



DEMOCRATIC AND POPULAR ALGERIAN REPUBLIC  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH  
جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف  
CHADLI BENDJEDID EL TARF UNIVERSITY  
كلية علوم الطبيعة والحياة  
FACULTY OF NATURE AND LIFE SCIENCES  
قسم



Mémoire de Fin d'Études  
Présenté en vue de l'obtention d'un Diplôme de Master en  
« Biodiversité et environnement »

## Thème

Dépendance mycorhizienne de *Vigna angularis* (L.)  
dans la région d'El Kala (Nord est algérien)

Présenté Par : **RAHEM Hadil**

Soutenue publiquement le : 15/06/2026

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BOUZATA Chouhaira	MCA	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Président
TOUIL Wided	MCA	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Directeur de mémoire
OUIBRAHIM Amira	MCB	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Examinateur

Année universitaire : 2025/2026

# *Remerciment*

En tout premier lieu, je remercie le Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés afin de réaliser ce travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur : « ***Dr. Touil Wided*** »

Pour ses précieux conseils, et surtout dirigé cette étude avec un esprit  
Scientifique et objectif.

Nous vifs remerciements vont également aux membres du jury : « ***Dr. Bouzata  
Chouhaira*** » Et « ***Dr. Ouibrahim Amira*** »

Pour l'intérêt qu'elles ont porté à notre  
Recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leur  
Propositions.

Enfin, nous tenons à exprimer des reconnaissances à toutes les personnes qui  
Ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à qui Dieu a dit :

( و اخفض لهما جناح الذل من الرحمة و قل رب ارحمهما كما ربياني صغيرا )

الاسراء/24

A celle qui m'a donné la vie, le symbole de la tendresse qui s'est sacrifié pour mon bonheur  
Ma mère « **Timel** », qui à œuvré ma réussite, de par son amour, son soutien, et tous les  
Sacrifices consentis et sa présence dans ma vie.

A mon exemple dans ma vie, mon très chère père « **Ali** », qui m'a très bien élevé et ma  
poussé à devenir ce qui je suis, que dieu le assure le paradis, j'espère que tu trouveras dans ce  
travail toute ma reconnaissance, Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien  
permanent venu de toi.

A ma sœur « **Houwayda** » et Mes frères : « **Louai** » « **Ayham** » et « **Med. Islam** », à qui  
je dois tout l'amour, avec mes tous mes vœux de les voir réussir dans leurs vies.

A tout ma famille paternelle et maternelle

**Hadil**

## Résumé

Les champignons mycorhiziens arbusculaires représentent l'une des associations symbiotiques les plus répandues dans les écosystèmes terrestres. Ces microorganismes établissent une relation mutualiste avec les racines des plantes supérieures, contribuant à l'amélioration de leur nutrition minérale, de leur croissance et de leur résistance aux contraintes environnementales.

Le but de ce travail est d'étudier les associations mycorhiziennes chez *Vigna angularis* dans la station d'El Kala, en conditions naturelles, ainsi que d'évaluer la diversité des spores de champignons mycorhiziens arbusculaires présentes dans le sol.

Dans une première phase, nous avons analysé les caractéristiques physico-chimiques du sol de la station d'étude. Les résultats ont montré que le sol présente une texture limono-argileuse avec un pH légèrement basique favorable au développement des champignons mycorhiziens.

Dans une deuxième phase, nous avons étudié la colonisation mycorhizienne au niveau des racines naturelles de *Vigna angularis*. Les observations microscopiques ont révélé la présence de différentes structures fongiques telles que les hyphes, les appressoria, les vésicules et les spores intra et extracellulaires.

Dans une troisième phase, nous avons recherché les symbiotes mycorhiziens sous forme de spores dans le sol à l'aide de la méthode de tamisage humide. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence une diversité sporale notable dominée principalement par le genre *Glomus*, avec l'identification de plusieurs morphotypes dont *Glomus mosseae* et *Glomus aggregatum*.

Cette étude montre l'importance écologique des champignons mycorhiziens arbusculaires dans les sols de la région d'El Kala et leur rôle essentiel dans l'amélioration de la croissance et de l'adaptation des plantes aux conditions du milieu.

**Mots clés :** Champignons mycorhiziens arbusculaires, *Vigna angularis*, symbiose, spores, *Glomus*, El Kala.

## **Abstract**

Arbuscularmycorrhizal fungi represent one of the most widespread symbiotic associations in terrestrial ecosystems. These microorganisms establish a mutualistic relationship with the roots of higher plants, contributing to improved mineral nutrition, plant growth, and resistance to environmental stresses.

The aim of this study was to investigate mycorrhizal associations in *Vigna angularis* under natural conditions in the El Kala region, as well as to evaluate the diversity of arbuscular mycorrhizal fungal spores present in the soil.

In the first phase of this work, the physico-chemical characteristics of the study soil were analyzed. The results showed that the soil has a silty-clayey texture and a slightly alkaline pH favorable to the development of mycorrhizal fungi.

In the second phase, mycorrhizal colonization was studied in natural and inoculated roots of *Vignaangularis*. Microscopic observations revealed the presence of several fungal structures such as hyphae, appressoria, vesicles, and intra- and extracellular spores.

In the third phase, mycorrhizal symbionts were investigated in their spore form in the soil using the wet sieving method. The obtained results highlighted a notable spore diversity mainly dominated by the genus *Glomus*, with the identification of several morphotypes including *Glomus mosseae* and *Glomus aggregatum*.

This study demonstrates the ecological importance of arbuscular mycorrhizal fungi in the soils of the El Kala region and their essential role in improving plant growth and adaptation to environmental conditions.

**Keywords:** Arbuscular mycorrhizalfungi, *Vigna angularis*, symbiosis, spores, *Glomus*, El Kala.

## المخلص

تُعَدُّ الفطريات الجذرية الشجيرية من أكثر العلاقات التكافلية انتشارًا في الأنظمة البيئية الأرضية، حيث تُقيم علاقة منفعة متبادلة مع جذور النباتات العليا، مما يساهم في تحسين التغذية المعدنية للنبات وزيادة نموه ورفع قدرته على مقاومة الظروف البيئية القاسية.

يهدف هذا العمل إلى دراسة العلاقات التكافلية الجذرية لدى نبات *Vigna angularis* في محطة القالة، وذلك في الظروف الطبيعية، بالإضافة إلى تقييم التنوع البوغي للفطريات الجذرية الشجيرية الموجودة في التربة.

في المرحلة الأولى من الدراسة، تم تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية لتربة منطقة الدراسة، حيث أظهرت النتائج أن التربة ذات قوام طمي-طيني ودرجة حموضة قاعدية خفيفة، وهي ظروف ملائمة لتطور الفطريات الجذرية.

أما في المرحلة الثانية، فقد تمت دراسة الاستعمار الجذري للفطريات على الجذور الطبيعية لنبات *Vigna angularis*. وقد أظهرت الملاحظات المجهرية وجود عدة تراكيب فطرية مثل الخيوط الفطرية، والممصات، والحوصلات، والأبواغ الداخلية والخارجية. كما لوحظ أن نسبة الاستعمار الفطري كانت أكبر عند النباتات المُلقحة وخلال فصل الربيع.

وفي المرحلة الثالثة، تم البحث عن الفطريات التكافلية في شكل أبواغ داخل التربة باستعمال تقنية الغزلة الرطبة، حيث أظهرت النتائج وجود تنوع بوغي معتبر يهيمن عليه بشكل أساسي جنس *Glomus*، مع التعرف على عدة أنماط شكلية من

بينها *Glomus mosseae* و *Glomus aggregatum*.

تُبرز هذه الدراسة الأهمية البيئية للفطريات الجذرية الشجيرية في تربة منطقة القالة، ودورها الأساسي في تحسين نمو النباتات وقدرتها على التكيف مع الظروف البيئية المختلفة.

الكلمات المفتاحية: الفطريات الجذرية الشجيرية، *Vigna angularis*، التكافل، الأبواغ، *Glomus*، القالة.

## *Liste des figures*

N°	Titre	Page
<b>01</b>	Principales formes de mycorhizes associées aux racines des plantes supérieures	<b>04</b>
<b>02</b>	Ectomycorhize. <b>A</b> : coupe transversale. <b>B</b> : morphotype d'ectomycorhize	<b>05</b>
<b>03</b>	Schéma montrant les différences entre les ecto- et les endomycorhizes arbusculaires	<b>06</b>
<b>04</b>	Structure des mycorhizes arbusculaires	<b>08</b>
<b>05</b>	La Classification des champignons mycorhiziens arbusculaires	<b>09</b>
<b>06</b>	Classification des CMA	<b>10</b>
<b>07</b>	Schéma de la structure du mycorhize arbusculaire dans une coupe racinaire	<b>11</b>
<b>08</b>	Différentes structures de la colonisation mycorhizienne arbusculaire	<b>14</b>
<b>09</b>	Les différentes phases d'établissement de la symbiose mycorhizienne arbusculaire, adapté d'après	<b>16</b>
<b>10</b>	Morphologie générale de <i>Vigna angularis</i>	<b>23</b>
<b>11</b>	Racines des <i>Vigna angularis</i>	<b>24</b>
<b>12</b>	La tige de <i>Vigna angularis</i>	<b>24</b>
<b>13</b>	Feuilles de <i>Vigna angularis</i>	<b>25</b>
<b>14</b>	Fleur du <i>Vigna angularis</i>	<b>25</b>
<b>15</b>	Grosses de <i>Vignaangularis</i>	<b>26</b>
<b>16</b>	Graine des <i>Vigna angularis</i>	<b>26</b>
<b>17</b>	Localisation de la station d'étude	<b>30</b>
<b>18</b>	Données climatiques de la région d'étude pour l'année 2023	<b>31</b>
<b>19</b>	Données climatiques de la région d'étude pour l'année 2024	<b>32</b>
<b>20</b>	Détermination du pH eau du sol d'étude	<b>35</b>
<b>21</b>	Détermination de la texture du sol	<b>37</b>
<b>22</b>	Mise en évidence de la colonisation des racines du chêne liège par	<b>40</b>

	les CMA	
<b>23</b>	Méthode d'extraction des spores fongiques	<b>44</b>
<b>24</b>	Différentes formes de colonisation naturelle MA chez le <i>Vigna angularis</i>	<b>47</b>
<b>25</b>	Différentes formes de colonisation MA chez les plants inoculés du <i>Vigna angularis</i>	<b>49</b>
<b>26</b>	Présentation du morphotype 1	<b>50</b>
<b>27</b>	Présentation du morphotype 2	<b>51</b>
<b>28</b>	Présentation du morphotype 3	<b>52</b>
<b>29</b>	Présentation du morphotype 4	<b>53</b>

*Liste des tableaux*

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>01</b>	Classification botanique du <i>Vigna angularis</i>	<b>22</b>
<b>02</b>	Composition chimique moyenne et valeur nutritionnelle des graines de <i>Vigna angularis</i>	<b>27</b>
<b>03</b>	Echelle de la texture.	<b>36</b>
<b>04</b>	Correspondance entre la lecture à l'objectif (nombre de graduations) et la dimension réelle de l'objet mesuré.	<b>43</b>
<b>05</b>	Caractéristiques physico-chimiques des sols de la station d'étude.	<b>45</b>

## TABLE DE MATIERES

*Remerciement*

*Dédicace*

*Résumé*

*Liste des figures*

*Liste des tableaux*

**INTRODUCTION ..... 01**

### **CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire**

1. Généralités sur la symbiose mycorhizienne .....	03
1.1. Historique de la découverte des mycorhizes .....	03
1.2. Définition des mycorhizes .....	03
1.3. Les différents types de mycorhizes .....	04
1.3.1. Ectomycorhizes .....	04
1.3.2. Endomycorhizes .....	05
1.3.3. Ectendomycorhizes.....	06
2. Les mycorhizes arbusculaires (MA / CMA).....	07
2.1. Définition des mycorhizes arbusculaires.....	07
2.1.1. Classification et taxonomie des CMA : approches morphologique et moléculaire .....	08
2.2. Partenaires de la symbiose mycorhizienne arbusculaire .....	10
2.2.1. Plantes hôtes (cas des légumineuses) .....	10
2.2.2. Champignons mycorhiziens arbusculaires.....	10
2.3. Structure et développement de la symbiose MA .....	11
2.3.1. Structure des mycorhizes arbusculaires.....	11
2.3.1.1. Hyphes.....	12
2.3.1.2. Arbuscules .....	12
2.3.1.3. Vésicules.....	12
2.4. Développement de la symbiose (MA).....	12
2.4.1. Phase asymbiotique .....	15
2.4.2. Phase pré-symbiotique.....	15
2.4.2.1. Signaux émis par les végétaux.....	15
2.4.2.2. Signaux émis par le CMA.....	15

2.4.3. Phase symbiotique.....	16
3. Facteurs influençant la symbiose mycorhizienne arbusculaire.....	17
3.1.Facteurs édaphiques .....	17
3.1.1. Effet du phosphore sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire .....	17
3.1.2. Effets du pH et de la salinité.....	17
3.2.Facteurs climatiques.....	18
4. Importance des MA.....	18
5. Dépendance mycorhizienne.....	19
5.1.Effet mycorhizosphère.....	21

## **CHAPITRE II : *Vigna angularis***

1. Position systématique et classification botanique.....	22
2. Origine, domestication et distribution géographique .....	23
3. Caractéristiques botaniques et morphologiques.....	23
3.1.Racines .....	24
3.2.Tige .....	24
3.3.Feuilles .....	25
3.4.Fleurs.....	25
3.5.Fruits et graines.....	26
3.6.Gousses.....	26
3.7.Graines .....	26
4. Exigences écologiques et conditions de culture .....	27
5. Composition chimique et valeur nutritionnelle.....	27
5.1.Composition moyenne .....	27
6. Importance agronomique, économique et utilisations.....	28
7. Diversité génétique et amélioration variétale .....	28

## **CHAPITRE III : Matériels et Méthodes**

1. Présentation de la région d'étude et de la station d'étude .....	29
1.1.Localisation de la région et de la station d'étude.....	29
1.2. Climat.....	29
2. Présentation du matériel végétal.....	32
2.1.Caractères botaniques et écologiques.....	32

2.2. Intérêts écologiques et économiques.....	33
2.3. Méthode de prélèvement et d'observation des racines .....	34
2.3.1. Collecte des racines .....	34
2.3.2. Analyse des paramètres physico-chimiques du sol.....	34
2.3.2.1. pH eau.....	34
2.3.2.2. La texture .....	35
2.3.3. Mise en évidence de la colonisation des racines du <i>Vigna angularis</i> par les CMA.....	37
2.3.4. Evaluation de la biodiversité et de l'abondance des spores de CMA présentes dans le sol .....	41
2.3.4.1. Méthode d'extraction des spores fongiques.....	41
2.3.4.2. Préparation des lames .....	41
2.3.4.3. Description des spores.....	42

## **CHAPITRE IV Résultats et Discussion**

1. Résultats et interprétations.....	45
1.1. Analyse du sol.....	45
1.2. La mycorhization naturelle du <i>Vigna angularis</i> dans la station d'étude.....	45
1.3. La mycorhization artificielle du <i>Vigna angularis</i> dans la station d'étude .....	45
1.4. Diversité sporale .....	49
2. Discussion.....	55

<b>CONCLUSION.....</b>	<b>56</b>
------------------------	-----------

### **Références bibliographiques**

# *Introduction*

# INTRODUCTION

---

## Introduction générale

Les champignons sont des organismes hétérotrophes incapables d'assimiler directement le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) atmosphérique. Ils dépendent de la matière organique comme source de carbone et d'énergie. Ces organismes peuvent établir différentes formes de relations avec les plantes hôtes. Lorsque le champignon exploite la plante sans lui procurer de bénéfice, la relation est qualifiée de parasitisme. En revanche, lorsque l'interaction est avantageuse pour les deux partenaires, elle correspond à une symbiose mutualiste (**Smith et Read, 1997**).

La mycorhize, issue des termes grecs *myco* (champignon) et *rhiza* (racine), désigne une association symbiotique entre les champignons du sol et les racines des plantes. Cette interaction repose sur des échanges nutritionnels réciproques : la plante fournit au champignon des composés carbonés issus de la photosynthèse, tandis que le champignon améliore l'absorption des éléments minéraux par la plante grâce à son réseau d'hyphes extraradiculaires, qui explore un volume de sol bien supérieur à celui des racines seules (**Smith et Read, 1997**). De nombreuses espèces végétales dépendent fortement de cette symbiose pour assurer une croissance et un développement normaux (**Gobat et al., 2003**).

Les mycorhizes résultent ainsi d'une association durable entre les racines des végétaux et certains champignons du sol. Elles constituent un élément fondamental des interactions sol-plantes-microorganismes et jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes. En effet, l'absence de partenaires fongiques peut limiter la croissance et la survie de nombreuses espèces végétales (**Janos, 1980 ; Gobat et al., 2003**).

Les plantes interagissent également avec divers micro-organismes bénéfiques vivant dans la rhizosphère et les tissus racinaires. L'ensemble de ces interactions forme le microbiome végétal, qui influence le phénotype des plantes, leur état sanitaire et le fonctionnement des écosystèmes (**van der Heijden et al., 2015, in Zidelkheir & Gatcha, 2024**). Parmi ces micro-organismes, les mycorhizes arbusculaires représentent l'une des associations symbiotiques les plus répandues. Elles sont généralement mutualistes, les champignons assurant l'apport en éléments minéraux du sol en échange de composés carbonés produits par la plante (**Smith et Read, 2008**).

Le bassin méditerranéen se caractérise par une biodiversité végétale remarquable, avec environ 25 000 espèces de plantes vasculaires, dont près de la moitié sont endémiques et

# INTRODUCTION

---

adaptées aux conditions climatiques marquées par des périodes de sécheresse (**Quézel, 1995 ; Véla et Benhouhou, 2007**). Cette richesse floristique confère à cette région le statut de l'un des principaux hotspots mondiaux de biodiversité végétale (**Mittermeier et al., 2004 ; Myers, 2003**).

Grâce à sa situation géographique et à sa diversité pédoclimatique, l'Algérie abrite une flore riche comptant 4 449 taxons, dont 6,5 % sont endémiques (**Dobignard et Chatelain, 2010–2013**). Toutefois, les écosystèmes agricoles, notamment dans les régions arides et semi-arides, sont soumis à des contraintes environnementales importantes. Dans ce contexte, l'utilisation d'approches biologiques durables, telles que les symbioses mycorhiziennes, apparaît comme une alternative pertinente pour améliorer la croissance et l'adaptation des plantes cultivées face aux stress environnementaux (**Smith et Read, 2008 ; Gianinazzi et al., 2010**).

L'objectif de cette étude est d'évaluer la dépendance mycorhizienne de *Vigna angularis* (L.) dans la région d'El Tarf (Nord-Est algérien), en mettant en évidence le rôle des champignons mycorhiziens arbusculaires dans la croissance et l'adaptation de cette légumineuse aux conditions pédoclimatiques locales.

Ce manuscrit est organisé comme suit :

- ❖ Une introduction générale ;
- ❖ Une bibliographique, englobant deux chapitres : chapitre 1 : généralités sur les mycorhizes et chapitre 2 : généralités sur *Vigna angularis* (L.).
- ❖ Une partie, présentant matériels et méthodes, traitant la zone et le site d'étude, ainsi que la méthodologie de travail.
- ❖ Une autre partie, est consacrée à la présentation des résultats obtenu avec leurs discussions.
- ❖ Une conclusion.

*Chapitre 01 :*  
*Synthèse*  
*bibliographique*

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

---

## Chapitre I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

### 1. Généralités sur la symbiose mycorhizienne

#### 1.1. Historique de la découverte des mycorhizes

Les plantes terrestres ont pu coloniser les milieux continentaux il y a environ 400 millions d'années grâce à leur association symbiotique avec des champignons du sol, appelée mycorhize (**Dechemplain, 2002**).

Les premières descriptions de cette association ont été réalisées au XIX<sup>e</sup> siècle par Hartig, qui a observé au microscope la colonisation des racines par un réseau fongique (**Hartig, 1840**).

En 1885, Frank a formalisé le concept de mycorhize, tandis que les mécanismes physiologiques de cette symbiose et le rôle majeur des mycorhizes arbusculaires chez la majorité des plantes, y compris les espèces cultivées, ont été mis en évidence au milieu du XX<sup>e</sup> siècle par Harley et Mosse (**Frank, 1885**).

#### 1.2. Définition des mycorhizes

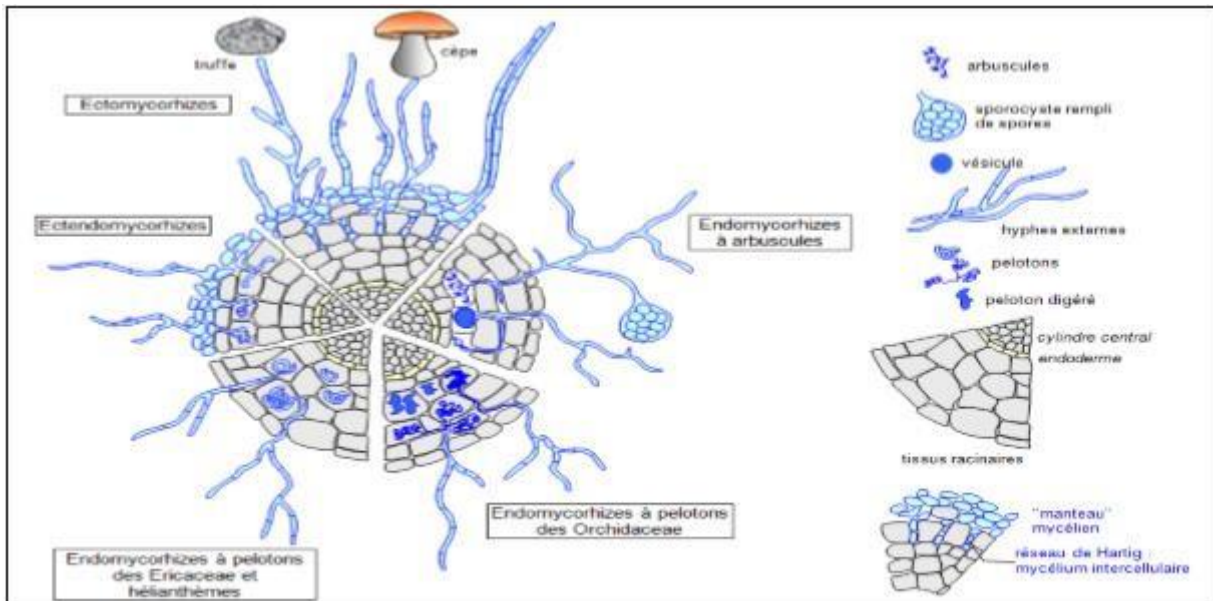
Le terme « mycorhize » provient du grec *mukes* (champignon) et *rhiza* (racine) (**Sahraoui, 2013**). Il désigne une association symbiotique durable entre les racines des plantes phanérogames et certains champignons du sol, présente chez environ 90 % des taxons végétaux (**Mousain et al., 1997**). La diversité végétale mondiale est estimée entre 220 000 et 420 000 espèces de plantes terrestres, dont 86 % présentent des structures mycorhiziennes, principalement chez les angiospermes (**Scotland et al., 2003 ; Brundrett, 2009 ; Tedersoo et al., 2010**).

Les mycorhizes se caractérisent par un réseau de filaments fongiques associé aux racines, permettant une meilleure exploration du sol et une absorption accrue des nutriments difficilement accessibles au système racinaire. Cette association résulte d'échanges réciproques de métabolites entre le champignon et la plante hôte, formant un organe fonctionnel mixte où chaque partenaire optimise sa croissance et son développement (**Châtaigner et Duponnois, 2017**).

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

## 1.3. Les différents types de mycorhizes

Les associations mycorhiziennes elles-mêmes peuvent être classées dans l'un des types différents de mycorhizes, sur la base du type de champignon en cause et la gamme de structures produites par la combinaison racine-champignon, d'après la morphologie, on distingue les trois types de mycorhizes suivants (**Fig. 01**)



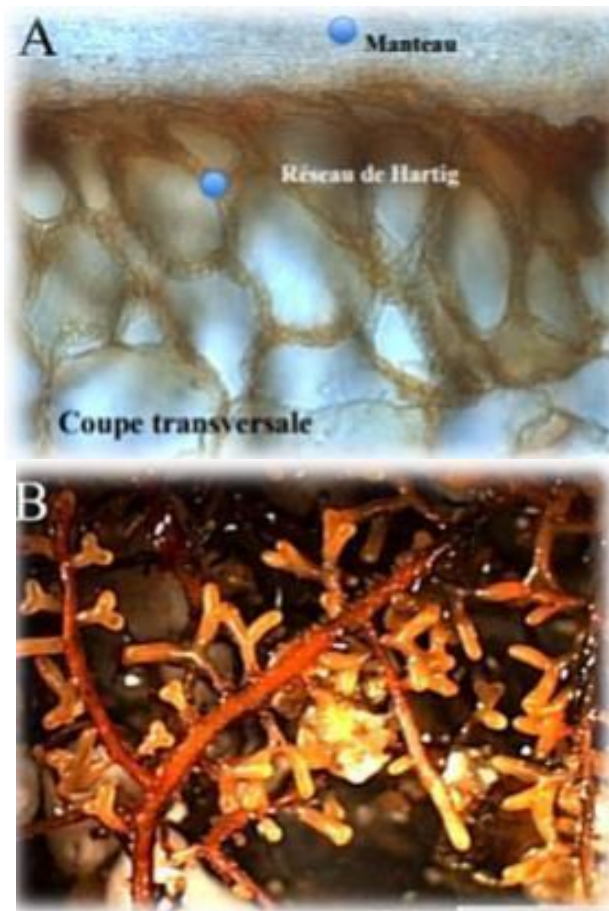
**Figure 01** : Principales formes de mycorhizes associées aux racines des plantes supérieures (Hallé, 2008, figure modifiée de Le Tacon, 1985).

### 1.3.1. Ectomycorhizes

La symbiose ectomycorhizienne concerne environ 3 % des espèces végétales et est assurée principalement par des champignons appartenant aux Ascomycètes et surtout aux Basidiomycètes (Mousain, 1991 ; Fortin et al., 2008). Elle se caractérise par un développement fongique externe à la racine, avec la formation d'un manteau mycélien entourant les radicelles, à partir duquel des hyphes s'insèrent entre les cellules corticales pour former le réseau de Hartig, siège des échanges symbiotiques intercellulaires (Zidelkheir R. et Gatcha N., 2024).

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

---



**Figure 02** : Ectomycorhize. **A** : coupe transversale. **B** : morphotype d'ectomycorhize

(site web 01)

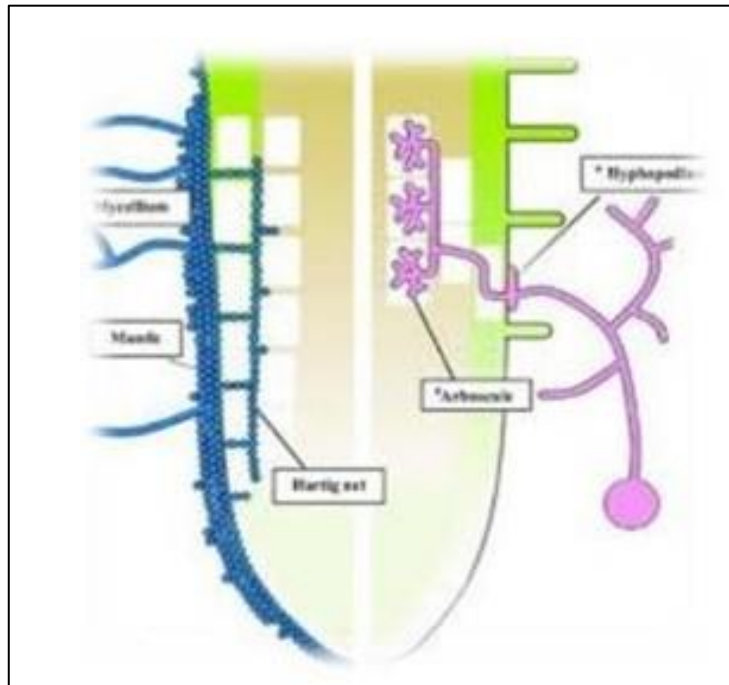
## 1.3.2. Endomycorhizes

C'est la forme la plus répandue des mycorhizes, à l'inverse des ectomycorhizes, ces champignons se développent plutôt à l'intérieur des cellules (**Fig.01**), seul un réseau lâche d'hyphes entoure la racine. Le manteau fongique est absent et les poils absorbants peuvent se développer (**Nultsch, 1998**).

Il existe plusieurs formes d'endomycorhizes qui diffèrent en de nombreux points où leur prolifération conduit à la formation d'arbuscules ou de pelotons, les endomycorhizes arbusculaires sont la forme la plus répandue. Le champignon forme dans

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

l'écorce de la racine des vésicules elliptiques et des hyphes intracellulaires finement ramifiées en arbuscules qui représentent des suçoirs (Dar, 2010).



**Figure 03 :** Schéma montrant les différences entre les ecto- et les endomycorhizes arbusculaires (Bonfante et Genre, 2010).

### 1.3.3. Ectendomycorhizes

Les ectendomycorhizes présentent à la fois un manteau mycélien et des hyphes inter- et intracellulaires, dont le réseau de Hartig pénètre à l'intérieur des cellules racinaires, offrant une large surface d'échanges symbiotiques. Elles sont principalement observées chez certaines familles végétales et sont formées par des Basidiomycètes (Garbaye, 2013)

## 2. Les mycorhizes arbusculaires (MA / CMA)

### 2.1. Définition des mycorhizes arbusculaires

Les mycorhizes à arbuscules (Fig.04) sont parmi les associations endomycorhiziennes les plus communes et répandues entre les champignons du sol et les racines des plantes, elles sont aussi les plus anciennes et ont apparu il y a 400 à 500 millions d'années avec les toutes

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

---

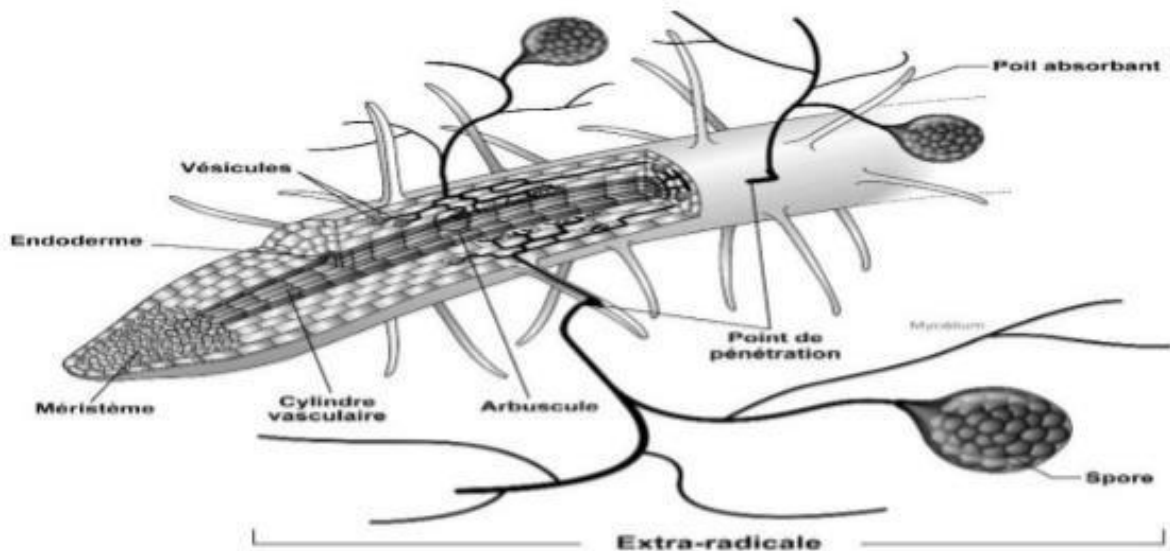
premières plantes qui ont commencé à coloniser la terre ferme (**Garbaye, 2013**). Leur taux de colonisation est d'environ 80 % de toutes les plantes terrestres (**Smith et Read, 2008 ; Spatafora et al., 2016**) ligneuses, herbacées, mousses, fougères, gymnospermes et angiospermes, plusieurs conifères et la majorité des plantes à fleurs.

Elles ne se différencient pas à l'œil nu et ne sont visibles qu'au microscope après un traitement approprié des racines colonisées. Ceci, peut être obtenu après traitement par la méthode de Phillips et Hayman (1970). Leur croissance est essentiellement souterraine, et leur reproduction est asexuée, assurée par les spores (**Driai, 2016**).

Le terme arbuscule, qui désigne ce type de mycorhize, est dû aux structures formées par la ramification des hyphes à l'intérieur des cellules prenant la forme d'un petit arbre d'où le nom d'arbuscule (arbres nains). La colonisation s'effectue à partir des propagules fongiques présentes dans le sol, ces structures sont appelées ainsi car elles servent à la propagation de l'espèce (**Fortin et al., 2008**). Elles sont viables et sont responsables de garder en vie le champignon et ce jusqu'à la colonisation des racines. Les hyphes pénètrent à l'intérieur des racines par voie intercellulaire le plus souvent et rarement par les poils absorbants, puis, leur propagation se fait entre les cellules corticales pour différencier deux types de structures caractéristiques des MA : les arbuscules et les vésicules.

La division dichotomique d'un hyphe produit des arbuscules intracellulaires, c'est le lieu d'échanges nutritifs entre les deux partenaires ; des vésicules, différenciées à l'extérieur des cellules tout comme à l'intérieur servent d'organes de stockage de ces nutriments, elles se présentent sous la forme de renflements des terminaisons hyphales (**Fortin et al., 2008**).

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire



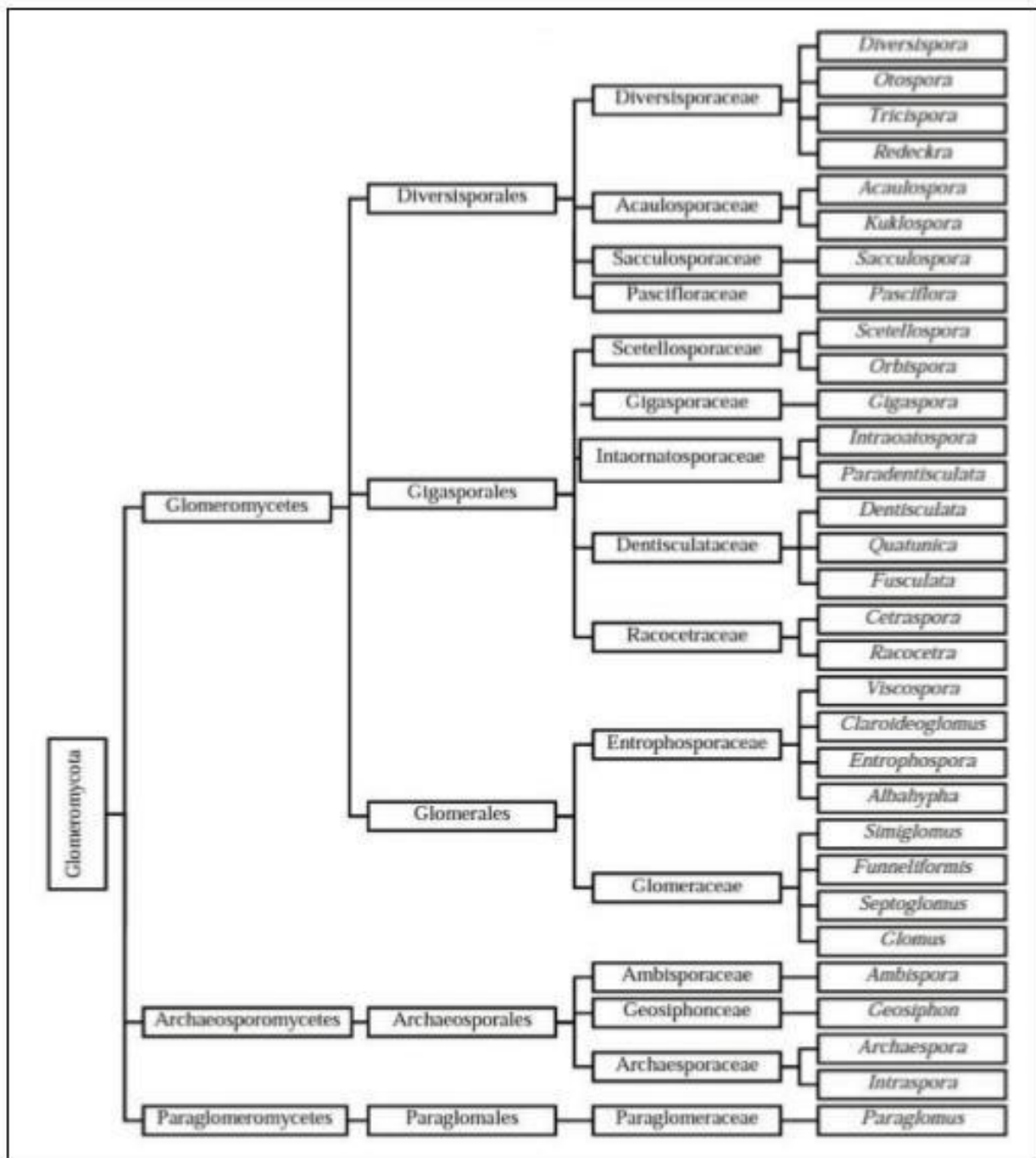
**Figure 04:** Structure des mycorhizes arbusculaires (Fortin et al., 2008).

## 2.1.1. Classification et taxonomie des CMA : approches morphologique et moléculaire

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) présentent une distribution ubiquitaire, avec environ 250 espèces décrites jusqu'en 2013 (Redecker et al., 2013). Leur classification reposait initialement sur le morphotypage des spores, basé sur la morphologie et la structure de la paroi sporale, mais cette approche ne permettait pas de refléter pleinement leur diversité (Morton et Redecker, 2001 ; Rosendahl et al., 1994 ; Morton et Benny, 1990 ; Giovannetti et Gianinazzi-Pearson, 1994).

L'introduction des outils de biologie moléculaire a conduit à une révision majeure de la systématique des CMA, désormais regroupés dans un phylum monophylétique distinct, les Glomeromycota (Schüssler et al., 2001). Selon cette classification (Fig.5), les CMA sont organisés en plusieurs ordres et genres (Goto et al., 2012). Une espèce particulière, *Geosiphon pyriforme*, se distingue par une symbiose atypique avec des photosymbiotes procaryotes (Gaveriaux, 2012).

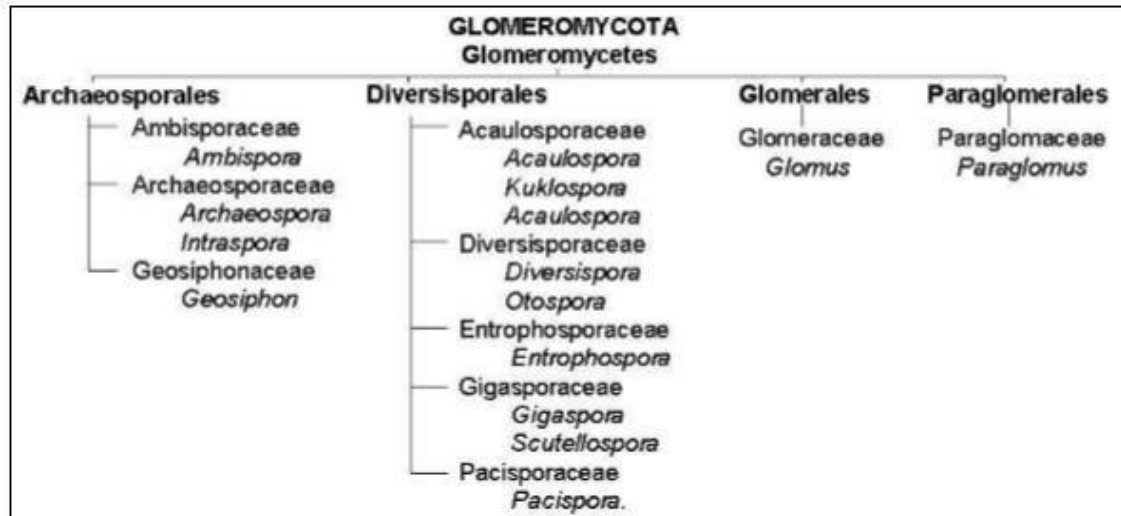
# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire



**Figure 05 :** La Classification des champignons mycorhiziens arbusculaires (GOTO *et al.*, 2012)

Les classifications actuelles, intégrant des approches morphologiques et moléculaires, reconnaissent quatre ordres, environ dix familles, dix-huit genres et près de 200 espèces décrites (Raab et Redecker, 2006) (Fig. 06).

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire



**Figure 06:** Classification des CMA selon Schüßler et *al.* (2001) après corrections de Oehl et Sieverding (2004), Walker et Schüßler (2004), Sieverding et Oehl (2006), Spain et *al.* (2006), Walker et *al.* (2007a, b) et Palenzuela et *al.* (2008).

## 2.2. Partenaires de la symbiose mycorhizienne arbusculaire

### 2.2.1. Plantes hôtes (cas des légumineuses)

Il est largement démontré que la majorité des plantes terrestres établissent des associations mycorhiziennes, les mycorhizes arbusculaires représentant le type le plus répandu dans la plupart des écosystèmes (**Brundrett, 1991**). Bien que certaines estimations avancent que 95 % des plantes sont mycorhizées, des analyses plus précises indiquent qu'environ 80 % des espèces végétales présentent des associations mycorhiziennes, dont près de 60 % avec des MA (**Trappe, 1987 ; Brundrett, 2009**). Les plantes mycorhizées, notamment celles associées aux MA, demeurent importantes même dans des habitats soumis à des conditions environnementales extrêmes (**Harley et Harley, 1987 ; Koske et al., 1992**).

### 2.2.2. Champignons mycorhiziens arbusculaires

Les champignons mycorhiziens arbusculaires regroupent plus de 150 espèces réparties principalement entre les ordres *Glomerales*, *Diversisporales*, *Gigasporales*,

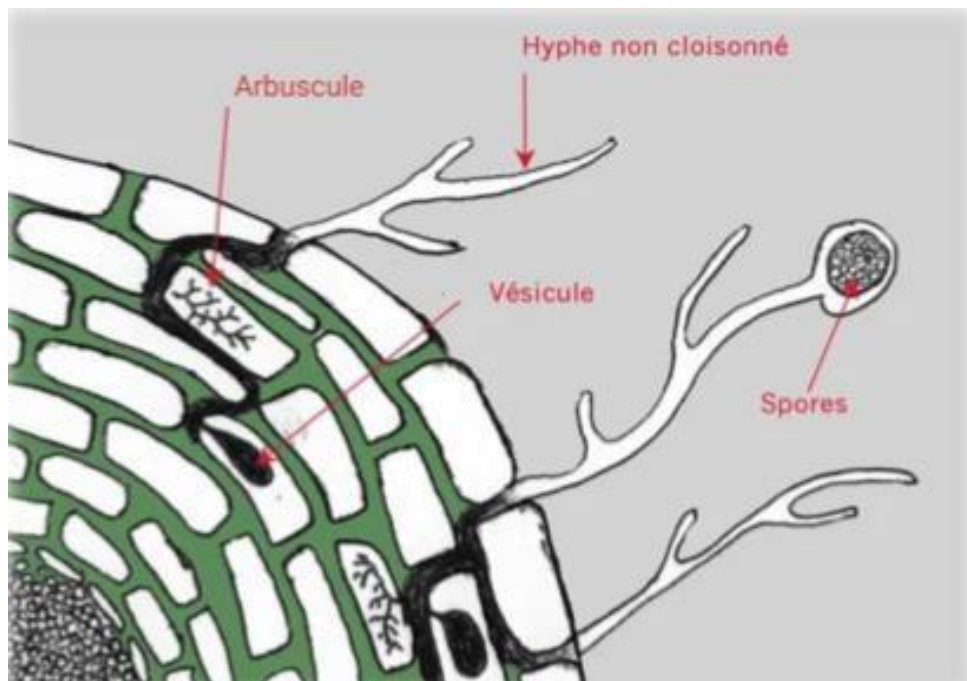
# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

*Archaeosporales* et *Paraglomerales* (Oehl et al., 2011). Ce groupe se caractérise par un nombre relativement limité d'espèces et l'absence de reproduction sexuée, suggérant un potentiel d'évolution génétique restreint (Trappe et Molina, 1986 ; Tommerup, 1988 ; Morton, 1990). Néanmoins, des études basées sur des approches biochimiques et moléculaires ont mis en évidence une variabilité fonctionnelle et taxonomique importante au sein des CMA, en lien avec les conditions édaphiques et environnementales (Hepper et al., 1988 ; Sanders et al., 1996 ; Clapp et al., 1999).

## 2.3. Structure et développement de la symbiose MA

### 2.3.1. Structure des mycorhizes arbusculaires

Le champignon mycorhizien à arbuscule forme plusieurs structures à l'intérieur des racines, principalement des arbuscules, des vésicules, des spores et des hyphes, Le terme propagule est utilisé pour les désigner puisque toutes ces structures servent à propager l'espèce (Fortin et al, 2008).



**Figure 07** : Schéma de la structure du mycorhize arbusculaire dans une coupe racinaire (Janotto, 2021)

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

---

## 2.3.1.1. Hyphes

Les hyphes sont des filaments mycéliens intra ou extra-racinaires permettant aux champignons d'explorer le sol et de coloniser la plante hôte. Le mycélium intracellulaire est en relation avec des hyphes externes à la racine qui diffusent dans le sol. Elles augmentent ainsi considérablement le volume de sol exploré par la racine (**Luttge et al., 2002**).

## 2.3.1.2. Arbuscules

L'arbuscule est l'unité d'échange entre la plante hôte et le champignon. C'est la ramification latérale des hyphes fongiques dans les cellules du cortex racinaire où le champignon pénètre et se développe. La membrane de la cellule hôte invagine et enveloppe le champignon. Le rôle des arbuscules est d'augmenter de 2 à 3 fois la surface de contact entre les cellules et les hyphes. Leur durée de vie moyenne est estimée à 8 jours avant d'entrer en sénescence et d'être complètement éliminées des cellules végétales, retournant à leur état initial (**Javot et al., 2007**).

## 2.3.1.3. Vésicules

Les vésicules sont des structures de stockage qui sont des renflements sphériques formés par des champignons symbiotiques, généralement localisés dans l'espace intercellulaire et parfois aussi dans certaines cellules du cortex racinaire (**Garbaye, 2013**).

## 2.4. Développement de la symbiose (MA)

La mise en place de la symbiose mycorhizienne arbusculaire (MA) correspond à une séquence programmée de changements phénotypiques et d'événements de reconnaissance conduisant à une intégration morphologique et physiologique étroite entre la plante hôte et le champignon symbiotique (**Garg et Chandel, 2010**) (**Fig. 08**). Elle débute par la colonisation d'une racine compatible à partir de propagules fongiques du sol, notamment des spores asexuées ou des racines déjà mycorhizées (**Requena et al., 1996**). Après la formation d'un appressorium à la surface racinaire, le champignon pénètre le cortex et développe des structures spécialisées,

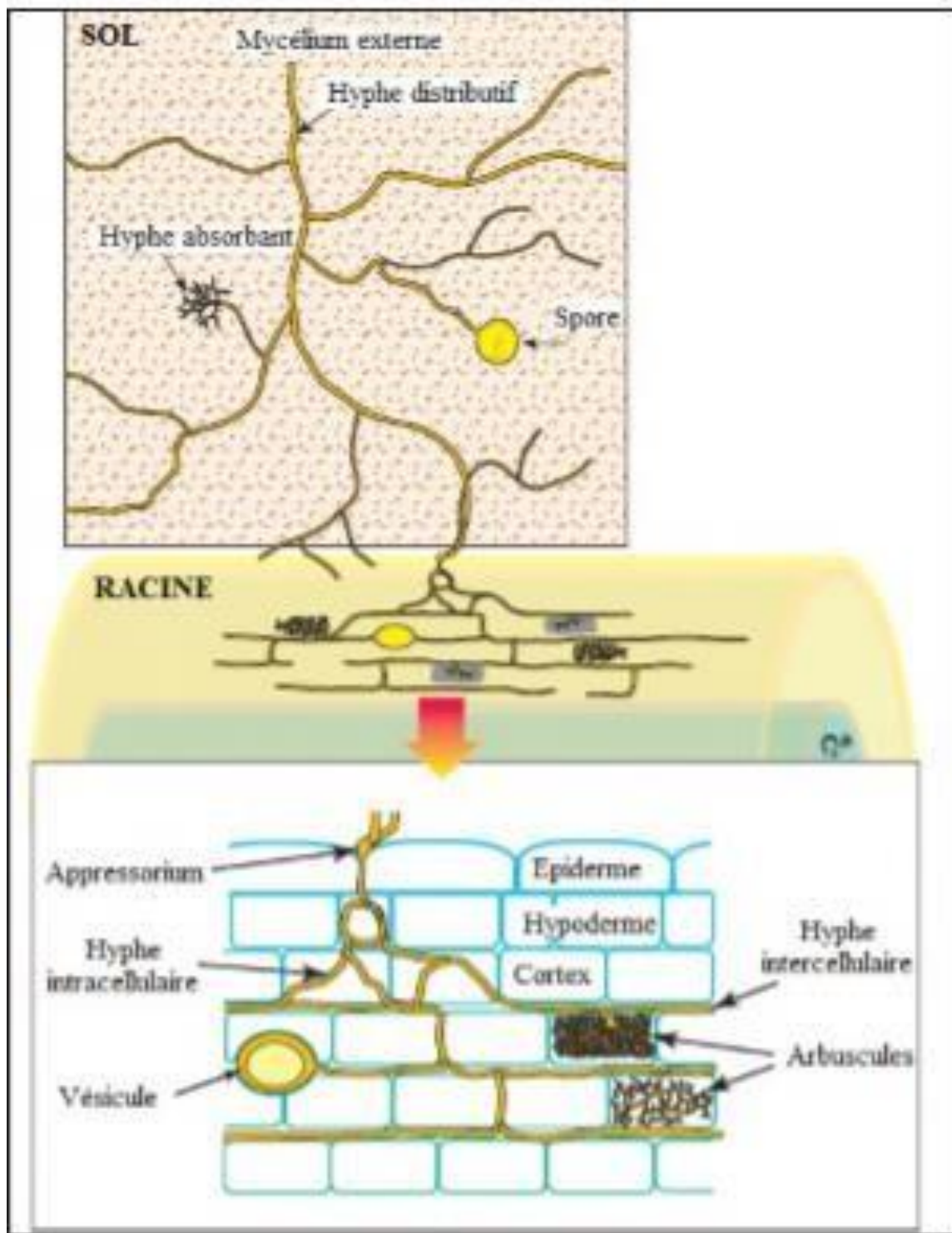
## CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

---

telles que des hyphes inter- et intracellulaires ainsi que des arbuscules (**Garg et Chandel, 2010**).

Les arbuscules constituent le principal site d'échanges nutritifs, assurant le transfert des éléments minéraux vers la plante et l'acquisition du carbone par le champignon (**Requena et al., 2007 ; Pumplin et Harrison, 2009**). Par la suite, le mycélium extraracinaire se développe dans le sol, permettant l'exploration de nouveaux volumes édaphiques et la colonisation d'autres racines, avant l'achèvement du cycle de vie fongique par la formation de chlamydospores asexuées (**Garg et Chandel, 2010 ; Requena et Breuninger, 2004**). L'ensemble de ces étapes, largement conservées chez différentes associations plante - champignon, repose sur une communication moléculaire étroite entre les partenaires, soulignant le rôle central de la plante hôte dans l'organisation de la symbiose MA (**Eckardt, 2005 ; Bucher, 2007 ; Paszkowski, 2006**).

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire



**Figure 08 :** Différentes structures de la colonisation mycorhizienne arbusculaire (Brundrett et al., 1996)

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

---

## 2.4.1. Phase asymbiotique

Pendant cette phase il y a germination de la spore et ramification de l'hyphes germinative ; dans des conditions favorables, les spores peuvent germer spontanément et produire un hyphes germinatif et quelques ramifications primaires sans stimulus exogène (**Requena et al., 2007**).

## 2.4.2. Phase pré-symbiotique

Il s'agit là du dialogue entre une plante et un champignon mycorhizien. Avant le premier contact physique, les deux partenaires de la symbiose émettent des signaux dans le sol qui leur permet d'être informés de leur présence respective (**Bonfante et Genre, 2010**).

### 2.4.2.1. Signaux émis par les végétaux

Les plantes émettent des exsudats racinaires capables de stimuler la germination des spores, d'induire la ramification des hyphes et de moduler l'activité métabolique des champignons mycorhiziens arbusculaires (**Giovannetti et al., 1998 ; Buée et al., 2000 ; Nagahashi et Douds, 2000**). Parmi ces composés, les strigolactones jouent un rôle majeur en favorisant la croissance fongique et l'établissement de la symbiose, tandis que d'autres molécules, telles que les flavonoïdes et les polyamines, peuvent influencer ces processus de manière variable selon les conditions et les espèces impliquées (**Besserer et al., 2008 ; Steinkellner et al., 2007 ; Scervino et al., 2007 ; Hassan et Mathesius, 2012 ; Cheng et al., 2012**).

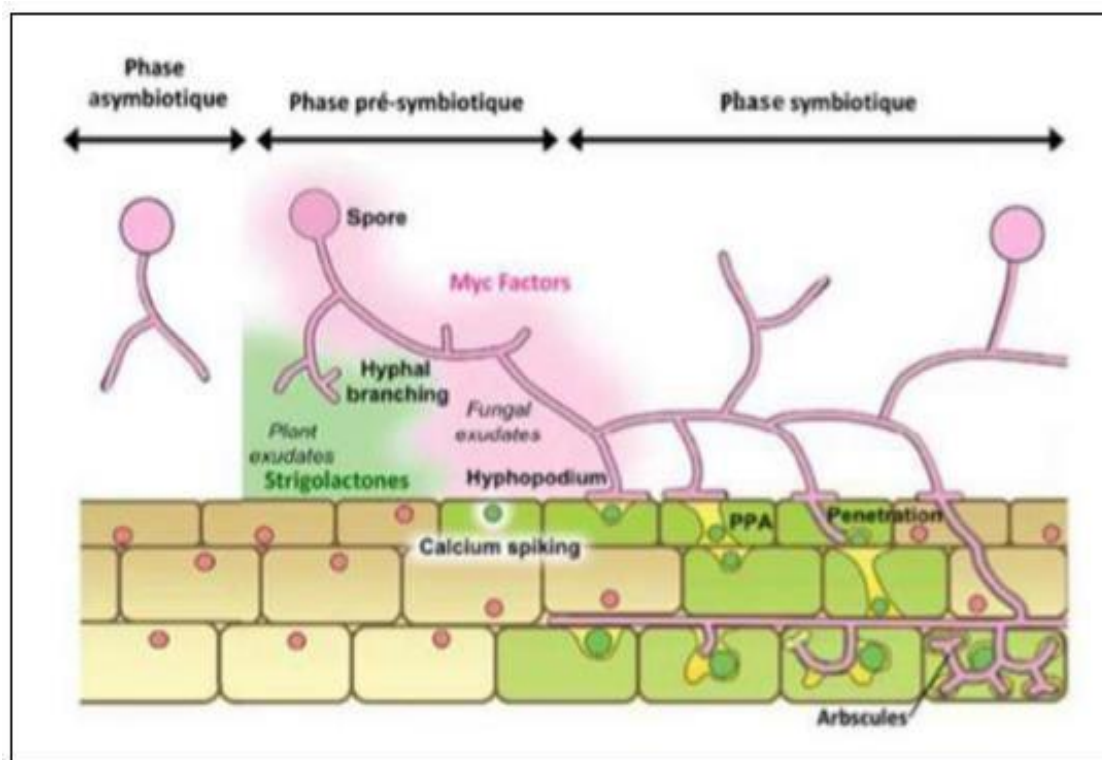
### 2.4.2.2. Signaux émis par le CMA

À l'instar des signaux de type Nod produits par les rhizobiums, les CMA synthétisent des molécules diffuses, appelées « Mycfactors », qui permettent leur reconnaissance par la plante hôte et déclenchent l'activation de gènes impliqués dans l'établissement de la symbiose (**Paszkowski, 2006 ; Bonfante et Requena, 2011**). Parmi ces signaux, les Myc-LCO ont été identifiés comme jouant un rôle clé dans la préparation de la plante à la colonisation mycorhizienne arbusculaire, en favorisant la mycorhization et la formation de racines latérales. L'échange de ces signaux initiaux conduit à une régulation génique coordonnée entre les deux partenaires, indispensable à l'installation de la symbiose (**Maillet et al., 2011**).

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

## 2.4.3. Phase symbiotique

Il s'agit de la colonisation des racines de l'hôte ; le champignon forme une structure renflée au contact de l'épiderme appelée hyphopode. Les cellules végétales réorganisent leur cytosquelette et forment un système membranaire de pré-pénétration (PPA) « prepenetrationapparatus », qui va permettre au champignon d'entrer dans la racine et d'atteindre la zone corticale de la racine pour y développer des structures hyper-ramifiées appelées arbuscules (**Fig. 09**) (**Genre *et al.*, 2005, 2008**). De manière concomitante au développement dans la racine, le champignon va se développer dans le sol, le mycélium extraracinaire s'organise en un réseau très dense d'hyphes, qui peut former jusqu'à plusieurs mètres d'hyphes par cm<sup>3</sup> de sol (**Miller *et al.*, 1995**). Ces structures vont puiser eau et sels minéraux puis les transporter vers la racine. C'est aussi à ce moment-là que le champignon va former de nouvelles spores, structures de reproduction et de dissémination des CMA, complétant ainsi son cycle de vie.



**Figure 09:** Les différentes phases d'établissement de la symbiose mycorhizienne arbusculaire, adapté d'après (**Bonfante et Genre 2010**). PPA : pré pénétration apparatus.

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

---

## 3. Facteurs influençant la symbiose mycorhizienne arbusculaire

Les mycorhizes sont influencés par plusieurs facteurs climatiques et édaphiques et par la nature de végétation.

### 3.1. Facteurs édaphiques

Parmi les facteurs édaphiques influençant la symbiose MA figurent le pH du sol, la texture, l'humidité et la disponibilité en éléments minéraux, le phosphore représentant le facteur le plus déterminant.

#### 3.1.1. Effet du phosphore sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

Le principal effet bénéfique des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) sur la croissance des plantes réside dans l'amélioration de l'absorption du phosphore (P). Les hyphes fongiques permettent d'explorer des volumes de sol au-delà de la zone appauvrie autour des racines et assurent le transfert du phosphore vers les arbuscules, où il devient assimilable par la plante hôte. Toutefois, l'efficacité de cette fourniture varie selon les isolats de CMA, certains étant capables d'absorber le phosphore sans nécessairement le transférer efficacement à la plante.

Des concentrations élevées de phosphore dans le sol peuvent inhiber l'établissement de la symbiose mycorhizienne, en réduisant le développement des arbuscules, la biomasse mycélienne et le nombre de points d'entrée des hyphes dans les racines. Néanmoins, en conditions naturelles, les CMA peuvent maintenir leur fonctionnement sur une large gamme de concentrations en phosphore grâce à des mécanismes de stockage et de régulation, notamment sous forme de polyphosphates. Par ailleurs, les plantes mycorhizées sont capables d'exploiter plus efficacement certaines sources de phosphore organique que les plantes non mycorhizées, bien que ces processus puissent être influencés par l'activité microbienne et les interactions biotiques du sol (Wright, 2005).

#### 3.1.2. Effets du pH et de la salinité

Les caractéristiques de la plante hôte et les facteurs abiotiques influencent significativement la composition des communautés de champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA). Parmi

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

---

ces facteurs, le pH et la salinité du sol figurent parmi les variables les plus déterminantes dans la structuration de ces communautés. Les études ont montré que, si la tolérance au sel et certains traits des espèces hôtes n'affectent pas toujours la diversité des CMA dans les racines, ils modulent néanmoins la composition de leurs communautés, en particulier dans les écosystèmes salinisés. Ainsi, le pH et la salinité jouent un rôle clé dans la distribution des CMA au sein des systèmes végétaux et pédologiques (Guo et Gong, 2014).

## 3.2. Facteurs climatiques

Parmi les facteurs climatiques qui impacte sur la formation et le fonctionnement desmycorhizes entre autre :

- La température est un facteur qui influence la formation des mycorhizes. En effet, chaquechampignon mycorhizien a ces températures optimales qui lui assurer un bon fonctionnementet un bon développement. En général, les champignons poussent mieux aux environ de 20°C. L'infection endomycorhizienne et la production des spores sont stimulées par une élévation de température, jusqu'aux environs de 30°C (Fortin et Fortin ,1973 in Harchaoui, 2003).
- La lumière influence sur la mycorhization par son intensité et sa durée. Il a été prouvé que l'abaissement de l'éclairement provoque la diminution de l'infection mycorhizienne(Son et al, 1988).

## 4. Importance des MA

Dans la nature, les mycorhizes sont la règle, pas l'exception (Garg et Chandel, 2010). Les CMA sont omniprésents et forment des relations symbiotiques avec les racines de la plupart des plantes terrestres (Akhtar et Siddiqui, 2008). Dans cette association le champignon prend le rôle de la racine de la plante et agit comme une extension du système racinaire (Muchovej, 2004). Avec la colonisation mycorhizienne dans les racines, il ya augmentation de l'absorption de surface, une plus grande zone de sol dénudé, une plus grande longévité des racines absorbantes, une meilleure utilisation des nutriments par une faible disponibilité et une meilleure rétention des éléments nutritifs solubles, réduisant ainsi la réaction avec les colloïdes du sol ou les pertes par lessivage (Muchovej, 2004; Selvaraj et Chellappan, 2006).

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

---

Les MA augmentent l'établissement de la nodulation et la capacité de fixation de l'azote atmosphérique chez les légumineuses (**Turk et al., 2008**). Les mycorhizes influencent sur la colonisation des racines par d'autres micro-organismes, et réduisent la sensibilité des racines à des agents pathogènes transmis par le sol comme les nématodes ou les champignons phytopathogènes(**selvaraj et Chellappan, 2006**).

Les MA modifient également les relations sol-plante-eau, favorisant ainsi une meilleure adaptation des plantes à des conditions défavorables, comme la sécheresse, la salinité ou de stress de chaleur. À des concentrations élevées de métaux lourds dans les sols, les champignons mycorhiziens se sont avérés détoxifier l'environnement pour la croissance des plantes (**Muchovej, 2004**). Ainsi, la compréhension de l'écologie et du fonctionnement de la symbiose MA dans l'écosystème naturel ou agricole est essentielle pour l'amélioration de la croissance et la productivité des plantes (**Garg et Chandel, 2010**)

## 5. Dépendance mycorhizienne

La dépendance mycorhizienne est une propriété intrinsèque de chaque espèce végétale et, en fonction de l'espèce fongique, déterminée par l'ampleur des avantages procurés par la symbiose sur les effets du développement et de la croissance de la plante hôte. Selon plusieurs études réalisées, en réponse à l'association avec un champignon, un meilleur établissement des espèces sur des terres dégradées est évident (**Ruiz PO, Davey CB, 2003 et Sanon A, 2005**); augmentation de la production de biomasse d'arbres fruitiers (**Guisso T 2001**); une amélioration de la production végétale ainsi qu'une efficacité photosynthétique plus élevée après une période de sécheresse (**Ruiz-Sánchez M, Aroca R, Muñoz Y, Polón R, Ruiz-Lozano JM 2010**). En général, certains mécanismes physiologiques impliqués dans les effets des mycorhizes sur le développement des plantes, qui ont été démontrés expérimentalement, confirment que le champignon impliqué dans la symbiose modifie l'équilibre interne de la plante (**Garbaye J, 2013**). De plus, les racines des plantes sont indirectement impliquées dans la modification des minéraux du sol, cependant, ce sont les microorganismes qui les accompagnent qui jouent un rôle direct. Surtout des champignons mycothiziens et des bactéries qui contribuent à l'altération des minéraux et permettent la mobilisation d'un grand nombre de nutriments nécessaires à la croissance et au développement de la plante. Pour l'étude de la dépendance mycorhizienne, il faut non seulement prendre en compte la contribution potentielle des champignons mycorhiziens, mais aussi exclure les contributions

## CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

---

possibles de la fixation symbiotique de l'azote, par l'activité bactérienne, par la présence de légumineuses. Les travaux de (Helgason T, Daniell TJ, Husband R, 1998 et Daniell TJ, Husband R, Fitter AH, 2001), sur les communautés de micro-organismes basés sur l'analyse de séquences codant pour l'ARN 18S amplifié avec le premier AMI à partir de racines de cultures agricoles ont montré une diversité plus faible des communautés fongiques MA dans les sols cultivés en comparaison avec les sols de prairies ou de forêts. Ces résultats comcident avec la mesure de la richesse spécifique des sols cultivés selon le morphotype de spores (Oehl F et al., 2003 et Oehl F et al., 2004) Cette perte de diversité a été attribuée à une pression de sélection complexe exercée par les pratiques agricoles sur les communautés de champignons MA, parmi lesquelles la fertilisation minérale, le travail du sol, l'utilisation de pesticides et la monoculture. La dépendance mycorhizienne comprend à la fois le type de culture, les conditions édaphiques (état du milieu modifié par la culture précédente et la culture associée) et l'effet de l'itinéraire technique suivi (Chiffot V, 2008). La dépendance mycorhizienne relative de la plante est calculée selon la formule suivante

$$DM = \frac{BTM - BTNM}{BTM}$$

**DM:** Dépendance Mycorhizienne

**BTM:** Biomasse Totale des plantes Mycorhizées

**BTNM:** Biomasse Totale des plantes Non Mycorhizées

Il existe trois catégories d'espèces végétales en fonction de leur dépendance mycorhizienne:

- a) Les plantes dites non mycotrophes capables de se développer sans l'intervention de champignons mycorhiziens,
- b) Les mycotrophes facultatifs qui se reproduisent grâce à la symbiose mycorhizienne uniquement lorsque le milieu dans lequel ils se développent est pauvre en éléments nutritifs et

# CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire

---

- c) Desmycotrophes obligatoires, ceux qui ne peuvent terminer leur cycle de développement qu'en association avec des champignons mycorhiziens (**Durion G, 1993** cité par **Baohanta R, 2011.**)

## 5.1. Effet mycorhizosphère

Les champignons mycorhiziens arbusculaires font partie intégrante du système pédologique. La rhizosphère est composée de sol proche des racines des plantes et est affectée par leur activité (**Reyes Jaramillo, 2011.**).

L'établissement de la symbiose mycorhizienne des arbuscules conduit à l'apparition de nouveaux compartiments biologiques au sein de la rhizosphère, modifiant la physiologie de la plante et par conséquent la qualité et la quantité des exsudats de racines, le fonctionnement de la symbiose mycorhizienne induit, dans la structure de la microflore tellurique, différents compartiments microbiens composés de communautés bactériennes et fongiques présentant des caractéristiques spécifiques (structure, diversité fonctionnelle).

Le terme "mycorhizosphère" a été proposé pour caractériser ce volume de sol sous l'influence de mycorhizes (**Rambelli A, 1973 et Johansson JF, Paul LR, Finlay RD, 2004.**). La mycorhizosphère a deux composantes, la couche de sol autour des racines mycorhizées et le sol près des hyphes du champignon mycorhizien (HM) ou du mycélium externe qui constitue l'hyphasphère ou la mycosphère (**Reyes Jaramillo, 2011.**). Grâce à son réseau de mycéliums, le volume de sol exploré par le champignon s'avère beaucoup plus important que celui exploré par les seules racines (**Balergue C, 2012.**).

*Chapitre 02 :*

*Vigna angularis*

## CHAPITRE II : *Vigna angularis*

### Chapitre 02 : *Vigna angularis*

#### 1. Position systématique et classification botanique

*Vigna angularis* (Willd.) Ohwi & Ohashi appartient à la famille des Fabaceae (Leguminosae), caractérisée par sa capacité à fixer l'azote atmosphérique grâce à une symbiose avec des bactéries du genre *Rhizobium*. Cette espèce est classée dans le genre *Vigna*, sous-genre *Ceratotropis*, qui regroupe plusieurs légumineuses asiatiques telles que *Vignaradiata* et *Vigna mungo* (Takahashi, 2024).

Sur le plan cytogénétique, *Vignaangularis* est une espèce diploïde ( $2n = 22$ ), autogame et annuelle, ce qui favorise la stabilisation des caractères agronomiques au cours des programmes de sélection (Lixia et al., 2022).

Historiquement, cette espèce a été initialement décrite dans le genre *Dolichos* avant d'être reclassée dans le genre *Vigna*, reflétant l'évolution des connaissances taxonomiques fondées sur des critères morphologiques et moléculaires (Takahashi, 2024).

**Tableau 01:** Classification botanique du *Vigna angularis*

Niveau	Classification
Règne	Plantae
Sous-règne	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Ordre	Fabales
Famille	Fabaceae
Sous-famille	Papilionoideae
Tribu	Phaseoleae
Genre	<i>Vigna</i>
Sous-genre	<i>Ceratotropis</i>
Espèce	<i>Vignaangularis</i>

## CHAPITRE II : *Vigna angularis*

---

### 2. Origine, domestication et distribution géographique

L'origine de *Vigna angularis* est généralement attribuée à l'Asie de l'Est, notamment à la Chine, où des données archéobotaniques suggèrent une domestication ancienne remontant à plusieurs millénaires (Lixia et al., 2022). L'espèce sauvage ancestrale (*Vigna angularis* var. *nipponensis*) est largement distribuée dans les régions tempérées de l'Asie, incluant la Chine, le Japon et la péninsule coréenne (Lixia et al., 2019).

La diffusion de cette légumineuse s'est progressivement étendue vers l'Asie du Sud, l'Océanie, ainsi que certaines régions d'Afrique et d'Amérique. Toutefois, sa culture reste principalement concentrée en Chine, au Japon et en Corée (Lim, 2011).

La diversité génétique observée entre formes sauvages et cultivées reflète un processus de domestication complexe, impliquant des modifications morphologiques, physiologiques et agronomiques (Vaughan et al., 2007).

### 3. Caractéristiques botaniques et morphologiques

*Vigna angularis* est une plante herbacée annuelle, à port dressé ou légèrement grimpant, atteignant généralement une hauteur comprise entre 30 et 90 cm selon les variétés et les conditions environnementales (Sindhu et Manickavasagan, 2020).



**Figure 10:** Morphologie générale de *Vigna angularis* (site web 02)

## CHAPITRE II : *Vigna angularis*

---

### 3.1. Racines

Le système racinaire est pivotant et bien développé, permettant une exploration efficace du sol et une absorption optimale de l'eau et des nutriments. Une variabilité importante de l'architecture racinaire existe entre les cultivars, influençant leur adaptation aux stress environnementaux (Cho *et al.*, 2022).



**Figure 11 :** Racines des *Vigna angularis* (site web 03)

### 3.2. Tige

La tige est généralement fine, ramifiée et peut présenter un port érigé ou semi-grimpant.



**Figure 12 :** La tige de *Vigna angularis* (site web 04)

## CHAPITRE II : *Vigna angularis*

---

### 3.3. Feuilles

Les feuilles sont trifoliées, composées et disposées de manière alternée le long de la tige, portées par un long pétiole. Les folioles sont de forme ovale, mesurant environ 5 à 10 cm de longueur et 5 à 8 cm de largeur (Lumpkin, Konovsky, Larson, et al., 2016).



**Figure 13 :** Feuilles de *Vigna angularis* (site web 04)

### 3.4. Fleurs

Les fleurs sont de type papilionacé et de couleur jaune vif. L'inflorescence est une fausse grappe axillaire composée généralement de six à dix fleurs, mais pouvant varier de deux à vingt fleurs selon les conditions(Lumpkin, Konovsky, Larson, et al., 2016).



**Figure 14:** Fleur du *Vigna angularis* (site web 04)

### 3.5. Fruits et graines

#### 3.5.1. Gousses

Les gousses sont lisses, cylindriques et à paroi mince. Elles sont de couleur verte lorsqu'elles sont immatures, puis deviennent blanches à grises à maturité. Leur taille varie entre 5 et 13 cm de longueur et environ 0,5 cm de largeur. Chaque gousse contient de 2 à 14 graines. À maturité, les gousses ont tendance à s'ouvrir (déhiscent), ce qui peut rendre la récolte difficile dans certaines conditions (Lumpkin, Konovsky, Larson, et al., 2016).



Figure 15: Gousses de *Vigna angularis* (site web 04)

#### 3.5.2. Graines

Les graines sont lisses, de forme subcylindrique, avec une longueur comprise entre 5,0 et 9,1 mm, une largeur de 4,0 à 6,3 mm et une épaisseur de 4,1 à 6,0 mm. Le poids de mille graines varie entre 50 et 200 g. Il existe une grande diversité de couleurs de graines, allant du rouge foncé (marron) au noir bleuté, parfois tachetées de couleur paille (Lumpkin, Konovsky, Larson, et al., 2016).



Figure 16: Graine des *Vigna angularis* (site web 04)

## CHAPITRE II : *Vigna angularis*

### 4. Exigences écologiques et conditions de culture

*Vigna angularis* est adaptée aux climats tempérés et subtropicaux, avec une température optimale de croissance comprise entre 20 et 30°C. Elle nécessite une pluviométrie modérée et bien répartie durant son cycle végétatif (ScienceDirect, 2023).

Cette espèce s'adapte à différents types de sols, bien qu'elle préfère des sols bien drainés, riches en matière organique. Grâce à sa symbiose avec les bactéries fixatrices d'azote, elle contribue à améliorer la fertilité des sols (Lixia et al., 2019).

Elle présente également une tolérance relative à certains stress abiotiques, notamment la sécheresse et les variations de température, bien que ces facteurs puissent affecter le rendement et la qualité des graines (Takahashi, 2024).

### 5. Composition chimique et valeur nutritionnelle

Les graines de *Vigna angularis* possèdent une valeur nutritionnelle élevée. Elles contiennent des protéines, des glucides complexes, des fibres alimentaires ainsi que des vitamines et minéraux essentiels (Lixia et al., 2022).

#### 5.1. Composition moyenne

**Tableau 02:** Composition chimique moyenne et valeur nutritionnelle des graines de *Vigna angularis*

Composant	Teneur approximative
Protéines	20–25 %
Glucides	55–65 %
Lipides	1–2 %
Fibres	5–10 %

La faible teneur en lipides confère à cette légumineuse un intérêt particulier dans les régimes alimentaires sains. Elle contient également des composés bioactifs, notamment des flavonoïdes et des polyphénols, responsables de ses propriétés anti oxydantes (Cho et al., 2022).

## **CHAPITRE II : *Vigna angularis***

---

Ces caractéristiques font de *Vigna angularis* un aliment fonctionnel contribuant à la prévention de certaines maladies chroniques, telles que le diabète et les maladies cardiovasculaires (**Lixia et al., 2022**).

### **6. Importance agronomique, économique et utilisations**

*Vigna angularis* occupe une place importante dans les systèmes agricoles asiatiques, tant pour l'alimentation humaine que pour l'amélioration de la fertilité des sols. Elle est largement utilisée dans l'alimentation traditionnelle, notamment sous forme de pâte sucrée dans la cuisine japonaise et chinoise (**Ensembl Plants, 2024**).

Sur le plan agronomique, cette espèce joue un rôle clé dans les rotations culturales grâce à sa capacité de fixation biologique de l'azote, contribuant ainsi à l'amélioration de la structure et de la fertilité du sol (**Lixia et al., 2019**).

Elle présente également un intérêt économique croissant en raison de son potentiel d'exportation et de sa contribution à la diversification des systèmes de production agricole (**Anjali et Bhardwaj, 2020**).

### **7. Diversité génétique et amélioration variétale**

La diversité génétique de *Vigna angularis* est importante, comme le montrent les nombreuses études de caractérisation morphologique et moléculaire. Cette variabilité constitue une ressource essentielle pour les programmes d'amélioration variétale visant à accroître le rendement, la qualité nutritionnelle et la tolérance aux stress environnementaux (**Anjali et Bhardwaj, 2020**).

Les analyses génétiques ont permis d'identifier plusieurs groupes distincts, offrant des perspectives intéressantes pour la sélection et les croisements (**Lixia et al., 2022**).

Les avancées en génomique, notamment le séquençage du génome de l'espèce, ouvrent de nouvelles perspectives pour l'amélioration assistée par marqueurs et la compréhension des mécanismes de domestication (**Kang et al., 2024**).

*Chapitre 03 :*  
*Matériels*  
*& Méthodes*

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes

---

### 1. Présentation de la région d'étude et de la station d'étude

#### 1.1. Localisation de la région et de la station d'étude

La zone d'étude (**fig.17**) se situe dans la région d'El-Kala. Elle fait partie du complexe humide de la Numidie Orientale (**Samraoui et De Belair, 1998**). Elle est située à l'extrême Nord-est algérien et incluse dans la wilaya d'El-Tarf qui est limitée au nord par la mer méditerranéenne, au sud par les wilayas de Guelma et Souk Ahras, à l'ouest par la wilaya d'Annaba et à l'est, elle fait frontière avec la Tunisie.

Administrativement, la ville d'El-Kala et ses environs sont inclus dans le Parc National d'ElKala qui couvre près de 80.000 hectares. C'est une zone à vocation forestière qui possède également divers sites humides et zones lacustres classées RAMSAR (**DGF, 2002**).

#### 1.2. Climat

Le parc national d'El Kala est sous l'influence d'un climat (**fig.18**) subhumide, variant à hiver tempéré à chaud. Il se caractérise par une pluviométrie forte généreuse dont le total annuel varie entre 687 et 850 mm. Ce climat est à caractère méditerranéen avec une période pluvieuse d'octobre à avril et une période sèche de mai à septembre. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 18°C. Les mois les plus chauds sont juillet et août où la température moyenne oscille autour de 25°C. Les mois les plus froids sont décembre et janvier avec des températures moyennes de l'ordre de 12°C. Durant la saison estivale, ce sont les vents chauds et secs qui dominent. Ils assèchent l'atmosphère et favorisent le déficit hydrique de la végétation et contribuent fortement à la propagation de violents incendies de forêts. Par ailleurs, la pluviométrie généreuse de la zone d'étude permet non seulement l'entretien du couvert forestier, mais surtout le maintien du réseau hydrographique important existant au sein du Parc (**Khallef, 2019**).

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes



**Figure 17:** Localisation de la station d'étude (Site web 01).

Légendes  : Site d'étude.

Echelle: 1/500000.

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes

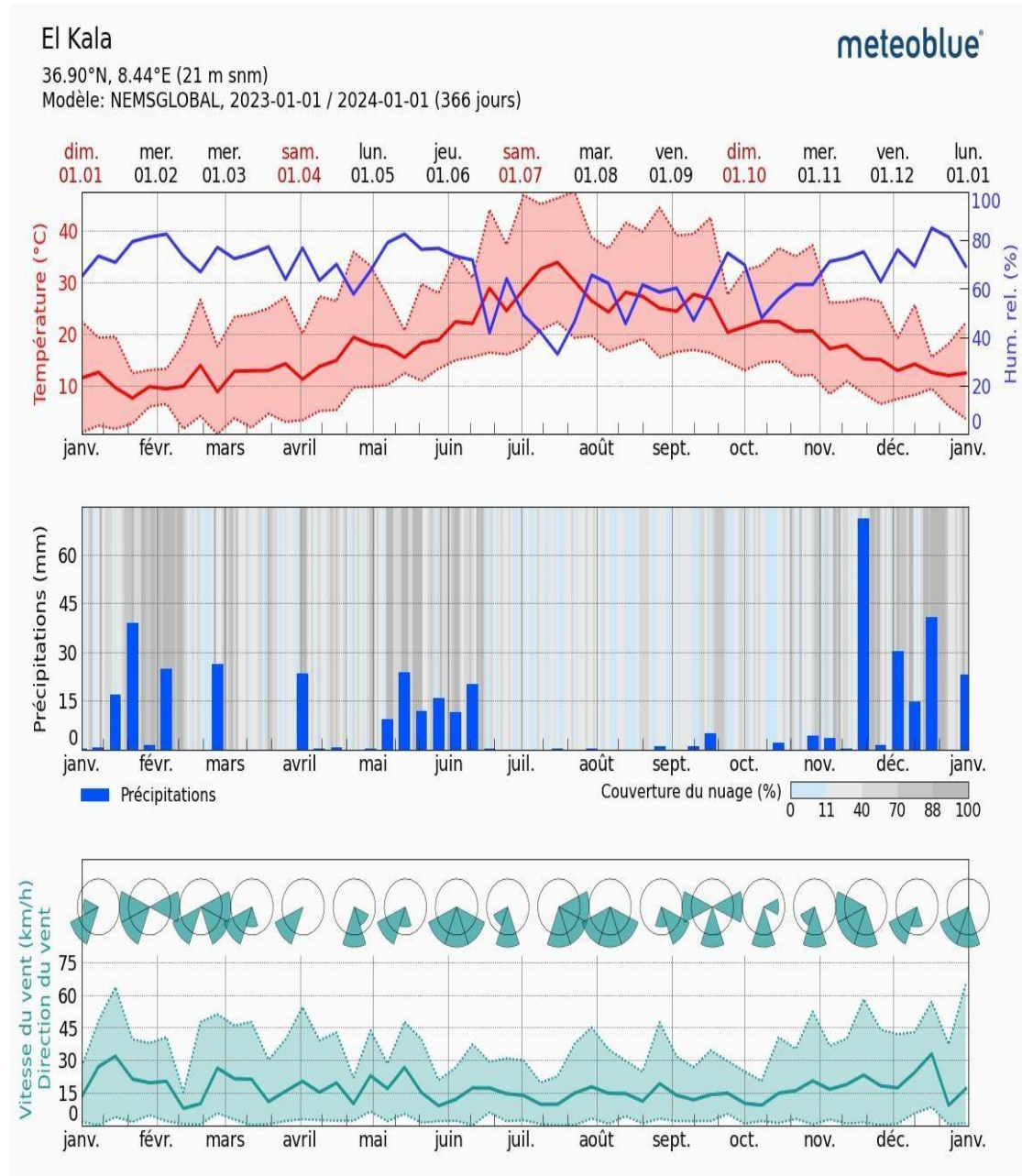
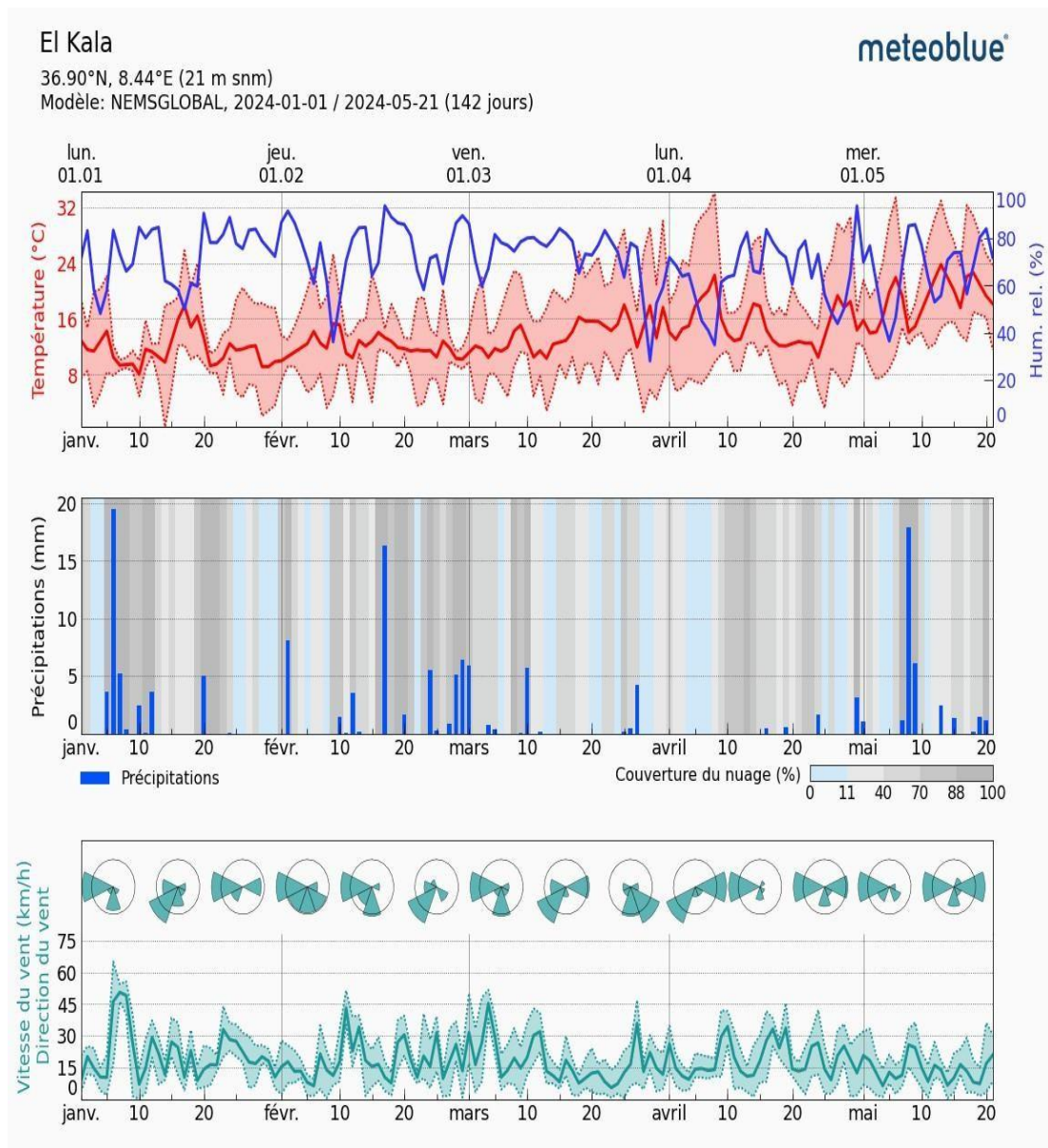


Figure 18 : Données climatiques de la région d'étude pour l'année 2023 (Site web 02).

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes



**Figure 19:** Données climatiques de la région d'étude pour l'année 2024 (Site web 03).

## 2. Présentation du matériel végétal

### 2.1. Caractères botaniques et écologiques

Le *Vigna angularis* (Willd.) Ohwi & Ohashi, appelé haricot azuki, appartient à la famille des Fabaceae (Ohwi et Ohashi, 1969). C'est une légumineuse annuelle diploïde ( $2n = 22$ ), autogame et largement cultivée en Asie orientale, principalement en Chine, au Japon et en Corée (Tomooka et al., 2002 ; Anjali et Bhardwaj, 2020). Son origine serait chinoise et sa domestication remonterait à environ 12 000 ans (Yang et al., 2015).

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes

---

Le haricot azuki est une plante herbacée pouvant atteindre 30 à 90 cm de hauteur. Ses feuilles sont trifoliolées et ses fleurs jaunes regroupées en grappes axillaires (Anjali et Bhardwaj, 2020). Les fruits sont des gousses cylindriques contenant 6 à 14 graines généralement rouges, riches en protéines, amidon, vitamines et sels minéraux (Yang et al., 2015). Son système racinaire porte des nodosités capables de fixer l'azote atmosphérique, améliorant ainsi la fertilité des sols (Tomooka et al., 2002).

Sur le plan écologique, *Vigna angularis* est adapté aux climats tempérés chauds et humides, avec une température optimale comprise entre 15 et 30 °C. Il préfère les sols bien drainés, légèrement acides à neutres, et présente une tolérance modérée à la sécheresse (Yang et al., 2015). Son cycle végétatif varie de 80 à 120 jours selon les variétés et les conditions climatiques (Genetic Diversity and Environmental Influence, 2021).

### 2.2. Intérêts écologiques et économiques

Le *Vigna angularis* possède une grande importance économique grâce à sa haute valeur nutritive. Ses graines sont riches en protéines, glucides, fibres, vitamines et minéraux, et sont largement utilisées dans l'alimentation humaine sous forme de soupes, farines et desserts traditionnels asiatiques (Anjali et Bhardwaj, 2020 ; Tomooka et al., 2002). Au Japon, la pâte sucrée d'azuki (*anko*) est utilisée dans plusieurs pâtisseries traditionnelles (Takahashi et al., 2024).

Cette légumineuse représente également une culture commerciale importante en Asie orientale, notamment au Japon où elle constitue la deuxième légumineuse alimentaire après le soja (Yang et al., 2015). Les résidus végétaux sont parfois utilisés comme fourrage ou matière organique pour enrichir les sols (Anjali et Bhardwaj, 2020).

Du point de vue écologique, *Vigna angularis* améliore la fertilité des sols grâce à sa capacité de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par les bactéries du genre *Rhizobium* (Tomooka et al., 2002). Cette espèce est souvent utilisée dans les rotations culturales afin de réduire l'utilisation des engrais chimiques et de limiter l'appauvrissement des sols (Yang et al., 2015). Elle contribue également à la protection des sols contre l'érosion et représente une culture intéressante face aux changements climatiques grâce à son adaptation à différentes conditions environnementales (Takahashi et al., 2024).

### 2.3. Méthode de prélèvement et d'observation des racines

#### 2.3.1. Collecte des racines

Nous avons effectué des prélèvements racinaires en prenant soin de choisir les racines les plus fines. Les racines provenant du même plant sont convenablement mélangées pour en faire un seul échantillon. Nous avons récupéré la totalité du système racinaire de chaque plant. Parallèlement à cet échantillonnage racinaire, nous avons effectué un prélèvement du sol à proximité des racines dans les horizons supérieurs (0 à 30cm) pour plusieurs utilisations à savoir :

- L'analyse physico-chimique du sol même,
- L'estimation de la diversité sporale dans ce sol

#### 2.3.2. Analyse des paramètres physico-chimiques du sol

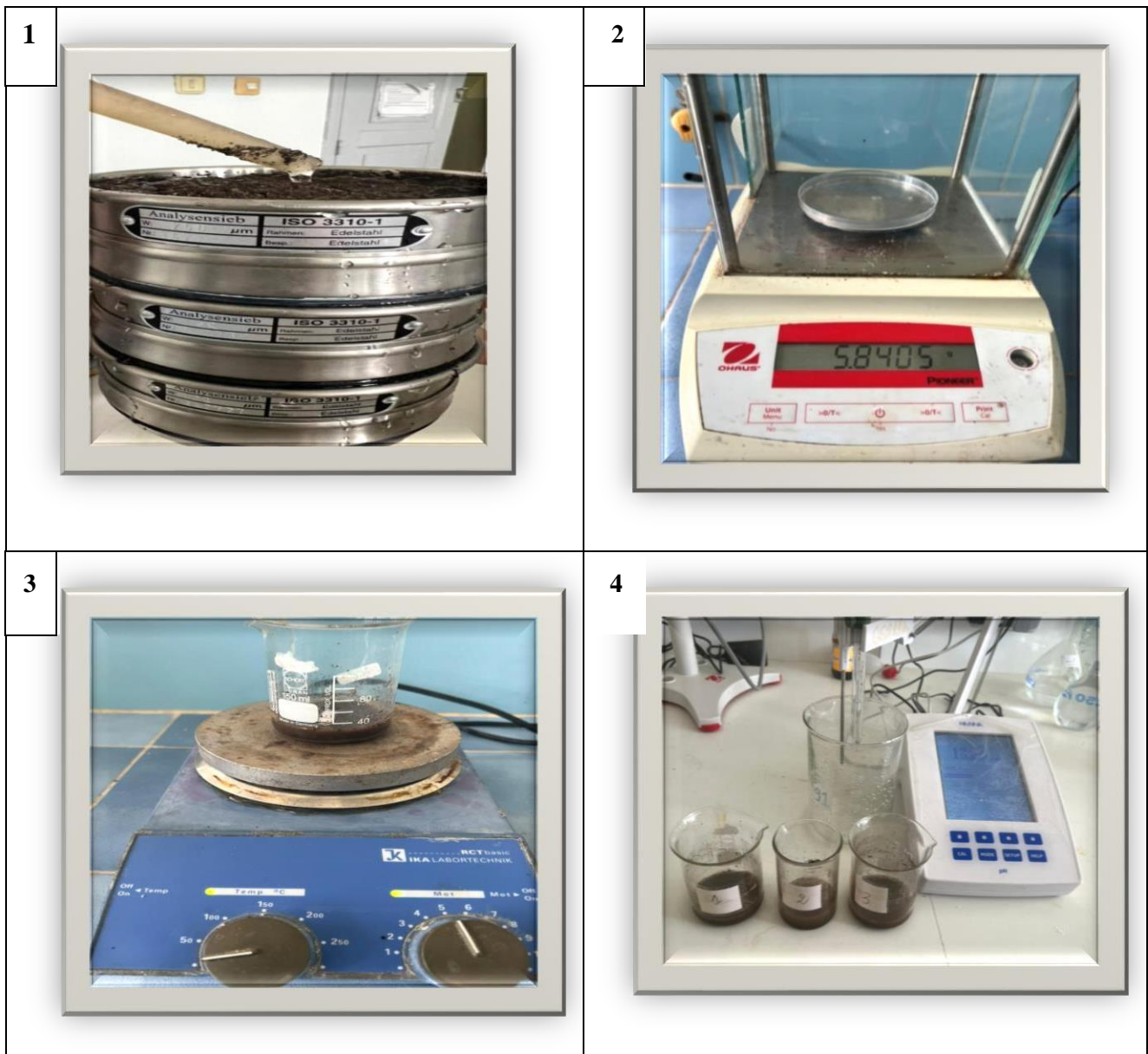
Les paramètres physicochimiques suivants ont été évalués : Le pH eau et la texture.

##### 2.3.2.1. PH eau

Pour déterminer le pH eau du sol (**fig.15**) (**Baize et Jabiol, 1995**):

- Tamiser le sol d'analyse avec un tamis de 2 mm.
- Peser 5 g de sol dans un flacon ou pilulier à agitation et ajouter 25 ml d'eau distillée.
- Agiter avec agitateur culbuteur pendant 2 heures à température proche de 20 °C.
- Laisser reposer la solution 24 h, ensuite mesurer le pH eau moyen d'un pH mètre

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes



**Figure 20 : Détermination du pH eau du sol d'étude (RAHEM,2026).**

(1 : Tamisage du sol d'analyse, 2 : Peser 5 g de sol dans un flacon ou pilulier, 3 : Agiter avec agitateur culbuteur pendant 2 heures à température proche de 20 °C, 4 : Mesure du pH eau moyen d'un pH mètre).

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes

### 2.3.2.2. La texture

Pour déterminer la texture du sol, nous avons utilisé la méthode par saturation qui consiste à mesurer le pourcentage d'humidité du sol ( $y$ ) et à le comparer à une échelle qui détermine la texture qui lui correspond.

Nous avons, tout d'abord, pris une petite quantité de sol (= 50 g) et nous l'avons imbibée d'eau au goutte à goutte tout en mélangeant jusqu'au point où la pâte devient luisante et glisse doucement lorsqu'on incline le récipient.

Ensuite, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Peser une capsule vide (P1)
- Prendre une petite quantité de pâte (sol mouillé).
- La mettre dans la capsule puis repeser (P 2).
- Mettre à l'étuve à 105 °C pendant 24 h
- Peser une troisième fois la capsule à la sortie de l'étuve (P3). Le poids correspond donc au poids de la capsule vide + le poids du sol sec.
- Puis calculer

$X 1 = P 2 - P 3$  (Poids de l'humidité).

$X 2 = P 3 - P 1$  (Poids du sol sec).

Ensuite appliquer la règle de trois pour calculer le pourcentage d'humidité.

$X 1 \rightarrow X 2$  g du sol sec

$Y \rightarrow 100$  g de sol sec

Enfin, le comparer au tableau n°1 pour déterminer la texture.

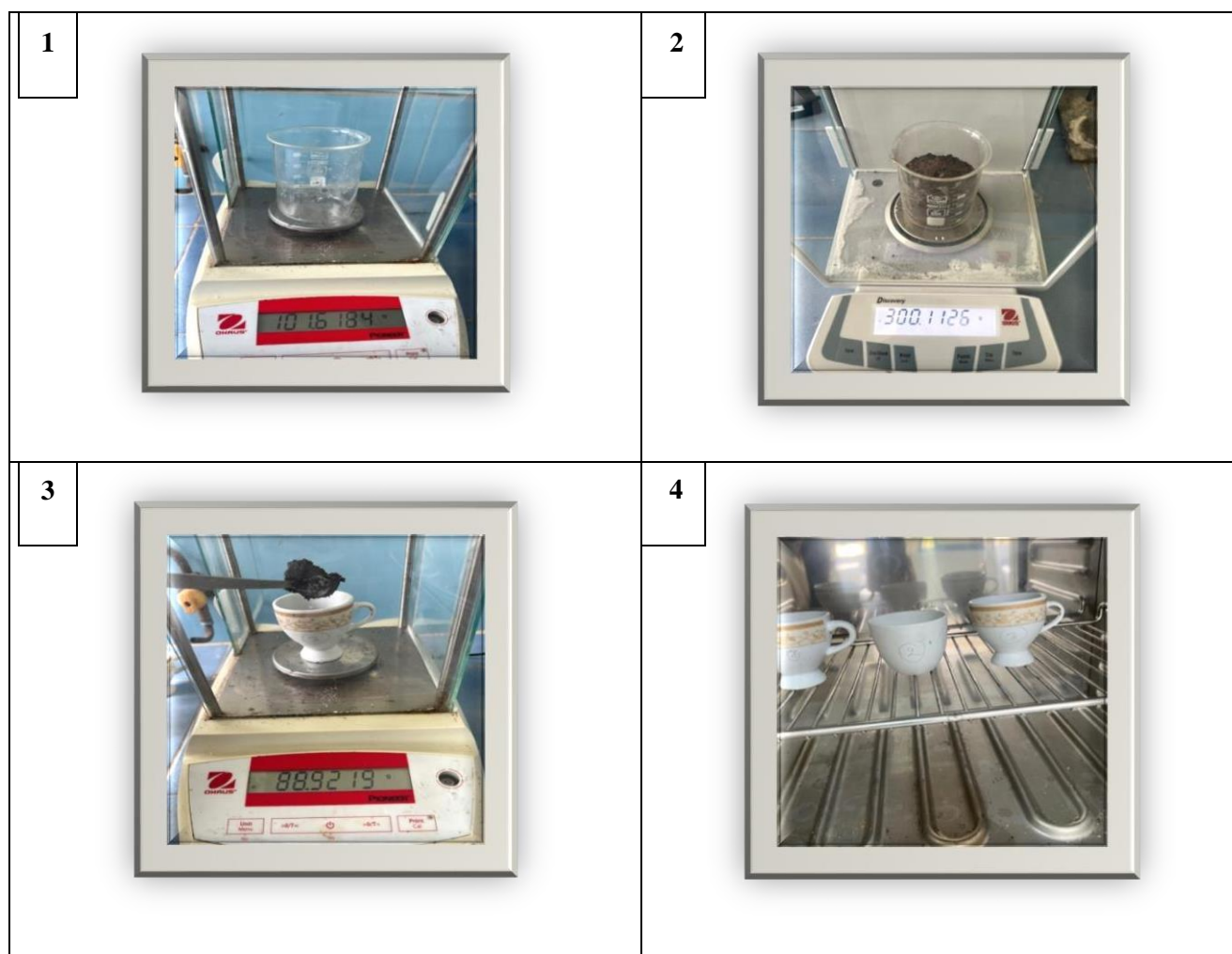
**Tableau n°3:** Echelle de la texture.

Pourcentage d'humidité(%)	Texture
<12	Sableuse
12-24	Sablo-limoneuse
24-37.5	Limoneuse-sableuse

### CHAPITRE III : Matériels & Méthodes

37.5- 45	Limoneuse-argileuse
>75	Argileuse

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes



**Figure 21** : Détermination de la texture du sol (RAHEM,2026).

(1 : Peser une capsule vide (P1), 2 : Peser le sol, 3 : Prendre une petite quantité de pâte (sol mouillé), 4 : Mettre les échantillons à l'étuve, 5 : Régler l'étuve à 105 °C, 6 : Peser une troisième fois la capsule. A la sortie de l'étuve).

### 2.3.3. Mise en évidence de la colonisation des racines du *Vigna angularis* par les CMA

Les champignons MA n'étant pas décelables à l'œil nu, pour pouvoir les observer et les détecter au niveau des racines, il est nécessaire de faire subir à ces dernières un traitement qui permet de les mettre en évidence (fig.22).

Les échantillons racinaires sont lavés et séparés délicatement afin de les débarrasser de toute particule de terre puis découpés en fragments d'environ 1 cm de longueur.

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes

---

Les racines lavées sont recueillies dans des tubes en plastique munis à leur base d'une grille en acier inoxydable. Les tubes sont rassemblés et rangés dans un cristalliseur et traités comme suit:

- Immerger les racines dans une solution d'hydroxyde de potassium (KOH à 10%)
- Mettre le cristalliseur muni des tubes dans un bain marie à 100°C.
- Laisser chauffer pendant 30 minutes, l'utilisation de la potasse a pour effet de vider les cellules de leur contenu cytoplasmique.
- Rincer les tubes à l'eau du robinet afin d'éliminer toute trace de potasse (KOH).
- Plonger les fragments racinaires contenus dans le cristalliseur successivement dans du peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> à 10 vol) pendant 30 minutes pour éclaircir les racines.
- Plonger les racines ensuite dans HCl pendant 10 minutes
- Rincer de nouveau les racines éclaircies.
- Immerger les racines éclaircies dans le Bleu trypan voir composition en annexe 1, Chauffé à 90 °C au bain marie pendant 30 minutes.
- Conserver les racines ainsi colorées dans des piluliers étiquetées en les immergeant dans du glycérol ou de l'acide lactique.

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes

1



2

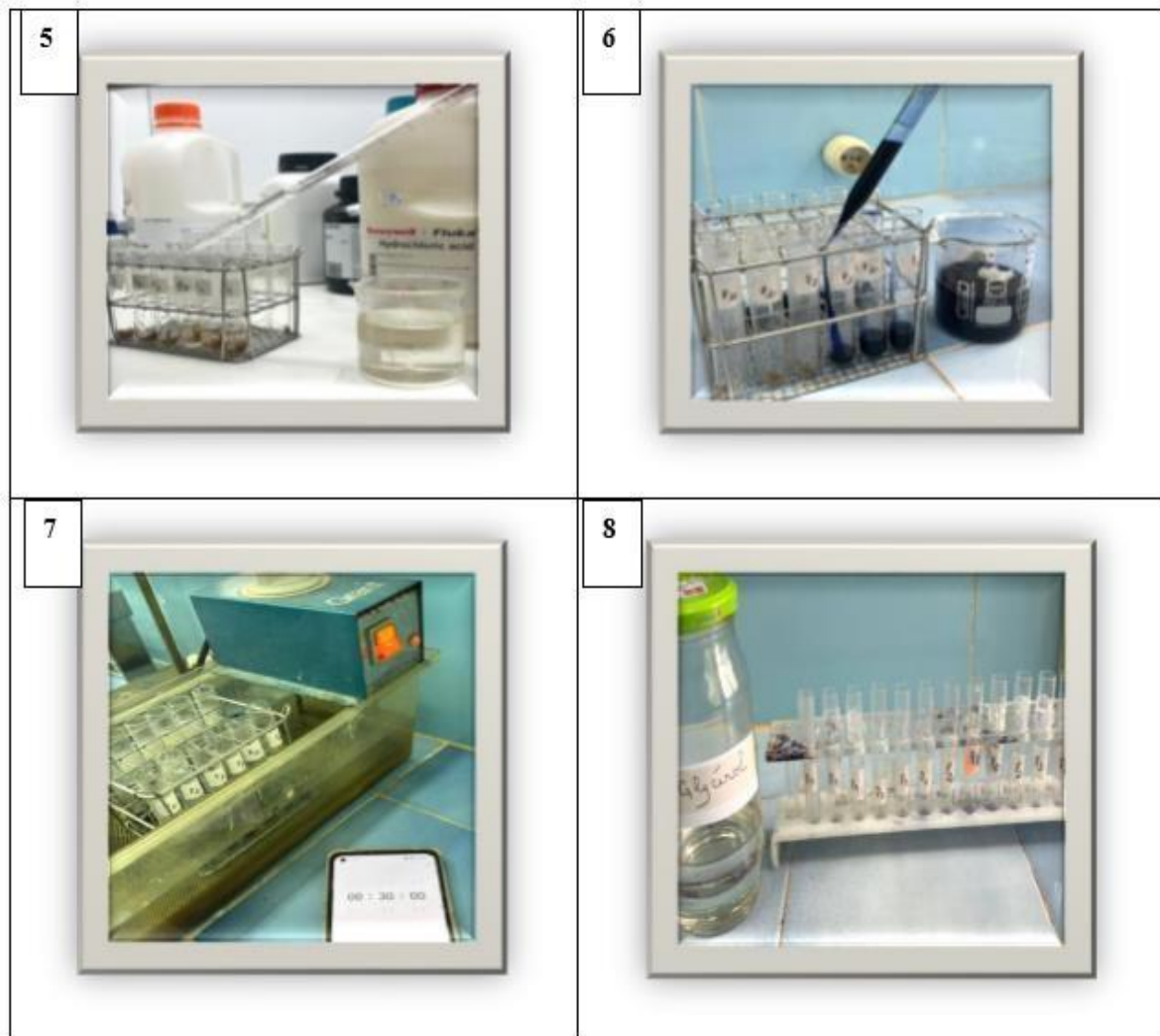


3



4





**Figure 22:** Mise en évidence de la colonisation des racines du chêne liège par les CMA (RAHEM,2026).

- 1- Les plants du *Vigna angularis*.
- 2- Les racines lavées sont recueillies dans des tubes en plastique munis à leur base d'une grille en acier inoxydable.
- 3- Immerger les racines dans une solution d'hydroxyde de potassium (KOH à 10%)
- 4- Plonger les fragments racinaires contenus dans le cristalliseur successivement dans du peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> à 10 vol) pendant 30 minutes.
- 5- Plonger les racines ensuite dans HCl pendant 10 minutes
- 6- Immerger les racines éclaircies dans le Bleu trypan
- 7- Chauffé à 90 °C au bain marie pendant 30 minutes
- 8- Conserver les racines ainsi colorées dans des piluliers étiquetées en les immergeant dans du glycérol

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes

---

### 2.3.4. Evaluation de la biodiversité et de l'abondance des spores de CMA présentes dans le sol

#### 2.3.4.1. Méthode d'extraction des spores fongiques

La connaissance de la biologie et l'écologie des champignons MA est limitée par des difficultés de techniques à la fois pour identifier et qualifier les espèces présentes dans les sols (**Brundrett et Abbott, 2002**).

Le nombre et la nature des spores varient en fonction du type de sol, de son traitement ainsi que du type de culture. Les spores des CMA sont les plus souvent libres dans le sol. Généralement, elles ont un diamètre de 50 à 500 micromètres et peuvent donc être séparées des fines particules de sol par tamisage humide (**Gerdemann et nicolson, 1963**).

La technique de tamisage consiste à:

Superposer une série de tamis (3 tamis) de mailles micrométriques de différentes ouvertures : 355 $\mu$ m, 250 $\mu$ m ,150  $\mu$ m .

L'échantillon de sol (200 g) est déposé sur la série de tamis et soumis à un jet d'eau du robinet jusqu'à ce que l'eau qui en sorte devienne claire et limpide. Les tamisats du sol de chaque tamis sont recueillies dans des flacons étiquetés.

Une fraction de chaque flacon est versée dans une boîte de Pétri, diluée avec de l'eau distillée et observée à la loupe binoculaire. Les spores sont récoltées à l'aide d'une micropipette afin d'être montées entre lame et lamelle et observées au microscope.

Des méthodes d'ADN ont été récemment utilisées pour identifier les champignons MA dans les sols (**Clapp et al, 1995; Helgason et al, 1999**). Toutefois, les données obtenues par ce moyen ont été limitées en raison de la difficulté des techniques (**Sanders et al, 1996; Douds et Millner, 1999; Lanfrano et al, 1999**). L'extraction des lipides et l'analyse des profils d'acides gras est une autre méthode prometteuse pour quantifier les champignons MA dans les sols (**Graham et al, 1995; Olsson, 1999**).

Pour identifier les différentes spores, nous avons utilisé le manuel de **Schenck et Perez (1990)** et le site de **Blaszkowski (2006)**.

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes

---

### 2.3.4.2. Préparation des lames

Le procédé employé est le suivant:

- 1) Deux petites gouttes de Melzer (**Annexe 2**) sont placées sur la surface d'une lame propre de microscope, en prenant soin de réserver un espace sur une extrémité pour une étiquette de marquage. Le réactif de Melzer montre les réactions des composants de la paroi des spores et des couches intérieures de germination des champignons à arbuscules.
- 2) Environ 10-20 spores sont ajoutées à chaque goutte, selon la taille des spores. On les laisse pendant 3-5 minutes afin que le montage (melzer + spore) devienne plus visqueux avant de placer une lamelle.
- 3) Les spores sont écrasées en appliquant une pression modérée sur la lamelle avec l'extrémité d'un crayon sous le microscope photonique.
- 4) Les lames sont placées dans un incubateur à 60°C pour 12-24 h pour essuyer l'excédent du milieu et des bulles d'air. De plus, le chauffage diminue l'espace entre la lame et la lamelle et facilite, de ce fait, la prise des photos des structures sous-cellulaires des spores montées.

### 2.3.4.3. Description des spores

#### ➤ Morphologie générale : Forme de la spore

La forme de la spore peut être sphérique, subsphérique, ronde, ovale, obovale, etc.

#### ➤ Détermination de la couleur

La couleur des spores les plus claires et des spores les plus foncées est donnée sous la forme d'une formule exprimée en pourcentage de Cyan, Magenta, Jaune et Noir suivant le code de couleur défini par INVAM.

**Formule=%Cyan /Magenta/ yellow/Black**

#### ➤ Taille de la spore

Le diamètre des spores est estimé au microscope optique à l'aide d'un micromètre oculaire. Afin d'obtenir une bonne estimation de la taille de la spore, il est préférable de choisir, suivant la taille de la spore, le plus fort grossissement permettant de mesurer, en une fois son diamètre.

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes

Le calibrage du micromètre est donné dans le **tab.04**.

Ces mesures permettent d'observer les valeurs minimum et maximum et de calculer une valeur moyenne de la taille des spores d'une espèce. Le nombre de mesures effectuées ainsi que le nombre de spores par classe de diamètre sont généralement mentionnés.

**Exemple:** à l'objectif 10, nous avons constaté que le diamètre de la spore comprend 9 graduations de 10  $\mu\text{m}$  chacune ce qui correspond à  $9 \times 10 = 90 \mu\text{m}$ .

**Tableau n°04:** Correspondance entre la lecture à l'objectif (nombre de graduations) et la dimension réelle de l'objet mesuré.

<b>Objectif</b>	04	10	20	40	100
<b>Graduation =x <math>\mu\text{m}</math></b>	22	10	06	04	1

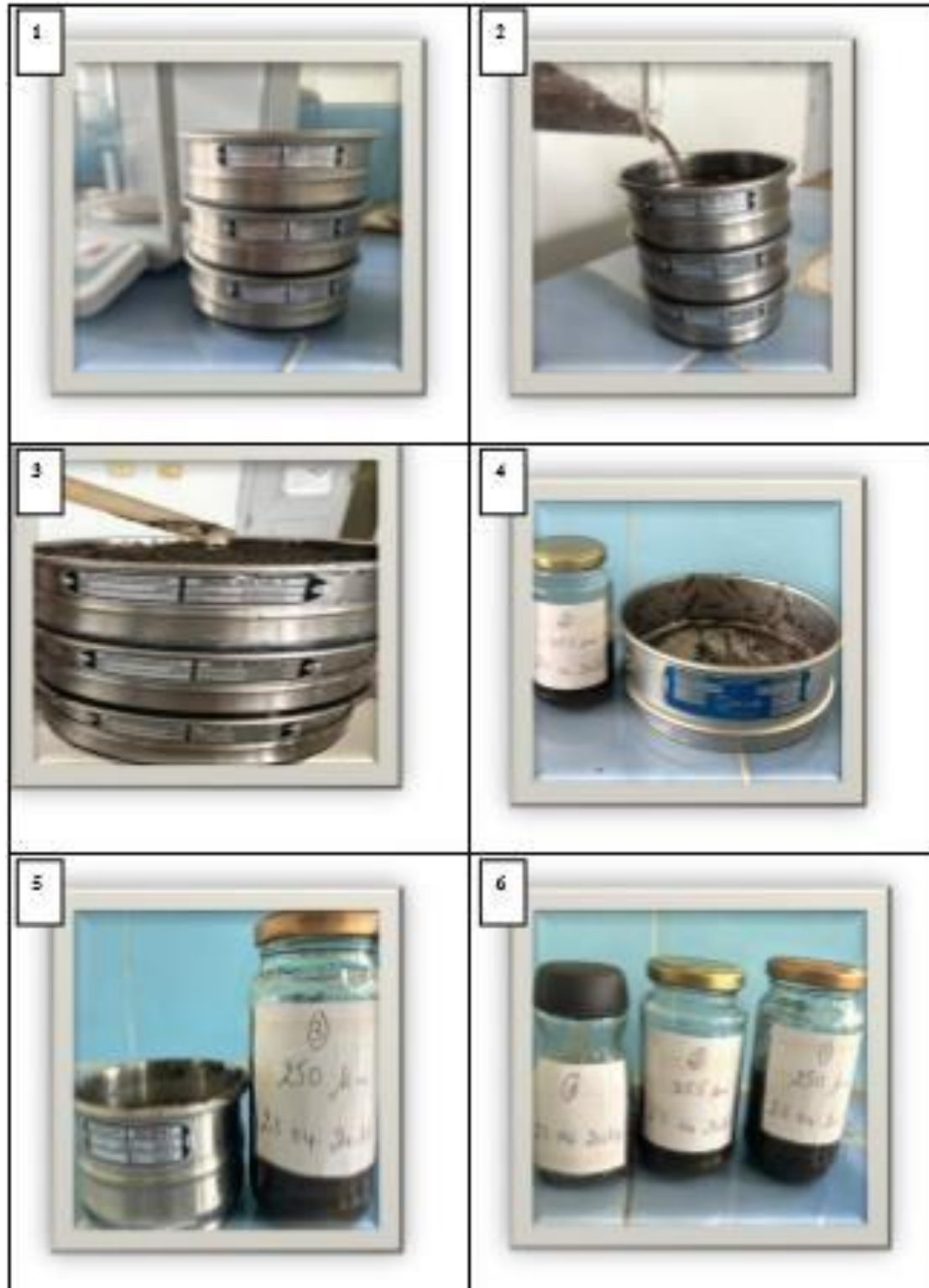
### ➤ Particularités remarquables

Des particularités morphologiques permettent, dans bien des cas, de déterminer les genres *Glomus*, *Simiglomus*, *Claroideoglomus*, *diversispora*, *Acaulospora*, *Entrophospora*, *Gigaspora*, *Sclerocystis*, *Scutellospora*, *Fusutata*, *Racocetra*, *Paraglomus*, *Archaeospora*, *Ambispora*, *Paraglomus*. Ces particularités sont :

- Présence d'un hyphe suspenseur pour le genre *Glomus*.
- Présence de cellule sporogène bulbiforme avec ou sans prolongement hyphal pour les genres *Gigaspora* et *Scutellospora*.

Ces caractères sont très importants dans la taxonomie des glomales et permettent de séparer les différents genres qui composent ce principal ordre des champignons mycorhiziens arbusculaires.

## CHAPITRE III : Matériels & Méthodes



**Figure 23:** Méthode d'extraction des spores fongiques (RAHEM,2026).

(1 : Superposer 3 tamis de mailles différents, 2 : Mettre le sol sur les tamis, 3 : Le sol est soumis à un jet d'eau du robinet, 4 : Les tamisats du sol de tamis 355µm, 5 : Les tamisats du sol de tamis 250µm, 6 : Les tamisats du sol de chaque tamis)

*Résultats*  
*& Discussion*

# RESULTATS & DISCUSSION

## 1. Résultats et interprétations

### 1.1. Analyse du sol

L'analyse du sol de la station d'El Kala (avec 3 répétitions) a permis d'obtenir les résultats consignés dans le tableau n°05 et annexe 1 et 2. Le sol d'étude est légèrement basique (le  $\text{pH} \approx 8$ ) et la texture est limoneuse – Argileuse (la moyenne de la valeur de texture égale à 22,5).

**Tableau n°05:** Caractéristiques physico-chimiques des sols de la station d'étude.


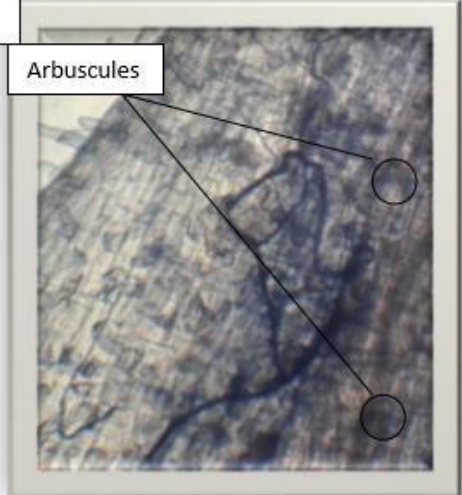
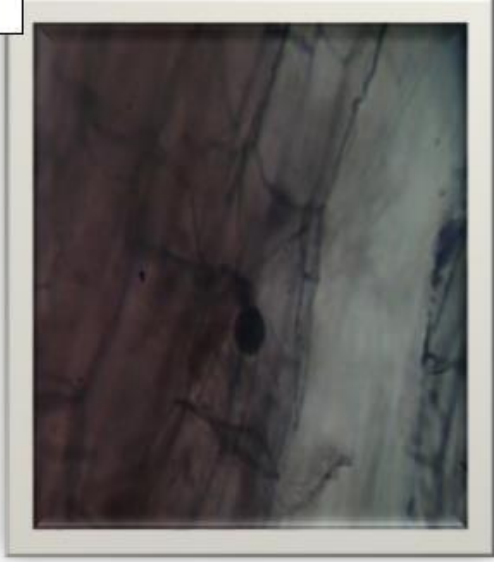
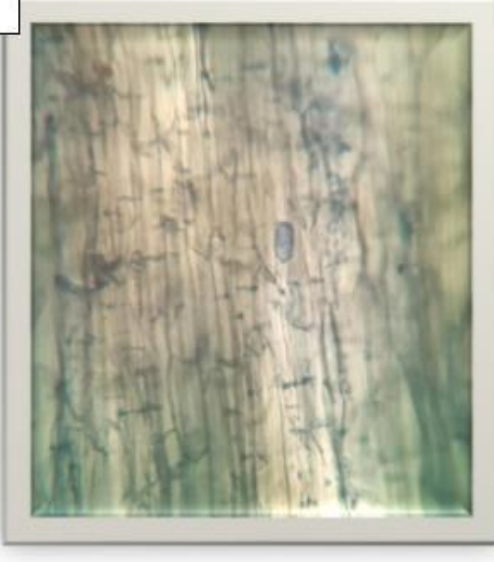
pH du sol d'étude			Texture du sol d'étude		
Répétition 1	Répétition 2	Répétition 1	Répétition 1	Répétition 2	Répétition 3
7,65	7,76	7,68	23,4	22,9	22,2

### 1.2. La mycorhization naturelle du *Vigna angularis* dans la station d'étude

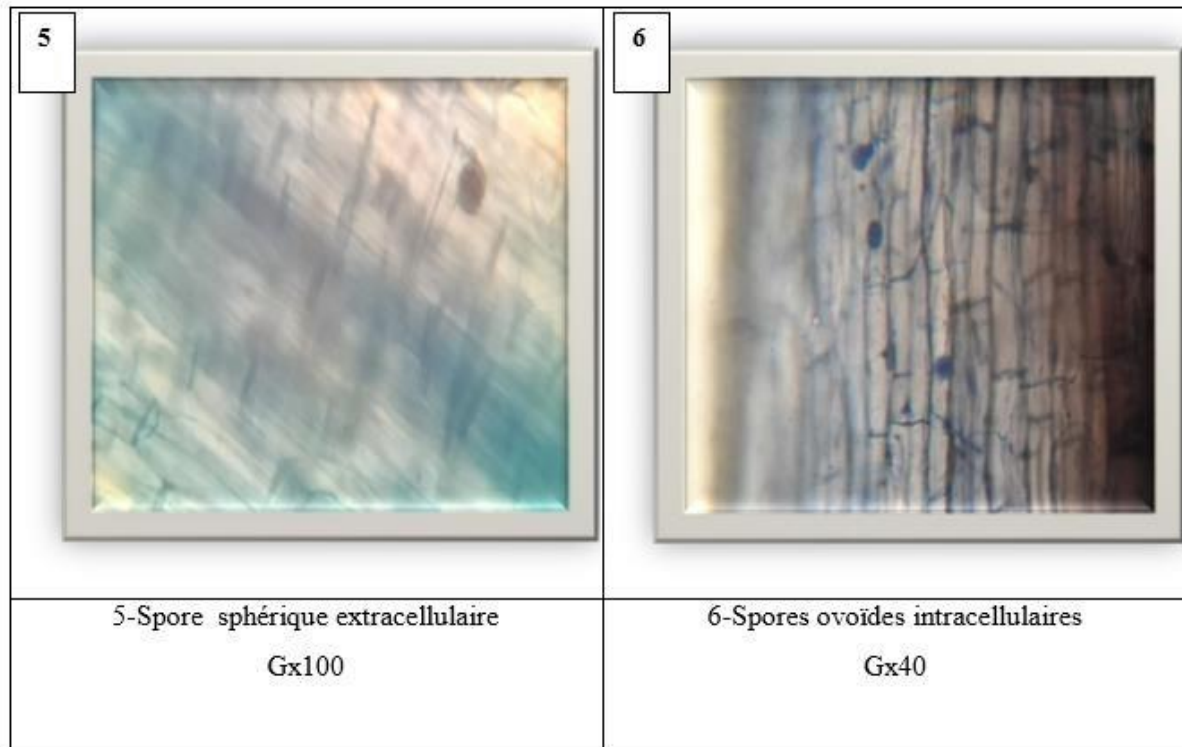
L'examen microscopique des racines naturelles du *Vigna angularis* prélevées du site d'El Kala au cours de l'année 2026, pendant le printemps et colorées au bleu Trypan, révèle une colonisation par les champignons MA. La colonisation se manifeste par différentes structures, à savoir l'existence d'un réseau important d'hyphes intra et intercellulaires (**fig.24 :1**). L'épaisseur du mycélium varie entre 10 à 20 um, de nombreux points d'entrée des champignons dans la racine ou appressoria (**fig.24 :2**) (Ces structures sont considérées comme l'événement le plus décisif dans le déroulement de la colonisation endomycorhizienne).

La colonisation des racines par les CMA s'est surtout manifestée par la présence de spores sphériques et ovoïdes extracellulaires (**fig.24 :3,4 et 5**) ainsi que des spores ovoïdes intracellulaires (**fig.24 :6**).

## RESULTATS & DISCUSSION

<p>1</p> 	<p>2</p> <p>Arbuscules</p> 
<p>1-Un réseau d'hyphes intra et intercellulaires Gx100</p>	<p>2-Mycélium extracellulaire et appressoria Gx100</p>
<p>3</p> 	<p>4</p> 
<p>3-Spore sphérique extracellulaire Gx100</p>	<p>4-Spores ovoïdes extracellulaires Gx100</p>

## RESULTATS & DISCUSSION



**Figure 24** : Différentes formes de colonisation naturelle MA chez le *Vigna angularis* (RAHEM,2026).

## RESULTATS & DISCUSSION

---

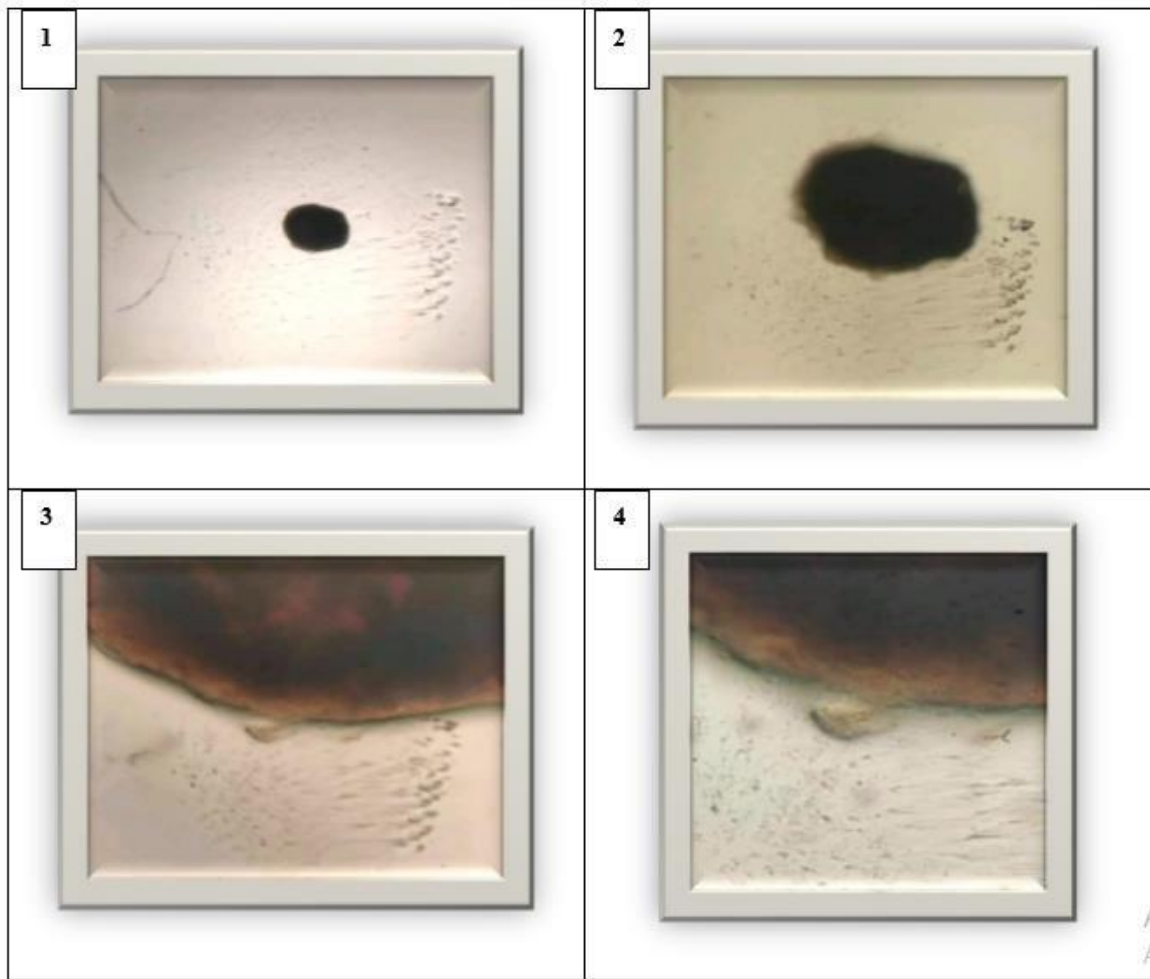
### 1.3. Diversité sporale

Pour aboutir notre objectif, il nous était nécessaire et indispensable d'extraire et d'essayer d'identifier des spores rencontrées dans le sol de la station d'étude. Comme l'affirment **Brundrett et Abbott (2002)**, la plupart de nos connaissances sur les populations de champignons proviennent des observations des spores, celle-ci étant relativement faciles à séparer du sol, elles sont utilisées pour identifier les espèces fongiques (**Brundrett et Abbott, 2002**).

Les différentes spores de CMA ont été extraites grâce à la méthode de tamisage humide. Après cela, nous avons employé le manuel de **Schenck et Perez (1990)** et le site web (**Blaszkowski, 2006**) pour tenter de les identifier. L'identification morphologique des spores reste toujours délicate et crée de grands problèmes taxonomiques. Elle nécessite aussi des moyens d'observation microscopique de plus en plus perfectionnées. C'est pourquoi nous avons été contraints de nous arrêter au rang du genre.

L'observation des différents tamisats du sol a permis de déceler une abondance et une diversité sporale notable pour un sol inondé comme celui d'El Kala (**voir figures correspondantes de 25 à 28**).

## RESULTATS & DISCUSSION



**Figure 25 :** Présentation du morphotype1 (RAHEM,2026).

(1: Spore entière Gx100, 2: Spore entière Gx400,

3: Hyphe d'attache Gx400, 4: Paroi de la spore Gx400)

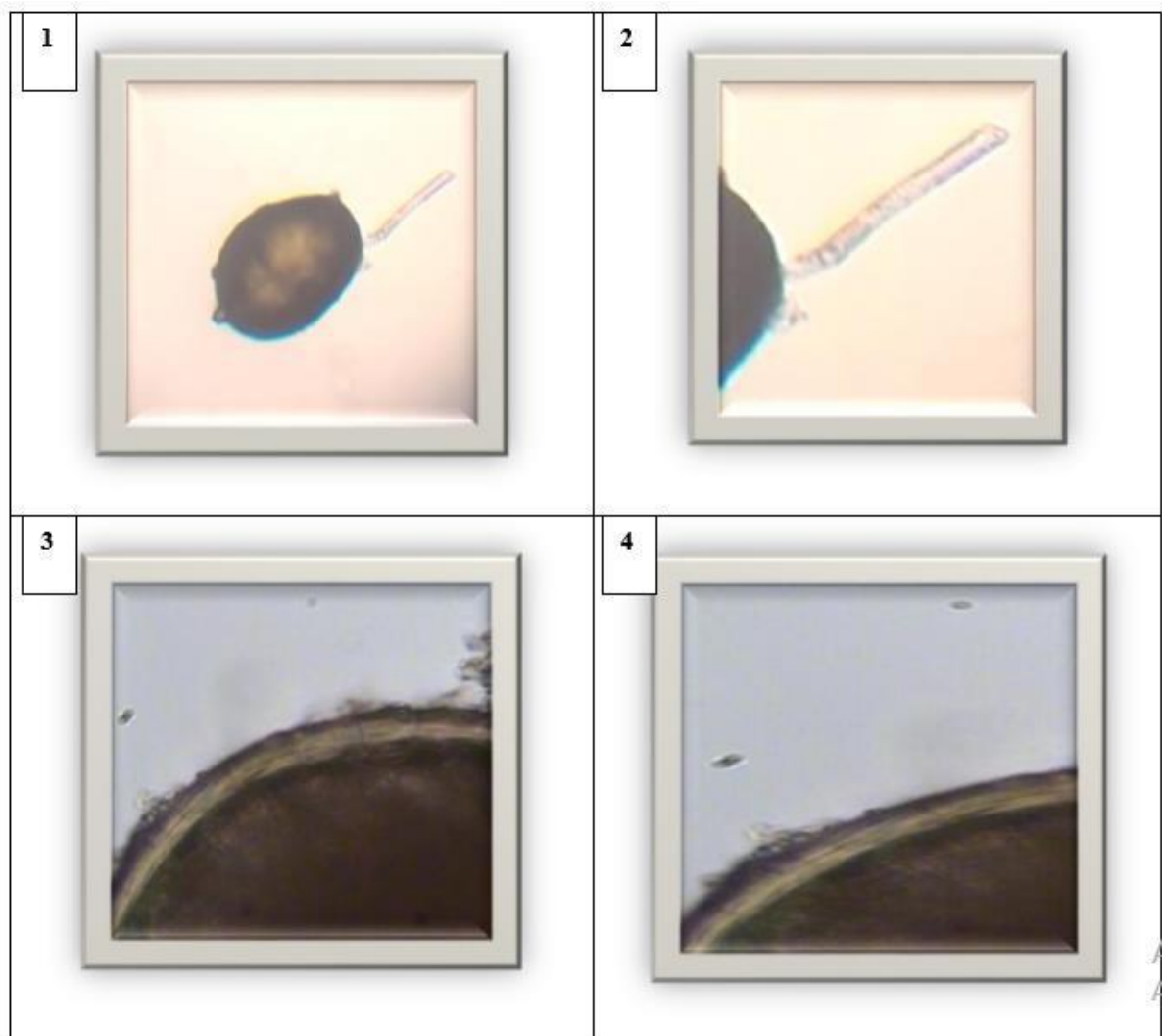
Spore de forme sphérique, de 110 $\mu$ m de diamètre, de couleur 15% Bleu /15 % Mauve /10% Jaune / 60% Noir dont la paroi présentant trois couches réagissant au Melzer.

L'hyphe suspenseur en forme mamelon, de couleur jaune incrusté de noir et mauve.

Sa paroi formée d'une couche discontinue.

Vu la difficulté rencontrés dans l'identification de cette espèce appartenant au genre *Glomus*. Nous la nommons *Glomus sp1*.

## RESULTATS & DISCUSSION



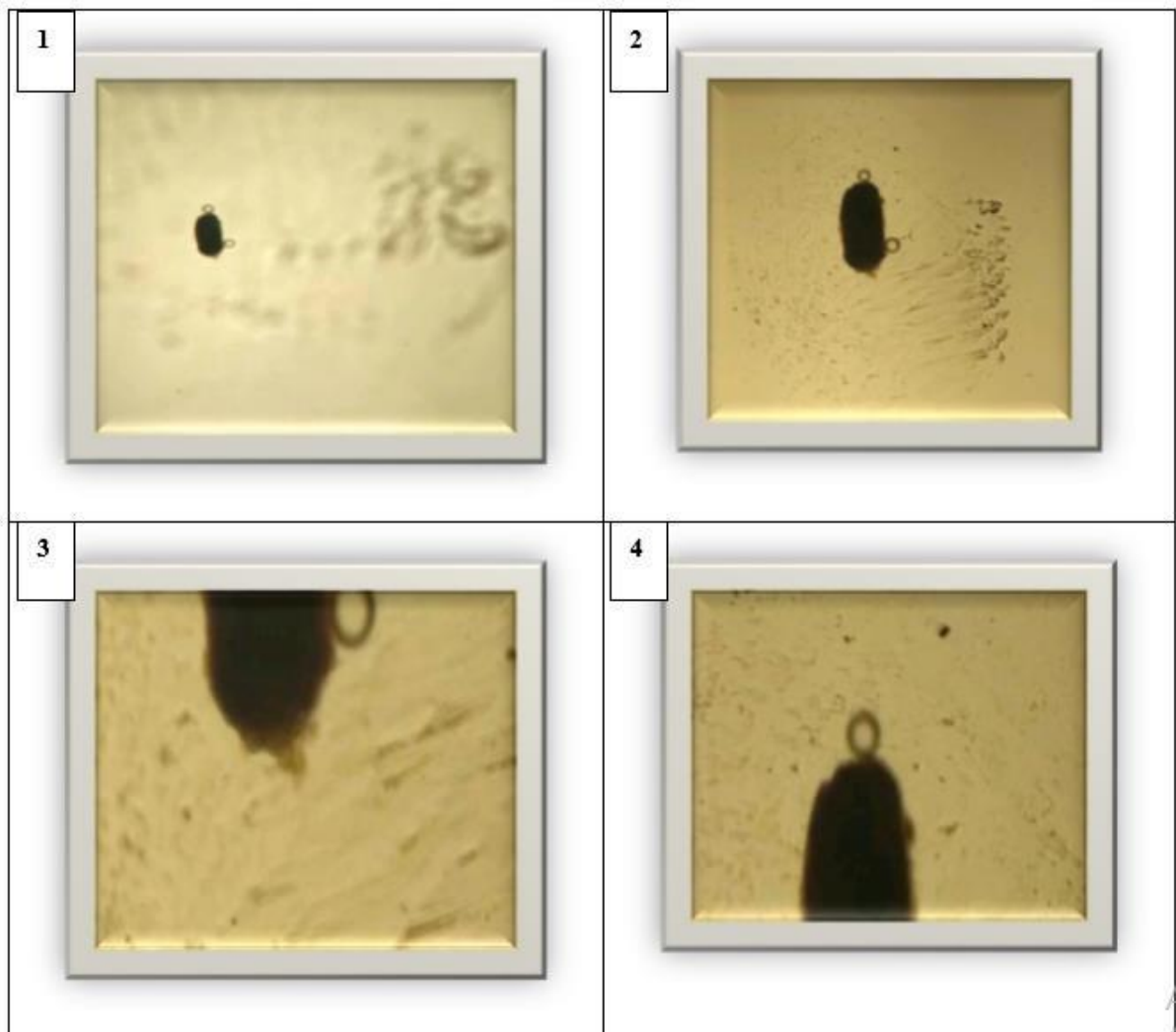
**Figure 26:** Présentation du morphotype 2 (RAHEM,2026).  
(1: Spore entière Gx100, 2: Spore entière Gx400,  
3: Paroi de la spore Gx100, 4: Paroi de la spore Gx100)

Spore de forme ovoïde, de 220 $\mu$ m de diamètre, de couleur 10% Bleu / 40% Mauve / 00 % jaune / 50 % Noir dont la paroi présentant trois couches réagissant au Melzer.

L'hyphe suspenseur en forme de bâtonnet, de couleur mauve et bleu. Sa paroi formée de deux couches continues.

D'après la description de **Schenck et Perez (1986)** et celle de **Blaszkowski (2006)**, nous estimons qu'il s'agirait de *Glomus* sp2.

## RESULTATS & DISCUSSION



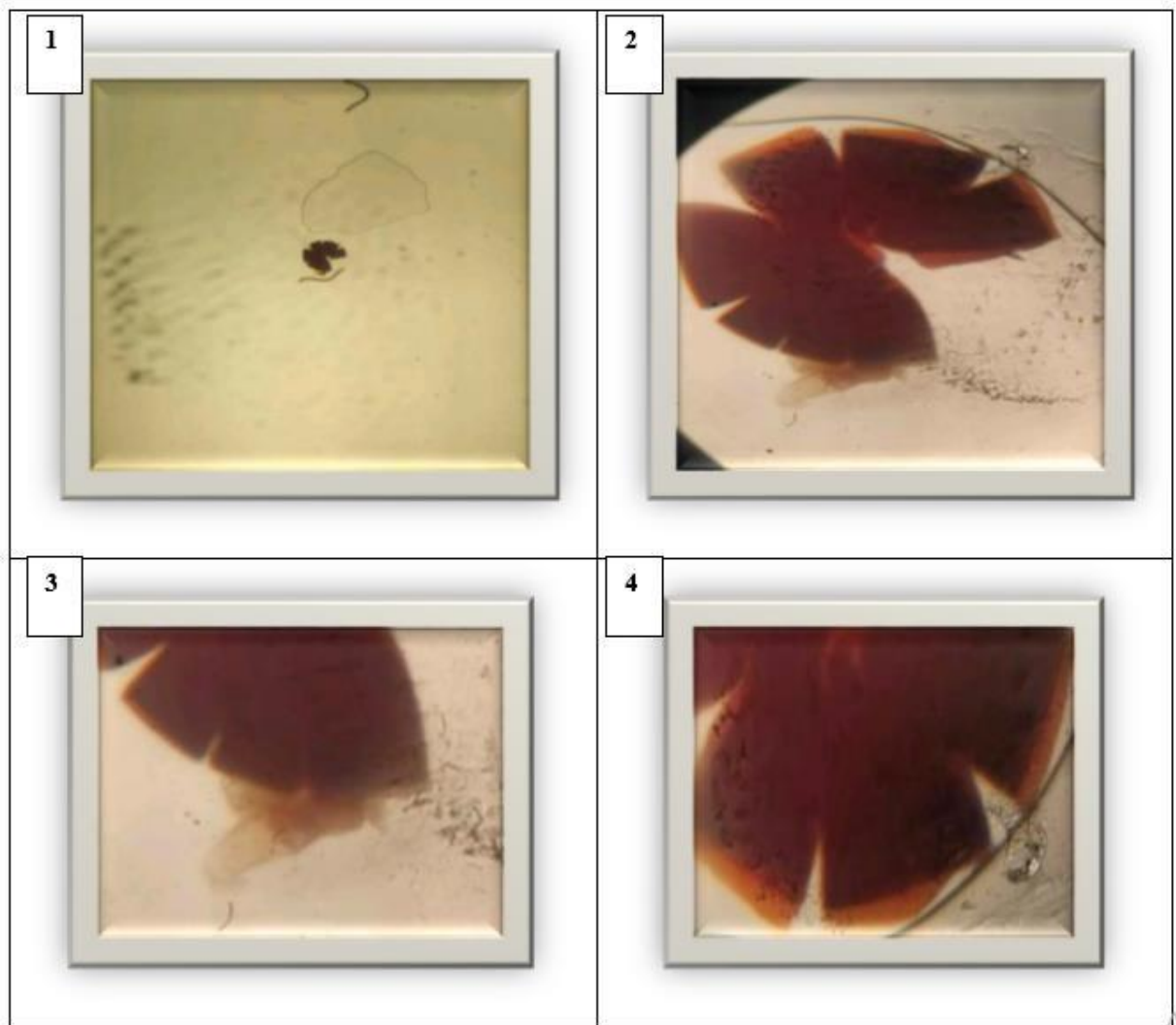
**Figure 27** : Présentation du morphotype 3 (RAHEM,2026).  
(1: Spore entière Gx100, 2: Spore entière Gx400,  
3: Hyphe d'attache Gx100, 4: Paroi de la spore Gx100)

Spore de forme ovoïde, de 120 $\mu$ m de diamètre, de couleur 5% Bleu / 45% Mauve / 00 % jaune / 50 % Noir dont la paroi présentant trois couches réagissant au Melzer.

L'hyphe suspenseur en forme irrégulière, de couleur jaune, mauve et bleu. Sa paroi formée de deux couches continues.

D'après la description de **Schenck et Perez (1986)** et celle de **Blaszkowski (2006)**, nous estimons qu'il s'agirait de *Glomus aggregatum*.

## RESULTATS & DISCUSSION



**Figure 28** : Présentation du morphotype 4 (*Glomus mosseae*) (**1** : Spore entière Gx100, **2** : Spore entière Gx400, **3** : Hyphe d'attache Gx400, **4** : Paroi de la spore Gx400)

Spore de forme sphérique à subsphérique, de 100 à 110  $\mu\text{m}$  de diamètre, de couleur 10% Bleu/ 80% Mauve/ 7% jaune / 3% noir dont la paroi présentant trois couches qui ne réagissent pas avec le réactif de Melzer.

L'hyphe suspenseur en forme allongé avec une queue en forme de faucille et cloisonné, de couleur mauve incrusté de bleu et de jaune. Sa paroi formée d'une à trois couches est continue. D'après la description de **Schenck et Perez (1986)** et celle de **Blaszkowski (2006)**, nous estimons qu'il s'agit de *Glomus mosseae*.

## RESULTATS & DISCUSSION

---

### 2. Discussion

Les résultats obtenus indiquent que la colonisation par les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) est particulièrement élevée au cours de la saison printanière, période caractérisée par une forte activité végétative. Cette intensité de colonisation souligne le rôle majeur des endomycorhizes, en particulier des arbuscules, considérés comme les principaux sites d'échanges fonctionnels entre le champignon symbiotique et les racines de la plante hôte durant le cycle de développement végétatif.

Les variations saisonnières constituent des facteurs environnementaux déterminants qui influencent la physiologie des plantes hôtes et, par conséquent, les interactions symbiotiques mycorhiziennes (**Giovannetti, 1985**). En effet, l'accroissement de l'activité photosynthétique observé durant la phase de croissance printanière favorise un transfert plus important de composés carbonés vers le système racinaire, stimulant ainsi le développement des CMA (**Birhane et al., 2012**).

Les résultats obtenus dans cette étude concordent avec ceux rapportés par **Brundrett et Abbott (1995)** ainsi que par **Merryweather et Fitter (1998b)**, lesquels ont mis en évidence l'existence de fluctuations saisonnières de l'activité fongique dans les sols, évaluées notamment à travers les taux de colonisation racinaire.

Par ailleurs, la colonisation mycorhizienne observée semble également favorisée par les conditions climatiques humides caractéristiques de la région d'El Kala. Plusieurs études ont montré que les contextes de sécheresse ou d'aridité exercent un effet défavorable sur le développement des mycorhizes. Bien que ces conditions ne suppriment pas totalement leur croissance, elles induisent une augmentation de la dormance racinaire ainsi qu'une diminution de l'élongation des racines principales (**Feil et al., 1988**). À l'inverse, les milieux humides favorisent généralement le développement d'un système racinaire plus étendu comparativement aux environnements arides (**Feil et al., 1988 ; Madhava Rao, 2006**). Cette expansion racinaire augmente les probabilités d'interaction avec les spores fongiques présentes dans le sol, ce qui favorise une intensification de la colonisation mycorhizienne (**Zangaro et al., 2013**).

En outre, plusieurs paramètres édaphiques interviennent dans la dynamique et l'organisation des communautés de CMA, notamment la texture du sol, la teneur en matière organique, le

## RESULTATS & DISCUSSION

---

pH ainsi que la disponibilité des macro- et micronutriments (**Mohammad et al., 2003**). La texture du sol, à travers la distribution granulométrique des particules, influence différentes propriétés physiques telles que la porosité, la capacité de rétention hydrique et la capacité d'échange cationique, déterminant ainsi les conditions favorables à l'installation et au développement des CMA (**Chaudhary et al., 2008**).

Le pH du sol, qui traduit l'acidité active de la solution du sol, constitue également un facteur essentiel dans le maintien de la structure et du fonctionnement biologique des sols. Dans le cadre de cette étude, le sol présente un pH légèrement basique, condition reconnue comme favorable au développement des champignons mycorhiziens. Bien que certaines espèces de CMA soient capables de s'adapter à des conditions extrêmes de pH (**Abbott et Robson, 1991**), des valeurs fortement acides peuvent restreindre, voire inhiber complètement, la colonisation endomycorhizienne lorsque le pH devient inférieur à 5 (**Abbott et Robson, 1985 ; Wang et al., 1993**). En outre, le pH agit indirectement sur la composition des communautés fongiques en modifiant la disponibilité des éléments nutritifs et l'activité physiologique des plantes (**Chaudhary et al., 2008**).

Selon **Dommergues et Mangenot (1970)**, les sols légèrement basiques offrent des conditions particulièrement propices à l'établissement de la symbiose mycorhizienne, ce qui est en accord avec les caractéristiques du sol étudié.

Enfin, plusieurs paramètres sont susceptibles d'influencer l'évaluation du nombre de propagules de CMA, notamment les conditions expérimentales, la température et la période de prélèvement, en raison de leurs effets sur la croissance des racines, le développement des propagules fongiques et leur capacité d'interception (**Wilson et Trinick, 1983**). Il est également reconnu que plusieurs espèces de champignons mycorhiziens peuvent coexister simultanément au sein du système racinaire d'une même plante (**Abbott et Robson, 1978 ; Abbott et Robson, 1981 ; Merryweather et Fitter, 1998a**). Des observations indirectes suggèrent que ces espèces remplissent des fonctions écologiques complémentaires et différenciées au sein des écosystèmes édaphiques (**Merryweather et Fitter, 1998b**).

*Conclusion*

# CONCLUSION

---

## CONCLUSION

Le présent travail a permis de mettre en évidence les caractéristiques biologiques et écologiques de la symbiose endomycorhizienne à arbuscules et vésicules associée à *Vigna angularis* au niveau de la station d'étude d'El Kala. L'objectif principal consistait à évaluer la présence et la distribution des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) au sein du sol et des racines de la plante hôte.

Les résultats obtenus ont permis de dégager plusieurs observations majeures. Dans un premier temps, l'analyse physico-chimique du sol a montré que le substrat étudié présente une texture limono-argileuse ainsi qu'un pH légèrement basique avoisinant 8. Ces propriétés édaphiques apparaissent favorables au développement des champignons mycorhiziens arbusculaires et à l'établissement des interactions symbiotiques avec les racines des plantes.

Dans un second temps, l'observation microscopique des racines naturelles de *Vigna angularis*, après coloration au bleu Trypan, a mis en évidence une colonisation effective par les CMA. Cette colonisation s'est manifestée par la présence de plusieurs structures fongiques caractéristiques, notamment des hyphes intra- et intercellulaires, des appressoria ainsi que des spores localisées aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des tissus racinaires. Ces observations confirment l'existence d'une symbiose fonctionnelle entre les CMA et la plante hôte dans les conditions naturelles de la station d'El Kala. Le niveau élevé de mycorhization observé souligne le rôle essentiel des CMA dans l'amélioration de la croissance végétale, l'optimisation de l'absorption des éléments minéraux ainsi que le renforcement de la tolérance des plantes aux contraintes environnementales.

Par ailleurs, l'étude de la diversité sporale réalisée selon la méthode du tamisage humide a révélé une diversité notable de morphotypes appartenant majoritairement au genre *Glomus*. Quatre morphotypes ont été distingués, incluant *Glomus aggregatum* et *Glomus mosseae*, ainsi que deux autres morphotypes provisoirement désignés sous les appellations *Glomus* sp1 et *Glomus* sp2. Cette diversité observée met en évidence l'importance écologique des CMA dans les sols humides caractéristiques de la région d'El Kala.

Les résultats montrent également que plusieurs facteurs environnementaux, notamment le climat humide, la texture du sol et le pH, exercent une influence significative sur la dynamique de la symbiose mycorhizienne. La période printanière apparaît comme la phase la

## CONCLUSION

---

plus favorable au développement des CMA, en raison de l'intensification des processus physiologiques et de l'activité photosynthétique des plantes hôtes.

Ainsi, les champignons mycorhiziens arbusculaires occupent une place essentielle dans l'amélioration de la nutrition hydrominérale des plantes, l'augmentation du volume d'exploration du système racinaire, le renforcement de la tolérance au stress hydrique ainsi que la protection contre certains agents pathogènes.

Dans cette perspective, ce travail pourrait être approfondi par des recherches complémentaires portant sur l'identification moléculaire des espèces fongiques recensées, l'évaluation de leur efficacité symbiotique et la sélection des souches présentant les meilleures performances pour des programmes d'inoculation contrôlée. La mise en place d'une mycothèque locale destinée à la conservation de ces souches constituerait également une étape stratégique pour leur valorisation future dans les domaines agricole et forestier.

En définitive, l'exploitation raisonnée des champignons mycorhiziens arbusculaires représente une stratégie biologique prometteuse pour améliorer durablement la productivité végétale tout en contribuant au maintien de la fertilité et de la qualité écologique des sols.

*Références*

*Bibliographiques*

## Références bibliographiques

### A

- **Akhtar MS, Siddiqui ZA (2008).** Arbuscular mycorrhizal fungi as potential bioprotectants against plant pathogens. In: Siddiqui ZA, Akhtar MS et Futai K. (eds) Mycorrhizae: Sustainable agriculture and forestry. Springer Netherlands, pp: 61–97.
- **Anjali et Bhardwaj, 2020.** Morphological Characterization and Diversity Analysis of Adzukibean [*Vigna angularis* (Willd.) Ohwi and Ohashi] Germplasm

### B

- **Baohanta R, (2011).** Facilitation de la régénération d'*Uapaca bojeri* par la gestion des communautés de champignons mycorrhiziens associées aux espèces pionnières de la zone dégradée de la forêt sclérophylle d'Arivonimamo.
- **Balergue C, (2012)** [cité 12 nov 2016].. Régulation de la symbiose endomycorhizienne par le phosphate [Internet]. Université Paul Sabatier-Toulouse III; Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00796089/>
- **Bonfante P., Genre A. 2010.** Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature communications* 1: 48p.
- **Brundrett MC (1991).** Mycorrhizas in natural ecosystems. *Adv Ecol Res* 21: 171–213.

### C

- **Chiffot V (2008).** Étude moléculaire des champignons mycorrhiziens arbusculaires dans un système agrisylvicole [Internet]. 2008 [cité 9 juin 2017]. Disponible sur <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/25687/25687.html>
- **Cho et al., 2022.** Investigation of Root Morphological and Architectural Traits in Adzuki Bean (*Vigna angularis*) Cultivars Using Imagery Data

## D

- **Dobignard, A. & Chatelain, C. (2010-2013).** Index synonymique de la flore d'Afrique du Nord (5 vol.). C.J.B.G, Genève.
- **Daniell TJ, Husband R, Fitter AH (2001), Young JPW.** Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi colonising arable crops. *FEMS Microbiol Ecol.*;36(2-3):203-209
- **Durion G, (1993).** *Écologie des champignons* [Internet] 1 eds. Paris. MASSON, [cité 2 mai 2017]. 207 p. Disponible sur [http://www.unitheque.com/Livre/elsevier - masson/Collection d ecologie/ecologie des champignons-6543.html](http://www.unitheque.com/Livre/elsevier-masson/Collection_d_ecologie/ecologie_des_champignons-6543.html)
- **Driai, S. (2016).** Impact des polluants d'origine industrielle sur le développement des champignons mycorrhiziens à arbuscules, sur leur diversité et sur la viabilité microbienne des sols des agroécosystèmes du Nord-est algérien. Thèse de Doctorat en Biologie végétale et environnement, Université Annaba, 137p.
- **Dar, G.H. (2010).** *Soil microbiology and biochemistry.* New India Publishing
- **Dong, W. et al. (2024).** *Flowering-associated gene expression and metabolic characteristics in adzuki bean.*

## F

- **Frank, B. (1885).** Über die auf Wurzelsymbiose beruhende Ernährung gewisser Bäume durch unterirdische Pilze.
- **Fortin JA., Plenchette C. & Piche, Y. (2008).** *Les mycorhizes la nouvelle révolution verte,* édition Multi Mondes.

# G

- **Gobat, J.M ; Aragno, M. & Matthey, W. (2003).** Le sol vivant, 2e Edition. Presses Polytechniques Universitaires Romandes, Lausanne. 568 p.
- **Gianinazzi, S., Gollotte, A., Binet, M.N., van Tuinen, D., Redecker, D. & Wipf, D. (2010).** Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20(8), 519-530.
- **Garbaye J. (2013).** La symbiose mycorhizienne: Une association entre les plantes et les champignons. Versailles: Editions Quae; 284 p.
- **Guisso T (2001)** , Bå A, Planchette C, Guinko S, Duponnois R. Effets des mycorhizes à arbuscules sur la tolérance à un stress hydrique de quatre arbres fruitiers *Balanites aegyptiaca* (L) Del, *Parkia biglobosa* (Jacq) Benth., *Tamarindus indica* L et *Zizyphus mauritiana* Lam 010025748.pdf. [cité 21 nov 2016]:12(2). Disponible sur [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_7/b\\_fdi\\_59\\_60/010025748.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_59_60/010025748.pdf)
- **Garg N et Chandel S (2010).** Arbuscular mycorrhizal networks: process and functions. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30: 581–599.
- **Garbaye, J. (2013).** La symbiose mycorhizienne: une association entre les plantes et les champignons. Editions Quae.
- **GOTO BT, SILVA GA, ASSIS D, SILVA DK, SOUZA RG, FERREIRA AC and OEHLF (2012)** Intraornatosporaceae (Gigasporales), a new family with two new genera and two new species. *Mycotaxon*, 119(1), 117-132.
- **Gavériaux, J.P. (2012-2).** Les Glomeromycota- Mycorhizes V AM et Geosiphon pyriformis (Kützing) Wetzstein, 92, PO 1-17.
- **Gianinazzi-Pearson, V. (1994).** Plant cell responses to arbuscular mycorrhizal fungi: getting to the roots of the symbiosis. *The Plant Cell*, 8(10), 1871.
- **Guo, X., & Gong, J. (2014).** Differential effects of abiotic factors and host plant traits on diversity and community composition of root-colonizing arbuscular mycorrhizal fungi in a salt-stressed ecosystem. *Mycorrhiza*, 24(2), 79-94.

## ***H***

- **Helgason T, Daniell TJ, Husband R (1998)**, Fitter AH, Young JPW Ploughing up the wood-wide web? *Nature.*;394(6692):431-431.
- **Hallé, F. (2008)**. Aux origines des plantes, tome 1: Des plantes anciennes à la botanique du XXIe siècle. Fayard.
- **Harley JL (1987)**, The significance of mycorrhiza. *Micological Research* 92 :129-139.; Koske et *al.*, 1992

## ***J***

- **Janos, D.P. (1980)**. Mycorrhizae influence tropical succession. *Biotropica*, 12 : 56-64.
- **Johansson JF, Paul LR, Finlay RD, 2004**. Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiol Ecol* avr;48(1):1-13.

## ***K***

- **Kang et al., 2024**. Chromosome genome assembly and annotation of Adzuki Bean (*Vigna angularis*)

## ***L***

- **Luttge, U., Kluge, M., Bauer, G. (2002).** Botanique, 3ème Edition, Lavoisier, Paris, 571P.
- **Lixia et al., 2022.** Genetic Diversity and Environmental Influence on Yield and Yield-Related Traits of Adzuki Bean (*Vigna angularis* L.)
- **Lixia et al., 2019.** Adzuki bean (*vigna angularis* (willd.) ohwi & ohashi) breeding
- **Lim, 2011.** *vigna angularis*
- **Lumpkin T, Konovsky J, Larson K, et al., 2016.** « Nouvelles cultures spécialisées potentielles d'Asie : haricot azuki, soja edamame et astragale » . Consulté le 9 novembre 2016 .

## ***M***

- **Mittermeier, R.A., Gil, P.R., Hoffmann, M., Pilgrim, J., T Brooks, C.M., Lamoreux, J. & Da Fonseca, G.A.B. (2004).** Hotspots Revisited: Earth's Biologically Wealthiest and most Threatened Ecosystems. CEMEX, México DF, 99-103.
- **Myers, N. (2003).** Biodiversity hotspots revisited. *BioScience* 53(10), 916-917
- **Muchovej RM (2004).** Importance of mycorrhizae for agricultural crops. SS-AGR-170, Agronomy Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- **Miller, R.M., Jastrow, J.D. & Reinhardt, D.R. (1995).** External hyphal production of vesiculararbuscular mycorrhizal fungi in pasture and tallgrass prairie communities. *Oecologia*, 103(1), 17-23.
- **Moussain D (1991),** Ectomycorhization et tolerance des arbres à la sécheresse. Dans: Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides. Groupe d'Etude de l'Arbre, Ed. John Libbey Eurotext, Paris, pp. 167-174.

## N

- **Nultsch, W. (1998).** Botanique Générale. Edition De Boeck Supérieur, 602 p.

## O

- **Oehl F, Sieverding E, Ineichen K, Mader P, Boller T, Wiemken A. (2003).** Impact of Land Use Intensity on the Species Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Agroecosystems of Central Europe. Appl Environ Microbiol. 1 mai 2003;69(5):2816-24.
- **Oehl F, Sieverding E, Ineichen K, Ris E-A, Boller T, Wiemken A (2004).** Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi at different soil depths in extensively and intensively managed agroecosystems. New Phytol. 9 déc 2004;165(1):273-83.
- **Ohwi, J. & Ohashi, H. (1969).** Taxonomic revision of *Vigna angularis*.

## Q

- **Quézel, P. (1995).** La flore du bassin méditerranéen : origine, mise en place, endémisme. Ecologia mediterranea, 21(1), 19-39.

## R

- **Ruiz PO, Davey CB (2003).** Efectos del manejo de suelos de laderas en hongos formadores de micortizas arbusculares y en bacterias fijadoras de nitrógeno en ultisoles sujetos a erosión pluvial en la amazonia peruana. Ecol Apl.;2(1):87-92.

- **Ruiz-Sánchez M, Aroca R, Muñoz Y, Polón R, Ruiz-Lozano JM (2010).** The arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances the photosynthetic efficiency and the antioxidative response of rice plants subjected to drought stress. *J Plant Physiol.* juill:167(11):862-9.
- **Reyes Jaramillo, (2011).** I La micorriza arbuscular (MA) centro de la rizósfera: comunidad microbiológica dinámica del suelo. *Rev Contactos.*;81-17-23.
- **Rambelli A, (1973).** "The rhizosphere of mycorrhizae," in *Ectomycorrhizae: Their Ecology and Physiology.* G C Marks T T Kozlowski.;299-343.
- **Requena, N., Jeffries, P. & Barea, J.M. (1996).** Assessment of natural mycorrhizal potential in a desertified semiarid ecosystem. *Applied and environmental microbiology*, 62(3), 842-847.
- **Redecker, D., Raab, P., Oehl, F., Camacho, F. J. & Courtecuisse, R. (2007).** A novel clade of sporocarpforming species of glomeromycotan fungi in the Diversisporales lineage. *Mycological Progress*, 6(1), 35-44.

## S

- **Smith SE, Read DJ (1997),** *Mycorrhizal symbiosis.* Second edition. Academic Press ; Harcourt Brace and Compan y Publishers, 605p.
- **Smith, S.E. & Read, D.J. (2008).** The symbionts forming arbuscular mycorrhizas. *Mycorrhizal symbiosis*, 2, 13-41.
- **Sanon A (2005).** Rôle des champignons mycorrhiziens à arbuscules dans les mécanismes régissant la co-existence entre espèces végétales. [cité 10 mai 2017]; Disponible sur [http://horizon documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers13-07/010040027.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers13-07/010040027.pdf)
- **Selvaraj T, Chelleppan P (2006).** Arbuscular mycorrhizae: a diverse personality. *Central Eur. J. Agr* 7: 349–358.
- **Smith, S.E. & Read, D.J. (2008).** The symbionts forming arbuscular mycorrhizas. *Mycorrhizal symbiosis*, 2, 13-41.
- **Spatafora, J.W., Chang, Y., Benny, G.L., Lazarus, K., Smith, M. E., Berbee, M.L., ... & Stajich, J.E. (2016).** A phylum-level phylogenetic classification of zygomycete fungi based on genome-scale data. *Mycologia*, 108(5), 1028-1046

- **Sahraoui, A. L. (2013).** La Mycorhize à arbuscules : quels bénéfices pour l'homme et son environnement dans son contexte de développement durable?. Synthèse : Revue des Sciences et de la Technologie, 26, 06-19
- **Scotland, R.W. & Wortley, A.H. (2003).** How many species of seed plants are there? Taxon, 52: 101-104.
- **SCHÜBLER, A., Schwarzott, D., & Walker, C. (2001).** A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. Mycological research, 105(12), 1413-1421
- **Sindhu et Manickavasagan, 2020.** The adzuki bean (*Vigna angularis*)
- **ScienceDirect (2017).** *Vigna angularis* – Overview.

## ***T***

- **Turk MA, Assaf TA, Hammed KM, Al-Tawaha AM (2008).** Significance of mycorrhizae. World J. Agric. Sci 2: 16–20.
- **Trappe JM, Molina R (1986).** Taxonomy and genetics of mycorrhizal fungi: their interactions and relevance. In 'Physiological and genetical aspects of mycorrhizae.' (Eds V Gianinazzi-Pearson and S Gianinazzi). (INRA: Paris). pp: 133–146.
- **Takahashi, 2024.** Histoire taxonomique, morphologie, évolution, pool génétique et tolérance au stress du haricot azuki et de ses ressources génétiques sauvages apparentées du genre *Vigna*
- **Tomooka et al., 2002 cité par Takahashi, 2024.** Taxonomic history, morphology, evolution, gene pool and stress tolerances of azuki bean and its related wild *Vigna* genetic resources
- **Takahashi, Y. et al. (2024).** *Taxonomic history, morphology, evolution, gene pool and stress tolerances of azuki bean.*

## V

- **van der Heijden et al., 2015 in Zidelkheir R & Gatcha N, 2024.-** Contribution à l'étude de la mycorhization chez quelques plantes steppiques de la région de Laghouat. P2
- **Véla, E. & Benhouhou, S. (2007).** Assessment of a new hotspot for plant biodiversity in the Mediterranean basin (north Africa). *Comptes rendus biologiques*, 330(8), 589-605.
- **Vaughan et al., 2007.** Genome Dissection of Traits Related to Domestication in Azuki Bean (*Vigna angularis*) and Comparison with other Warm-season Legumes

## W

- **Willer et al., 2020 in Ait abdesselam S et Ladraa H, 2022-** Contribution à l'étude des mycorhizes de la région de Constantine et méthodes de leurs conservation. p1
- **WRIGHT, S. F. (2005).** Management of arbuscular mycorrhizal fungi. *Roots and soil management: interactions between roots and the soil*, 48, 181-197.

## Y

- **Yang, K. et al. (2015).** *Genome sequencing of adzuki bean (Vigna angularis)*.
- **Yamaguchi, H. et al. (1992).** Wild ancestor studies of azuki bean.

## **Sites web**

**Site 01:** <https://www.editions.ird.fr/produit/64/9782709919487/des-champignons-symbiotiques-contre-la-desertification>

**Site 02:** <https://www.nparks.gov.sg/florafaunaweb/flora/5/8/5851>

**Site 03:** <https://www.vignevin-occitanie.com/fondamentaux/racines-de-la-vigne/>

**Site 04:** <https://www.ebay.fr/itm/292951392605>

**Site 05:** <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/vigna-angularis>

**Site 06 :** [https://plants.ensembl.org/Vigna\\_angularis](https://plants.ensembl.org/Vigna_angularis)

# Annexes

## Annexe 1

### Le Bleu Trypan

<u>Ingrédient</u>	<u>Quantité</u>
Bleu Trypan	0,1g
Acide lactique	100 ml
Glycérol	100 ml
Eau distillée	100 ml

## Annexe 2

### La composition se Melzer

<u>Ingrédient</u>	<u>Quantité</u>
Hydrate de chloral	100g
Eau distillée	100ml
Iode	1,5g
Iode de potassium	5,0g