais de couverture NPK 250 kg/ha (10-10-20) est apporté à trois semaines après plantation.

### **2.5.4. Inoculation**

L'inoculum est constitué de propagules mycorhiziennes d'une souche fongique *Glomus mosseae*. L'inoculation consiste à apporter sur des lignes sélectionnées au hasard et à chaque pied de Aïda ou Atlas, 20 grammes d'inoculum composé de spores (environ 50 spores/g substrat) et de fragments de racines de maïs colonisés (80% de mycorhization) (**Photo 6**). Elle est réalisée 21 jours après plantation et est suivie d'un léger arrosage pour tasser le sol.



**Photo 6 :** Inoculation au champ des plants de pomme de terre

## 2.6. Suivi des cultures

- Un sarclo-buttage est effectué à 30 jours de plantation, afin de favoriser la formation des stolons au pied des tiges et de protéger les tubercules contre les infections.
- Le désherbage est effectué manuellement à la demande (**Photo 7**).



**Photo 7 :** Désherbage et binage des parcelles de pomme de terre

## 2.7. Paramètres mesurés

### 2.7.1. Pourcentage de levées des minitubercules

Un échantillonnage a été fait de la manière suivante : sur chaque ligne, une portion de 3,75 m (soit 25 minitubercules plantés) a été délimitée par 2 piquets. Les relevés portent donc uniquement sur ces 25 pieds par ligne. Le comptage est fait tous les 3 jours dans

l'intervalle des 3,75 m et s'arrête lorsque le nombre compté atteint 25 (maximum de levée, 100%) ou lorsqu'il reste constant pendant 3 relevés ou plus.

### **2.7.2. Croissance en hauteur**

Afin d'observer dans le temps la vigueur des plantes, l'élongation de la tige principale est mesurée à partir de 2 semaine du semis. Les mesures sont prises sur 20 plantes par variété avec une grande règle qui part du sol au bourgeon terminal.

### **2.7.3. Aspect phytosanitaire**

Les attaques bactériennes responsables du flétrissement de la plante sont évaluées grâce au test de l'exsudat positif (CDE, 2009). La tige suspecte est sectionnée au niveau du collet et plongée verticalement dans un verre d'eau. S'il s'agit bien de pourriture brune, de fins filaments blancs (exsudat bactérien) s'échappent de la tige après 2 à 3 min d'immersion. Toute plante ayant une tige positive au test de l'exsudat est considérée comme malade.

### **2.7.4. Rendement en tubercules**

Sur chaque ligne, un intervalle de 6 m représentant 40 plants (6 m x 0,15 m) est délimité. Les tubercules récoltés, sont rassemblés suivant la variété et le numéro de la ligne. Par la suite, ils sont pesés, ensuite les moyennes sont déterminées selon la surface.

### **2.7.5. Fréquence de mycorhization**

La coloration des racines est effectuée au LBC de l'UCAD selon la méthode de Philips et Hayman (1970) décrite dans le chapitre précédant.

La fréquence de mycorhization (nombre de fragments mycorhizés / nombre total des fragments) est évaluée sans tenir compte du stade de développement extra et intraracinaire des symbiotes. Seule la présence de propagules mycorhiziennes est comptabilisée (Trouvelot et *al.*, 1986).

### **2.7.6. Analyses statistiques**

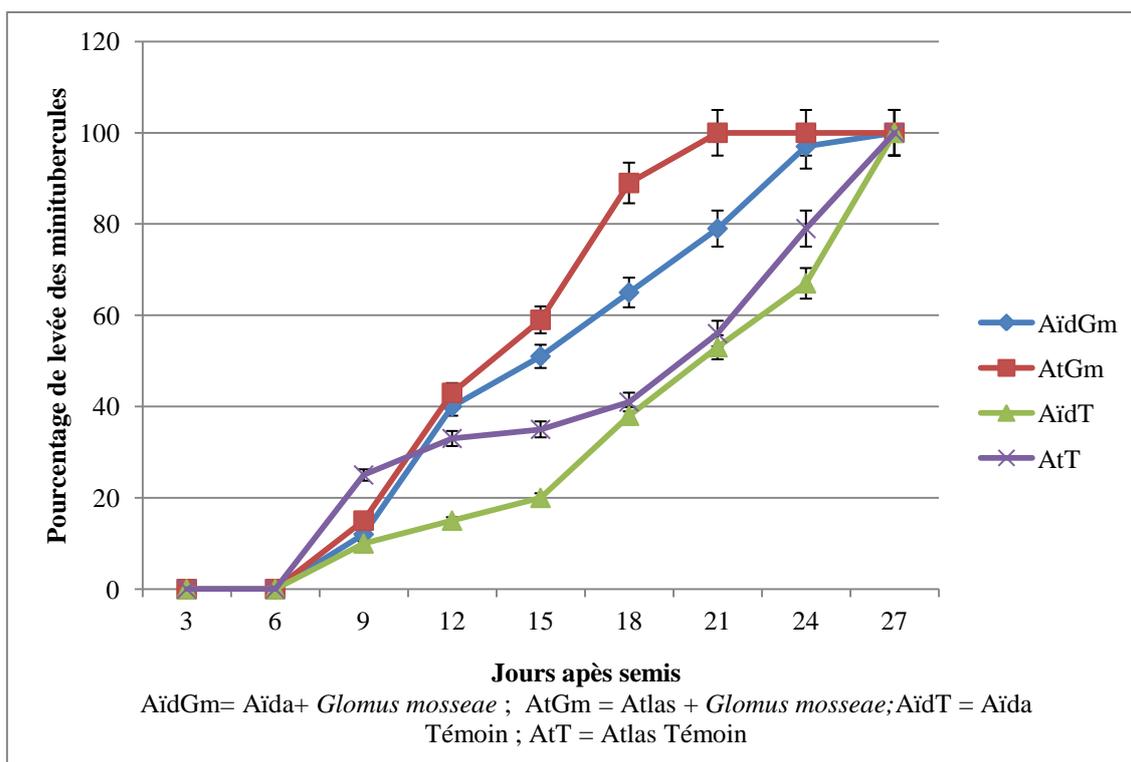
Les analyses de variance sur les données obtenues sont menées grâce au logiciel XLSTAT et le test de Fisher au seuil de 5% a permis de comparer les moyennes.

### 3. RESULTATS

#### 3.1. Paramètres de croissance des plantes

##### 3.1.1. Pourcentage de levées des minitubercules

Les premières levées de plantules ont été observées à partir du 6<sup>ème</sup> jour après semis chez les deux variétés (Atlas et Aïda). A partir de cette date jusqu'au 10<sup>ème</sup> jour, la levée est plus significative chez Atlas témoin que chez les autres traitements. L'effet de l'inoculation sur la germination des tubercules apparaît de manière significative à partir du 18<sup>ème</sup> jour. La variété Atlas inoculée germe plus rapide que tous les autres traitements et au 21<sup>ème</sup> jour tous les tubercules ont germé. La levée de la variété Aïda inoculée suit progressivement celle de Atlas inoculée à un rythme plus lente jusqu'au 21<sup>ème</sup> jour. A partir de cette date, la levée des deux traitements ne présente plus de différence significative (**Figure 7**).



**Figure 7 :** Effet mycorhization sur le pourcentage de levées des variétés Aïda et Atlas

Les barres verticales représentent les écarts-types à la moyenne

### 3.1.2. Croissance en hauteur

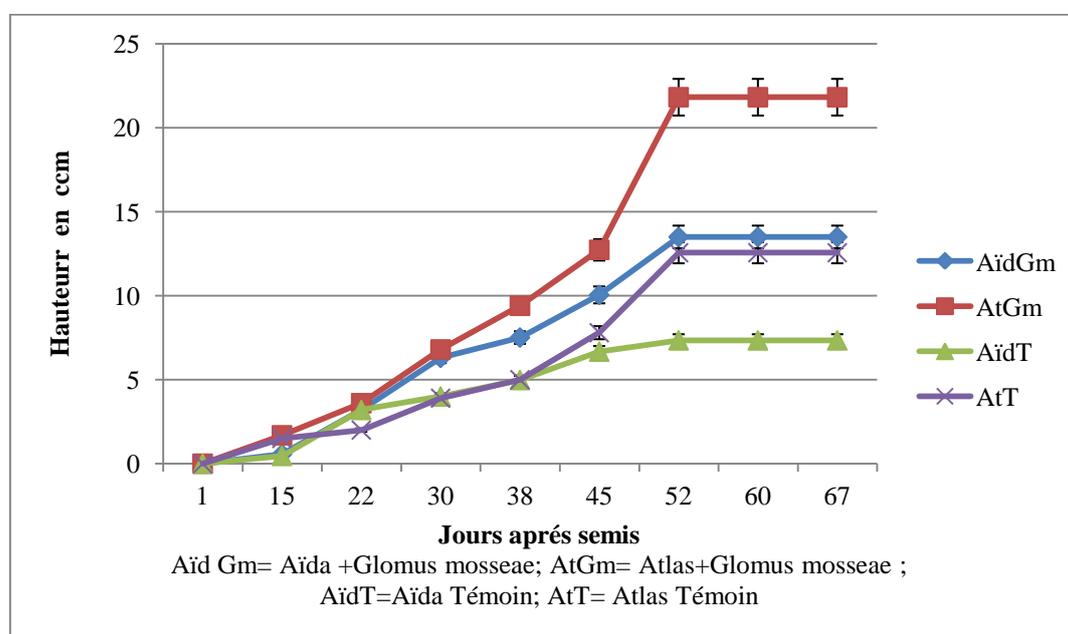
La hauteur des plantes augmente progressivement à partir de la deuxième semaine de culture jusqu'au 22<sup>ème</sup> jour chez tous les traitements. Après cette date, l'effet de l'inoculation se manifeste par une amélioration de la croissance et permet de distinguer deux groupes.

Le premier composé des traitements inoculés (Aïda et Atlas) montre une amélioration significative et de manière progressive de la hauteur des plantes jusqu'à 52 jours après semis. Le champignon *Glomus mosseae* entraîne la meilleure croissance chez les plantes de la variété Atlas comparées à celles d'Aïda.

Dans le second groupe (témoins) les hauteurs des plantes de aïda et de Atlas sont sensiblement les mêmes jusqu'à 45 jours de semis. Après cette date, la hauteur des plantes d'Atlas augmente significativement par rapport à celle d'Aïda.

Un retard de croissance est observé et de manière plus significatif chez la variété Aïda.

A partir de 52 jours de culture, nous avons constaté chez tous les traitements un arrêt de croissance, suivi d'un flétrissement des plantes. L'arrêt de croissance est plus manifeste chez la variété Aïda (**Figure 8**).



**Figure 8:** Effet mycorhization sur la hauteur moyenne des plants de pomme de terre

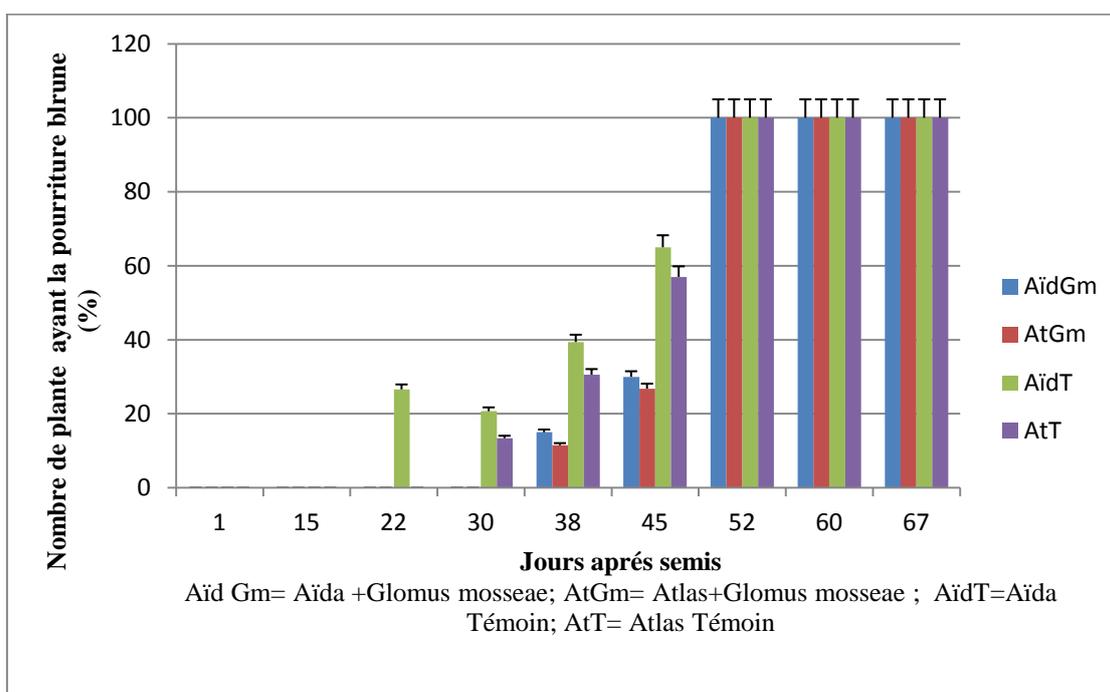
Les barres verticales représentent les écarts-types à la moyenne

### 3.2. Aspect phytosanitaire

Les plantes de pomme de terre non inoculées (Atlas et Aïda) sont plus sensibles à l'attaque des bactéries que les plantes inoculées. Cette vulnérabilité est plus significative chez les plantes d'Aïda que chez Atlas. La maladie apparaît plus tôt chez Aïda que chez Atlas, respectivement au 22<sup>ème</sup> et au 30<sup>ème</sup> jour de semis.

Chez les plantes inoculées (Atlas et Aïda) les premières attaques apparaissent à partir du 38<sup>ème</sup> jour de semis. Elles sont à des niveaux significativement inférieurs aux plantes non inoculées.

La même tendance se poursuit jusqu'à 52 jours de semis. A partir de cette date, nous constatons une généralisation de l'attaque chez tous les traitements (**Figure 9**).



**Figure 9 :** Pourcentage du nombre de plantes atteintes de pourriture brune chez la pomme de terre mycorhizée.

Les barres verticales représentent les écarts-types à la moyenne

La récolte des pommes de terre effectuée par la suite montre l'aspect des infections au niveau des tubercules (**Photo 8**).



Tubercules infectés

**Photo 8** : Aspect des tubercules infectés d'un pied d'Aïda inoculé avec *Glomus mosseae*

### 3.3. Rendement

Seuls les tubercules sains ont été pris en compte pour le calcul du rendement (**Photo 9**).



**Photo 9** : Aspect des tubercules d'un pied d'Atlas

La mycorhization augmente significativement le rendement en minitubercules chez les deux variétés de pomme de terre comparées aux témoins. Une augmentation significative de 7 t/ha est obtenue grâce à l'inoculation des racines de la variété Atlas par rapport au témoin. Chez la variété Aïda inoculé, le rendement est de 5 t/ha par rapport au témoin (**Tableau 9**).

**Tableau 9:** Effets du champignon mycorhizien *Glomus mosseae* sur le rendement (tonne / hectare) de deux variétés de la pomme de terre cultivée au champ

Traitements	Rendement (t/ha)	
	Atlas	Aïda
Témoins	13,05 b	8,50 b
<i>Glomus mosseae</i>	20,12 a	13,61a

Pour une même variété et sur une même colonne, les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité  $P < 0,05$  (Test de Fischer LSD).

### 3.4. Mycorhization

Les souches introduites ont induit des fréquences de colonisation mycorhizienne racinaire significative au sein de chaque variété. Chez Atlas le pourcentage de colonisation varie de 24 à 58% chez Atlas et de 27 à 39% chez Aïda. (**Tableau 10**). La colonisation mycorhizienne la plus élevée est obtenue par la variété Atlas.

**Tableau 10:** Colonisation mycorhizienne racinaire de deux variétés de pomme de terre cultivées au champ.

Fréquence de colonisation mycorhizienne (%)		
Traitements	Atlas	Aïda
Témoin	24 b	27 b
<i>Glomus mosseae</i>	58 a	39 a

Pour une même variété et sur une même colonne, les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité  $P < 0,05$  (Test de Fischer LSD).

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Développement végétatif

Le champignon *G. mosseae* favorise la levée des tubercules chez les deux variétés de pomme de terre. La variété Atlas inoculée germe plus rapidement que celle de Aïda inoculée. Cette germination est généralisée à partir du 21<sup>ème</sup> jour chez toutes les variétés. Ceci confirme que les conditions climatiques et plus particulièrement la température du milieu de culture est favorable à la germination des tubercules de la pomme de terre. Cette thèse est démontrée antérieurement par Ellisseche (2008). Ce dernier avait confirmé que lorsqu'un tubercule est placé dans les conditions environnementales favorables (16°- 20° C, 60-80% d'humidité relative), il commence à germer aussitôt après la fin de son repos végétatif.

La croissance en hauteur des plants inoculés est significative comparée aux plants non inoculés. La souche introduite, *G. mosseae*, a une influence positive sur la croissance des plants. Cela est plus marqué chez la variété Atlas. Ce potentiel de biostimulant pourrait être attribué au champignon inoculé.

### 4.2. Mycorhization

L'étude du potentiel mycorhizien du sol d'étude montre la présence de propagules mycorhiziens capable de favoriser une infection de champignon arbusculaire. Cela est confirmé par la mycorhization des racines au niveau des traitements témoins.

Les racines des plants de pomme de terre ont été mycorhizées qu'à hauteur de 58 % chez la variété Atlas et de 39% chez Aïda. La pomme de terre cultivée au champ a une dépendance moyenne vis-à-vis des champignons mycorhiziens arbusculaires. Cela a été déjà observé précédemment par Planchette et *al.* (1983).

L'effet biofertilisant des champignons MA, a permis une amélioration du rendement chez les variétés inoculées comparées aux témoins. Une différence significative de 7 t/ha est observée entre la variété Atlas inoculée et le témoin. Chez la variété Aïda, le champignon *Glomus mosseae* favorise une production de 5 t/ha par rapport au témoin. Or, Planchette et *al.*, (1983) ont montré que le rendement en tubercules de pomme de terre est significativement supérieur à 40% dans un sol comportant une microflore endomycorhizienne indigène, comparativement à un sol exempt de mycorhizes. Cette

baisse du rendement constaté dans notre étude peut être due à l'apparition très tôt des attaques bactériennes.

### 4.3. Protection phytosanitaire

Il faut rappeler que les champignons MA sont non seulement utilisés pour améliorer la croissance et la production mais aussi, parce qu'ils jouent un rôle protecteur contre les pathogènes.

Les mycorhizes n'ont pas empêché l'apparition des maladies dans la presque totalité des plants de notre champ expérimental. La plupart des tubercules récoltés étaient déjà très atteints par les pourritures. Cela signifie que la maladie a non seulement ralenti la croissance végétative des cultures de façon drastique, mais aussi a réduit la production de tubercules. Or, de nombreux rapports ont, en effet, démontré les effets bénéfiques de l'utilisation de ces microorganismes dans l'amélioration de l'état phytosanitaire des plantes. Les champignons MA réduisent l'incidence et/ou la sévérité des effets délétères causés par certains champignons phytopathogènes racinaires tels que *Rhizoctonia*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Phytophthora*, *Pythium* et *Aphanomyces* (Whipps 2004 ; St-Arnaud et al., 1995), certaines bactéries telle que *Xanthomonas campestris* (Lui et al., 2007) et certains nématodes tels que *Meloidogyne incognita* et *Pratylenchus penetrans* (Vos et al., 2012).

Un retard dans la progression de la maladie provoqué par *Phytophthora infestans* a également été observé sur des plantes de pomme de terre colonisées par un inoculum mycorhizien commercial (O'Herlihy, 2003).

## **5. CONCLUSION**

La méthode de production d'inoculum utilisée permet une grande production à l'échelle pour les besoins d'essais en serre et au champ.

La production de la pomme de terre au champ est compatible avec l'inoculation mycorhizienne arbusculaire dans les itinéraires techniques de sa culture au Sénégal à partir de semences importées. Les pertes de rendements et l'apparition de maladies sont observées malgré toutes les applications biotechnologiques combinées aux pratiques culturales. Cette problématique nous ouvre de nouvelles pistes de réflexion sur les interactions des différents facteurs mis en évidence dans cette production de pomme de terre. Pour se faire, des études en milieu contrôlé seraient plus appropriées pour une bonne maîtrise des impacts entre les intrants chimiques, organiques et la mycorhization de plants de pomme de terre.

---

---

## **CHAPITRE 4 :**

### ***Effet de deux types d'insecticides sur la mycorhization arbusculaire et le développement de deux variétés de pomme de terre (*Solanum tuberosum*)***

---

---

#### **Avant –propos**

La production de pomme de terre s'accompagne souvent d'une utilisation massive de produits phytosanitaires. Les insecticides, malgré leurs nombreux avantages dans la lutte contre les maladies des plantes, constituent des éléments toxiques pour l'environnement.

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'impact des insecticides sur l'expression des champignons mycorhiziens chez la pomme de terre.

Une partie de ce chapitre a fait l'objet d'une présentation orale aux journées doctoriales du 15 au 17 Décembre 2009 à l'École Doctorale Sciences de Vie, de la Santé, et de l'Environnement de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar

L'étude est présentée également dans un article :

**Effet de deux insecticides sur la mycorhization arbusculaire et le développement de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*)** publié dans *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, (IJBCS).

B. SARR\*, F. NDIAYE, M. NDIAYE et T. A. DIOP, Int. J. Biol. Chem. Sci. 7(5): 1902-1909, October 2011, ISSN 1997-342X (Online), ISSN 1991-8631 (Print) Available online at <http://ajol.info/index.php/ijbcs> (**Annexe V**).

## INTRODUCTION

La pomme de terre est l'une des plus importantes cultures à travers le monde (Kashyap et Panda, 2003). Elle est parmi les principaux produits végétaux pouvant permettre de lutter contre la pauvreté dans le monde. Dans les pays en développement, sa production a plus que doublé au cours des 15 dernières années (Lutaladio et Prakash, 2010).

Au Sénégal chaque année quelques 60 000 tonnes de pomme de terre de consommation sont importées pour une valeur de 9 916 541,87 USD. Cette dépendance vis-à-vis de l'extérieur est davantage accentuée par une accessibilité tardive des semences par les producteurs locaux. Cela réduit en même temps la période de production locale. Ces semences sont souvent de qualité moyenne (viroses), de choix variétal limité et sont vendues chères (35% du prix de revient). A cela s'ajoute, malgré l'usage abusif des pesticides, l'envahissement d'un cortège de pathogènes pendant le semis des tubercules : nématodes, bactéries, champignons et virus (Stevenson et *al.*, 2001). Fort de ces constats, une production de semences de pomme de terre par multiplication *in vitro* ou micropropagation est mise au point. Cette méthode permet d'assurer la permanence génétique (Dième et *al.*, 2011) et d'obtenir en peu de temps plusieurs générations de vitroplants exempts de toute contamination (Ranalli 1997 ; Ndiaye et *al.*, 2005). Cependant, ces vitroplants passent nécessairement par une acclimatation en serre, avant leur transfert aux champs. Durant cette phase, ils subissent l'effet des stress physiologiques et pathologiques (Sidikou et *al.*, 2002). Pour améliorer la capacité de résistance à ces stress, une inoculation de ces vitroplants par les champignons mycorhiziens arbusculaires est préconisée pendant l'acclimatation (Gianinazzi et *al.*, 1989 ; Niemira et *al.*, 1995). La mycorhization arbusculaire aide à surmonter les chocs lors de la transplantation (Carlos et *al.*, 2008) à apporter une meilleure nutrition hydrominérale et à réduire les maladies racinaires grâce à des changements considérables des mécanismes de défense de l'hôte (Guenoune et *al.*, 2001 ; Dalpé, 2005).

Les effets des pesticides sur les champignons mycorhiziens ont été revus par de nombreux auteurs (Menge, 1982a ; Trappe et *al.*, 1984). Cependant, peu de travaux se sont intéressés à l'effet du mode d'action des insecticides sur l'établissement de la mycorhization.

Notre objectif est d'évaluer l'impact des deux types insecticides d'insecticides, couramment utilisés au Sénégal, sur la pomme de terre associée à une souche de champignon mycorhizien arbusculaire, *Glomus mosseae*.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1 Matériel végétal

Le matériel végétal est constitué de vitroplants de pomme de terre des deux variétés, Atlas et Aïda dont le processus de production est précédemment décrit dans le chapitre

### 2.2. Matériel fongique

Le matériel fongique appartient à la collection du Laboratoire de Biotechnologies des Champignons de l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar. Il s'agit d'un isolat de champignon mycorhizien arbusculaire *Glomus mosseae* (Nicolson et Gerd. ; Gerd. et Trappe DAOM 227 131). L'isolat est préalablement multiplié en serre dans des pots contenant du sable grossier de plage stérilisé en utilisant comme plante piège le maïs (*Zea mays*). Les plantes sont ensuite régulièrement arrosées à la capacité au champ et reçoivent en plus tous les 15 jours 100 ml d'une solution nutritive de Long Ashton.

### 2.3. Pesticides utilisés

Deux pesticides (Furadan et Spiphor) couramment utilisés dans la culture de la pomme de terre au Sénégal sont testés (**Tableau 11**) :

**Tableau 11** : Caractéristiques des pesticides utilisés

Pesticides	Famille	Propriété	Matière active	Mode d'action	Concentration
Furadan 5G	carbamates	insecticides nématocides	carbofuran 50g/kg	systémique	0,2g/l
Spiphor 5%	organo- phosphorés	insecticides	chlorpyriphos- éthyl 50g/kg	contact	0,2g/l

### 2.4. Conduite de la culture et dispositif expérimental

L'étude est conduite en serre pendant 3 mois. Le substrat de culture est un sol de Sangalkam, situé à 50 km de Dakar dont les caractéristiques physico-chimiques sont : argile 5,4% ; limon 5,8% ; sable 89% ; carbone 0,3% ; azote total 0,02% ; potassium total 333,5 ppm; phosphore total 41,4 ppm ; phosphore assimilable 2,1 ppm ; calcium

1,03 ppm ; magnésium 0,3 ppm et pH (H<sub>2</sub>O) 6,0. Le substrat est stérilisé à l'autoclave, 120°C pendant 2 heures et mis dans des pots en raison de 1 kg par pot. Un arrosage est effectué 48 heures avant le repiquage à la capacité au champ. Les vitroplants des deux variétés (Aïda et Atlas) de pomme de terre sont transplantés en raison d'un plant par pot.

Le matériel fongique et les insecticides sont appliqués le 1<sup>er</sup> jour de la transplantation des plants (jt.) ou 21 jours après la transplantation (jat.). Le dispositif expérimental est complètement randomisé avec dix répétitions par traitement. Les traitements sont effectués selon le schéma suivant :

- Application de carbofuran ou chlorpyrifos-éthyl le 1<sup>er</sup> jt. + inoculum *Glomus mosseae* au 21<sup>ième</sup> jat.
- Inoculum *Glomus mosseae* le 1<sup>er</sup> jt. + application de carbofuran ou chlorpyrifos-éthyl au 21<sup>ième</sup> jat.

Chaque plant de pomme de terre à inoculer reçoit 20 g d'inoculum. L'inoculum est placé dans le substrat de culture à 2 ou 3 cm de profondeur au contact du système racinaire.

Les pesticides testés sont incorporés au substrat selon les concentrations indiquées dans le tableau 11.

## 2.5. Paramètres mesurés

A 60 jours de culture, les racines prélevées, sont éclaircies au KOH 10% et colorées au bleu Trypan selon la technique de Philips et Hayman (1970) avant de les observer à la loupe.

- **Le pourcentage de mycorhization** des racines est déterminé selon la méthode « Gridline Intersect » de Giovannetti et Mosse (1980).

- **Test de viabilité des propagules mycorhiziens** est effectué en trempant les spores dans un colorant vital MTT, 3-(4,5-diméthylthiazol-2-yl)-2,5 diphényltétrazolium bromide, selon les conditions décrites par An et Hendrix (1988). Le colorant est imbibé à l'aide d'une pipette sur toutes les propagules. Celles-ci sont ensuite conservées à l'obscurité pendant 48 h avant l'estimation de la viabilité. La couleur jaunâtre du MTT vire au bleu en cas de réactions positives.

- **La biomasse aérienne** est séchée pendant 48 h à l'étuve à 80°C, afin de déterminer le poids sec grâce à une balance de précision de marque Sortorius (portée Max de 3100 g). Le nombre de minitubercules par plant est évalué par comptage. Le calibre des minitubercules par plant est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse.

## **2.6. Analyse statistique**

L'analyse des variances est faite grâce au logiciel XLStat Pro 2011 (version 13.2, AddinSoft®) et les comparaisons entre les moyennes ont été faites selon le test de Fischer LSD au seuil de 5 %.

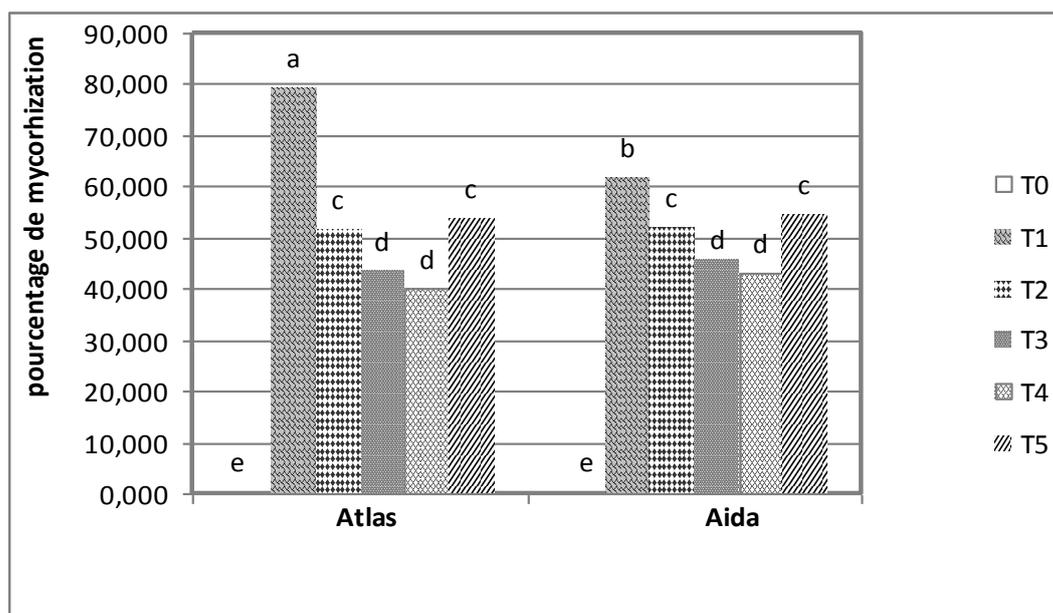
### 3. RESULTATS

#### 3.1. Mycorhization

Le traitement *Glomus mosseae* seul, montre des pourcentages de mycorhization significativement élevés chez les deux variétés Atlas et Aïda avec respectivement 79,4% et 62% de racines mycorhizées comparés aux témoins (0%). Cette colonisation racinaire des plants est constituée d'hyphes intraracinaires, de vésicules et d'arbuscules.

L'utilisation du colorant vital MTT a révélé une grande viabilité des propagules observées (en moyenne 80%) quel que soit le produit phytosanitaire appliqué.

Nos résultats montrent aussi que tous les traitements d'insecticides testés réduisent significativement la mycorhization des deux variétés Atlas et Aïda (**Figure 10**).



**Figure 10 :** Effet des insecticides sur la colonisation mycorhizienne des racines de deux variétés de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*)

Les barres surmontées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % selon le test Fischer LSD.

T0 = témoin ; T1 = *Glomus mosseae* seul 1<sup>er</sup> jt. ; T2 = *Glomus mosseae* 1<sup>er</sup> jt. + carbofuran 21 jat.

T3 = carbofuran 1<sup>er</sup> jt. + *Glomus mosseae* 21 jat. ; T4 = *Glomus mosseae* 1<sup>er</sup> jt. + chlorpyrifos-éthyl 21 jat.

T5 = chlorpyrifos-éthyl 1<sup>er</sup> jt. + *Glomus mosseae* 21 jat.

(jt.) : jour de la transplantation des plants ; (jat.) : jour après la transplantation

Cette baisse de la mycorhization varie en fonction de la date d'application et du mode d'action du produit chimique.

En effet, l'insecticide systémique appliqué au sol à 21 jours avant l'inoculation du *Glomus mosseae*, entraîne une baisse significative du pourcentage de mycorhization comparé à son traitement effectué jours après inoculation.

Avec l'insecticide de contact, c'est le traitement effectué 21 jours après inoculation qui entraîne une réduction significative du pourcentage la colonisation mycorhizienne des racines de pomme de terre.

Ces mêmes tendances sont observées chez les deux variétés de pomme de terre Aïda et Atlas.

### **3.2. Développement végétale et production de minitubercules**

En comparant les différents traitements, nous constatons le *Glomus mosseae*, sans insecticide, améliore significativement la biomasse aérienne le nombre et le calibre des minitubercules des deux variétés de pomme de terre.

Par contre, l'application du carbofuran ou chlorpyriphos entraîne une variation de comportement des variétés de la pomme de terre.

#### **3.2.1. Chez la variété Atlas**

Le carbofuran appliqué à 21 jours avant ou après inoculation des plants, entraîne une baisse significative de la biomasse aérienne comparée à celle des plants sur sol sans insecticide. Avec le chlorpyriphos seul le traitement effectué 21 jours après inoculation réduit significativement la biomasse et le nombre de minitubercules.

Les insecticides testés augmentent le calibre des minitubercules (**Tableau 12**).

#### **3.2.2. Chez la variété Aïda**

Tous les traitements d'insecticides sauf celui du chlorpyriphos avant inoculation des plants, réduisent la biomasse et le nombre et le calibre des minitubercules. Cette réduction est plus accentuée avec l'application de l'insecticide systémique à 21 jours avant inoculation. Il n'y pas de différence significative du traitement chlorpyriphos avant inoculation sur le calibre des minitubercules (**Tableau 12**).

**Tableau 12** : Effet de deux insecticides sur la biomasse aérienne, le nombre et la calibre des minitubercules de deux variétés de Pomme de terre (*Solanum tuberosum*)

Traitements	Variétés de <i>Solanum tuberosum</i>					
	Atlas			Aida		
	biomasse aérienne (mg)	nombre de minitubercule	calibre minitubercule (cm)	Biomasse aérienne (mg)	nombre de minitubercule	calibre minitubercule (cm)
T0	502,00d	1,02c	1,85c	489,89f	1,05e	1,92c
T1	707,20a	2,72a	2,75b	720,00a	3,47a	3,62a
T2	633,80b	2,33a	3,36ab	553,80d	2,56c	2,70b
T3	617,70bc	1,56b	2,99ab	501,20e	1,89d	2,55b
T4	597,40c	1,60b	3,03ab	663,70c	2,14d	2,82b
T5	683,80a	2,73a	3,55a	699,80b	2,96b	3,80a

Pour une même variété et sur une même colonne, les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité  $P < 0,05$  (Test de Fischer LSD).

T0 = témoin ; T1 = *Glomus mosseae* seul 1<sup>er</sup> jt. ; T2 = *Glomus mosseae* 1<sup>er</sup> jt. + carbofuran 21 jat.

T3 = carbofuran 1<sup>er</sup> jt. + *Glomus mosseae* 21 jat. ; T4 = *Glomus mosseae* 1<sup>er</sup> jt. + chlorpyriphos-éthyl 21 jat. ;

T5 = chlorpyriphos-éthyl 1<sup>er</sup> jt. + *Glomus mosseae* 21 jat.

(jt.) : jour de la transplantation des plants ; (jat.) : jour après la transplantation

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Mycorhization

Le pourcentage de mycorhization est nul chez les traitements témoins, ce qui démontre l'absence de champignons endogènes dans notre substrat de culture. L'inoculation s'est bien installée, cela est confirmé par le pourcentage de mycorhization racinaires de 79,4% et 62% respectivement chez Atlas et Aïda. Donc, les deux variétés testées sont très mycotrophes.

L'utilisation des insecticides (carbofuran ou chlorpyrifos-éthyl) baisse significativement la mycorhization. Cette réduction de la colonisation mycorhizienne des racines par les insecticides a été déjà démontré plutôt par Abd-Alla et *al.*, (2000).

Le test de viabilité montre un taux élevé de propagules mycorhiziennes viables. Ce qui signifie que les insecticides testés ne tuent pas totalement les propagules mais ralentissent leur capacité à infecter les racinaires de la plante hôte. Plusieurs travaux ont rapporté cet effet inhibiteur des pesticides sur la germination des propagules de champignons mycorhiziens arbusculaires (Nemec, 1980 ; Smith et Gianinazzi-Pearson, 1988 ; Dodd et Jeffries, 1989).

Cependant, l'effet des insecticides testés est fonction du stade de la mycorhization racinaire des plants et du mode d'action de chaque l'insecticide.

Ainsi, nos résultats montrent que l'insecticide systémique, le carbofuran est plus compatible avec la mycorhization lorsqu'il est appliqué aux racines de pomme de terre après inoculation avec *G. mosseae*. Menendez et *al.*, (1999) avaient aussi constaté que le diméthoate, insecticide systémique, appliqué après inoculation du *G. mosseae*, n'affecte pas la colonisation mycorhizienne. Donc, le *G. mosseae* inoculé tolère les insecticides systémiques appliqués aux doses recommandées après l'installation de la mycorhization. La compatibilité entre l'insecticide systémique et *G. mosseae* après l'installation de ce dernier, pourrait s'expliquer par une dégradation plus facilement du produit sous l'effet de la métabolisation des champignons (Meharg et *al.*, 1997).

Cependant, cette tolérance aux insecticides systémiques semble être spécifique au champignon exogène inoculé, *G. mossea*. Les résultats de Menendez et *al.*, (1999) ont montré que des champignons endogènes (*Scutellospora castaneae* et *Glomus rosea*) sont sensibles à l'effet de l'insecticide diméthoate. Donc, l'impact négatif de

l'insecticide systémique est lié d'une part à l'état de la mycorhization et d'autre part à l'origine du champignon présent dans le sol.

Par contre, l'application de l'insecticide de contact, le chlorpyrifos-éthyl 21 jours avant inoculation, est plus compatible avec l'expression du champignon que son utilisation après l'inoculation de *G. mosseae*. Ceci peut s'expliquer par une volatilisation du produit avant l'installation de la mycorhization. En effet, Whang et *al.* (1993) ont observé que la moitié de la quantité de chlorpyrifos appliquée au sol a été volatilisée pendant une période de 26 jours.

A partir de nos résultats, on peut dire que la tolérance de la souche *Glomus mosseae* pour les insecticides, dépend du stade de la mycorhization du champignon et du mode d'action de la matière active de l'insecticide.

#### **4.2. Développement végétal et production de minitubercules**

L'impact négatif des insecticides constaté sur la mycorhization du *G. mosseae*, s'est répercuté sur la croissance et la production des plants de pomme de terre. Les insecticides ralentissent l'expression des mycorhizes entraînant une baisse de la croissance et du rendement de la plante. La même tendance a été obtenue par Abd-Alla et *al.*, (2000) avec un insecticide de contact, le Selecron. Cela pourrait être dû à une diminution de l'apport en nutriment essentiel dont le phosphore. (Merryweather et Fitter, 1996).

Les variétés de pomme de terre présentent une variabilité de comportement vis-à-vis des insecticides. La variété Aïda tolère mieux l'impact négatif des insecticides. Cette variabilité a été déjà démontré par (Belkouri et *al.*, 2009).

Connaissant l'impact conjugué des mycorhizes sur le rendement des cultures et comme agent de lutte biologique, il est essentiel qu'elles soient bien établies pour atteindre ces bénéfices relatifs à la production et à la protection des végétaux. Ces résultats visant à réduire l'apport d'insecticides et à protéger les cultures méritent d'être exploités (Dalpé, 2005).

## 5. CONCLUSION

De ces résultats, on peut retenir que chez les plants de pomme de terre, la compatibilité des insecticides et de la symbiose mycorhization dépend du stade de mycorhization et du mode d'action de l'insecticide utilisé. Le *Glomus mosseae* tolère l'insecticide systémique et l'insecticide de contact lorsqu'ils sont utilisés respectivement après et avant l'installation de la mycorhization. Cette tolérance des champignons mycorhiziens arbusculaires aux insecticides encourage leurs utilisations dans la promotion d'une agriculture durable et soucieuse de l'environnement. Ce travail a permis de déceler le moment compatible de l'inoculation de *Glomus mosseae* avec l'application des insecticides au sol. Ces résultats doivent être corroborés par le biais des essais au champ afin d'en tenir compte dans les itinéraires techniques de cultures de la pomme de terre.

---

---

## **CHAPITRE 5 :**

### ***Effet de la litière de deux espèces sylvicoles sur le développement et la mycorhization de plants de Pomme de terre***

---

---

#### **Avant – propos**

La production de pomme de terre nécessite un apport important en éléments minéraux. Face à la baisse de la fertilité des sols et au besoin de préserver la qualité de l'environnement, sa culture doit privilégier les d'intrants biologiques.

Cette étude consiste à évaluer l'impact des litières sur le développement et la mycorhization de plants de pomme de terre obtenus par vitrométhodes.

Les résultats de cette étude sont en cours de publication dans *Agriculture et développement*

## INTRODUCTION

Face à la baisse de la fertilité des sols tropicaux, les résidus des végétaux représentent une source importante d'éléments nutritifs (Musvoto, 2000). La litière foliaire permet de restaurer les sols par un transfert vertical d'éléments minéraux (Feller, 1995). Elle stimule également, l'activité et le développement des microorganismes du sol. Cette stimulation se fait grâce à l'apport de substrats carbonés dans les systèmes sol-végétation (Vance and Chapin 2001).

La capacité de fertilisation de la litière est fonction de la nature de celle-ci. Cette variabilité a été démontrée antérieurement par les travaux de Diallo et *al.*, (2008). Ils ont constaté que les litières foliaires d'*Andropogon gayanus*, Kunth et d'*Eragrostis tremula*, Steud) ne fournissent pas de réserves organiques significatives alors que celles de *Faidherbia albida* et d'*Azadirachta indica* font preuve d'un potentiel élevé pour améliorer la croissance des plantes.

La pomme de terre a une faible densité racinaire et un fort potentiel de croissance. Cela peut être complétement par les champignons mycorhiziens grâce à leurs hyphes mycéliens (Diallo et *al.*, 2010). En effet, les mycorhizes sont des associations symbiotiques entre les racines de végétaux et les champignons. Ces derniers améliorent le prélèvement et le transport vers la plante des éléments nutritifs très peu mobiles, principalement le phosphore (Bolan, 1991). Ce phosphore constitue un nutriment essentiel pour la pomme de terre (Alvarez-Sanchez *et al.*, 1999; Dechassa et *al.*, 2003). Les travaux de Ndiaye et *al.*, (2003) ont montré que la mycorhization des vitroplants de pomme de terre est compatible avec la fertilisation phosphatée. Les associations mycorhiziennes peuvent jouer, également, un rôle significatif dans la décomposition et la minéralisation des matières organiques (Gobat et *al.*, 2003; Lambers et *al.*, 2008). Cependant, peu d'informations sont disponibles sur les interactions entre les champignons mycorhiziens et les fertilisants organiques à base de litière.

Notre étude s'inscrit dans ce cadre et consiste à évaluer l'influence de la litière foliaire, à différentes doses, sur la mycorhization et le développement de la pomme de terre.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1. Matériel

#### 2.1.1. Matériel végétal

Le matériel végétal est constitué de vitroplants de pomme de terre des deux variétés, Atlas et Aïda dont le processus de production est précédemment décrit dans le chapitre 1

#### 2.1.2. Matériel fongique

Le même isolat fongique *Glomus mosseae* est utilisé (confère chapitre 2 et 3)

#### 2.1.3. Litières

Deux litières foliaires sont utilisées : *Azadirachta indica* (Meliaceae) et *Hadwickia binata* (Fabaceae). Ces deux espèces sont des plantes exotiques qui occupent une place très importante dans l'espace agroforestière du Sénégal. Les feuilles d'*Azadirachta indica* et de *Hadwickia binata* sont prélevées au moment de leur chute entre le mois d'avril et juin et séchées à l'air libre pendant deux semaines. Elles sont broyées ensuite, à la fraction 0,75 mm pour accélérer leur décomposition lors du contact avec le sol (Recous et al., 1995) puis, conservées dans des sacs. Les résidus végétaux (carbone, azote, hémicellulose, cellulose et lignine) sont déterminés par la méthode de Van Soest (1963). Les caractéristiques physico-chimiques des litières utilisées sont représentées dans le tableau 13.

**Tableau 13:** Caractéristiques physico-chimiques des litières utilisées

Litière	Lignine (%)	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	C (mg/g)	N (mg/g)	C/N
<i>Azadirachta indica</i>	22	20,1	11	440,6	14,5	30,3
<i>Hadwickia binata</i>	18,3	17,6	11,3	424,1	21,0	20,2

#### 2.1.4. Sol de culture

Le sol de culture provenait de Sangalkam. Ce substrat est prélevé au niveau de l'horizon de surface (0-10 cm) à l'aide d'une tarière cylindrique Eijekelkamp (single root auger). Le sol est stérilisé à l'autoclave pendant 1 heure à 120 °C. Les caractéristiques physico-chimiques du sol sont : argile 5,4% ; limon 5,8% ; sable 89% ; carbone 0,3% ; azote

total 0,02% ; potassium total 333,5 ppm; phosphore total 41,4 ppm ; phosphore assimilable 2,1 ppm ; calcium 1,03 ppm ; magnésium 0,3 ppm et pH (H<sub>2</sub>O) 6,0.

## **2.2. Méthodes**

### **2.2.1. Dispositif expérimental**

L'étude est conduite en serre pendant 3 mois en mélangeant 40 g de chaque sol à 2 kg de sol dans des pots en polyéthylène de 5 kg. L'ensemble a subi une incubation pendant 7 mois pour accélérer le processus de minéralisation (Diallo *et al.*, 2008). Les vitroplants des variétés Aïda et Atlas, sont repiqués en raison d'un pied par pot. L'inoculation est effectuée pendant le repiquage des vitroplants. L'inoculum (10 g) est placé dans le substrat de culture à 2 ou 3 cm de profondeur au contact du système racinaire des plants de pomme de terre.

Le dispositif expérimental était totalement randomisé avec trois facteurs. Le premier facteur est l'inoculation avec 2 niveaux (témoin, *Glomus. mosseae*) et le second facteur la litière avec 3 niveaux (0 g, 25 g, et 50 g) et le troisième facteur est la variété avec deux niveaux (Atlas, Aïda). Chaque traitement est répété 10 fois soit un total de 120 plants.

### **2.2.2. Paramètres mesurés**

Le pourcentage de colonisation est déterminé selon la méthode « Gridline Intersect » de Giovannetti et Mosse (1980) suite à une coloration des racines au bleu Trypan (Philips et Hayman, 1970).

- La biomasse aérienne est séchée pendant 72 h à l'étuve à 75 °C afin de déterminer le poids sec grâce à une balance de précision de marque Sortorius (portée Max de 3100 g).
- Le nombre moyen de minitubercules par plant est évalué par comptage ;
- Le calibre de minitubercules par plant est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse.

### **2.2.3. Analyse statistique**

L'analyse des variances est faite grâce au logiciel XLSTAT 2013 (version 13.2). La comparaison des moyennes est effectuée en utilisant le test de Fischer au seuil de probabilité de 5 %.

### 3. Résultats

#### 3.1. Effet de la litière sur la biomasse aérienne

L'analyse statistique réalisée montre que la litière a un effet significatif ( $R^2 = 0,96$  ;  $p < 0,001$ ) sur la biomasse aérienne des plants de pomme de terre mycorhizés.

Au niveau des traitements inoculés, l'apport de litières de *Hadwickia* (H.) *binata* ou *Azadirachta* (A.) *indica* entraîne une augmentation significative de la production de biomasse aérienne comparée aux témoins. L'augmentation de la litière favorise la production de biomasse. Cette dernière varie en fonction de la litière et de la variété de pomme de terre.

A la dose de 50 g de litière, H. *binata* favorise la production de la biomasse la plus significative comparée à celle induit par A. *indica*. Chez la variété Atlas, H. *binata* entraîne un gain de biomasse de plus de 900 mg par rapport au témoin. Chez Aïda ce gain est de 740 mg (**Tableau 14**).

**Tableau 14:** Biomasse Aérienne (BA), Nombre de Minitubercules (NM) et le Calibre de Minitubercules (CM) de deux variétés de pomme de terre inoculées avec *Glomus mosseae* à différents niveaux de traitements de litière.

Traitement	Inoculation	Traitement litière (g)	Atlas			Aïda		
			BA (mg)	NM	CM (cm)	BA (mg)	NM	CM (cm)
M+		témoin	660,83e	2,10d	2,14c	220,00g	2,06d	1,53def
		<i>H. binata</i>						
		25	698,33d	2,80a	3,39a	610,00b	3,83a	1,54de
		50	1654,00a	2,50b	3,41a	960,00a	2,87b	1,82cd
		<i>A. indica</i>						
		25	758,00c	2,75a	2,45b	412,00d	2,50c	2,80b
		50	1584,00b	2,30c	2,40b	541,00c	2,87b	3,17a
	M-		témoin	418,33h	1,30f	1,20g	194,00h	1,13e
		<i>H. binata</i>						
		25	470,33g	1,41f	1,33e	204,00h	1,41e	1,18fg
		50	475,00g	1,45f	1,35de	195,83h	1,41e	1,45fef
		<i>A. indica</i>						
		25	513,66f	1,73e	1,27f	256,00f	1,36ef	1,67de
		50	515,00f	1,65e	1,37d	277,83e	1,53e	2,02c

Pour une même variété et sur une même colonne, les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité  $P < 0,05$  (Test de Fischer LSD)

M- = Sans inoculation avec *Glomus aggregatum*., M+ = Inoculation avec *Glomus aggregatum*

Chez les traitements non inoculés, l'apport de la litière (*H. binata* ou *A. indica*) augmente également la biomasse aérienne de la pomme de terre par rapport au témoin. Cependant, cette production de biomasse reste inférieure à celle obtenue chez les traitements inoculés. En plus, il n'y a pas de différence significative de l'effet des doses (25 et 50 g) de litière sur la biomasse aérienne des variétés Atlas et Aïda (**Tableau 14**).

### 3.2. Effet de la litière sur la production de minitubercules

L'apport de litière entraîne une augmentation significative du nombre de minitubercules.

L'analyse statistique des traitements inoculés, montre que c'est la dose de 25 g de litière de *H. binata* ou d'*A. indica* qui favorise la production la plus significative du nombre de minitubercules (2,80) chez la variété Atlas. Cependant, chez la variété Aïda, le nombre de minitubercules le plus significatif à cette dose est obtenu seulement avec la litière de *H. binata*.

Le calibre moyen des minitubercules augmente également avec l'apport de litières chez les plants mycorhizés comparés aux témoins.

La comparaison de deux litières montre que *H. binata* entraîne la production de calibre de minitubercules plus significative que celle de *A. indica*. Cependant, chez chaque variété l'effet de la litière ne présente pas de différence significative entre la dose 25 et 50 g (**Tableau 14**).

Chez les traitements non inoculés, la litière favorise également la production de minitubercules aussi bien sur le nombre que sur le calibre. Cependant, l'effet très faible comparé aux traitements inoculés. L'analyse des traitements au sein de chaque variété révèle qu'il n'y a pas de différence significative de l'effet des doses de 25 et 50 g de litières sur le nombre de minitubercules chez la variété Atlas de même que chez celle de Aïda.

### 3.3. Effet de la litière sur la mycorhization

La mycorhization des racines des plants de pomme de terre est influencée par la quantité de litière apportée. Elle diminue progressivement quand la quantité de litière augmente et quelle que soit la litière ou la variété considérée. L'apport de litière inhibe la colonisation des racines de pomme de terre par la souche *G. mosseae* (Tableau 15).

**Tableau 15:** Effet de la colonisation mycorhizienne de racine de pomme de terre à différente dose de litières chez deux variétés de pomme de terre.

Traitement litière (g)	Traitement inoculation	Fréquence de colonisation mycorhizienne racinaire (%)	
		Aïda	Atlas
témoin	M-	00,0 e	00,0g
<i>Hadwickia binata</i>			
0	M+	21,66 a	23,33 b
25	M+	13,33 c	14,66 c
50	M+	08,00 d	08,00 f
<i>Azadichta indica</i>			
0	M+	16,27 b	24,16 a
25	M+	09,33 d	13,50 d
50	M+	07,33 d	08,83 e

Pour une même variété et sur une même colonne, les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité  $P < 0,05$  (Test de Fischer LSD)

M- = Non inoculation avec *Glomus mosseae*., M+ = Inoculation avec *Glomus mosseae*

### 3.4. Interaction entre les différents traitements

L'analyse de variance montre un effet significatif entre les différents facteurs :

Inoculation, litière et variétés (**Tableau 16**).

**Tableau 16:** Interaction entre variétés -inoculation-litière

	Fréquence mycorhizienne	Biomasse aérienne	Calibre minitubercule	Nombre minitubercule
R <sup>2</sup>	0,967	0,999	0,935	0,941
F	152,465	6111,385	75,008	83,381
Pr > F	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Variété*inoculation*litière	152,465	6111,385	75,008	83,381
	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Croissance

La litière a un effet stimulateur sur la biomasse aérienne, le nombre et la taille des minitubercules. Cette stimulation de la croissance peut s'expliquer par une meilleure disponibilité des minéraux. En effet la litière stimule l'activité et la diversité des microorganismes du sol (Shiralipour et *al.*, 1992 ; Carpenter-Boggs et *al.*, 2000). En retour, cette communauté microbienne en dégradant la matière organique va libérer des éléments minéraux (ammonium et nitrate) qui favorisent ainsi le développement des plantes (Samba, 2001 ; Diallo et *al.*, 2005). Dans notre étude, ce rôle est joué par le *G. mosseae*. Les champignons mycorhiziens arbusculaires peuvent être impliqués à la fois dans les processus de décomposition et d'absorption des acides aminés moins mobiles ou des ions ammonium. Cela grâce à leurs hyphes qui facilitent l'absorption de N en présence de litière et le gain de N dans les plantes hôtes est linéairement lié à la densité des hyphes dans la matière organique (Hodge et *al.*, 2001; Read et Moreno, 2003).

Les deux litières utilisées ont aussi un impact positif sur la production de la pomme de terre mycorhizée. Cependant, la litière de *H. binata* a un effet stimulateur plus significatif que celle d'*A. indica*. La même tendance a été obtenue par Diallo et *al.*, (2008) sur la croissance du mil et du maïs. Cela peut s'expliquer par le rapport C/N plus élevé d'*A. indica* que celui de *H. binata*. En effet, lorsque la teneur en azote incorporé au sol est faible, les microorganismes assimilent l'azote minéral du sol réduisant ainsi, sa disponibilité de sorte que les rendements des cultures diminuent (Falisse, 1994 ; Diallo et *al.*, 2008). Donc, la nature de la litière détermine son efficacité, à raison des caractéristiques biochimiques variables des résidus de végétaux (Williams, 1974).

### 4.2. Mycorhization

Les plants de pomme de terre micropropagés peuvent s'adapter à l'inoculation des champignons mycorhiziens arbusculaires, tels que rapportés par Vosatka et *al.* (2000). Ces conclusions sont également soutenues par nos observations récentes. Pendant la phase d'acclimatation, les champignons MA peuvent améliorer la viabilité et l'état

physiologique des plants de pomme de terre (McArthur et Knowles, 1993; Ndiaye et *al.*, 2005).

Nous avons constaté que la litière inhibe la mycorhization des racines de pomme de terre. Cette inhibition augmente avec la quantité de litière apportée. Thomson et *al.*, (1986) et Duke et *al.*, (1994) ont démontré que la colonisation mycorhizienne peut diminuer dans un milieu fertile. Sachant que l'association mycorhizienne s'établit sur la base d'un échange bidirectionnel entre les deux partenaires symbiotes. De composés carbonés passent de la plante vers le champignon et de composés minéraux sont fournis par le champignon à la plante. La libération de sucres solubles lors de la décomposition de la lignine des litières, constitue un autre apport de nutriment pour le champignon. Ce dernier peut se passer des carbones de la plante et satisfaire directement ses besoins en sucres à partir de la litière. La lignine contient des lignases et polyphénoloxydases qui sont d'un intérêt particulier, car ils seraient tenus de contribuer d'une manière importante dans la décomposition et la nutrition des plantes (Read et Moreno, 2003).

Nous avons également constaté que la baisse de la mycorhization est concomitante à une bonne expression des paramètres du rendement de la pomme de terre. Cela confirme encore une fois que les bénéfices de la mycorhization ne sont pas toujours reliés à une colonisation plus intense à l'intérieur des racines (Al-Karaki, 1998). Cela a été également démontré antérieurement par Plenchette et *al.*, (1982). Ces avantages peuvent être expliqués par une meilleure décomposition de la matière organique favorisée par une bonne expression du *Glomus mosseae* (Schädler et *al.*, 2010).

## 5. CONCLUSION

Notre expérimentation montre que l'apport de fertilisation organique à base de litière de *Hadwickia binata* ou d'*Azadirachta indica* est compatible à une bonne expression de la mycorhization des racines de pomme de terre obtenues par micropropagation. Cet effet bénéfique est fonction de la dose et de la nature de la litière apportée.

La dose de 50 g la litière de *Hadwickia binata* favorise significativement la production de biomasse aérienne des deux variétés de pomme de terre mycorhizées. A cette même dose, la litière *A. indica* entraîne le même effet mais à un degré moindre.

Le nombre de minitubercule le plus significatif est obtenu avec la dose de 25 g litières chez la variété Atlas de même que chez celle d'Aïda.

Le calibre des minitubercules chez Atlas ne présente pas de différence significative entre les doses de 25 et 50 g des litières.

---

---

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

---

---

## **1. Conclusion générale**

L'objectif général de notre étude a consisté à évaluer l'utilisation de certaines pratiques culturelles sur la culture et la mycorhization de la pomme terre.

En serre, la recherche des meilleurs couples symbiotiques montrent que les différentes espèces de champignons testées n'ont pas le même niveau d'efficacité envers les variétés de pomme de terre (Atlas, Aïda et Adessa). Les meilleures dépendances mycorhiziennes sont observées chez les couples Atlas-*Glomus mosseae*, Aïda-*Glomus mosseae* qui sont respectivement 81,51% et 72,58%. La variété Adessa a une dépendance inférieure à 40% avec tous les inocula fongiques testés. L'expression de ces inocula MA performants a un impact positif sur le développement des plants de pomme de terre.

L'étude montre également que les vitroplants des deux variétés, Aïda et Atlas, sont compatibles avec l'inoculation des champignons arbusculaires. Ils ont montré un développement végétal et une production satisfaisant en présence des symbiotes fongiques. Aucun signe de nécrose ni de perte de feuilles ne sont constatés.

Au champ, le comportement de ces couples symbiotiques performants est évalué. L'étude part d'une démarche participative avec l'association des producteurs de Sangalkam. La culture a été interrompue en cours par la présence de *Ralstonia solanacearum* malgré le renforcement effectué par les inocula de champignons mycorhiziens arbusculaires (*Glomus mosseae*) et l'usage des intrants chimiques. Ce problème phytosanitaire rencontré est une confirmation des difficultés de production de la pomme de terre à partir des tubercules importés, dans les pays du sahel.

Il ressortait de cette étude au champ, l'intérêt d'évaluer les pratiques agricoles sur l'efficacité de la symbiose mycorhizienne et le comportement végétatif de deux espèces Aïda et Atlas de pomme de terre.

L'étude de l'effet des insecticides sur la mycorhization arbusculaire et le développement de la pomme de terre nous a permis de déceler le moment propice de l'inoculation de champignon arbusculaire avec l'application des insecticides au sol.

Nos résultats montrent que l'application au sol des insecticides aux doses recommandés est compatible à un bon établissement de la symbiose mycorhization chez les plants de pomme de terre obtenus par vitrométhodes. Cette compatibilité dépendant du stade de

mycorhization et du mode d'action de l'insecticide utilisé. Le champignon *Glomus mosseae* tolère l'insecticide systémique et l'insecticide de contact lorsqu'ils sont utilisés respectivement après et avant l'installation de la mycorhization.

Dans le dernier chapitre, nous nous sommes intéressés à évaluer l'impact des litières sur le développement et la mycorhization de plants de pomme de terre obtenus par vitrométhodes.

L'apport de fertilisants organiques à base de litière (*Hadwickia binata* ou *Azadirachta indica*) est aussi compatible à une bonne expression de la mycorhization des racines de vitroplants de pomme de terre. Cet effet bénéfique est fonction de la dose et de la nature de la litière apportée.

A la dose de 25 g la litière de *Hadwickia binata* favorise significativement la production du nombre de minitubercules chez les deux variétés Aïda et Atlas mycorhizées. Par contre à 50 g elle ne stimule que la production en biomasse aérienne.

La litière d'*Azadirachta indica* à 50 g entraîne également une amélioration du rendement par la production de calibre de minitubercules de manière significative chez Aïda mycorhizée. A 25 g, seul le nombre de minitubercules de la variété Atlas est amélioré de manière significative par cette litière.

L'ensemble de ces résultats permet de déceler d'une part, la période propice pour l'inoculation des champignons mycorhiziens des racines de pomme avec l'application des insecticides au sol et d'autre part, de savoir la nature et la dose de litières qui favorisent le meilleur rendement de pomme de terre.

## **2. Perspectives**

Les différents cultivars n'ont pas tous répondu de la même façon aux facteurs étudiés. De ce fait, avant de recommander l'inoculation endomycorhizienne au champ comme biostimulant dans la culture de la pomme de terre, il serait important d'étendre les travaux à différentes combinaisons de cultivars de pomme de terre et d'espèces de champignons MA.

Dans la culture de la pomme de terre, l'apport de la litière est compatible avec les mycorhization. Toutefois, pour augmenter ce potentiel, il est nécessaire de tenir compte des différences possibles entre les variétés de pommes de terre et les types de litières. Ainsi, il serait important d'étudier l'impact d'une large gamme de litières disponibles au niveau local sur plusieurs souches de champignons mycorhiziens.

La lutte intégrée combinant les insecticides, les biofertilisants de champignons mycorhiziens et les litières, pourrait être une solution raisonnée pour améliorer la production de semence de pomme de terre.

L'utilisation des biotechnologies pour l'adoption de la culture de pomme de terre au Sénégal permettrait de surmonter les difficultés d'approvisionnement en semences et de réduire le coût des intrants chimiques. A court terme, comme solution immédiate possible, la production de vitroplants par micropropagation adaptés aux conditions locales pourrait être le point de départ du système de production de pomme de terre. Cette multiplication de vitroplants de pomme de terre sans apport d'hormones, est une production peu coûteuse et compatible avec l'apport de biofertilisants, les champignons mycorhiziens arbusculaires.

---

---

**REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES**

---

---

- Abd-Allaa M. H., Shukry A. O. and Sokol K., 2000.** The impact of pesticides on arbuscular mycorrhizal and nitrogen-fixing symbioses in legumes. *Applied Soil Ecology* **14**: 191–200
- Abdessalem A. K., 2008.** Dégradation des pesticides chlortoluron, carbofurane et bentazone en milieux aqueux par les procédés d'oxydation avancée. Thèse universités Paris-Est et Tunis El Manar P 7-11
- Akiyama K., Matsuzaki K., and Hayashi H., 2005.** Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature* **435**: 824-827.
- Al-Karaki G. N. 1998.** Benefit, cost and water-use efficiency of arbuscular mycorrhizal durum wheat grown under drought stress. *Mycorrhiza* **8** : 41-45.
- Amir H. and Lagrange A. 2008.** Arbuscular mycorrhizal fungi from New Caledonian ultramafic soil improve the tolerance to nickel of endemic plant species. In: Sixth International Conference on Serpentine *Ecology*, 16-23 juin, Bar Harbor, USA.
- An Z. A. and Hendrix J. W., 1988.** Determining the viability of endogonaceous spores with a vital stain. *Mycologia*, **80** : 259-261.
- Ana M., Alicia M., Viviana C., Nadia V., Ocampo J. A. and Alicia G., 1999:** Influence of the insecticide dimethoate on arbuscular mycorrhizal colonization and growth in soybean plants. *Internatl Microbiol* **2** : 43-45
- Azcon-Aguilar C. and J. M. Barea. 1996.** Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens-an overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza* **6** : 457–464.
- Balemi T. 2009.** Effect of Phosphorus nutrition on growth of potato genotypes with contrasting phosphorus efficiency, *African Crop Science Journal*, Vol. **17**, No. 4, pp. 199 – 212
- Banfalvi Z., Molnar A., Lakatos L., Hesse H. and Hofgen R., 1999.** Differences in sucrose to starch metabolism of *Solanum tuberosum* and *Solanum brevidens*. *Plant Sci.* **147**: 81-88;
- Barea J. M. M., Orozco M. O., Campos E. and Azcon R. 2002.** The application of isotopic

- (32P and 15N) dilution techniques to evaluate the interactive effect of phosphate-solubilizing rhizobacteria, mycorrhizal fungi and Rhizobium to improve the agronomic efficiency of rock phosphate for legume crops. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **63** : 35-42.
- Belletti P., Lanter S., Lotito and Saracco F. 1994.** Production of potato micro-tubers through *in vitro* culture. *Acta Hort.* 362 Seed Res. Hord. V : 141-149.
- Belkouri A., Es-Sgaouri A., Aouadj R., and Dahchoura A. 2009.** Action de certains pesticides sur la croissance du champignon ectomycorrhizien *Pisolithus Tinc-Torius*. *Biomatec Echo.*,3(6): 26 – 30.
- Benhamou N., Fortin J.A., Hamel C., St-Arnaud M., and Shatilla A., 1994.** Resistance responses of mycorrhizal Ri T-DNA-transformed carrot roots to infection by *Fusarium oxysporum* f. sp. *chrysanthemi*. *Phytopathology* **84**: 958-968.
- Berg L. A. and Bustamante M. 1974.** Heat treatment and meristem culture for the production of virus free bananas. *Phytopathology* **64** : 320-322.
- Berta G., Trotta A., Fusconi A., Hooker J. E., Munro M., Atkinson D., Giovannetti M., Morini S., Fortuna P., Tisserant B., Gianinazzi-Pearson V. and Gianinazzi S. 1995.** Arbuscular mycorrhizal induced changes to plant growth and root system morphology in *Prunus cerasifera*. *Tree Physiol.* **15** : 281-293.
- Bethlenfalvay G. J. 1992.** Mycorrhizae in the agricultural plant-soil system. *Symbiosis* **14** : 413-425.
- Bhattarai I. D. and. Mishra R. R. 1984.** Study on the vesicular-arbuscular mycorrhiza of three cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant and Soil* **79** : 299-303.
- Bird G. W., Rich J. R. and Glover S. U. 1974.** Increased endomycorrhizae of cotton root in soil treated with nematicides. *Phytopathology* **64** : 48-51
- Blee K. A. and Anderson A. J. 1996.** Defense-related transcript accumulation in *Phaseolus vulgaris* L. colonized by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* Schenck and Smith. *Plant Physiol.* **110**: 675-688.
- Bochow H. and Abou-Shaar M. 1990.** On the phytosanitary effect of mycorrhiza in tomatoes to the corky-root disease. *Z. Microbiol.* **145** : 171-176.

- Bonfante P. and Perotto S. 1995.** Strategies of arbuscular mycorrhizal fungi when infecting host plants. *New Phytologist* **130**: 3-21.
- Borowicz V. A. 2001.** Do arbuscular mycorrhizal fungi alter plant–pathogen relations? *Ecology* **82** : 3057–3068.
- Brodie B. B. 1998** “Potato”. In : Barker KR, Pederson GA, Windham GL, eds . Plant and nematode interactions. Madison USA: *American Society of Agronomy*: 567-94.
- Boxus P. Jemmali A. and Pieron S. 1995.** Multiplication végétative : la Micropropagation. Chapitre X. Stade II : Multiplication par organogenèse ou néoformation de bourgeons. In : *Biotechnologies Végétales*. Demarly Y. et Picardi E. (eds). UNISAT, CNED/AUPELF-UREF BV 93, Fascicule U: 63-78
- Brundrett M. C., Piché Y. and Peterson R. L. 1984.** A new method for observing the morphology of vesicular-arbuscular mycorrhizae. *Canadian Journal of Botany* **63** : 2128-2134.
- Bryan J. E. 1990.** Rupture de la dormance des tubercules de pomme de terre Guide de Recherche. Centre internationale de la pomme de terre.CPI 16. Lima Pérou. 13 p
- Bucher M. 2007.** Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. *New Phytol*, **173**: 11-26.
- Buddenhagen I. and Kelman A. 1964.** Biological and physiological aspect of bacterial wilt caused by *Pseudomonas solanacearum*. *Annu Rev. Phytopathol*, **2**: 203-230.
- Buee M., Rossignol M., Jauneau A., Ranjeva R. and Bécard G., 2000.** The pre-symbiotic growth of arbuscular mycorrhizal fungi is induced by a branching factor partially purified from plant root exudates. *Molecular Plant-Microbe Interactions* **13**: 693-698.
- Carlos L. C, Manuel C.A., José L.G., Rosario A. and Antonio T. 2008.** Arbuscular Mycorrhizal Contributes to Alleviation of Salt Damage in Cassava Clones *Journal of Plant Nutrition* **31**: (5) p. 959-971.
- Caron M., J.A. Fortin and C. Richard. 1986.** Effect of phosphorous concentration and *Glomus intraradices* on *Fusarium* crown and root rot of tomatoes. *Phytopahtology* **76** : 942-946.

- Carpenter-Boggs L., Kennedy A. C. and Reganold J. P. 2000.** Organic and biodynamic management: effects on soil biology. *Soil Science of American Society Journal*, **64**, 1479-1486.
- Cassels A. C., Mars G. L., Perriapuram C., 1996.** Establishment of arbuscular mycorrhizal fungi in autotrophic strawberry culture in vitro: comparison with inoculation of microplants *in vivo*. *Agronomie* **16**: 625-632
- CDE (Centre pour le Développement de l'Entreprise) 2009.** Guide Technique de la culture de la pomme de terre en Afrique de l'Ouest, 82 p.
- Chapdelain A., Dalpé Y., Hamel C., St-Arnaud M., Kosuta S., Pezzente M., Jutras P. and Parent S. 1998.** Endomycorrhizal inoculation improves the City of Montreal nursery tree seedling production. Second International Conference on *Mycorrhizae* (ICOM2). Uppsala, Sweden, July 1998, 41 pp.
- Charles G., Rossignol L., et Rossignol M. 1995.** Application d'un modèle de développement et de tubérisation synchrones chez la pomme de terre cultivée *in vitro*. Evolution d'activités enzymatiques. *Acta Bot. Gallica* **142** : 321-331.
- Cissé I., Fall S. T., Akinbamijo O. O., Diop Y. M. et Adedrian S. A. 2001.** Agriculture urbaine intensive et santé publique : l'utilisation des pesticides et leurs incidences sur la contamination des nappes phréatiques et les risques sur la santé des populations dans la zone des Niayes au Sénégal. In Agriculture urbaine dans les villes Ouest-Africaines : Impacts des systèmes intégrés de production intensive. Workshop /Séminaire Atélier.05-08 août 2001-09.21.Savana Saly Portugal. Sénégal.19 p.
- Clapp J. P., Young J. P.W., Merryweather J.W. and Fitter A.H., 1995.** Diversity of fungal symbiontes in arbuscular mycorrhizae from a natural community. *New Phytologist* **87**: 259:265.
- Clark R. B. and Zeto S. K. 2000.** Mineral acquisition by arbuscular mycor. *Plants. J. Plant Nutr.* **23** : 867-902.
- Constantinides M. and Fownes J. H. 1994.** Nitrogen mineralization from leaves and litter of tropical plants: Relationships to nitrogen, lignin and soluble polyphenol concentration. *Soil Biol Biochem* ; **26** : 49-55.

- Cooper K. M. and Tinker P. B. 1978.** Translocation and transfer of nutrients in vesicular arbuscular mycorrhizas. 2. Uptake and translocation of phosphorus zinc and sulphur. *New phytologist* **81** : 43-52.
- Cordier C., Gianinazzi S. and Gianinazzi-Pearson V. 1996.** Colonisation patterns of root tissues by *Phytophthora nicotianae* var. *parasitica* related to reduced disease in mycorrhizal tomato. *Plant Soil* **185** : 223–232.
- Cordier C., Pozo M. J., Barea J. M., Gianinazzi S. and Gianinazzi-Pearson V. 1998.** Take-all disease is systemically reduced in roots of mycorrhizal barley plants.
- Cuenca G., Andrade de Z., Meneses E. and Szaniszló P. 2001.** The presence of aluminium in arbuscular mycorrhizas of *Clusia multiflora* exposed to increased acidity. *Plant and soil*, 231, pp. 233-241.
- Cunniff P. 1995.** Official methods of analysis of AOAC International. 16th Edition. Editeur : Arlington, VA: AOAC international. ISBN/ISSN 0935584544.
- Dalbé Y. 2005.** Les mycorhizes : un outil de protection des plantes mais non une panacée. *Phytoprotection*, **86** (1): 53-59.
- Damm E. and Unestam T. 1997b.** Protection of *Pinus sylvestris* seedlings by ectomycorrhiza. II: Interaction between *Rhizoctonia* sp. Mycorrhiza and seedling photosynthesis. *Scandinavian Journal of Forest Research*
- Das S. K., Reddy G. S. and Sharma K. L. 1993.** Prediction of nitrogen availability in soil after crop residues incorporation. *Fert Res* ; **37** : 209- 15.
- De Neve S. and Hofman G. 1996.** Modelling N mineralization of vegetable crop residues during laboratory incubation. *Soil Biol Biochem* ; **28** : 1451-7.
- Dehne H. W., Schoenbeck F. and Baltruschat H. 1978.** The influence of endotrophic mycorrhiza on plant diseases. 3. Chitinase activity and the ornithine cycle. *Z. Pflanzenk.* **85**: 666-678.
- Desilets H. et Dugas C. 1998.** Utilisation d'un inoculant mycorrhizien de *Glomus intraradices* pour la production de minitubercules de pomme de terre en serre et en champ. Dans : Rapport annuel de recherche 1998, section 2, Présenté à Propur Inc.. Centre de recherche en horticulture. Université Laval, Québec. Canada. pp. 22-3 1.

- Desilets H., Dugas C. et Yelle S. 1997.** Production de minitubercules en serre et en champ via des boutures et des vitroplants. Dans : Rapport bisannuel de recherche 1995- 1997, section 2, Présenté à Propur Inc., Centre de recherche en horticulture, Université Laval, Québec, Canada, pp. 324.
- Désiré S., Couillerot J. P ; Hilbert J. L. and Vasseur J. 1995.** Dormance et germination des microtubercules de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) produit invitro : effets de la concentration en saccharose du milieu de tuberisation, de la durée de conservation à 4° C et d'un traitement avec de l'acide gibbérillique. *Acta. Bot.* 142 (4) : 371-378.
- DH (Direction de l'Horticulture) 2012.** Rapport d'évaluation de la production des légumes au Sénégal, p. 3.
- Diallo M. D., Chotte J. L., Guissé A. and Sall S. N. 2008.** Influence de la litière foliaire de cinq espèces végétales tropicales sur la croissance du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br) et du maïs (*Zea mays* L.). *Sécheresse*, 19 (3) :207-10.
- Diallo M. D., Guissé A., Badiane-Niane A., Sall S. and Chotte J. L. 2005** *In situ* effect of some tropical litters on N mineralization. *Arid Land Res Manage* ; 19 : 173-81.
- Diallo S. Crepin A. Barbey C., Orange N., Burini J. F. and Latour X. 2010.** Mechanisms and recent advances in biological control mediated through the potato rhizosphere, *Microbiol Ecol* 75 351–364
- Diémé A., Sagna M. and Sy M. O. 2011.** Influence of hormonal treatments and of sucrose on the Microtuberization of three potato varieties (*Solanum tuberosum* l.) Adapted to agroclimatic conditions in Senegal. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences* Vol. 1 (3) p. 69-77
- Dieng A., 1993.** Micropropagation et microtubérisation de deux variétés de Pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) adaptées aux conditions agroclimatiques du Sénégal. Mémoire de DEA de Biologie Végétale, FST/BVUCAD. 84p.
- Diop T. A., Wade T. K., Diallo A., Diouf M. and Guéye M. 2003.** *Solanum* cultivar responses to arbuscular mycorrhizal fungi : growth mineral status. *African Journal of Biotechnologie* Vol. 2 (11), pp. 429-43
- with winter wheat (*Triticum aestivum* L.) *Biol. Fertil. Soils* 7: 120-128.

- Dodd JC. And Jeffries P. 1989.** Effet of Fungicides on three vesicular-arbuscular mycorrhiza fungi associated with winter wheat (*Triticum aestivum* L.) *Biol. Fertil. Soils* **7**: 120-128.
- Dore Swamy R., Sirinasa N.K. and Chacko E. 1983.** Tissue-culture propagation of banana. *Scientia Horticulturae* **18** : 247-253.
- Dugassa, G.D., H. Vonalten and Schönbeck F. 1996.** Effects of arbuscular mycorrhiza (AM) on health of *Linum usitatissimum* L. infected by fungal pathogens. *Plant Soil* **185** : 173-182.
- Dumas-Gaudot E., Furlan V., Grenier J. and Asselin A. 1992.** New acidic chitinase isoforms induces in tobacco roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* **1**: 133-13
- Dumas-Gaudot E., Slezack S., Dassi B., Pozo M. J., Gianinazzi-Pearson V. and Gianinazzi S. 1996.** Plant hydrolytic enzymes (chitinases and-1-3 glucanases) in root reactions to pathogenic and symbiotic microorganisms. *Plant Soil* **185** : 211-221.
- Duvauchelle S. and Andrivon D. 1996.** Le mildiou et son agent *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary. In P. Rousselle, Y. Robert, and J. C. Crosnier (Eds.), La Pomme de terre INRA Editions. Paris. pp. 281-291.
- Edwards S. G., Fitter A. H. and Young J. P. W. 1997.** Quantification of an arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus mosseae* within plant root by competitive polymerase chain reaction. *Mycological Research* **101** : 1440-1444.
- Ellissèche D. 2008.** Production de pomme de terre, quels défis pour aujourd'hui et pour demain ?
- Escalant J. V. and Teisson C. 1988.** Embryogenèse somatique chez *Musa* sp. CR Acad. Sc. Paris **306** : 277-281.
- Ewing E. E. 1995.** Cuttings as simplified models of the potato plant. In. Potato physiology P. H. LI (ed), *Academic Press*, Orlando, 157-207.
- Falisse A., Lambert J. 1994.** La fertilisation minérale et organique. In : El Hassani TA, Persoons E, eds. *Agronomie moderne, bases physiologiques et agronomiques de la production végétale*. Paris: Inra éditions.

- Fang H., Yu Y.L., Wang, X., Shan M., Wu X. M. and Yu J. Q. 2006.** Dissipation of chlorpyrifos in pakchoi-vegetated soil in a greenhouse. *J. Environ. Sci.* **18**, 607-64.
- FAOSTAT 2008.** <http://www.potato2008.org/fr/monde/index.html> (10-02-2009).
- FAOSTAT 2012.** *Database Results* [en ligne]. Disponible sur : <http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/25687/ch01.html> (15-11-2012)
- Feller C. 1995.** La matière organique du sol : un indicateur de la fertilité. Application aux zones sahélienne et soudanienne. *Agriculture et développement* ; **8** : 35-41.
- FNPPPT 1996.** Catalogue français des variétés de pomme de terre. Ed. FNPPPT
- Fomina M., Hillier S., Charnock J., Melville K., Alexander J., Gadd G. 2005.** Role of oxalic acid over excretion in transformation of toxic metal minerals by *Beauveria caledonica*. *Applied and environmental Microbiology*, **71**, pp. 371-381.
- Fortin J.A., Plenchette C. et Piché Y. 2008.** Les mycorhizes : La nouvelle révolution verte. Edition multimondes, Canada.
- Franco L., Maia R., Porto A., Messias A., Fukushima K. And De Campos-Takaki G. 2004.** Heavy metal biosorption by chitin and chitosan isolated from *Cunninghamella elegans* (IFM 46109). *Brazilian Journal of Microbiology*, **35**, pp. 243-247.
- Gallaud I. 1995.** Étude sur les mycorhizes endotrophes. *Revue Générale de Botanique* **17** : 5-48, 66-83, 123-135, 223-239, 313-325, 425-433, 479-500.
- Gamalero E., Trotta A., Massa N., Copetta A., Martinotti M.G. and G. Berta. 2004.** Impact of two fluorescent pseudomonads and an arbuscular mycorrhizal fungus on tomato plant growth, root architecture and P acquisition. *Mycorrhiza* **14** : 185-192.
- García-Romera I. and Ocampo JA 1988.** Effect of the herbicide MCPA on VA mycorrhizal infection and growth of *Pisum sativum*. *Z Pflanzenernaehr Bodenkd* **151**:225–228
- Garcia-Romera I., Miquel J.A., and Ocampo J.A. 1988.** Effect of cyanazine herbicide MCPA on VA mycorrhizal infection and growth of *Pisum sativum*. *Plant Soil.* 107.207
- Gaucher D., Duvauchelle S. and Andrivon D. 1998.** Mildiou de la pomme de terre – le champignon évolue, la lutte aussi! *Perspectives agricoles.* **236**:1-20.

- Gauthert R. J. 1959.** La culture des tissus végétaux, technique et réalisations, Masson, Paris, 863 p.
- Gerdemann J. W. and Nicolson T. H. 1963.** Spores of mycorrhizal Endogene species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans. Br. Mycol. Soc.* **46** : 235- 244.
- Gerdemann J.W. and Trappe J.M. 1975.** The endogonaceae in the Pacific Northwest. *Mycologia Memoire*
- Gerungan R. F. I., Jadari R., Collonier C., Fock I., Lian Y., Ambroise A., Servaes A., Lavergne D., Ducreux G. and Sihachakr D. 2000** Hydridation somatique pour le transfert de caractère de résistance au verticillium à partir de *Solanum tarijense* dans la pomme de terre (*Solanum tuberosum*). VII<sup>ème</sup>. Journées Scientifiques. AUPELF-UREF p 107
- Gianinazzi S, Gianinazzi-Pearson V. and Trouvelot A. 1989.** Potentialites and procedures for the use of endomycorrhizas with special emphasis and high values crops. In: *Biotechnology of fungi for improving plant growth*. Whipps J. M. et Lumdsen R.D. (eds).
- Gianinazzi-Pearson V. and Diem H. G. 1982.** Endomycorrhizae in the tropics. In Dommergues Y. R. and Diem H.G. (eds). *Mycrobiology of Tropical Soils and plant Productivity*, Junk, the Hague, pp. 209-251.
- Giovanetti M. and Mosse B. 1980.** An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots, *New Phytol.*, **84**: 489-500.
- Gosling P., Hodge A., Goodlass G. and Bending G. D., 2006.** Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **113**:17-35
- Graham S. O., Green N. E. and J. W Hendris. 1976.** The influence of vesicular-arbuscular mycorrhizal fûngi on growth and tubenzation of potatoes. *Mycologia* **68**: 925-929.
- Gryndler M., Hrselová H. and D. Strítešká. 2000.** Effect of soil bacteria on growth of hyphae of the arbuscular mycorrhizal (AM) fungus *Glomus claroideum*. *Folia Microbiol.* **45** : 545-551.
- Guenoune D., Galili S., Philips D.A., Volpin H., Chet I., Okon Y. and Kapulnik Y. 2001.** The defense response elicited by the pathogen *Rhizoctonia solani* is suppressed by

- colonization of the AM-fungus *Glomus intraradices*. *Plant Sci.*, **160**: 925–932.
- Guenoune D., Galili S., Philips D.A., Volpin H., Chet I., Okon Y. and Kapulnik Y. 2001.** The defense response elicited by the pathogen *Rhizoctonia solani* is suppressed by colonization of the AM-fungus *Glomus intraradices*. *Plant Sci.* **160**: 925–932.
- Habte M. and Manjunath A. 1994.** Initial and residual toxicity of soil-applied thiram on the vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis, *Mycorrhiza* **2**: 5-31
- Hardie K., and Leydon L. 1981.** The influence of mycorrhiza on growth and water relations of red clover. I. In phosphate deficiency soil. *New Phytologist.* **89** : 599-608.
- Harrier L. A. and C. A. Watson. 2004.** The potential role of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the bioprotection of plants against soil-borne pathogens in organic and/or other sustainable farming systems. *Pest Manag. Sci.* **60** : 149-157.
- Harrison J. G. 1992.** Effects of the aerial environment on late blight of potato foliage, *Plant Pathology* **41** : 384-416.
- Hause B., Mrosk C., Isayenkov S. and Strack D. 2007.** Jasmonates in arbuscular mycorrhizal interactions. *Phytochemistry* **68**: 101-110.
- Hawkes J.G. 1990.** The potato: evolution, biodiversity and genetic resources. Oxford: Belhaven Press.
- Hélias V. 1999.** Mise au point d'outils de caractérisation et de détection d'*Erwinia carotovora* subsp. *Atroseptica* agent de la jambe noire et de la pourriture molle de pomme de terre. Application à l'étude de la transmission de la bactérie du tubercule mère vers les tubercules fils, via la plante, en cours de culture. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 190 p.
- Hervé Y. 1995.** Intégration des biotechnologies chez les plantes légumières. In : Intégration chez les plantes légumières, fruitières et ornementales. Biotechnologies végétales. Demarly Y. et Picard E. (eds)). UNISAT, CNED/AUPELF-UREF, BV9A, Fascicule U: 12-23.
- Hewitt E. J., 1966.** Sand and Water Culture Methods Used in the study of Plant Nutrition. *Commonwealth Agric. Bureau, Tech. Comm.* N°22. Rev. 2<sup>nd</sup> edition.

- Hooker J.E., M. Munro and D. Atkinson. 1992.** Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi induces alteration in poplar root system morphology. *Plant Soil* 145 : 207-214.
- Huber D. M., 1989.** Introduction. *Dans* Soilborne plant pathogens : Management of diseases with Macro- and Microelements. Engelhard, A. W., red. APS Press, *The American Phytopathological Society*, St. Paul, MN, pages 1-8.
- Hussey G. and Stracey N. J. 1984.** Factors affecting the formation of in vitro tubers of potato (*Solanum tuberosum* L.) *Ann. Bot.* **53**: 565-578.
- Ismail Y. et Hijri M. 2009.** Les champignons mycorrhiziens modulent l'expression des gènes des mycotoxines du *Fusarium sambucinum* chez la pomme de terre. *Phytoprotection*, Volume 90, numéro 3, 2009, p. 121-122
- IYP. (International Year of the Potato) 2008.** Andean Heritage. <http://www.potato2008.org/en/potato/origins.html>. (Consulté le 20 Septembre 2010)
- Jackson S. D. 1999.** Multiple signaling pathways control tuber induction in potato. *Plant Physiol.* 199: 1-8
- Jadari R., Gerungan R., Collonier C., Fock I., Lian Y., Ambroise A., Servaes A., Lavergne D., Ducreux G. and Sihachakr D. 2000.** Adaptation de l'hybridation somatique à la production rapide d'hybrides intraspécifiques de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). VII<sup>es</sup> Journées Scientifiques. AUPELF-UREF p. 71
- Jeffries P. 1987.** Use of mycorrhizae in agriculture. *Critical Reviews in Biotechnology* **5** : 319-357.
- Johnson N. C. and Pflieger F. L. 1992.** VA mycorrhizae and cultural stresses. Dans : Bethlenfalvay, G.J. (éd.), *Mycorrhiza in sustainable agriculture*, ASA special publication n°. **54**, Wisconsin, Madison, USA, pp. 71-99.
- Joner E. J., Ravnskov S. and Jakobsen I. 2000.** Arbuscular mycorrhizal phosphate transport under monoxenic conditions using radio-labelled inorganic and organic phosphate. *Biotechnology Letters* : 1705–1708.
- Jouan B., Guillery E. 2001.** Proposition pour l'organisation et le développement de la pomme de terre au Niger. Compte rendu de mission. Ministère des affaires Etrangères / Ministère de l'Agriculture / Service de Coopération et d'Action Culturelle

au Niger ; 75p.

- Jouan B., Riquier X. et Vanderhorfstdat B. 1999.** Mali, Burkina Faso et Niger-Projet de Développement de la pomme de terre-La pomme de terre Française N°511:52-56
- Jouan B., Tivoli B. et Samson R. 1980.** Les principales maladies de conservation de la pomme de terre. La pomme de terre Française, **399** : 207-214
- Jouan B., Tivoli B., Samson R., Hingand L., Saily M. et Chauveau J. F. 1985.** Mise au point sur quelques méthodes de détection de champignons et de bactéries transmissibles par les tubercules de semences de pomme de terre C. R. 1<sup>ères</sup> Journées études mal. Plantes ; Versailles. *Ann. Assoc. Ntle Prot. Plantes*, pp. 231-240
- Kabir Z., O'Halloran I. P., Fyles J. W. and Hamel C. 1997.** Seasonal changes of arbuscular mycorrhizal fungi as affected by tillage practices and fertilization: hyphal density and mycorrhizal root colonization. *Plant Soil* **192** : 285-293.
- Kashyap P.S. and Panda R. K. 2003.** Effect of irrigation scheduling on potato crop parameters under water stressed conditions. *Agri. Water Man.*, **59** (1) :49-66.
- Kelman A. 1998.** One hundred and one years of research on bacterial wilt. In: Prior P., Allen C., Elphinstone J. (eds). *Bacterial Wilt Disease: molecular and ecological aspects*. Springer-Verlag, Berlin: 1-5.
- Koide R.T. and Kabir Z. 2000.** Extraradical hyphae of the mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* can hydrolyse organic phosphate. *New Phytologist* **148**: 511–517.
- Kurle J. E. and Pflieger F. L. 1994.** The effects of cultural practices and pesticides on VAM Press fungi. Dans : Pflieger, F.L. et R.G. Linderman (éds), *Mycorrhizae and plant health*, APS, St-Paul, *Minnesota*, pp. 101 - 131.
- Laferrière L.T., Helgeson J.P. and Callen C. 1999** Fertile *Solanum tuberosum* + *S. commersonii* somatic hybrids as sources of resistance to bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*, *Theor. Appl. Genet.*, **98**: 1272-1278
- Lal R. 1998.** Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality, *Crit Rev Plant Sci*; **17** : 319-464.
- Lambais M. R. and Mehdy M. C. 1993.** Suppression of endochitinase,  $\beta$ -1,3-endoglucanase

- and chalcone isomerase expression in bean vesicular-arbuscular mycorrhizal roots under different soil phosphate conditions. *Mol. Plant-Microbe Interact.* **6** : 75-83.
- Lambers H., Raven J.A., Shaver G. R. and Smith S.E. 2008.** Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. *Trends Ecol Evol* **23**:95–103
- Lambert D. H., Powelson M. L. and Stevenson W. R. 2005.** Nutritional interactions influencing diseases of potato. *Am. J. Potato Res.* **82** : 309-319.
- Le Tacon F., Le Tacon T., Mauron V., Rousseau Y., Backer M. and Bouchard D., 1999.** Fertilisation raisonnée et mycorhize. 4<sup>ème</sup> rencontre de la fertilisation raisonnée. Blois, novembre-décembre 1999, pp 211-222.
- Linderman R. G. 2000.** Effects of mycorrhizas on plant tolerance to diseases. Pages 345-365 in Y. Kapulnik et D.D.Jr. Douds (éds.), *Arbuscular mycorrhizas: physiology and function*. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands.
- Liu J., Maldonado-Mendoza I., Lopez-Meyer M., Cheung F., Town C.D. and Harrison M. J. 2007.** Arbuscular mycorrhizal symbiosis is accompanied by local and systemic alterations in gene expression and an increase in disease resistance in the shoots. *Plant journal*, **50**: 529-544
- Lutaladio N. B. and Prakash A. 2010.** La pomme de terre : histoire et développement économique. *Cahiers de Nutrition et diététique*, **45** : S5-S16.
- Louche-Tessandier D., Samson G., Hernandez-Sebastia P., Chagvardieff and Y. Desjardins. 1999.** Importance of light and CO<sub>2</sub> on the effects of endomycorrhizal colonization on growth and photosynthesis of potato plantlets (*Solanum tuberosum*) in an *in vitro* tripartite system. *New Phytologist* **142** : 539-550.
- Maillet F., Poinot V., André O., Puech-Pagès V., Haouy A., Gueunier M., Cromer L., Giraudet D., Formey D. and Niebel A. 2011.** Fungal lipochitooligosaccharide symbiotic signals in arbuscular mycorrhiza. *Nature*. **469**: 58-63
- Mangenot F. 1980.** Les litières forestières, signification écologique et pédologique. In *Rev. For. Fr.*, n°4, pp. 339-355
- Martinez A. 1999.** Biomass production and phosphorus accumulation of potato as affected by phosphorus nutrition. *Journal of Plant Nutrition* **22**:205-217.

- Mattila P. and Hellstrom J. 2007.** Phenolic acids in potatoes, vegetables, and some of their products. *Journal of Food Composition and Analysis*. Vol. **20**: 152-160.
- McArthur D. A. J. and Knowles N. R. 1993.** Influence of VAM fungi on the response of potato to phosphorus deficiency. *Plant Physiol.* **101**: 147-160
- Meharg A. A., Cairny J. W. G. and Maguir N., 1997:** Mineralization of 2, 4 dichlorophenol by ectomycorrhizal fungi in axenic culture and in symbiosis with pine, *Chemosphere* **34** : 2495-2504.
- Menendez A., Martínez A., Chiocchio V., Venedikian N., Ocampo J.A. and Godeas A. 1999.** Influence of the insecticide dimethoate on arbuscular mycorrhizal colonization and growth in soybean plants. *Internat Microbiol.*, **2**:43-45
- Menge J.A. 1982.** Effects of soil fumigants and fungicides on vesicular-arbuscular fungi. *Phytopathology* **72**: 1125-1132.
- Menge J. A. 1982b.** Utilization of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture. *Canadian Journal of Botany* **61** : 1015-1024.
- Menge J. A., Johnson E. L. V. and Platt R. G. 1978.** Mycorrhizal dependency of several citrus cultivars under three nutrients regimes. *New Phytol.* **81**: 553-559.
- Merryweather J., and Fitter A.H. 1996.** Phosphorus nutrition of an obligately mycorrhizal plant treated with benomyl in the field. *New Phytol.*, **132**: 307-311.
- Merryweather J., and Fitter A. H. 1998.** The arbuscular mycorrhizal fungi of *Hyacinthoides non-scripta*: I. Diversity of fungal taxa. *New Phytol.* **138**: 117-129
- Meyer J.R. and Linderman R. G. 1986.** Response of subterranean clover to dual inoculation with vesicular arbuscular mycorrhizal fungi and a plant growth-promoting bacterium *Pseudomonas putida*. *Soil Biol. Biochem.* **18** : 185-190.
- Miller J. C., Rajapakse S. and Garber R. K. 1986.** Vesicular-arbuscular mycorrhizae in vegetables crops. *HortScience* **21** : 974-984.
- Milne R. G. 1988** “The Filamentous Plant Viruses”. In : Fraenkel-conrat H, Wagner RR, eds. The Plant Viruses. Plenum Press : New York and London, : 331-407
- Morel G., Martin C. and Muller J. F. 1968.** La guérison des pommes de terre atteintes de

- maladies à virus. *Ann. Physiol.* **10** (2) : 113-139.
- Morel G. and Wetmore R. H. 1951.** Fern callus tissue culture. *Am. J.Bot.* **38**:141-143
- Morton J. B., Bentivena S. P. and Bever J. D. 1995.** Discovery, measurement and Interpretation of diversity in arbuscular endomycorrhizal fungi (Glomales Zygomycetes). *Canadian Journal of Botany* **73** : 523-532.
- Morton J. B. and Benny G. L., 1990.** Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): a new order Glomales and *Gigasporineae* and two new families *Acaulosporaceae* and *Gigasporaceae* with an emendation of *Glomaceae*. *Mycotaxon* **37**: 471-491.
- Muchovej J. J., Muchovej R. M. C. and Goncalves E. J. 1991.** Effect of kind and method of fungicidal treatment of bean seed on infections by the VA mycorrhizal fungus *Glomus macrocarpum* and by the pathogenic fungus *Fusarium solani*. *Plant Soil* **132** : 47-51.
- Muller M., Sundman V., Soininvaara O. and Merilainen A. 1988.** Effect of chemical composition on the release of nitrogen from agricultural plant materials decomposing in soil under field conditions. *Biol Fertil Soils* ; **6** : 78-83.
- Murashige T. and Skoog F. 1962.** A revised medium for rapid growth and bioassays, with tobacco tissue culture. *Physiol. Plant.*, **15**: 473-497.
- Musvoto C., Campbell B. M. and Kirchman H. 2000.** Decomposition and nutrient release from mango and miombo woodland litter in Zimbabwe. *Soil Biol Biochem*; **32** : 1111-9.
- Myers R. J. K., Palm C.A., Cuevas E., Gunatilleke I. U. N. and Brossard M. 1994.** The synchronisation of nutrient mineralization and plant nutrient demand. In : Woomer P, Swift MJ, eds. *The biological management of tropical soil fertility*. Chichester (UK) : JohnWiley .
- Nagahashi G. and Douds D. 1997.** Appressorium formation by AM fungi on isolated cell walls of carrot roots. *New Phytologist* **136**: 299-304.
- Ndiaye F., Diop T.A., Sy M.O., Manga A.G.B. et Sow H.A. et Ba T. 2005.** Mycorrhization contrôlée de plantes micropropagées de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.)

*Revue Sénégalaise des recherches agricoles et agroalimentaires* **1**:33-37.

**Ndiaye F., 2001.** Microtubérisation et mycorhization de trois de pomme de terre (*Solanum tuberosum*); Bamina, Baraka et Bintje. Mémoire de DEA de Biologie Végétale, Université Cheikh Anta Diop, Dakar Sénégal, 88p.

**Ndiaye F.; Diop T. A. ; Sy M.O. ; Manga A.G.B. ; Sow H.A. et Ba T. 2003.** Effets ex vitro de *Glomus aggregatum* sur le développement de plantes micropropagées de Pomme de terre (*Solanum tuberosum* L. var. Bintje) en présence de Phosphore Naturel du Sénégal. Annales de l'Université de Ouagadougou, Série C, sous presse.

**Ndiaye M. 2011.** Comportement de deux espèces productrices de gomme inoculées par des champignons mycorhiziens sous contrainte hydrique et chimique. Thèse de Doctorat, N° 002, École Doctorat : Sciences de la vie, de la Santé et de l'Environnement ; Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 156p.

**Nemec S. 1980.** Influence of 11 fungicides on endomycorrhizal development in sour orange. *Can. J. Bot.*, **58**: 522-526.

**Niemira B. A., Safir G. R., Hammerschmidt R. and Bird G. 1995.** Production of prenuclear minitubers of potato with peat-based arbuscular mycorrhizal fungal inoculum. *Agron. J.*, **87**: 942–946.

**Norman J. R. and Hooker J. E. 2000.** Sporulation of *Phytophthora fragariae* shows greater stimulation by exudates of non-mycorrhizal than by mycorrhizal straw berry roots. *Mycologia* **104** : 1069-1073.

**Nozeran R., Bancilhon R. L. and Grenan S., 1972.** Nouvelles possibilités d'obtention et de multiplication rapide des clones sains de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) *C.R. Acad. Sci., Paris D* **285**: 37-40.

**Ovchinikova A., Krylova E., Gavrilenko T., Smekalovat., Zhuk M., Knapp S. and Spooner D. M. 2011.** Taxonomy of cultivated potatoes (*Solanum* section *Petota*: *Solanaceae*) *Botanical Journal of the Linnean Society*, **165**: 107–155.j\_

**Palm C.A. and Sanchez P.A. 1991.** Nitrogen release from the leaves of some tropical légumes as effected by their lignin and polyphenolic contents. *Soil Biol Biochem*; **23**: 83-8.

- Parniske M., 2004.** Molecular genetics of the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Current Opinion in Plant Biology* **7**: 414-42
- Parniske M., 2008.** Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nat. Rev. Microbiol.* **6**:763–75.
- Parsieglä G., Juy M., Reverbel-Leroy C., Tardif C., Belaich J.-P., Driguez H. & Haser R. 1998.** The crystal structure of the processive endocellulase CelF of *Clostridium cellulolyticum* in complex with a thiooligosaccharide inhibitor at 2.0 Å resolution. *EMBO J.*, **17**, 5551–5562.
- Patrick O.C., Maria Manjarrez S. and E. Smith 2009.** The fate and efficacy of benomyl applied to field soils to suppress activity of arbuscular mycorrhizal fungi, *Revue canadienne de microbiologie*, **55** (7): 901-904, 10.1139/W09-035
- Paulitz T.C. and R.G. Linderman. 1991.** Lack of antagonism between the biocontrol agent *Gliocladium virens* and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol.* **117** : 303-308.
- Pavarthi K., Venkateswarlu K. and Rao A. S. 1985.** Effects of pesticides on development of *Glomus mosseae* in groundnut, *Trans. Br. Mycol. Sci.* **84**, 29.
- Perrier N., Amir H. and Collin F. 2006.** Occurrence of Mycorrhizal symbiosis in the metal-rich lateric soils of the Koniambo massif, New-Caledonia. *Mycorrhiza*, **16**: 446-458
- Pesticide Action Network (PAN) Africa 2006.** Pesticides et Pauvreté, Mise en œuvre des Conventions internationales relatives aux produits chimiques pour un développement sain et équitable, Document d'information sur la gestion des pesticides au Sénégal 56p.
- Philips J. M. and Hayman D. S. 1970.** Improved procedure for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* **55** : 158-161.
- Pieri C. 1989.** Fertilité des terres de savanes de 30 années de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Paris : Agridoc- International ; Ministère de la coopération et Cirad-Irat., *Soil Resources Reports*. Rome : FAO, 1998.
- Pinochet J. C., Calvet A. Campruby and C. Fernandez. 1996.** Interactions between

- migratory endoparasitic nematodes and arbuscular mycorrhizal fungi in perennial crops: a review. *Plant Soil* **185** : 183–190.
- Plenchette C., Fortin J. A. and Furlan V. N 1983a.** Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility. I – Mycorrhizal dependency under field conditions. *Plant and Soil* **70**: 199-209.
- Plenchette C. 1991.** Utilisation des mycorrhizes en agriculture et horticulture. Dans : Strullu, D.G. (éd.), Les mycorrhizes des arbres et des plantes cultivées, *technique et documentation*- Lavoisier, Paris, pp.131-196.
- Plenchette C. Furlan V. and Fortin J. A. 1982.** Effet of different endomycorrhizal fungi on five host plant grown on calcined montmorillonite clay. *J. Am. Hort. Sci.* **107**: 535-538.
- Plenchette C., Clermont-Dauphin C., Meynard J.M.and Fortin J.A. 2005.** Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Can. J. Plant Sci.*, **85**: 31-40.
- Pozo M. J., C. Azcon-Aguilar E. Dumas-Gaudot and J. M. Barea. 1998.** Chitosanase and chitinase activities in tomato roots during interactions with arbuscular mycorrhizal fungi or *Phytophthora parasitica*. *J. Exp. Bot.* **49**: 1729–1739.
- Radtke W. and Rieckmann W. 1991.** Maladies et ravageurs de la pomme de terre. Ed. Th. Mann. Gelsenkirchen-Buer, Allemagne. pp. 16-20.
- Ranalli P. 1997.** Innovative propagation methods in seed tuber multiplication programmes. *Potato Res.*, **40**: 439–453.
- Rapparini F., Baraldi R., Bertazza G., Brazanti B. and Predieri S., 1994.** Vesicular arbuscular-mycorrhizal inoculation of micropropagated fruit trees. *J. Hortic.Sci* **69**: 1101-1109.
- Read D.J., and Perez-Moreno J. 2003.** Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems – a journey towards relevance? *New Phytologist.* **57**: 475–492.
- Recous S., Robin D., Darwis D. and Mary B. 1995.** Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, **27**: 1529-1538.
- Redecker D., and Raab P. 2006.** Phylogeny of the Glomeromycota (arbuscular mycorrhizal

- fungi): recent developments and new gene markers. *Mycologia* **98**: 885-895.
- Requena N., Serrano E., Ocón A. and Breuninger M., 2007.** Plant signals and fungal perception
- Rios D., Ghislain M., Rodriguez F. and Spooner D. 2007.** What is the origin of the European potato? Evidence from Canary Island Landraces. *Crop Science Society of America*; **47**: 1271-80.
- Rousselle P., Robert Y. and Crosnier J.C. 1996.** Pomme de Terre – INRA Edition, 607p.
- Salaman R.N. 1985:** The history and social influence of the potato. Revised impression, edited with a new introduction by J.G. Hawkes. Cambridge: Cambridge University Press (1945), p.1-685.
- Samba S. A. N. 2001.** Effet de la litière de *Cordyla pinnata* sur les cultures : approche expérimentale en agroforesterie. *Ann Sci* ; **58** : 99-107.
- Sanders I. R., Groppe M. Alt K., Boller T. and Wiemken A. 1995.** Identification of ribosomal DNA polymorphisms among and within spores of the Glomales: application to studies on the genetic diversity of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *New Phytologist* **130**:419-427.
- Scervino J. M., Ponce M.A., Erra-Bassells R., Vierheilig H., Ocampo J. A. and Godeas A. 2005.** Flavonoids exhibit fungal species and genus specific effects on the presymbiotic growth *Gigaspora* and *Glomus*. *Mycological Research* **109**: 789-794.
- Schenck N.C. 1981.** Can mycorrhizae control root disease? *Plant disease*, **65**: 230-234.
- Schüßler A. H., Schwarzott Gehrig D. and Walker C., 2001a.** Analysis of partial Glomales SSU rRNA gene sequences: implications for primer design and phylogeny. *Mycological Research* **105**: 5–15.
- Schüßler A., Schwarzott D., Walker C., 2001.** A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological Research* **105**: 1413-1421.
- Schüßler A., D. Schwarzott and C. Walker, 2001b.** A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological Research* **105**: 1413-1421
- Schwarzott D., Walker C. and Schüßler A., 2001.** *Glomus*, the Largest Genus of the

- Arbuscular Mycorrhizal Fungi (Glomales), is nonmonophyletic. *Molecular Phylogenetics and Evolution* **21**: 190-197
- Seabrook R.D.S., Sihachakr., Lavergne D., Nato A., Ellissèche D., Jouan B., and Ducreux G., 2005.** Microtubérisation chez la pomme de terre- voie d'amélioration et d'adaptation de la qualité nutritionnelle des tubercules. Maitise des procédés en vue d'améliorer la qualité et la sécurité des aliments, Utilisation des OGM. Analyse des risques en agroalimentaire. *Ouagadougou*. 8-11 Novembre 2005.
- Secilia, J. and D.J. Bagyaraj. 1987.** Bacteria and actinomycetes associated with pot cultures of vesicular-arbuscular mycorrhizas. *Can. J. Microbiol.* **33** : 1069-1073.
- Seck L. T. M. 2001.** Perception des Risques à l'usage des pesticides. Enquête menée dans la communauté rurale de MBORO (Région de Thiès : Dép. de Tivaoune. Université Cheikh Anta Diop, pp. 1-21
- Sediqui M., Carroll, R. B. and Morehart A. L. 1997.** First report from Morocco of *Phytophthora infestans* isolates with metalaxyl resistance. *Plant Disease.* **81** : 831.
- Selosse M. A. et Le Tacon F. 1998.** The land flora: a phototroph -fungus partnership. Trends in *Ecology and Evolution*, **13**, 1, 15-20
- Shiralipour A.; Mc Connel W. and Smith WH 1992.** Physical and chemical properties of soil as affected by municipal solid waste compost application. *Biomass Bioenergy*, **3**, 195-211.
- Sidikou R. Seyni D. , Ellisseche D. , Sihachakr D. , Jouan B. and Ducreux G. 2002.** Conséquences du stress hydrique chez huit cultivars de Pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) Journal: *Acta. Botanica Gallica.*, **149**(2):139-148.
- Sidikou R.D.S. 2002.** Contribution des Biotechnologies Végétales à l'adaptation de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) au Niger. Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences, Université Abdou Moumouni de Niamey Niger.
- Sidikou R.D.S., Ellisseche D., Sihachakr D., Jouan B. and Ducreux G., 2002.** Conséquence du stress hydrique chez huit cultivars de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) *Acta Botanica Gallica*, **149** (2), 139-148.
- Singh R., Adholeya A. and Mukerji. K.G. 2000.** Mycorrhiza in control of soil-borne

- pathogens. Pages 173-196 in K.G. Mukerji, B.P. Chamola et J. Singh (éds.), *Mycorrhizal biology*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Smith S.E. and Gianinazzi-Pearson V. 1988.** Physiological interactions between symbionts in vesicular–arbuscular mycorrhizal plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **39** : 221–244.
- Smith S.E. and Read D.J., 1997.** *Mycorrhizal Symbiosis*, 2<sup>nd</sup> édition. Academic Press, San Diego, 605 p.
- Smith SE, and Read D.J. 2008.** *Mycorrhizal symbiosis*. Academic press.
- Soltner D. 1980.** Les grandes productions végétales-Collection Sciences et Techniques Agricoles.
- Sow M. Marone M., et S. Ndiaye 2004.** Etude socio-économique de l'utilisation des pesticides au Sénégal, Fondation Ceres Locustox FAO, Institut du Sahel 143p.
- Spanu P., Boller T., Ludwig A., Wiemken A., Faccio A. and Bonfante-Fasolo P. 1989.** Chitinase in roots of mycorrhizal *Allium porrum*: regulation and localization. *Planta* **177** : 447-455.
- Spooner D. 2009.** Roadmaps to the origins of the potato, Personal communication on potato taxonomy to IYP. In: International year of the potato 2008. New light on a hidden treasure Rome: FAO. p. 155-116.
- Srivastava D., Kapoor R., Srivastava S. K. and Mukerji K. G. 1996.** Vesicula. Arbuscular mycorrhiza - an overview. p. 1-40. dans : Concepts in mycorrhizal research. Handbook of vegetation science, volume 19/2. K. G. Mukerji, Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts
- St-Arnaud M., Hamel C., Caron M. and Fortin J.A. 1995.** Endomycorrhizes VA et sensibilité des plantes aux maladies: synthèse de la littérature et mécanismes d'interaction potentiels. Fortin J.A., Charest C., Piché Y.(eds). La symbiose mycorrhizienne, état des connaissances. Orbis Publishing, pp 51-87.
- Stevenson F. J. 1984.** Humus Chemistry, genesis, composition, reactions. John Wiley & Son, New York.

- Stevenson W.R., Loria R., Franc G.D., and Weingartner D.P. 2001.** Compendium of potato diseases, second edition. St. Paul, MN: APS Press. p. 106.
- Strack D., Fester T., Hause B., Schliemann W., and Walter M.H. 2003.** Arbuscular mycorrhiza: biological, chemical, and molecular aspect. *J Chem Ecol*, 29: 1955-1979.
- Strullu D.G. ; Perrin R. ; Plenchette C. et Garbaye J. 1991.** Les mycorhizes des arbres et des plantes cultivées. *Technique et Documentation, Lavoisier, Paris*, 254 p.
- Sukarno N., Smith S. E. and Scott E. S., 1993.** The effect of fungicides on vesicular arbuscular mycorrhizal symbiosis: 1. The effects on vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth. *New Phytol.* **125** : 139- 147
- Sylvia D.M. and Chellemi D.O.. 2001.** Interactions among root-inhabiting fungi and their implications for biological control of root pathogens. *Adv. Agron.* **73** : 1-33.
- Tarafdar JC. and Marschner H. 1994.** Phosphatase-activity in the rhizosphere and hyphosphere of VA mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus. *Soil Biology and Biochemistry* Vol: 387–395.
- Talburt W.F., Smith O., Potato Processing. 1987,** 4th edition, Avi Van Nostrand Reinhold Company. New York.
- Thomas L., Mallesha B.C. and Bagyaraj D.J. 1994.** Biological control of damping-off of cardamom by the VA mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum*. *Microbiol. Res.* **149** : 413–417.
- Tombet B. 1995.** Détection de *Pseudomonas solanacearum* chez *Solanum tuberosum* par la technique Elisa. Rapport de DEA-ENSA, Rennes-INRA, Antilles-Guyanne.
- Tisserant B., Schellenbaum L., Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S. and Berta G.. 1991.** Influence of infection by an endomycorrhizal fungus on root development and architecture in *Platanus acerifolia*. *Allionia* **30** : 171-181.
- Trappe JM, Molina R. and Castellano M. 1984.** Reactions of mycorrhizal fungi and pathogens induced in primary roots of pesticides. *An. Rev. of Phyt.*, **22**: 331-359.
- Traquair, J.A. 1995.** Fungal biocontrol of root diseases: endomycorrhizal suppression of *Cylindrocarpon* root rot. *Can. J. Bot.* **73** : S89–S95.

- Trouvelot A, Kough JL. and Gianinazzi-Pearson V. 1986.** Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. In *Aspects Physiologiques et Génétiques des Mycorhizes*. Edition INRA: Dijon, France; 217 – 221.
- UNGA. United Nations General Assembly declaration on international year of the Potatoes, 2005.** Resolution 60/191 of 22 December. <http://www.potato2008.org/en/events/unga.pdf>. (consulté le 5 Octobre 2010)
- Van Soest P.J.1963.** Ruminant fat metabolism with particular reference to factors affecting low milk fat and feed efficiency. A review. *J. Dairy Sci.*, **46**, 204-216.
- Vance E.D. and Chapin III FS. 2001.** Substrate limitations to microbial activity in taiga forest floors. *Soil Biol Biochem* ; **33** : 173-88.
- Varmn A. and Schuepp H. 1996.** Influence of myconhization on the growth of micropropagated plants. Dans : Mukerji, KG. (éd.), *Concepts in mycorrhizal research*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 1 13- 132.
- Vestberg M. and Estaun V. 1994.** Micropropagated plants, an opporhinity to positively manage mycorrhizal activities. Dans : S. Gianinaui et H. Schüep (éds), *Impact of Arbuscular Mycorrhizas on Sustainable Agriculture and Natural Ecosystems. US*, BirkMuser, Basel. pp. 217-226.
- Villalobos V. and Abdelnour A. 1992.** Cryoconservation of *Musa* spp. and its potential for long-term storage of other tropical crops. pp. 197-209 *in conservation of plant genes*, Academic Press, Inc.
- Vinterhalter D. Vinterhalter B. and Calovic 1997.** The relationship between sucrose and cytokinins in te regulation of growth and branching in potato cv Désirée shoot cultures. *Acta Horticulture* 462: 319-323.
- Volpin H., Elkind Y., Okon Y. and Kapulnik Y. 1994.** A vesicular arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus intraradix*) induces a defense response in alfalfa roots. *Plant Physiol.* w: 683–689.
- Vos C.M., Tesfahun A.N., Panis B., DeWaele D. and Elsen A. 2012.** Arbuscula rmycorrhizal fungi induce systemic resistance in tomato against the sedentary nematode *Meloidogyne incognita* and the migratory nematode *Pratylenchus*

- penetrans. Applied soil ecology*, 61: 1-6.
- Vosatka M. et Gryndker M. 2000.** Reponse of micropropagation potatoes transplanted to peat media to post vitro inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and soil bacteria. *Applied Soil Ecology* **15**: 145-152.
- Walker C. And Schubler A. 2004.** Nomenclature clarifications and new taxa in the Glomeromycota. *Mycol. Res.* 108: 979-982.
- Walker C. and Trappe J.M. 1993.** Names and epithets in the Glomales and Endogonales. *Mycol. Res.* **97**: 339-344.
- Wang P. J. And Hu C. Y., 1982.** *In vitro* mass tuberisation and virus free seed potato production in Taiïwan. *Am. Potato J.* **59**: 33-37.
- Whang JM, Schomburg CJ, Glotfelty DE, Taylor AW. 1993.** Volatilization of fonofos, chlorpyrifos and atrazine from conventional and no-till surface soils in the field. *J. Environ. Qual.*, **22**: 173-180
- Whipps J. M. 2004.** Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. *Can. J. Bot.* **82**: 1198-1227.
- Williams S.T. and Gray T.R.G. 1974.** Decomposition of litter on soil surface. In *Biology of litter decomposition*, Vol. 2, ed. by C.H. Dickinson and G.J.E. Pugh, p. 611-630. New York, Academic Press.
- Wyss P., Boller T. et Wiemken A. 1991.** Phytoalexin response is elicited by a pathogen (*Rhizoctonia solani*) but not by a mycorrhizal fungus (*Glomus mosseae*) in soybean roots. *Experientia* **47** : 395-399.
- Xavier L.J.C. and Boyetchko S.M. 2002.** Arbuscular mycorrhizal fungi as biostimulants and bioprotectants of crops. *Appl. Mycol. Biotechnol.* **2** : 311-340.
- Xuan T.D., Eiji T., Hiroyuki T., Mitsuhiro M., Khanh T.D., Chung I-M. 2004.** Evaluation on phytotoxicity of neem (*Azadirachta indica*. A. Juss) to crops and weeds. *Crop Prot.* **23** : 335-45.
- Zryd J.P., 1988.** Culture de cellules, tissus et organs végétaux. Fondements théoriques et utilisation pratiques. Lausanne, Suisse : *Presse Polytechnique Romandes*, 305 p.

*Références  
Bibliographiques*

---

---

**ANNEXES**

---

---

**Annexe I- MILIEUX DE CULTURE****I.1- Milieux de cultures pour croissance de vitroplants****I.1.1-MS standard (Murashige et Skoog, 1962)** (Stérilisation à l'autoclave : 120°C, 30 min)

Macro-éléments <sup>(1)</sup>	50ml
Micro-éléments <sup>(2)</sup>	10ml
FerEDTA <sup>(3)</sup>	10ml
Vitamine de Morel	5ml
Saccharose	20g
Agar	7g
Eau	930ml
pH	5,7-5,8
Méso-inositol	100

**I.2.2-Milieu de base MS (Murashige et Skoog, 1962)**

<sup>(1)</sup> Macro-éléments	milieu	solution-mère (x20)
	mg/l	(g/l)
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1650	33
KNO <sub>3</sub>	1900	38
CaCl <sub>2</sub> ,2H <sub>2</sub> O	440	8,8
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	170	3,4
<sup>(2)</sup> Micro-éléments	milieu	solution-mère (x20)
	(mg/l)	(g/l)
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	6,2	620
MnSO <sub>4</sub> , 4H <sub>2</sub> O	22,3	2230
KI	0,83	83
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ,2H <sub>2</sub> O	0,25	83
CuSO <sub>4</sub> , 5H <sub>2</sub> O	0,025	2,5
CoCl <sub>2</sub> ,6H <sub>2</sub> O	0,025	2,5

**(3) Solution de Fer EDTA**

	Milieu (mg/l)	solution-mère (x100) (mg/l)
FeSO <sub>4</sub> ,7H <sub>2</sub> O	22,8	2780(*)
Na <sub>2</sub> EDAT	37,3	3730(*)

(\*) Dissoudre les 2 produits séparément dans 500 ml, puis ajouter progressivement la solution de sulfate de fer à celle du sel disodique (très lentement). Prendre 10ml de cette solution par litre de milieu.

**I.1.3-Vitamines de Morel et Wetmore (1951)**

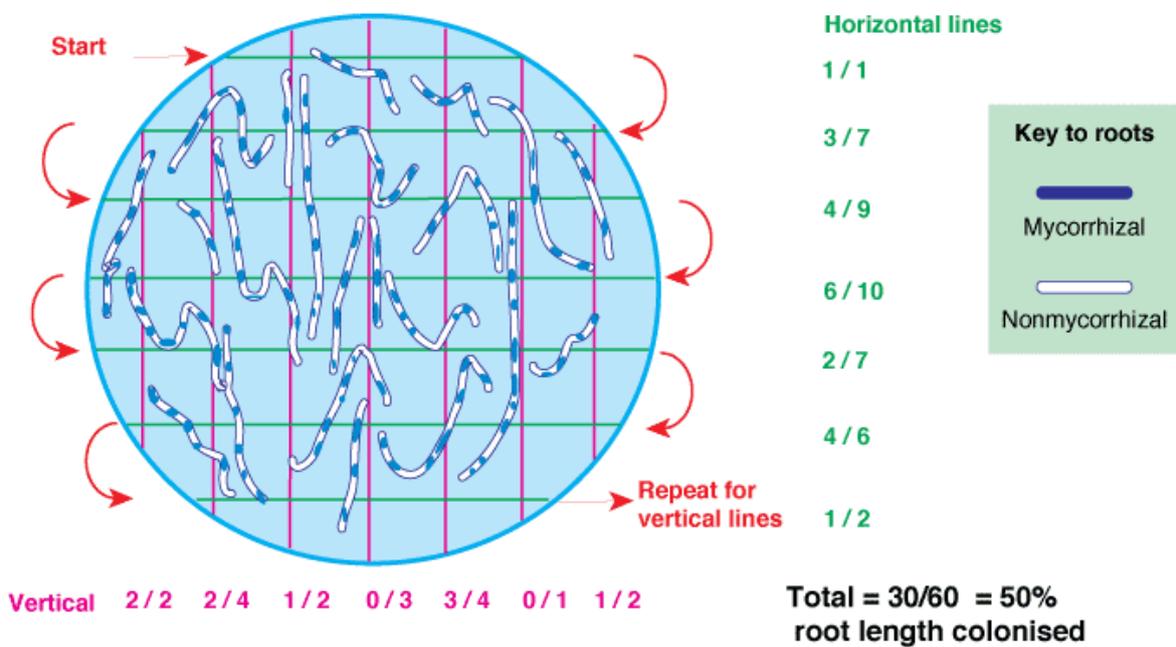
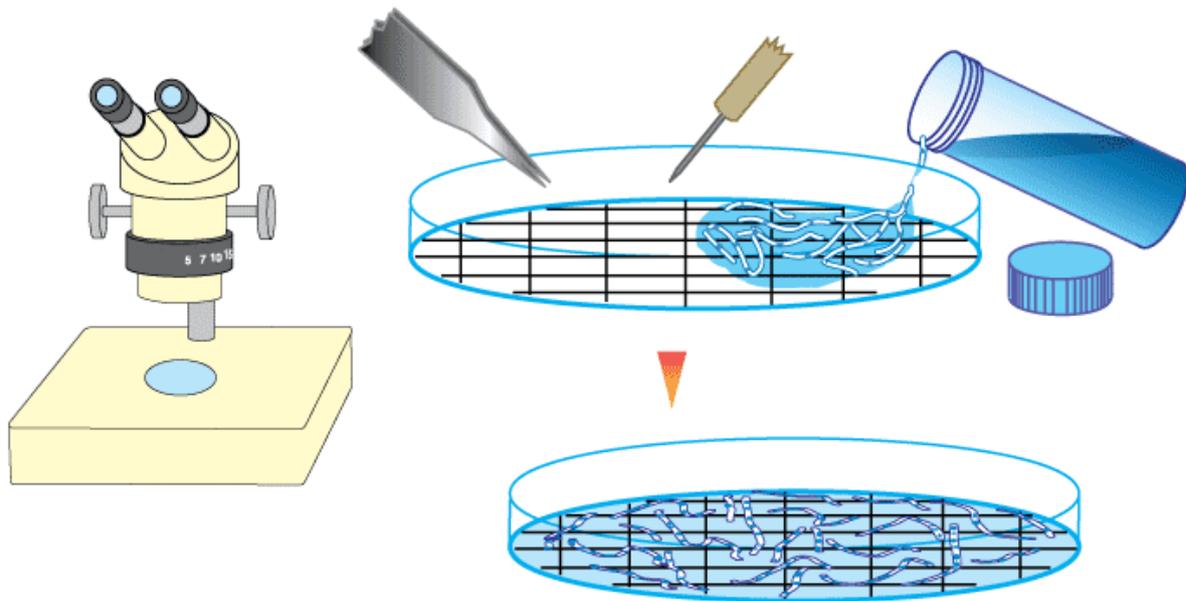
	Milieu mg/l)	solution-mère (x500) (mg/l)
Panthoténate de calcium	1	500
Méso-inositol	100	50000
Acide nicotinique	1	500
Chlorhydrate de pyridoxine (B6)	1	500
Thiamine (B1)	1	500
Biotine (**)	0,001	0,5

(\*\*) La Biotine est soluble dans l'alcool. Dissoudre 50 mg de Biotine dans 100 ml d'alcool. Utiliser cette solution pour établir la solution-mère. On en prépare généralement 100 ml à conserver au congélateur.

**Annexe II. Solution minerale de long Ashton (Hewitt, 1966)**

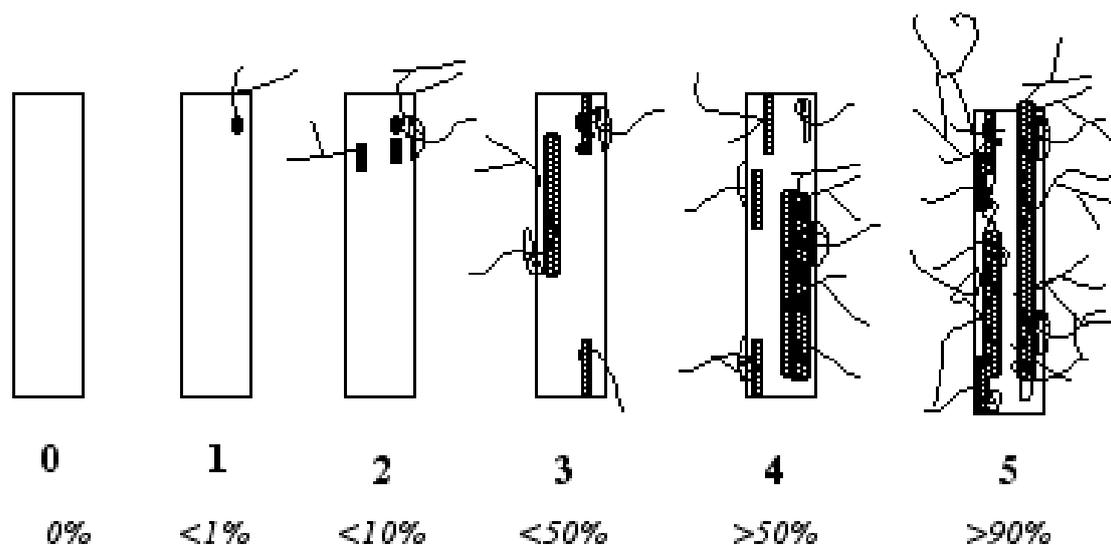
<b>Macroéléments</b>	<b>mg/l</b>
KNO <sub>3</sub>	400
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	350
Ca(NO <sub>3</sub> ).4H <sub>2</sub> O	900
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	500
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	200
<b>Oligoéléments</b>	<b>mg/l</b>
MnSO <sub>4</sub>	2,5
CuSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,25
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,3
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	3,0
NaCl	5,0
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> MO <sub>7</sub> O <sub>24</sub> .4H <sub>2</sub> O	5ml/100l
EDTA-Fe(13%)(11g/l)	4 ml

**Annexe III. Processus de la méthode Gridline Intersection**



**Annexe IV. Méthode de Trouvelot (1965)**

**SCORING MYCORRHIZAL COLONIZATION  
IN CLASSES FROM 0 TO 5**



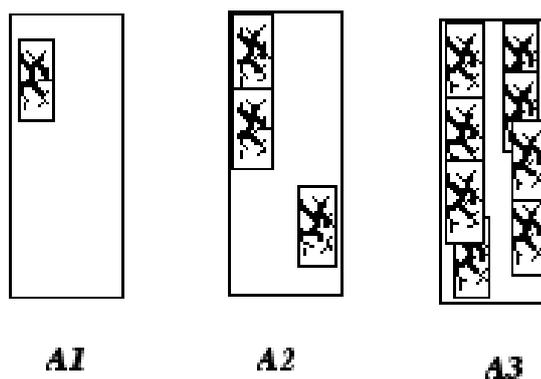
**SCORING ARBUSCULE ABUNDANCE**

*None : A0*

*Few arbuscules : A1*

*Frequent : A2*

*Abundant : A3*



## Annexe V. Page de garde Article publié

Available online at <http://ajol.info/index.php/ijbcs>

Int. J. Biol. Chem. Sci. 7(5): 1902-1909, October 2013

ISSN 1997-342X (Online), ISSN 1991-8631 (Print)

International Journal  
of Biological and  
Chemical Sciences

Original Paper

<http://indexmedicus.afro.who.int>

## Effet de deux types d'insecticides sur la mycorhization arbusculaire et le développement de deux variétés de pomme de terre (*Solanum tuberosum*)

B. SARR\*, F. NDIAYE, M. NDIAYE et T. A. DIOP

Laboratoire de Biotechnologies des Champignons, Département de Biologie Végétale Faculté des Sciences & Techniques, Université Cheikh Anta Diop, BP 5005, Dakar Fann, Sénégal.

\*Auteur correspondant, E-mail : [lbc@ucad.sn](mailto:lbc@ucad.sn); [sarrbath2002@yahoo.fr](mailto:sarrbath2002@yahoo.fr) ;

Tel. +221338646658; +221776163348

### RESUME

Cette étude a été menée en serre pour évaluer l'effet de deux types d'insecticides sur la mycorhization et le développement de deux variétés de pomme de terre (Aïda et Atlas). Les insecticides carbofuran et chlorpyrifos-éthyl, respectivement systémiques et contacts, ont été appliqués au sol à différentes stades d'inoculation du champignon *Glomus mosseae*. Le pourcentage de mycorhization, la biomasse aérienne, le nombre et le calibre des minitubercules ont été évalués après 60 jours de culture. L'application du carbofuran ou du chlorpyrifos-éthyl 21 jours avant ou après l'inoculation du champignon induit une diminution significative du pourcentage de colonisation mycorhizienne chez toutes les deux variétés. Cependant, cette baisse est plus importante avec les traitements de l'insecticide de contact après inoculation et de l'insecticide systémique effectué avant inoculation. Cette tendance s'est répercutée sur la biomasse aérienne et le nombre des minitubercules. Le calibre des minitubercules présente une variabilité de réponse selon la variété de pomme de terre et le type d'insecticide. Ce travail a permis de déterminer le moment compatible de l'inoculation de *Glomus mosseae* avec l'application des insecticides au sol chez les variétés Aïda et Atlas de la pomme de terre. © 2013 International Formulae Group. All rights reserved.

**Mots clés:** *Glomus mosseae*, carbofuran, chlorpyrifos-éthyl, Aïda, Atlas.

### INTRODUCTION

La pomme de terre est l'une des plus importantes cultures à travers le monde (Kashyap et Panda, 2003). Elle est parmi les principaux produits végétaux pouvant permettre de lutter contre la pauvreté dans le monde. Dans les pays en développement, sa production a plus que doublé au cours des 15 dernières années (Lutaladio et Prakash, 2010).

Au Sénégal chaque année quelques 60 000 tonnes de pomme de terre de consommation sont importées pour une valeur

de 9 916 541,87 USD (DH, 2012). Cette dépendance vis-à-vis de l'extérieur est accentuée par une accessibilité tardive des semences par les producteurs locaux; ceci réduisant en même temps la période de production locale. Ces semences sont souvent de qualité moyenne (viroses), de choix variétal limité et sont vendues chères (35% du prix de revient). A cela s'ajoute, malgré l'usage abusif des pesticides, l'envahissement d'un cortège de pathogènes pendant le semis des tubercules : nématodes, bactéries,

© 2013 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v7i5.10>

**Annexe VI. Page de garde Communication orale**

N°...

Orale



UNIVERSITE CHEKH ANTA DIOP



ECOLE DOCTORALE 'SCIENCES DE LA VIE,  
DE LA SANTE ET DE L'ENVIRONNEMENT (ED-  
SEV)

**Impact des pesticides sur la microflore et le développement de trois  
solanacées cultivées au Sénégal (Pomme de terre, Tomate, Aubergine  
africaine).**

**UER 301**

*Biotechnologies  
végétales et  
Amélioration des  
Plantes*

**Bathie SARR**

**Directeur de thèse : Professeur Tahir A. DIOP  
UCAD / FST / Département de Biologie Végétale /  
Laboratoire de Biotechnologies des champignons  
(LBC)**

**Tél : 338646658 ; [tdiop@yahoo.fr](mailto:tdiop@yahoo.fr)**

**UMR/UR/ESP**

*Production et  
Protection des  
végétaux*

Les légumes solanacés représentent une part importante dans production maraîchère au Sénégal. Ils font l'objet d'attaques par plusieurs ennemis de culture. En dépit de l'existence de variétés tolérantes, les pertes de rendement sont toujours élevées. Ainsi, les producteurs continuent à utiliser de façon abusive les pesticides. Compte tenu du rôle que jouent les microorganismes symbiotiques dans l'amélioration de la croissance et du développement des plantes, nous avons conduit des expérimentations pour caractériser l'impact des pesticides chez les solanacées associées à des champignons mycorhiziens arbusculaires.

En serre, le matériel végétal est constitué de vitroplants de deux variétés (*Atlas* et *Aïda*) obtenus par micropropagation. Au champ, la production a été obtenue à partir de semences importées (Classe A GERMICOPA France). Deux produits phytosanitaires (Furadan et Macop), ont été testés. Le furadan ou le Macop a été appliqué avant et après l'inoculation avec le champignon mycorhizien arbusculaire *Glomus mosseae*.

En condition semi contrôlée le traitement phytosanitaire (Furadan ou Mocap) a amélioré le développement végétatif des plants et la production de minitubercules pour les deux variétés testées. Cependant, une application préalable du produit phytosanitaire a induit une diminution de l'infection mycorhizienne de plus de 40 % chez les plants des deux variétés.

Au champ, des pertes de plus de 80 % sur le rendement sont enregistrées malgré un pourcentage de colonisation racinaire de 58 % chez *Atlas* et de 33 % chez *Aïda*

Le traitement phytosanitaire est compatible à un bon établissement de la symbiose mycorhizienne chez les plants de pomme de terre obtenus par vitrométhodes. Il a également amélioré le développement végétatif des plants.

**Retombées scientifiques**

- Maîtrise des techniques de culture in vitro pour la production de vitroplants de pomme de terre.
- L'utilisation de biofertilisants (inoculum de champignon mycorhizen arbusculaire) pour une production à grande l'échelle
- L'identification des virus PVX, PVY et PLRV sur les semences de pomme de terre de classe A importées.

**Impacts socio-économiques**

- Amélioration de la production locale de semences de pomme de terre (vitroplants)

**Mots-clefs** : pomme de terre, pesticides, vitroplant, champignon mycorhizien arbusculaire

**Annexe VII** : Table de Cochran

## MOST-PROBABLE-NUMBER METHOD FOR MICROBIAL COUNT

Table 100-1. Table of most probable numbers for use with 10-fold dilutions and 5 tubes per dilution (Cochran, 1950).

P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	Most probable number for indicated values of P <sub>3</sub>					
		0	1	2	3	4	5
0	0	-	0.019	0.036	0.054	0.072	0.090
0	1	0.019	0.036	0.055	0.073	0.091	0.11
0	2	0.037	0.055	0.074	0.092	0.11	0.10
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	0.091	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

## Summary

The potato (*Solanum tuberosum*) is the main not cereal foodstuff. It is considered as the first production which can allow the fight against the hunger and the poverty in the world. In Senegal, she constitutes the fourth truck-farming production. However, needs in consumption are strongly dependent on the import. Four specific objectives are defined: at first, determine the best symbiotic couples of various varieties of potatoes and fungi AM in greenhouse; then appreciate the efficiency of these successful couples in the usual conditions of production of potato; then estimate the impact of insecticides on the mycorrhization and the development of the potato; finally estimate the influence of the foliar litter On the mycorrhization and the development of the potato. The vitroplants of three varieties (Aïda, Atlas and Adessa) of potato is used in the usual practices of his its production. The obtained data are analyzed with the software XLSTAT. The answer of both varieties of potatoes shows a variability of behavior to the inoculated origins. Dependences mycorhiziennes the most significant are observed at the couples Atlas-*Glomus mosseae* and Aïda-*Glomus mosseae*. The behavior of these successful couples in the singing with the cultural practices gives results unsatisfactory. A stopof growth in 50 days of sowing accompanied with losses of yields and the appearance of diseases is observed in spite of the inoculation of the varieties by the *Glomus mosseae*. The evaluation in greenhouse of the chemical inputs shows that the systematic insecticide (carbofuran) is compatible with the mycorrhization and the development of the potato when it is used after the infection of the mushroom while the insecticide of contact (chlorpyrifos-éthyl) is successful when it is applied before the symbiosis. The use of organic fertilizers with litter (*Hadwickia binata* or *Azadirachta indica*) is also compatible with a good expression of the mycorrhization of the roots of vitroplants by potato. This beneficial effect is a function of the dose and the nature of the brought litter.

In the dose of 25 g the litter of *Hadwickia binata* favors the production of the number of minitubers to both varieties Aïda and Atlas mycorhizées. In the dose of 50 g stimulates the production in air biomass. The litter of *Azadirachta* indicated in 50 g entraine the most significant production of calibre of minitubers at Aïda mycorhizée and in 25 g, only the number of minitubers of the variety Atlas is improved by the contribution of litter.

All these results allows to reveal on one hand, the convenient period for the inoculation of mycorhiziens mushrooms of the roots of apple with the application of insecticides on the ground and on the other hand, to know the nature and the dose of litter which favor the best yield on potato.

**Key words:** *Solanum tuberosum*, arbuscular mycorrhizal fungi, litter, insecticides, micropropagation

### Résumé

La pomme de terre (*Solanum tuberosum*) est la principale denrée alimentaire non céréalière. Elle est considérée comme la première production pouvant permettre la lutte contre la faim et la pauvreté dans le monde. Au Sénégal, elle constitue la quatrième production maraichère. Cependant, les besoins en consommation sont fortement dépendants de l'importation. A cela s'ajoute, malgré l'usage abusif des pesticides, l'envahissement d'un cortège de pathogènes pendant le semis des tubercules. Face à ces défis d'améliorer la production tout en préservant l'environnement, l'objectif général de notre étude était d'évaluer l'utilisation de certaines pratiques culturales sur la culture et la mycorhization de la pomme terre. Les vitroplants de trois variétés (Aïda, Atlas et Adessa) de pomme de terre sont utilisés dans les pratiques usuelles de sa production. Les données obtenues sont analysées avec le logiciel XLSTAT. La réponse à la mycorhization des trois variétés de pomme de terre montre une variabilité de comportement envers les souches inoculées. Les dépendances mycorhiziennes les plus significatives sont observées chez les couples Atlas-*Glomus mosseae* et Aïda-*Glomus mosseae*. Au champ, le comportement de ces couples performants est testé, dans les pratiques culturales usuelles. Après 50 jours de culture, un arrêt de croissance et l'apparition de maladies bactériennes sont observées, malgré l'inoculation des variétés par le *Glomus mosseae*. L'évaluation en serre des intrants chimiques montre que l'insecticide systémique (carbofuran) n'inhibe pas l'installation et le développement du champignon lorsqu'il est utilisé après 3 semaines d'inoculation. Par contre, l'insecticide de contact (chlorpyrifos-éthyl) est performant quant il est appliqué avant la symbiose. L'utilisation de fertilisants organiques à base de litière (*Hadwickia binata* ou *Azadirachta indica*) est aussi compatible à une bonne expression de la mycorhization des racines de vitroplants de pomme de terre. Cet effet bénéfique est fonction de la dose et de la nature de la litière apportée. A la dose de 25 g la litière de *Hadwickia binata* favorise la production du nombre de minitubercules chez les deux variétés Aïda et Atlas mycorhizées. A la dose de 50 g elle stimule plus la production en biomasse aérienne. La litière d'*Azadirachta indica* à 50 g entraîne la production de calibre de minitubercules la plus significative chez Aïda mycorhizée et à 25 g, seul le nombre de minitubercules de la variété Atlas est amélioré de manière significative. L'ensemble de ces résultats permet de déceler d'une part, la période propice pour l'inoculation des champignons mycorhiziens des racines de pomme avec l'application des insecticides au sol et d'autre part, de savoir la nature et la dose de litières qui favorisent le meilleur rendement de pomme de terre.

**Mots clés :** *Solanum tuberosum*, champignon mycorhiziens arbusculaires, insecticide systémique, insecticide de contact, litières

---

**Discipline :** Biologie, physiologie et pathologies végétales

---