

# République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMERRI De Tizi-Ouzou

Faculté des Sciences Biologiques et Sciences Agronomiques

Département des Sciences Biologiques



## Mémoire de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Biodiversité et physiologie  
végétale

**Thème:**

Contribution à l'étude des mycorhizes du cedre de  
l'Atlas « *Cedrus atlantica manetti* » dans la région de  
Tigounatine

Proposé et encadré par :

**Mme. HARCHAOUI BOURENINE.C**

Présenté par :

**AMIRAT Saloua**

**DJEDID Dana**

Devant le jury d'examen composé de :

**Présidente : Mme. TOUDERT TALEB.K**

**Examinatrice : Mme. MEZAOUR.N**



Nous remercions ALLAH le Tout Puissant de nous avoir donné le savoir, la volonté et la patience pour arriver à la fin de notre parcours d'études. Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à notre encadrante **Madame BOURENINE HARCHAOUI.C** pour sa bienveillance exceptionnelle et son encadrement attentif, sa disponibilité constante et ses conseils précieux, sa patience et son suivi rigoureux tout au long de ce travail. Son investissement et son soutien ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à l'égard de membre de jury **Mme TALEB.K, Mme MEZAOUR.N** pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Nous remercions également Mesdames **KADI.L** et **Mme MEZAOUR. N**, pour leur aide et accompagnement au laboratoire. Leur expertise a grandement contribué au bon déroulement de notre étude.

Un grand merci pour tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce modeste travail.

## **Saloua**

A ma chère maman  
A moi  
Je dédie ce travail

## **Dana**

Je dédie ce mémoire, fruit de plusieurs mois d'efforts en tout premier à ma grand-mère, celle qui a tout fait pour que je devienne ce que je suis aujourd'hui.

Par son amour, ses sacrifices et sa force, elle a été ma première source d'inspiration.

Que ce travail soit le reflet de toute ma gratitude et de tout mon amour.

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices silencieux, et leur soutien indéfectible.

À ma famille, pour leurs encouragements constants et leur présence bienveillante. À mes enseignants, pour m'avoir transmis leur savoir avec patience et passion.

À mes ami(e)s, pour leur soutien moral, leurs sourires et leurs mots qui ont su m'apaiser dans les moments de doute.

Et à moi-même, pour n'avoir jamais abandonné malgré les difficultés.

Que ce travail soit le témoin de ma reconnaissance envers toutes celles et ceux qui ont cru en moi.

<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I: Généralité sur le Cèdre de l'Atlas.....</b>	<b>3</b>
Cedrus atlantica.....	4
1 Systématique du cèdre.....	4
2 Description et caractéristiques botanique du cèdre.....	5
2.1 Le port.....	5
2.3 Feuilles (aiguilles).....	7
2.4 Rameaux.....	7
2.5 Système racinaire.....	8
2.6 Organes reproducteurs.....	8
3 Les chatons mâles.....	8
3.1 Les inflorescences femelles.....	9
4 Répartition géographique du cèdre.....	10
4.1 Dans le monde.....	10
4.2 En Algérie.....	11
5 Caractéristique et exigences écologiques du cèdre.....	12
5.1 Température.....	12
5.2 Altitude.....	13
5.3 Précipitations.....	13
6 Importance du cèdre.....	14
6.1 Importance écologique.....	14
6.2 Importance économique.....	14
7 Statut mycorhizien de Cedrus atlantica.....	15
<b>II Généralité sur les mycorhizes.....</b>	<b>17</b>
1 Définition de la symbiose.....	17
2 Définition de la mycorhize.....	17
3 Les différents types de mycorhizes.....	18
3.1 Les ectomycorhizes.....	18
3.1.1 Distributions morphologiques des ectomycorhizes.....	19
3.1.2 La structure anatomique des ectomycorhizes.....	20
3.2 Les endomycorhizes.....	21
3.2.1 Les mychorhizes arbusculaires.....	21
3.2.2 Les mychorhizes éricoides.....	22
3.2.3 Les mychorhizes arbutoïdes et monotropoides.....	22
3.2.4 Les mychorhizes orchidées.....	22
3.3 Les ectendomycorhizes.....	23
4 Ecologie des mycorhizes.....	23

4.1 Les facteurs climatiques.....	23
4.2 Les facteurs édaphiques.....	23
5 Les phases de l'infection mycorhizienne.....	24
5.1 Phase asymbiotique.....	24
5.2 Phase pré-symbiotique.....	24
5.3 Phase symbiotique et colonisation des racines de l'hôte.....	25
5.4. L'infection chez les ectomycorhizes.....	26
5.5. L'infection chez endomycorhizes.....	26
6 L'importance de la relation symbiotique mycorhizienne.....	27
6.1 Pour la plante.....	27
6.2 Pour le champignon.....	28
<b>III-Matériel et méthodes.....</b>	<b>29</b>
1 Présentation de station d'étude :.....	29
Présentation de station de Tigounatine.....	29
2 Le matériel végétal.....	30
3 Etude des racines mycorhizées.....	31
3.1 Préparation des échantillons :.....	31
3.2 Etudes des ectomycorhizes.....	31
3.2.1 Etude morphologique.....	31
3.2.2 Etudes anatomique.....	31
3.3 Etudes des endomycorhizes.....	32
<b>Résultats.....</b>	<b>33</b>
1 Observations des ectomycorhizes du cèdre de l'Atlas.....	33
<b>IV Discussion et conclusion.....</b>	<b>48</b>
Discussion.....	48
<b>Diversité morphologique et fonctionnelle des ectomycorhizes.....</b>	<b>48</b>
2 Caractéristiques macroscopiques générales.....	48
3 Caractéristiques microscopiques.....	49
4 Classification selon la diversité morphologique et fonctionnelle des ectomycorhizes.....	49
5 Observation microscopique des structures endomycorhiziennes.....	51
6 Observation des cellules de type à tannins.....	52
<b>Conclusion.....</b>	<b>55</b>

## Liste des Figures

Fig 01 : Arbre de Cèdre de l'Atlas ( <i>Cedrus atlantica</i> ) [source : Wikipédia, 2025]	5
Fig 02: port du cèdre de l'Atlas (khaless, 2022)	6
Fig 03 :écorce du cèdre de l'Atlas (khaless, 2022)	6
Fig 04: feuilles de cèdre de l'Atlas (Krouchi .F , 2010)	7
Figure 05 : Les organes reproducteurs de <i>Cedrus atlantica</i> (source : Fondation Klorane Botanical,).	10
Figure 06 : Répartition géographique du genre <i>Cedrus</i> dans le monde (Derridj, 1990).	11
Figure 07 : localisation de <i>Cedrus atlantica</i> en Algérie (E.Roche; modifié)	12
Figure 08: Principaux types mycorhiziens actuels représentés sur une coupe transversale de la racine (Hallen et Lieutaghi, 2008).	18
Figure 09: Différentes distributions morphologiques des ectomycorhizes (Agerer, 1994 )	20
Figure10 :Carte géologique du Djurdjura (Flandrin, 1952)	30
Figure 11: Aspect morphologique et anatomique de (M01) et (M02)et son rizomorphe observés à la loupe binoculaire (G :40) et au microscope optique(G :400)	35
Figure 12 : Aspect morphologique et anatomique de (M03et M04) et son rizomorphe observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)	36
Figure 13 : Aspect morphologique et anatomique de (M05 et M06) observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)	37
Figure 14 : Aspect morphologique et anatomique de (M07 M08 M10 et M09) et de son rizomorphe observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)	40
Figure 15 : Aspect morphologique et anatomique de (M11 M12 M13) observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)	41
Figure 16 : Aspect morphologique et anatomique de (M16) et (M14 M15) et leurs rizomorphes observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)	43
Figure 17: Aspect morphologique et anatomique de (M17) et M18) observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)	44
Figure 18 : Vésicules observées sous microscope optique au grossissement 400	45
Figure 19 : Hyphes observés sous microscope optique au grossissement 400	46
Figure 20: Cellules tannins observées sous microscope optique au grossissement 400	47

## Liste des abréviations

- **Fig**: Figure
- **M** : Morphotype
- **My** : Mycorhize
- **REM** : Réseau extra matriciel
- **Mf** : manteau fongique
- **CC** : Cylindre central
- **G** : grossissement
- **VO** : vésicule ovale
- **VR** : vésicule ronde
- **Hy** : hyphes
- **Pe** : pelotons
- **Ct** : cellule tanins

# Introduction

Les écosystèmes forestiers méditerranéens en particulier ceux du Maghreb, abritent une diversité végétale remarquable, parmi laquelle le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*). Une espèce endémique des montagnes de l'Atlas en Afrique du Nord, notamment en Algérie et au Maroc (Nezzar-Hocine, 1998).

Cet arbre conférien joue un rôle écologique majeur dans les écosystèmes forestiers de haute altitude, participant à la stabilité des sols, à la régulation hydrique et à la biodiversité forestière (Quézel & Médail, 2003). Le Cèdre suscite un intérêt grandissant pour ses nombreuses qualités forestières et ornementales: faible inflammabilité, rusticité, richesse écologique, bois de qualité supérieure à celle des pins méditerranéens, port remarquable et esthétique, attrait touristique en forêt de plaisance, etc. (Toth, 1980 ; Bariteau et Ferrandes, 1990).

Cependant, cette espèce est menacée par les effets conjugués du changement climatique, de la pression anthropique et des attaques pathogènes (Bentouati & Bariteau, 2006).

Le *Cedrus atlantica*, à l'instar de nombreux conifères, établit des relations symbiotiques avec des champignons du sol, connues sous le nom de mycorhizes. Face aux pressions environnementales croissantes, l'étude des mécanismes naturels de résistance et d'adaptation devient essentielle. Parmi ceux-ci, les interactions mycorhiziennes représentent un axe de recherche prometteur. Les mycorhizes, principalement de type ectomycorhizien chez cette espèce, sont des associations symbiotiques entre les racines des plantes et certains champignons du sol. Elles permettent à l'arbre d'optimiser l'absorption de l'eau et des nutriments essentiels, comme le phosphore et l'azote, tandis que les champignons bénéficient des sucres issus de la photosynthèse de l'arbre (Smith & Read, 2008). Ces symbioses contribuent de manière essentielle à la survie et au développement, croissance du cèdre de l'Atlas, notamment dans des milieux caractérisés par des sols pauvres et une sécheresse accrue liée aux changements climatiques (Duponnois et al, 2011).

L'étude des mycorhizes associées au *Cedrus atlantica* s'avère indispensable, tant pour assurer la préservation durable de ses peuplements naturels que pour optimiser les stratégies de reboisement et de restauration écologique dans les écosystèmes méditerranéens soumis à des contraintes croissantes (Duponnois et al, 2011).

Dans quelle mesure les symbioses mycorhiziennes (endo- et ectomycorhizes) associées au cèdre de l'Atlas contribuent-elles à son adaptation aux contraintes environnementales méditerranéennes, et comment leurs structures varient-elles

selon les conditions édaphiques et les sites d'échantillonnage ? -Comment les symbioses mycorhiziennes (endo- et ectomycorhizes) associées au cèdre de l'Atlas participent-elles à son adaptation aux contraintes environnementales, et quelles variations présentent-elles selon les conditions du sol et les sites d'échantillonnage?

L'objectif de ce travail est de caractériser les structures morphologiques et anatomiques des symbioses endomycorhiziennes et ectomycorhiziennes associées au *Cedrus atlantica*, afin de mieux comprendre leur diversité, leur fonctionnement, ainsi que leur contribution à la physiologie de l'arbre et à son adaptation aux conditions édaphiques et climatiques contraignantes des milieux méditerranéens. Ce travail vise également à comparer ces structures selon les conditions édaphiques ou les sites d'échantillonnage, en vue de mettre en évidence d'éventuelles variations induites par l'environnement

# **Chapitre I: Généralité sur le Cèdre de l'Atlas**

## **Cedrus atlantica**

Le cèdre de l'Atlas, ou *Cedrus atlantica* Manetti, est un conifère sempervirent appartenant à la famille des Pinacées et est considéré comme étant le plus ancien après le genre *Pinus* (Gaussen, 1967). Il est classé parmi les spermaphytes (plante à graine), il est dit résineux car différentes parties de l'arbre contiennent de la résine (Toth, 2005). Le cèdre de l'Atlas est également considéré comme une espèce relique postglaciaire, endémique des massifs montagneux d'Afrique du Nord, principalement le Moyen et le Haut Atlas au Maroc, ainsi que les Aurès et le massif de l'Akfadou en Algérie (Quézel & Médail, 2003 ; M'Hirit, 2006).

### **1 Systématique du cèdre**

Le cèdre de l'Atlas a pour noms berbères «Inguel» ou «Avaoual» et pour noms arabes, «Arz al Atlas» ou «Elmedad» . Cette dernière appellation arabe viendrait du fait que les branches de l'espèce ploient sous le poids de la neige au lieu de se casser.

Sur le plan systématique, le cèdre de l'Atlas appartient aux taxons suivants, selon Angiosperm Phylogeny Group (APG III, 2009)

- Embranchement : Spermaphytes.
- Sous-embranchement : Gymnospermes.
- Classe : Vectrices.
- Ordre : Coniférales.
- Sous-ordre : Abiétales
- Famille : Pinacées.
- Sous-famille : Abiétées.
- Genre : *Cedrus*.
- Espèce : *Cedrus atlantica*.

Il recouvre quatre espèces *Cedrus atlantica* Manetti (Cèdre de l'Atlas); *Cedrus libani* Barrel (Cèdre du Liban); *Cedrus deodora* London (Cèdre de l'Himalaya) et *Cedrus brevifolia* Henry (Cèdre de Chypre) (Derridj, 1990) .



**Fig 01 : Arbre de Cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica) [source : Wikipédia, 2025]**

## **2 Description et caractéristiques botanique du cèdre**

### **2.1 Le port**

Le cèdre de l'Atlas présente un port conique et élancé dans sa jeunesse atteignant généralement entre 30 et 40 mètres de hauteur (Boudy ,1952). Avec l'âge, sa cime s'aplatit pour former une silhouette tabulaire caractéristique. Cette transformation lui confère une allure imposante et majestueuse (Debazac, 1964). Son tronc est monopoïdal, orthotrope, à croissance rythmique (Barthelemy et *al.* 1989 in Sabatier et Barthelemy,1994). Le diamètre du tronc prend souvent des formes considérables pouvant atteindre 1 m (Maire, 1952).(Fig03)



**Fig 02: port du cèdre de l'Atlas (khailes, 2022)**

## **2.2 Écorce**

À l'état juvénile, l'écorce du cèdre de l'Atlas est lisse et de couleur gris clair. En vieillissant, elle se fissure en crevasses sinueuses et se couvre de petites écailles, conférant une texture rugueuse ( M'hirit, 2006). de l'Atlas (fig 03)



**Fig 03 :écorce du cèdre de l'Atlas (khailes, 2022)**

## 2.3 Feuilles (aiguilles)

Les feuilles sont des aiguilles persistantes, groupées en rosettes sur les rameaux courts et disposées en spirale sur les rameaux longs. elles présentent un certain nombre de lignes de stomates sur les trois, et elles sont dotée d'un apex pointu (Maire, 1952).Elles mesurent généralement entre 1 et 2 cm et en moyenne de 2,5 cm (Boudy, 1952), et présentent une teinte bleu-vert .(fig04)

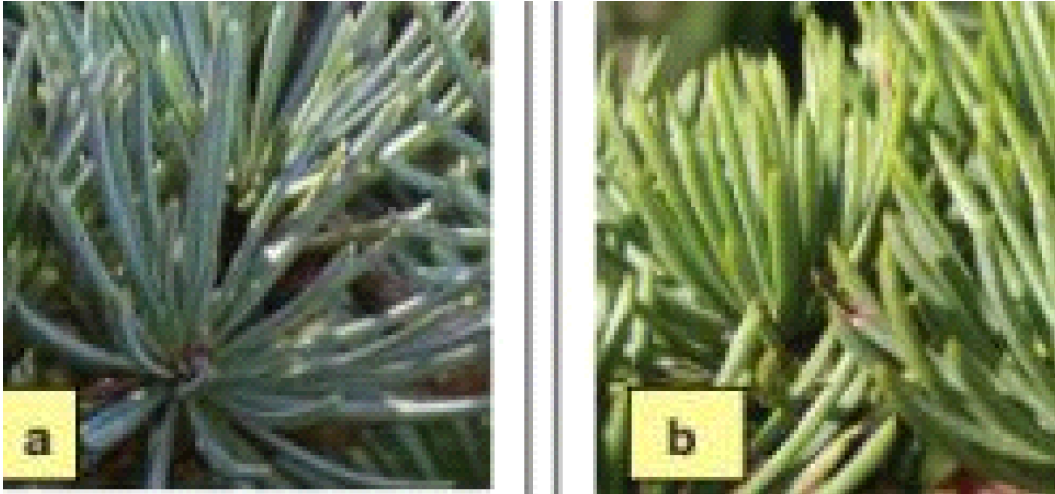


Fig 04: feuilles de cèdre de l'Atlas (Krouchi .F , 2010)

## 2.4 Rameaux

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) présente deux types de rameaux bien différenciés:

- Rameaux longs : de teinte gris jaunâtre, ces rameaux sont pubescents (recouverts d'un léger duvet) et portent des aiguilles insérées de manière isolée le long de leur axe (Rameau et *al.*, 1989 ;Boutekedjiret et *al.*, 2005 ).
- Rameaux courts : trapus et insérés latéralement sur les rameaux longs, ils se terminent par des faisceaux denses d'aiguilles groupées en rosettes, caractéristique typique des cèdres (Quézel et Médail, 2003 ; Gauquelin et *al.*, 2005).

Les bourgeons, quant à eux, sont petits, écailleux, et également de couleur gris jaunâtre (Rameau et *al.*, 1989).

## **2.5 Système racinaire**

Son système racinaire est développé et profondément ancré, avec des racines obliques puissantes qui colonisent efficacement les sols profonds et humides (Toth, 1970 in Krouchi,2010). Cette structure assure une excellente stabilité à l'arbre (Boudy,1952).

## **2.6 Organes reproducteurs**

Le cèdre de l'Atlas est une espèce monoïque, c'est-à-dire que les fleurs mâles et femelles sont portées par le même individu, mais sur des structures distinctes. Les organes mâles sont des chatons ovoïdes de couleur jaune-orangée qui apparaissent à la mi-juin et atteignent leur maturité vers la mi-septembre .Les organes femelles sont des inflorescences également ovoïdes, de teinte vert-bleuâtre, qui se développent progressivement en cônes et deviennent visibles environ trois mois après les chatons mâles, ce qui permet de les distinguer aisément (M'hirit, 2006). (fig.05)

## **3 Les chatons mâles**

Chez le cèdre de l'Atlas , les bourgeons mâles commencent à se différencier vers la fin juin de l'année N, apparaissant au centre d'une rosette d'aiguilles sur les rameaux courts et atteint sa maturité vers la mi-septembre de la même année ( Derridj, 1990). Mesurant quelques millimètres au départ, ils se développent progressivement pour atteindre 4 à 5 cm de longueur et environ 1 cm de diamètre à maturité ils sont de couleur jaune verdâtre ( Derridj, 1990)

Morphologiquement, le chaton mâle est comparable à celui des autres conifères: un axe central porte des écailles compressées, chacune supportant deux sacs polliniques renfermant le pollen (Anonyme, 1983).

La production de pollen varie considérablement d'une année à l'autre et d'un arbre à l'autre, ce qui indique une influence notable du facteur génétique dans ce processus (Pichot et *al.*, 2006, cité par Chaou, 2012). (.fig05)

### 3.1 Les inflorescences femelles

Les inflorescences femelles apparaissent généralement vers la fin du mois d'août de l'année N chez les individus les plus précoces (M'Hirit, 2006).

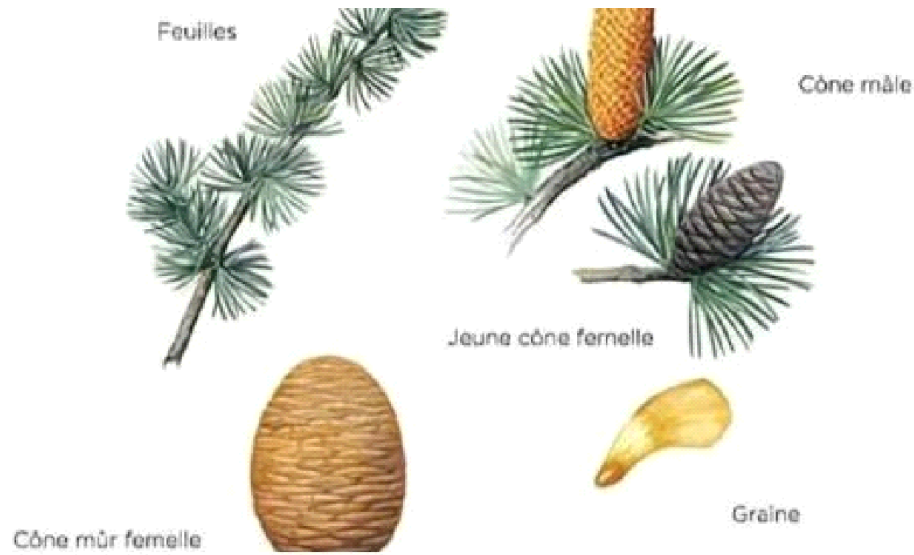
Elles se développent au centre d'une rosette d'aiguilles, sous forme d'un bourgeon gonflé à l'extrémité vert clair, distinct de sa base plus foncée. À mesure de son développement, ce bourgeon laisse apparaître une structure ovoïde, verte, dont les écailles tendres s'ouvrent progressivement jusqu'à former un angle de 90° avec l'axe, rendant l'inflorescence entièrement visible (Toth, 1978 ; Gauquelin et al., 2005).

Elles mesurent environ 1 cm de long et quelques millimètres de diamètre. Leur coloration vert pâle permet de les distinguer des chatons mâles plus précoces (Toth, 2005 ).

Au fil de leur développement, ces structures évoluent lentement pour former des cônes femelles (ou cônelets), qui subissent un cycle de maturation s'étendant sur deux années et environ deux mois. Pendant cette période, les cônes passent par plusieurs phases : croissance, pollinisation, fécondation, puis maturation des graines (Quézel & Médail, 2003 ; Fowler, 1964). (fig05)

Le cône mature mesure en général 5 à 9 cm de long, est dressé et prend une teinte brun clair à brun foncé. Il ne tombe pas au sol, mais se désintègre sur l'arbre, libérant

des graines ailées qui seront ensuite disséminées par le vent (fig02) (Rameau et al., 1989 ; Quézel & Médail, 2003). (fig05)



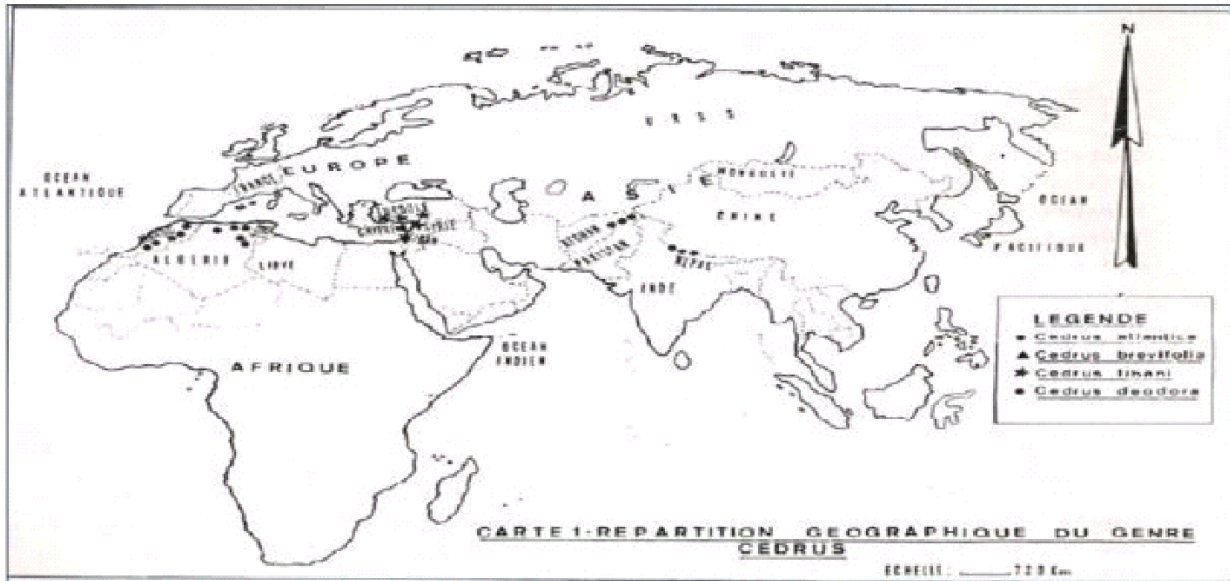
**Figure 05 : Les organes reproducteurs de *Cedrus atlantica* (source : Fondation Klorane Botanical,).**

## **4 Répartition géographique du cèdre**

### **4.1 Dans le monde**

Le cèdre de l'Atlas est originaire des montagnes de l'Atlas en Afrique du Nord ( Nezzar-Hocine, 1998). Il manque en Tunisie mais se rencontre au Maroc (Derridj, 1990). Il a été largement introduit en Europe et en Amérique du Nord en Pennsylvanie, New York, Côte pacifique et dans les régions de l'ex-URSS (Crimée et Caucase (Toth, 2005). pour des fins ornementales dans les parcs et les jardins et ensuite dans le reboisement forestier (fig03).

L'espèce a été introduite pour la première fois en dehors de son aire naturelle en 1862, dans le sud de la France, au Mont Ventoux, sur une parcelle de dix hectares semée avec des graines originaires d'Algérie (Toth, 1970). (fig06)



**Figure 06 : Répartition géographique du genre *Cedrus* dans le monde (Derridj, 1990).**

## 4.2 En Algérie

En Algérie, les cédraies se rencontrent au centre nord et à l'est du pays. Elles sont éparpillées en plusieurs îlots plus ou moins importants qui couvrent une superficie d'environ 27.000 ha des montagnes (Benabid, 1994).

Selon Abdessemed (1981) la répartition du cèdre est conditionnée par le climat (sec et humide) , celui de l'Atlas tellien ( humide ) se trouve principalement dans les massifs du Djurdjura ( à Tala Guilef et Tikjda) des Babors et Tababors ainsi que dans monts Blidéens à des altitudes entre 1300 et 2000.

Les cédraies de l'Atlas saharien (sec), on les retrouve principalement dans les monts du (l'Aurès et Bélézma (Abdessemed, 1981 *in* Derridj, 1990) (fig07) Cependant, son habitat naturel est menacé par les incendies et l'exploitation forestière

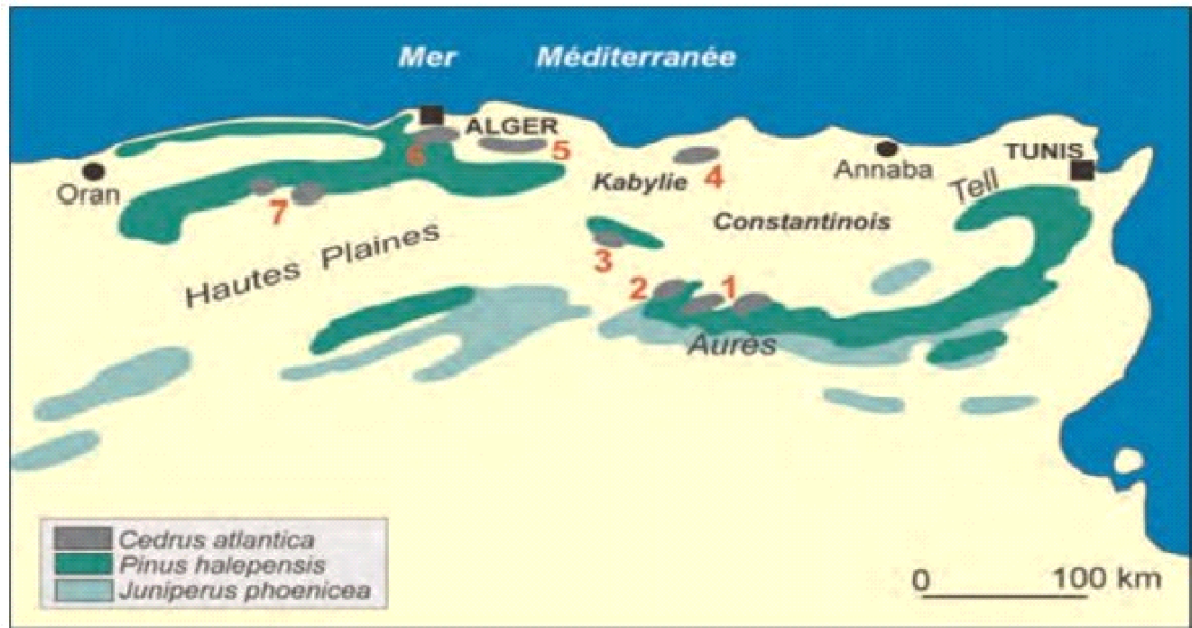


Figure 07 : localisation de *Cedrus atlantica* en Algérie (E.Roche; modifié)

1. Massif de l'Aurès ; 2. Monts de Belezma; 3. Monts de Hodna; 4. Jbel Babor 5. Massif de Djurdjura ; 6. Monts de Blida ; 7. Massif de l'Ouarsenis.

## 5 Caractéristique et exigences écologiques du cèdre

### 5.1 Température

Selon Boudy (1952), le cèdre de l'Atlas se développe dans des régions où la température moyenne annuelle varie entre 5 et 13 °C, ce qui correspond à son optimum écologique.

Cependant cette espèce supporte bien le froid, et est bien adaptée aux conditions de montagne et peut résister à des températures hivernales descendant jusqu'à -20 °C (Benzyane 1982).

Toth (1980) indique que le cèdre peut endurer les fortes températures estivales, mais sa croissance et sa régénération sont compromises lorsque les températures dépassent régulièrement les 40 °C, notamment dans les zones à forte sécheresse.

## **5.2 Altitude**

Le cèdre de l'Atlas occupe naturellement les étages montagnards supérieurs, généralement entre 1 300 m et 2 200 m d'altitude. Cette répartition lui permet de bénéficier de conditions climatiques modérées en été et de précipitations suffisantes en hiver (Boudy 1952).

La croissance optimale du cèdre est observée entre 1 500 m et 1 800 m, où les conditions thermiques et hydriques sont les plus équilibrées pour assurer sa vitalité et sa régénération naturelle. (Benzyane 1982).

Selon Toth (1980) cette altitude lui permet d'échapper aux chaleurs estivales intenses des basses altitudes, tout en assurant une bonne réception des précipitations (pluie et neige) qui sont cruciales pour sa croissance et la stratification naturelle des graines en hiver.

## **5.3 Précipitations**

Le cèdre de l'Atlas nécessite entre 600 et 1 500 mm de précipitations annuelles, idéalement réparties sur l'année, avec une part importante en automne et en hiver, ce qui est essentiel pour la recharge des sols et la réussite de la régénération naturelle (Boudy, 1952 ; Benzyane, 1982).

Il tolère la sécheresse estivale grâce à son système racinaire profond, qui lui permet de puiser l'eau dans les couches profondes du sol (Toth, 1980). Toutefois, une sécheresse prolongée sur plusieurs années peut compromettre la production de graines viables, la germination et la survie des jeunes semis, entravant ainsi la régénération naturelle (Ezzahiri, 2000 ; Toth, 1980).

## **6 Importance du cèdre**

### **6.1 Importance écologique**

Le cèdre de l'Atlas joue un rôle écologique majeur dans les écosystèmes de montagne en Afrique du Nord:

- Stabilisation des sols: grâce à son système racinaire profond, il lutte contre l'érosion.
- Régulation hydrique: ses peuplements influencent positivement le régime hydrique local.
- Habitat pour la biodiversité: il abrite une faune et une flore variées, y compris des espèces endémiques ou menacées (Toth, 1980 ; Benzyane, 1982).
- Sa résistance à la sécheresse en fait une espèce clé pour les programmes de reboisement et de lutte contre la désertification, notamment dans les zones écologiquement dégradées (Benzyane, 1997).

### **6.2 Importance économique**

Le cèdre de l'Atlas possède une grande valeur économique. Son bois est connu pour sa qualité et sa durabilité, il est imputrescible et facile à travailler. Ce dernier est largement utilisé en menuiserie, en charpente ainsi qu'en sculpture (Boudy, 1952). En plus de son intérêt forestier, le cèdre est très apprécié pour sa beauté et son port majestueux qu'il apporte aux parcs et jardins d'ornement, notamment en Europe (Toth, 1970).

Cependant il constitue une source de revenus et contribue à l'économie locale de certaines régions via l'exploitation forestière encadrée (Ezzahiri, 2000). Par ailleurs, la résine et les huiles essentielles extraites du cèdre sont utilisées en parfumerie, et parfois même en médecine traditionnelle (Boukef, 1986).

## 7 Statut mycorhizien de *Cedrus atlantica*

Classiquement le statut majoritaire de *Cedrus atlantica* le décrit comme une espèce typiquement ectomycorhizienne, à l'instar des autres Pinaceae (Harley & Smith, 1983 ; Martin et al., 2001 ; Smith & Read, 2008). Les ectomycorhizes se caractérisent par la formation d'un manteau fongique autour des racines fines, sans pénétrer à l'intérieur des cellules, et par l'établissement d'un réseau intercellulaire appelé réseau de Hartig, où s'effectuent les échanges de nutriments entre la plante et le champignon. Cette symbiose améliore considérablement l'absorption de l'eau et des minéraux, notamment le phosphore et l'azote, tout en renforçant la résistance de l'arbre face aux stress abiotiques (Brundrett, 2004 ; Smith & Read, 2008). Plusieurs travaux expérimentaux et de terrain ont confirmé ce statut, en identifiant des associations spécifiques avec *Tricholoma tridentinum* var. *cedretorum* (Nezzar-Hocine et al., 1998), ainsi qu'avec *Cortinarius cedretorum*, *Amanita vaginata* et *Inocybe geophylla* (Gaba-Chahboub et al., 2016 ; Chahboub et al., 2021). Toutefois, nos résultats ont également révélé la présence de structures endomycorhiziennes (arbuscules, vésicules), suggérant que le cèdre de l'Atlas présente une certaine flexibilité mycorhizienne. Cette dualité, déjà rapportée chez d'autres espèces forestières (Brundrett, 2004 ; Duponnois et al., 2011), pourrait constituer une stratégie adaptative permettant de cumuler les avantages des deux types de symbioses et d'accroître la résilience du cèdre face aux conditions édaphiques contraignantes et aux sécheresses saisonnières caractéristiques de la région de Tikjda.

*Cedrus atlantica* est une espèce ectomycorhizienne et endomycorhizienne, ce qui signifie qu'elle établit des symbioses avec des champignons. Ces symbioses forment un manteau fongique autour des racines fines, sans pénétrer à l'intérieur des cellules végétales. Ces champignons s'introduisent entre les cellules du cortex racinaire, formant un réseau complexe appelé réseau de Hartig . Dans ce réseau s'effectuent les échanges de nutriments entre la plante et le champignon. Cette interaction améliore considérablement l'absorption de l'eau et des minéraux, notamment le phosphore et l'azote, tout en renforçant la résistance de l'arbre face aux stress abiotiques . Contrairement aux mycorhizes à arbuscules (ou endomycorhizes), où les champignons pénètrent à l'intérieur des cellules de la racine, les ectomycorhizes restent dans l'espace intercellulaire (Brundrett, 2004 ; Smith & Read, 2008). Ce type de

symbiose est commun chez les arbres forestiers, notamment les Pinaceae, famille à laquelle appartient Cedrus (Harley & Smith, 1983 ; Martin et al., 2001)

# **II Généralité sur les mycorhizes**

## **1 Définition de la symbiose**

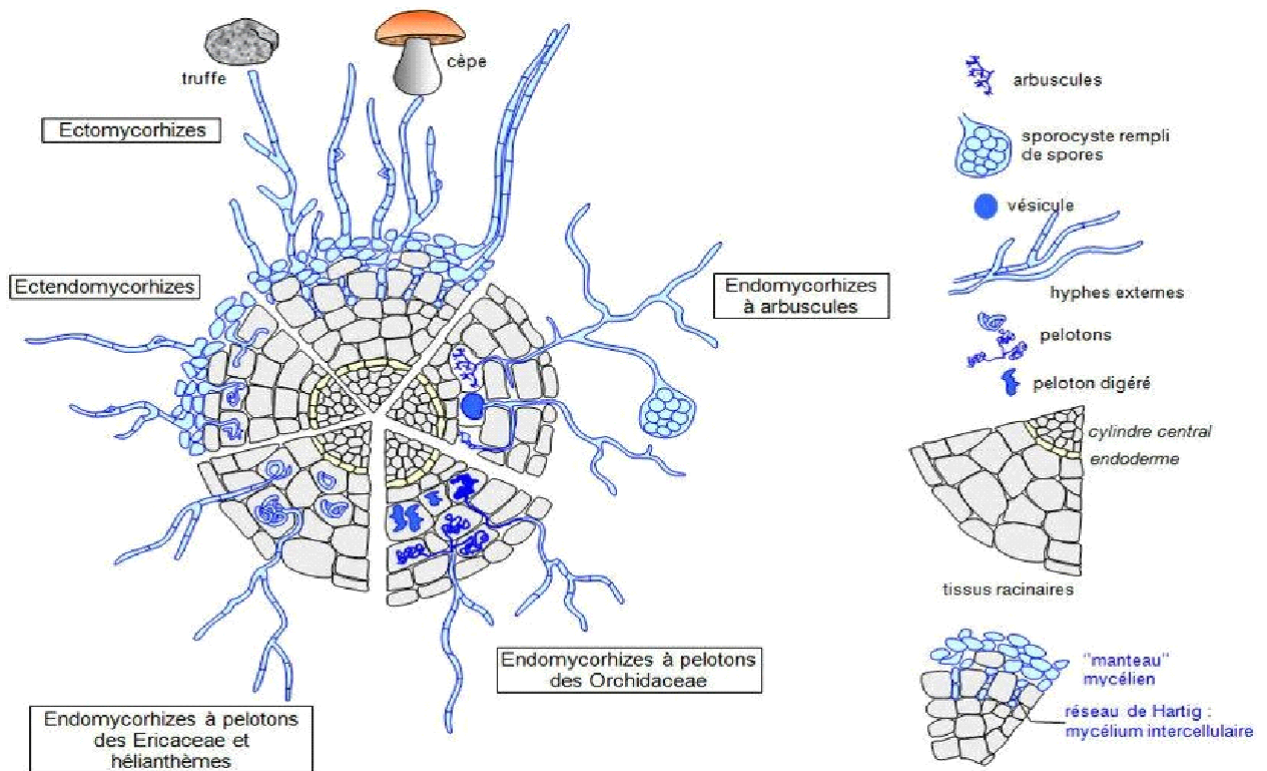
Le terme symbiose a été utilisé pour la première fois par l'allemand Frank (1877) pour dénommer la coexistence d'organismes différents (Harley, 1989). Elle est définie comme étant une association entre deux ou plusieurs organismes divers (symbiotes), qui est mutualiste (bénéfice mutuel par l'échange de ressources complémentaires) intime (par pénétration des tissus de l'un des deux organismes dans ceux de l'autre, ou à l'intérieur même des cellules) et durable : qui dure jusqu'à la mort de l'un des deux (2) organismes (Smail, 2017)

## **2 Définition de la mycorhize**

Le terme mycorhize viens de grec mykes=champignon et rhiza=racine, il été utilisé pour la première fois par FRANK en 1885 pour désigner un organe mixte de plante et champignon.

Les mycorhizes est l'association durable basée sur des échanges bénéfiques réciproques entre les racines des végétaux et les champignons optimisant et favorisant leur développement. (Strullu, 1991). C'est une symbiose à bénéfice réciproque.

### 3 Les différents types de mycorhizes



**Figure 08: Principaux types mycorhiziens actuels représentés sur une coupe transversale de la racine (Hallen et Lieutaghi, 2008).**

Les différentes structures mycorhiziennes sont données dans la figure 8 On distingue :

#### 3.1 Les ectomycorhizes

Ce sont des formations superficielles importantes, observées facilement à l'œil nu chez les arbres forestiers (Lanier et al , 1976).

Elles sont caractérisées par un manteau fongique qui enveloppe la racine, pouvant s'étendre dans le sol par un mycélium extra matriciel. Les hyphes de la partie interne de manteau pénètrent entre les cellules corticales racinaires pour former un réseau dense appelé « réseau de Hartig » (Jacquirot, 1978).( Fig08)

### 3.1.1 Distributions morphologiques des ectomycorhizes

Selon ( Agerer,1994), les ectomycorhizes peuvent avoir plusieurs distributions morphologiques (Fig.9) :

- **La structure monopodiale:** un système mycorhizien qui possède un long axe avec les ramifications latérales situées sur le même plan (fig. 9-1).
- **La structure pyramidale :** les mycorhizes sont de plus en plus nombreux et ramifiés, en s'éloignant de l'axe de la racine longue qui les porte (fig. 9-2).
- **La structure dichotomique :** les mycorhizes sont divisés très vite en deux de façon répétée le long de la racine longue (fig. 9-3).
- **La structure racémeuse :** les mycorhizes sont échelonnés de part et d'autre le long de la racine comme les fleurs sur une grappe (fig.9-4).
- **La structure noduleuse :** les mycorhizes dichotomiques ou coralloïdes sont regroupés dans un voile fongique qui donne l'aspect d'un nodule (fig. 9-6).
- **La structure coralloïde :** un ensemble de dichotomies répétées (fig. 9-7).

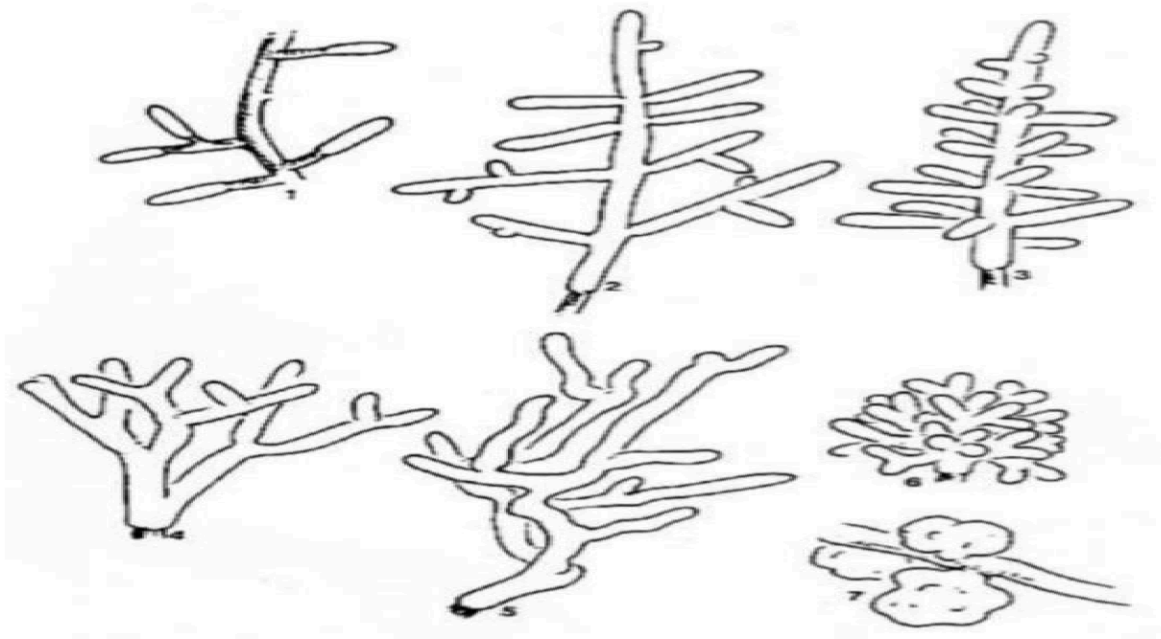


Figure 09: Différentes distributions morphologiques des ectomycorhizes (Agerer, 1994 )

### 3.1.2 La structure anatomique des ectomycorhizes

- **Le manteau fongique**

Le manteau est constitué d'hyphes représenté généralement par l'existence d'un plectenchyme à hyphes libres à l'extérieur et d'un plectenchyme à hyphes soudés à l'intérieur. Les hyphes superficielles de la mycorhize sont peu ramifiées. Certains hyphes progressent entre les cellules de l'écorce afin de former le réseau de Hartig (Strullu, 1991).(fig08)

- **Le réseau de Hartig**

Le réseau de Hartig représente le site d'échange entre les champignons et les cellules corticales qui restent en relation les unes avec les autres et avec les tissus conducteurs (Strullu, 1991).Il pénètre plus ou moins à l'intérieur de l'écorce.

Chez les symbioses formées par les angiospermes, seulement une couche de cellules est en contact avec le champignon tandis que chez les gymnospermes, le réseau de Hartig touche plusieurs couches de cellules corticales arrondies (Strullu, 1991).(fig08)

- **Le réseau extra matriciel**

C'est un réseau d'hyphes extra radiculaire qui se développe à partir du manteau fongique dans la rhizosphère (Mosse; 1973; Smith and Read, 2000). Ce réseau extra matriciel constitue une partie importante du système mycorhizien car il permet une exploration très étendue du sol et par la même occasion permet d'augmenter la surface d'échange du système racinaire (Nicolson, 1959; Mosse, 1981).

L'espèce fongique impliquée forme parfois des cordons mycéliens constitués d'hyphes assemblés les uns aux autres formant des rhizomorphes associés ou non à des sclérites, structure résultante de l'organisation d'hyphes mycéliens en pseudo tissu (Peterson et al, 2004).(fig08)

### **3.2 Les endomycorhizes**

Les endomycorhizes sont les plus répandues dans le règne végétal. Présentes chez la quasi-totalité des arbres fruitiers, certaines essences forestières, les plantes arbustives et herbacées (Plenchette, 1982; Chevalier et al.1990). Les champignons endomycorhiziens sont dépourvus de manteau fongique et de réseau de Hartig, mais il y existe deux réseaux mycéliens, internes et externes. Le mycélium pénètre dans la racine puis à l'intérieur des cellules corticales et forme des structures intracellulaires (Strullu, 1991).(fig08)

#### **3.2.1 Les mycorhizes arbusculaires**

Les formes les plus répandues sont les endomycorhizes à arbuscules. En effet, ces symbioses ont été recensées chez 80% des plantes terrestres (Smith et Read, 2008). Les hyphes intracellulaires enroulés en spires ou en pelotons lâches dans les cellules. Certains hyphes cheminent entre les cellules et émettent des branches latérales traversant la paroi cellulosique et se ramifiant finement à l'intérieur d'une

cellule en prenant la forme d'un petit arbre, d'où le nom d'arbuscule donné à ce type de structure (Garbaye, 2013). (fig08)

### **3.2.2 Les mychorizes éricoides**

Caractérisent les familles des Ericacée et des Epacridacées. Ce type est extrêmement important dans les écosystèmes où l'azote du sol est lié dans divers composés organiques. Les cellules épidermiques des racines sont colonisées par les hyphes fongiques qui forment des hyphes intracellulaires complexes. Les seules espèces fongiques identifiées appartiennent aux Ascomycètes (*in* Harchaoui, 2017). (fig08)

### **3.2.3 Les mychorhizes arbutoïdes et monotropoides**

Les deux sont exclusivement présentes chez les Ericales. Les arbutoïdes présentent des pelotons intracellulaires et un manteau autour de la racine. Les Monotroptoïdes sont caractérisées par des hyphes qui forment des pelotons dans les cellules superficielles de la racine. Cette relation permet à la plante d'améliorer sa nutrition en apportant principalement de l'eau, du phosphore et de l'azote.

### **3.2.4 Les mychorhizes orchidées**

Les mycorhizes des orchidées se développent dans toutes les couches corticales (Fortin et *al.* 2016). Le champignon envahit les embryons par le suspenseur, stimulant ainsi la division cellulaire et favorisant le développement embryonnaire. Différents stades de développement fongique, allant de pelotons d'hyphes à des amas de phagocytose, peuvent être observés dans un même embryon. Cependant, cette colonisation n'est pas suffisante pour établir la mycorhization chez les plantes adultes. Les racines, épaisses, sont infectées dès leur formation à partir du sol, et le champignon se limite au parenchyme cortical, sans coloniser le cylindre central. À la périphérie, des pelotons d'hyphes cloisonnés apparaissent, tandis que la partie profonde contient des cellules racinaires avec des amas résiduels résultant de la digestion de l'endophyte (Strullu, 1991).

### 3.3 Les ectendomycorhizes

Elles possèdent à la fois des caractères d'ectomycorhizes et d'endomycorhizes. Elles sont à mentaux réduit ou absent qui possèdent un réseau de Hartig bien développé et des hyphes qui pénètrent dans les cellules racinaires. Il est difficile de décrire ce groupe car la morphologie et la structure des ectendomycorhizes varient d'une espèce à l'autre (Béreaub et *al*, 1997). (fig08)

## 4 Ecologie des mycorhizes

### 4.1 Les facteurs climatiques

Les facteurs climatiques qui impacte la formation et le fonctionnement des mycorhizes sont :

- **La température** : chaque champignon mycorhizien à ces températures optimales qui lui assurent un bon fonctionnement et un bon développement. En général, les champignons poussent mieux aux environs 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** : elle 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).

### 4.2 Les facteurs édaphiques

La mycorhization est meilleure dans les sols légèrement acides qui conviennent en majorité à une multitude de champignons. L'optimum se situe entre pH=4 et pH= 6. Les ectomycorhizes se rencontrent surtout dans les sols forestiers à pH inférieur à 6 qui reste une indication de tendance et non une règle générale (Dommergues et

Mangennot ,1970). -- -Les minéraux : le développement mycorhizien est influencé par leur concentration. Un taux élevé freine la croissance du champignon mycorhizien (Dommergues et Mangennot, 1970). Par exemple, l'azote est un élément nutritif nécessaire à la plante certes ; mais en teneurs élevées, il freine la croissance du champignon mycorhizien (Egli et Brunner, 2002).

La mycorhization exige un certain taux d'humidité pour un bon fonctionnement mais les sols secs et inondés sont défavorables (Dommergues et Mangennot, 1970).

## **5 Les phases de l'infection mycorhizienne**

### **5.1 Phase asymbiotique**

#### **La germination de la spore et ramification de l'hyphe germinatif**

Dans des conditions favorables, les spores peuvent germer spontanément et produire un hyphe germinatif et quelques ramifications primaires sans stimulus exogène. Lorsqu'un partenaire végétal est à proximité, les hyphes germinatifs se cloisonnent et le cytoplasme se rétracte dans la spore (Bonanomi et al, 2009). Les spores des AM sont capables de germer et d'entrer à nouveau en dormance de nombreuses fois si des signaux racinaires ne sont pas perçus (Bonanomi et al, 2009). Dans tous les cas, l'essentiel des réserves énergétiques des spores initiales est conservé.

### **5.2 Phase pré-symbiotique**

C'est le 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 permettent d'être informés de leur présence respective. Un certain

nombre de gènes impliqués dans l'établissement de la symbiose seront alors activés

(Bonfante et al, 2009).

- **Signaux émis par les végétaux :** Les plantes produisent des exsudats racinaires capables de stimuler la germination, d'induire une ramification des hyphes et de modifier l'activité métabolique du AM, dénommées «branching factors», ces molécules ont été identifiées comme étant des strigolactones, un dérivé des apocaroténoïdes (Besserer et *al*, 2008). Les strigolactones provoquent chez le champignon l'oxydation des acides gras et la production d'ATP, ces réponses étant dépendantes d'une NADH déshydrogénase et d'une oxydase alternative dans la chaîne respiratoire (Besserer et *al*, 2008).

En plus des strigolactones, d'autres molécules ont été décrites comme potentiellement perçues par les AM, même si leur rôle reste encore à définir. Différents flavonoïdes ou polyamines ont montré un effet sur la germination des spores ou la ramification des hyphes (Bonanomi et *al*, 2009).

- **Signaux émis par les AM :** De même que pour les signaux «Nodfactors» émis par les Rhizobiums, les AM produisent des molécules diffuses qui leur permettent d'être reconnus par les plantes. Ces molécules appelées « Mycfactors » induisent l'activation de gènes chez la plante hôte (Bonfante et *al*, 2009). Parmi ces molécules sécrétées par le champignon (LCO : lipochito-oligosaccharides) ont été récemment décrites comme jouant un rôle dans la préparation de la plante à la colonisation mycorhizienne arbusculaire. Ces composés favorisent la mycorhization des plantes lorsqu'ils sont ajoutés de manière exogène, et induisent également la formation des racines latérales (Bonfante et *al*, 2009). Une fois ces premiers signaux échangés, les deux partenaires mettent en place une régulation génique propre à l'établissement de la symbiose.

### 5.3 Phase symbiotique et 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) pour (pré-pénétration apparatus), 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, lieu d'échanges entre les partenaires (Genre et *al*, 2005). Ces structures sont entourées d'une membrane plasmique péri-arbusculaire séparant le champignon du cytoplasme végétal et assurant les échanges entre le champignon et la plante grâce à des transporteurs spécifiques. Les arbuscules ont une durée de vie limitée estimée en moyenne à 5- 8 jours. Actifs pendant 4 à 5 jours, les arbuscules entrent ensuite en sénescence et sont complètement éliminés de la cellule végétale qui retrouve son état initial (Javot et *al*, 2007). De manière concomitante au développement dans la racine, le champignon va se développer dans le sol.

Le mycélium extra-racinaire 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 (Genre et *al*, 2005). 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 AM, complétant ainsi son cycle de vie.

## **5.4. L'infection chez les ectomycorhizes**

L'infection par les ectomycorhizes débute au niveau des racines courtes. Selon certaines études, la formation commence par la prolifération des cellules fongiques entre les cellules corticales, créant d'abord le réseau de Hartig, suivi par la formation du manteau (Boudarga, 1988).

D'autres recherches indiquent que le réseau de Hartig se développe à partir des couches profondes d'un manteau préexistant (Stullu, 1991). Selon Marks et Foster (1973), l'infection débute par une action mécanique des hyphes qui écartent les cellules, facilitée par l'hydrolyse enzymatique qui relâche la lamelle moyenne.

## **5.5. L'infection chez endomycorhizes**

Dans les mycorhizes à vésicules et arbuscules, l'endophyte pénètre les racines par des points d'infection distincts et bien délimités (Bouderga et Dexheimer, 1988). Selon Boullard (1968) et Scannerini (1982), les hyphes externes pénètrent dans les racines soit par des poils absorbants, soit en créant des appressoriums. De plus, les hyphes pénètrent dans la première couche des cellules corticales en traversant les espaces intercellulaires.

D'autres hyphes constituent le réseau extra matriciel au niveau des points de pénétration (Hadley, 1975)

## **6 L'importance de la relation symbiotique mycorhizienne**

### **6.1 Pour la plante**

La symbiose mycorhizienne influence positivement la stabilité de la structure des sols, ce qui stimule la croissance de la plante-hôte, grâce à :

- L'augmentation quantitative des hormones de la croissance secrétées, tels que :  
les gibbérellines, les auxines et les cytokinines (Duponnois et al, 2013).
- L'augmentation des quantités d'eau reçues par la plante, grâce à l'expansion du volume du sol atteint par les hyphes extra-matriciels et les cordons mycéliens (Bâ et al, 2011).
- L'amélioration de la capacité de la plante à absorber les éléments minéraux, en particulier le phosphore et l'azote via la minéralisation (Strullu, 1991).
- L'amélioration de l'état sanitaire de l'arbre, en la protégeant contre les agents pathogènes (certaines bactéries, nématodes, insectes, maladies fongiques, ...) (St-Arnaud et al, 1997).
- Selon Smail (2017), la symbiose améliore la résistance de la plante hôte face à de nombreux stress environnementaux (stress hydrique, stress osmotique, ... etc.).
- Le développement de la tolérance de la plante-hôte aux métaux lourds, aux températures extrêmes et aux pH défavorables (Nezzar-Hocine, 1998).

- L'amélioration de l'absorption de certains ions, en particulier les oligo-éléments, comme : le cuivre, le potassium et le zinc (Peyret-Guzzon, 2014).
- Favorise de la coexistence entre plusieurs espèces végétales, ce qui améliore la productivité et la biodiversité végétales dans les écosystèmes (Duponnois et *al*, 2013)

## **6.2 Pour le champignon**

Les AM reçoivent de la plante des éléments carbonés issus de la photosynthèse. L'interaction représente donc un coût pour le partenaire végétal. La part de photosynthétats transférée au champignon est non négligeable puisqu'elle peut atteindre jusqu'à 20 % du carbone fixé lors de la photosynthèse (Wright et *al*, 1998; Bago et *al*, 2000). Celui-ci est transporté jusqu'aux racines sous la forme de saccharose et de monosaccharides comme le glucose, le fructose et le mannose (Schaarschmidt et *al*, 2006)

# III-Matériel et méthodes

## 1 Présentation de station d'étude :

### Présentation de station de Tigounatine

La forêt de Tigounatine est située au versant Sud du Djurdjura (Wilaya de Bouira) dans le parc national de Djurdjura . Elle se classe dans l'étage de végétation supra-méditerranéen. C'est un espace de développement d'une flore du massif montagneux variée avec des conifères tels que le pin d'Alep, le cèdre de l'Atlas, les chênes, les hêtres et surtout les genévriers. Elle se situe entre 1470 et 1610 m d'altitude. Le climat, marqué par des hivers froids et neigeux et des étés doux et secs, influence l'adaptation des espèces végétales aux variations saisonnières.

Les caractéristiques de la station sont résumées dans le tableau 1 ci-dessous

Caractéristiques	Altitude	Pente	Orientation	Cordonnées GPS
Données correspondants	1566m	50%	Nort west	36°27'24,03,4N 04°07'37, 43'7E

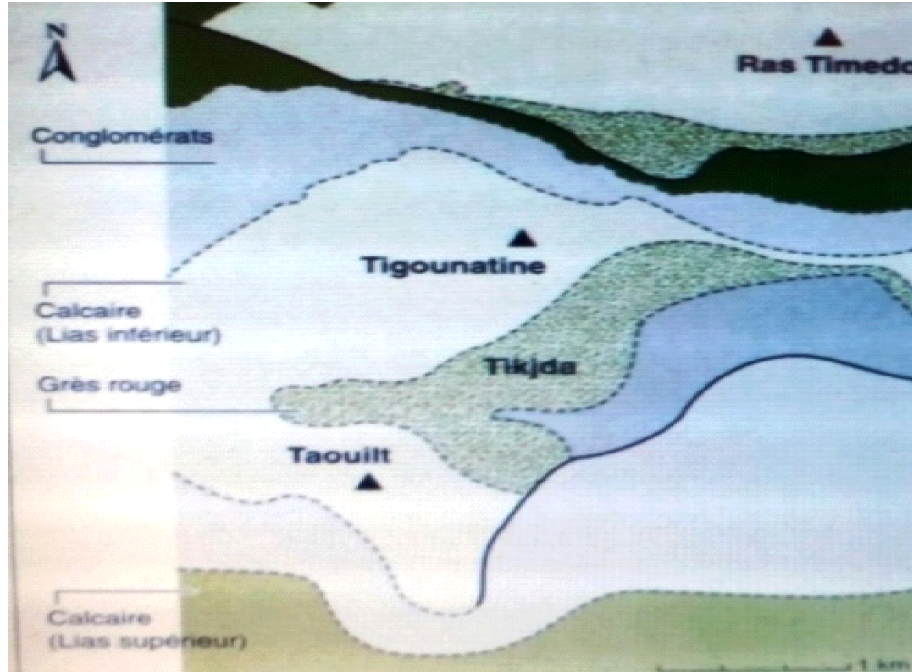


Figure10 :Carte géologique du Djurdjura (Flandrin, 1952)

## 2 Le matériel végétal

Le matériel végétal est constitué de racines du cèdre de l'Atlas qui ont été prélevées autour de trois jeunes arbres.

Le prélèvement des racines a été effectué en hiver le 26 février 2025.

Après l'élimination de la litière autour de l'arbre, à l'aide d'une pelle et une pioche, nous avons creusé à une profondeur de 20 à 30 cm. Ensuite après avoir repérés et suivies les grosses racines jusqu'aux plus fines et cela a une distance de 1 à 1,5 m du tronc .Des mottes de sol contenant des racines fines ont été prélevées délicatement sans arracher ou abîmer les autres racines. Les racines ainsi récoltées sont mises dans des sachets en plastique étiquetés.

A la fin les échantillons sont transportés au laboratoire où ils sont conservés au frais pendant toute la durée de l'étude

## 3 Etude des racines mycorhizées

### 3.1 Préparation des échantillons :

Les mottes de terre contenant les racines sont lavées délicatement à l'eau du robinet sans les abîmer et préserver au maximum leur état initial.

### 3.2 Etudes des ectomychorhizes

#### 3.2.1 Etude morphologique

Les racines sont mises dans des boîtes de petri et émergées dans de l'eau de robinet ensuite elles sont observées à la loupe binoculaire.

Une fois les ectomychorhizes sont repérées, nous notons la couleur, la forme et distribution et la présence ou l'absence du mycélium extra matriciel ainsi que la présence ou l'absence de rhizomorphes. Les différents morphotypes sont ensuite classés en trois catégories selon le type d'exploitation (Agerer, 2001):

- **Les mycorhizes de type contact (TC)** : elles sont lisses, ne présentent ni cordons ni rhizomorphes.
- **Les mycorhizes de type courte distance (TCD)**: présentant un réseau extra matriciel plus ou moins abondant mais sans cordons et sans rhizomorphes.
- **Les mycorhizes de type moyenne et longue distance (TMLD)**: présentent des cordons et des rhizomorphes.

Toutes les mycorhizes identifiées sont isolés et conservées dans des piluliers contenant de l'FPA.

#### 3.2.2 Etudes anatomique

Elle consiste à réaliser des coupes transversales très fines des mychorhizes de chaque morphotype. Elles sont effectuées à main levée à l'aide d'une lame de rasoir. Elles sont ensuite colorées au bleu de lactophénole et montées entre lame et lamelle chauffées dans une goutte de lactoglycérole et mise à l'observation au microscope au grossissement 400. Notons l'aspect du manteau fongique, son épaisseur, l'aspect de réseau de Hartig et du mycélium frangeant.

### **3.3 Etudes des endomycorhizes**

Afin d'observer les différentes structures montrant la formation d'endomycorhizes (vésicules, arbuscules, hyphes etc.) Nous avons suivi la méthode de Phillips et Hayman (1970).

Les racines fines sont isolées et coupées en fragments de 2 cm .Ces derniers sont éclaircis et vidés dans des tubes fermés et étiquetés contenant une solution de potasse à 10% et portées à ébullition. Le processus est répété pendant plusieurs jours jusqu'à ce qu'ils se vident et deviennent clairs. Ensuite, ils sont mis dans l'eau oxygénée pendant 15 minutes pour mieux les éclaircir. Les fragments sont mis dans une solution d'acide lactique pendant 15 minutes puis colorés au bleu de trypan et dans un bain-marie pendant 45 minutes. Un rinçage à l'eau distillée est nécessaire après l'application de chaque produit. Les fragments ainsi traités sont montés entre lame et lamelle dans une goutte de lactoglycerol et observés au microscope au grossissement 100 puis au 400.

# Résultats

## 1 Observations des ectomycorhizes du cèdre de l'Atlas

L'observation macroscopique et microscopique des apex racinaires du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) a permis d'identifier plusieurs types d'ectomycorhizes se différenciant par leur couleur, leur forme, leur distribution, leur structure externe (phase extra matricielle), l'importance du manteau fongique et l'étendue du réseau de Hartig. Les morphotypes observés sont :

- **Morphotype 01**

Il a une couleur noire, une distribution simple, et une forme courbée. La phase extra-matricielle est cotonneuse (fig11).

La coupe transversale montre un manteau fongique fin, avec un réseau de Hartig s'étendant sur quatre couches de cellules corticales, sans atteindre le cylindre central (fig.08).

- **Morphotype 02**

Il est de couleur marron foncé, à distribution simple et de forme courbée ; La phase extra-matricielle cotonneuse (fig10). Un rhizomorphe d'une capacité d'exploration de moyenne distance et de type a été observé (fig12).

La coupe transversale révèle un manteau fongique visible, avec un réseau de Hartig s'étalant sur toutes les couches de cellules corticales (fig11).

- **Morphotype 03**

Il est de couleur noire, à distribution simple et forme courbée. La phase extra-matricielle est granuleuse. (fig12)

- **Morphotype 04**

Il est de couleur marron foncé, à distribution simple et forme courbée .La phase extra-matricielle cotonneuse. Un rhizomorphe d'exploration de moyenne distance et de type a été observé (fig12).

Le manteau fongique est moyennement épais, et le réseau de Hartig s'étalant sur toutes les couches de cellules corticales jusqu'au cylindre central (fig12).

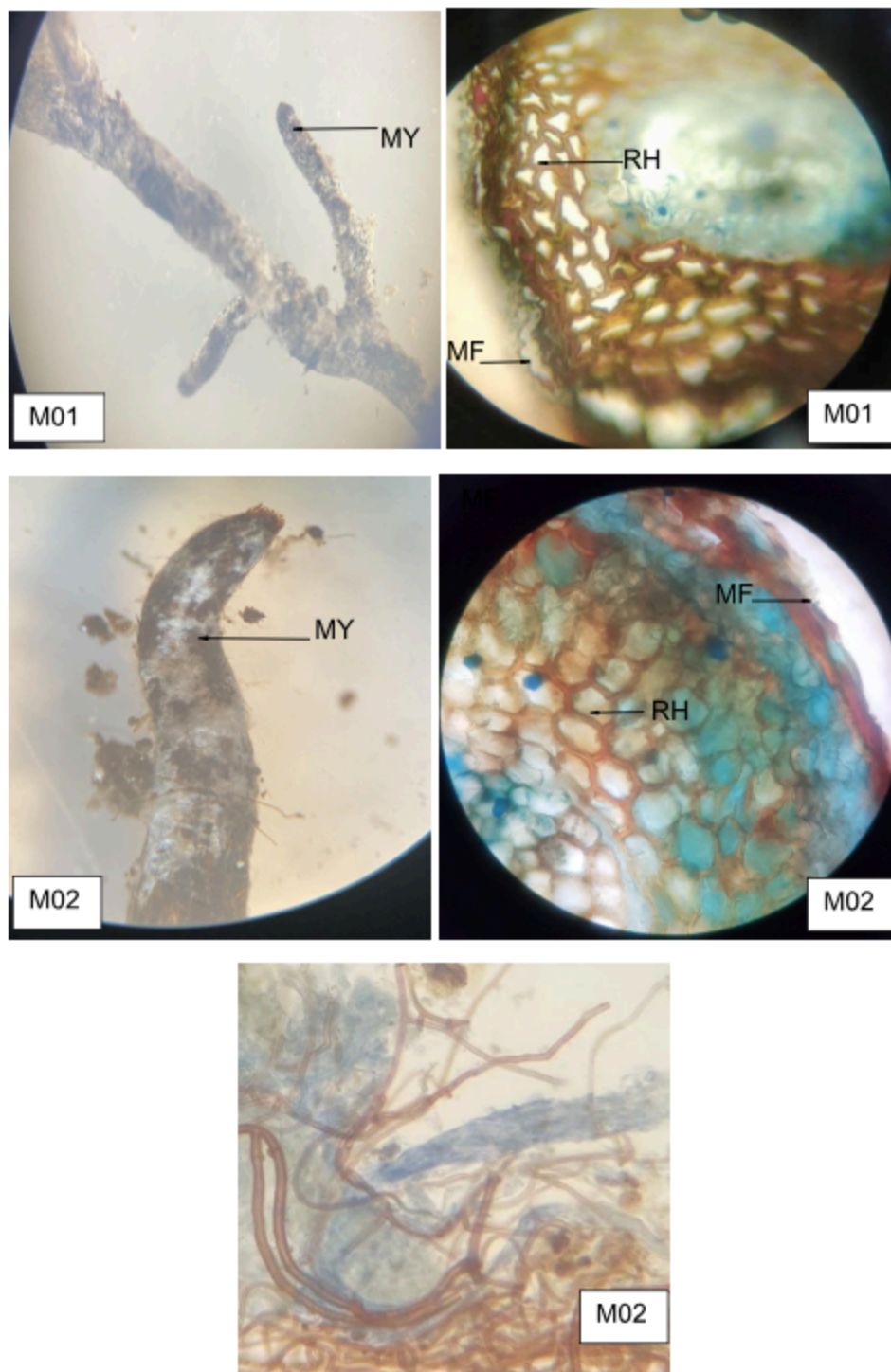
- **Morphotype 05**

Il est de couleur noire, à distribution simple et de forme courbée .La phase extra-matricielle lisse. (fig13)

La coupe transversale montre un manteau fongique épais, et un réseau de Hartig s'étalant sur trois couches corticales, sans atteindre le cylindre central.(fig13)

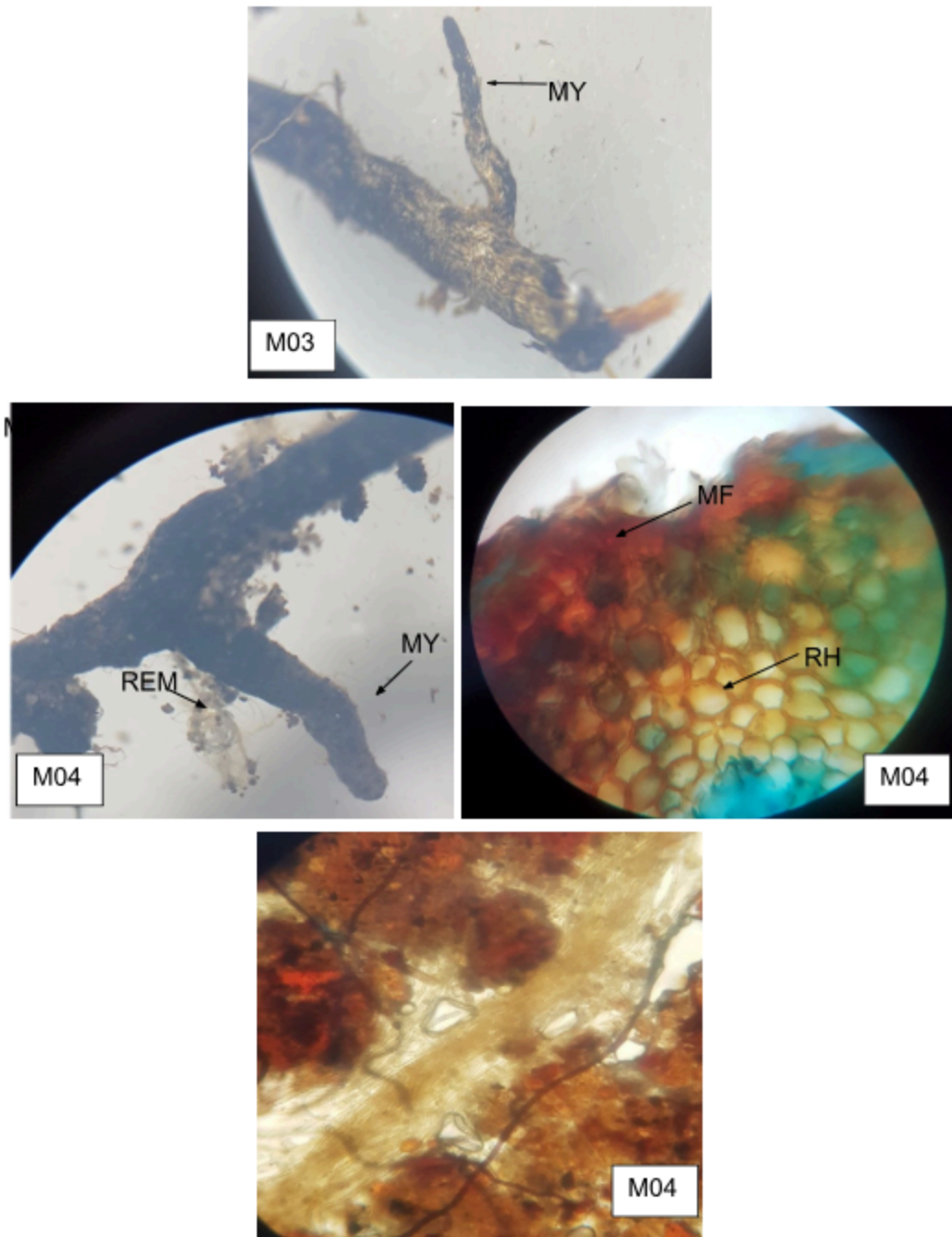
- **Morphotype 06**

Il marron foncé, à distribution simple et de forme droite, avec une phase extra-matricielle cotonneuse.(fig13) La coupe transversale révèle un manteau fongique moyennement épais, et un réseau de Hartig limité à une seule couche de cellules corticales.(fig13).



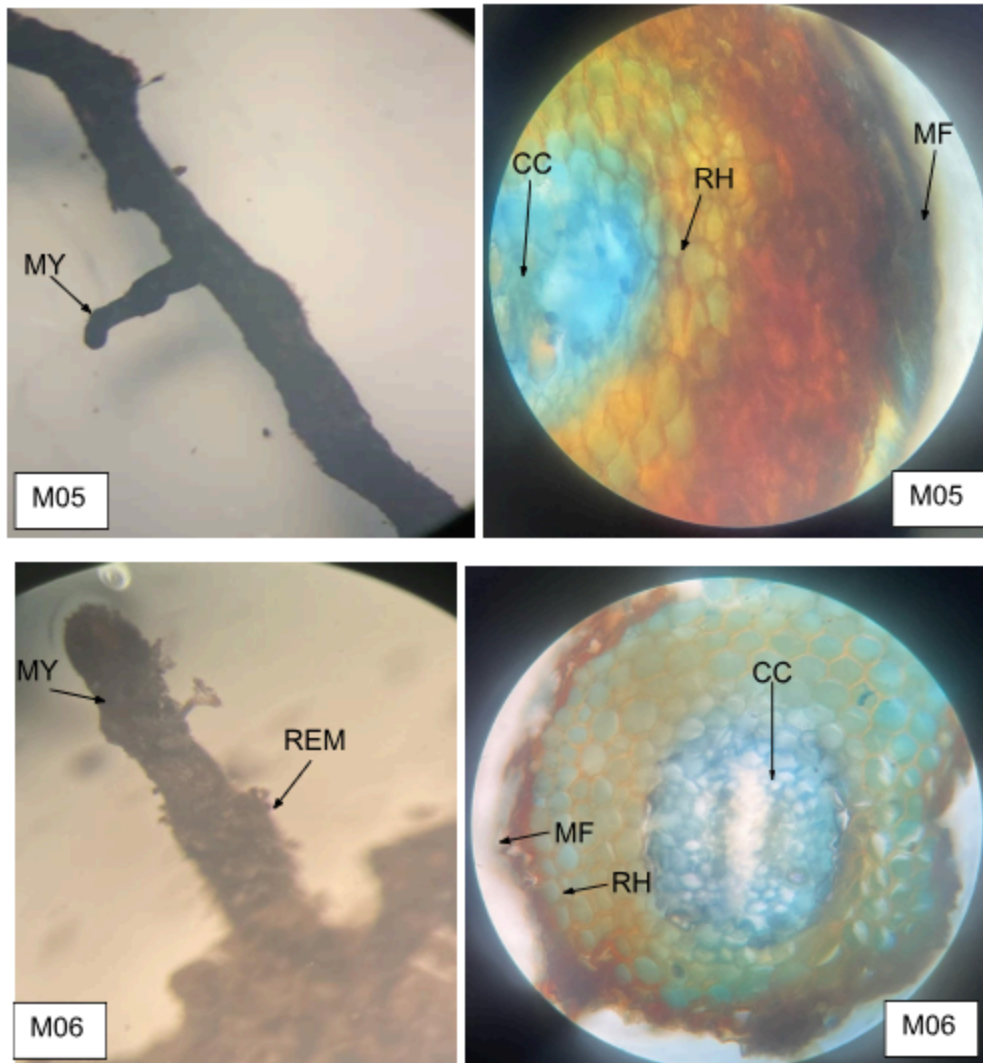
**Figure 11: Aspect morphologique et anatomique de (M01) et (M02) et son rizomorphe observés à la loupe binoculaire (G :40) et au microscope optique(G :400)**

Mycorhize, RH : Réseau de Hartig, MF :  
Manteau fongique



**Figure 12 : Aspect morphologique et anatomique de (M03et M04) et son rizomorphe observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)**

MY : Mycorhize, RH : Réseau de Hartig, MF : Manteau fongique, REM :Réseau extra matriciel, CC :Cylindre central



**Figure 13 : Aspect morphologique et anatomique de (M05 et M06) observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)**

MY : Mycorhize, RH : Réseau de Hartig, MF : Manteau fongique, REM : Réseau extra matriciel, CC : Cylindre central

- **Morphotype 07**

Il est de couleur noir, une distribution simple et un apex plus large que la base. La phase extra-matricielle est laineuse (fig14).

- **Morphotype 08**

Il est de couleur marron, à distribution monopodiale pennée et de forme courbée, cette mycorhize présente une phase extra-matricielle cotonneuse (fig14).

- **Morphotype 09**

Il est de couleur noire, à distribution simple et de forme droite. La phase extra-matricielle est lisse. (fig14)

Un rhizomorphe d'une capacité d'exploration de moyenne distance et de type. (fig14).

- **Morphotype 10**

Il est de couleur noire, à distribution simple et de forme courbée. La phase extra-matricielle est laineuse (fig14).

La coupe transversale montre un manteau fongique, et un réseau de Hartig s'étalant sur deux couches corticales (fig14).

- **Morphotype 11**

Il est de couleur marron clair, à distribution monopodiale pennée et une forme droite. La phase extra-matricielle est de type en feutrage (fig15).

La coupe transversale montre un manteau fongique, et un réseau de Hartig s'étalant sur toutes les couches corticales (fig15).

- **Morphotype 12**

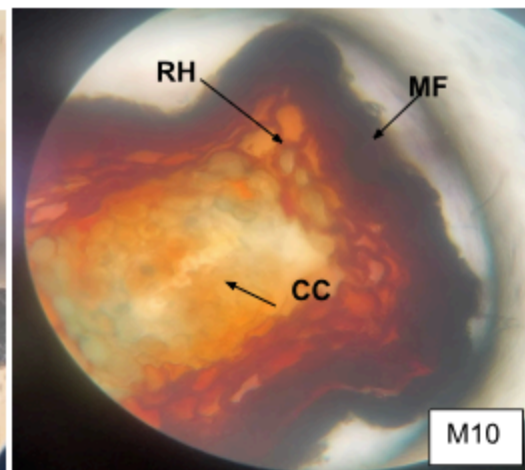
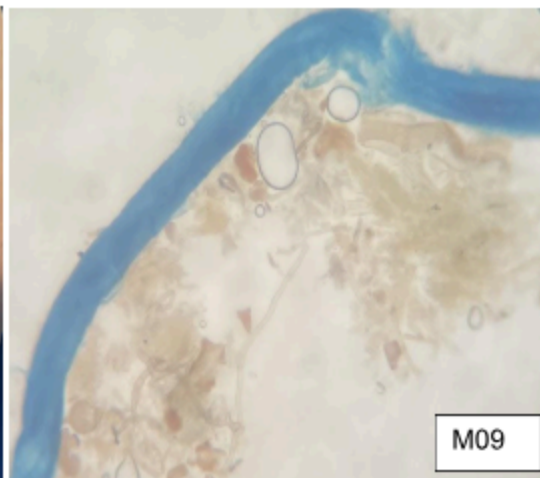
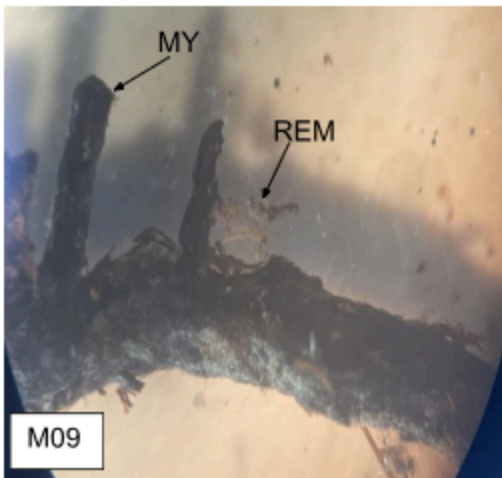
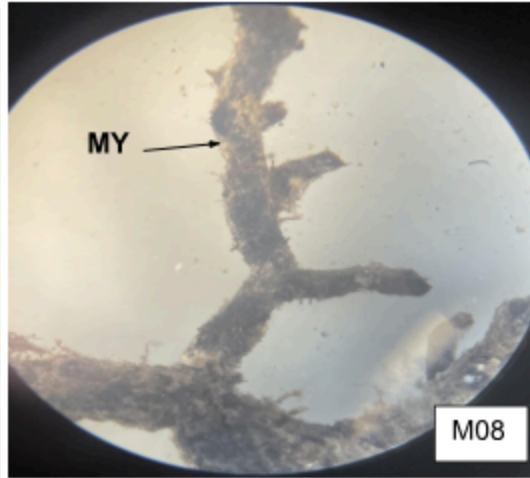
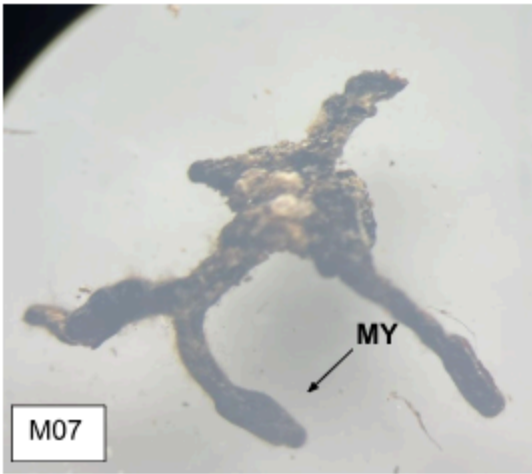
Il est de couleur blanche, à distribution simple et de forme droite. La phase extra-matricielle est lisse (fig15).

La coupe transversale montre un manteau fongique, et un réseau de Hartig s'étalant sur deux à trois couches corticales (fig15).

- **Morphotype 13**

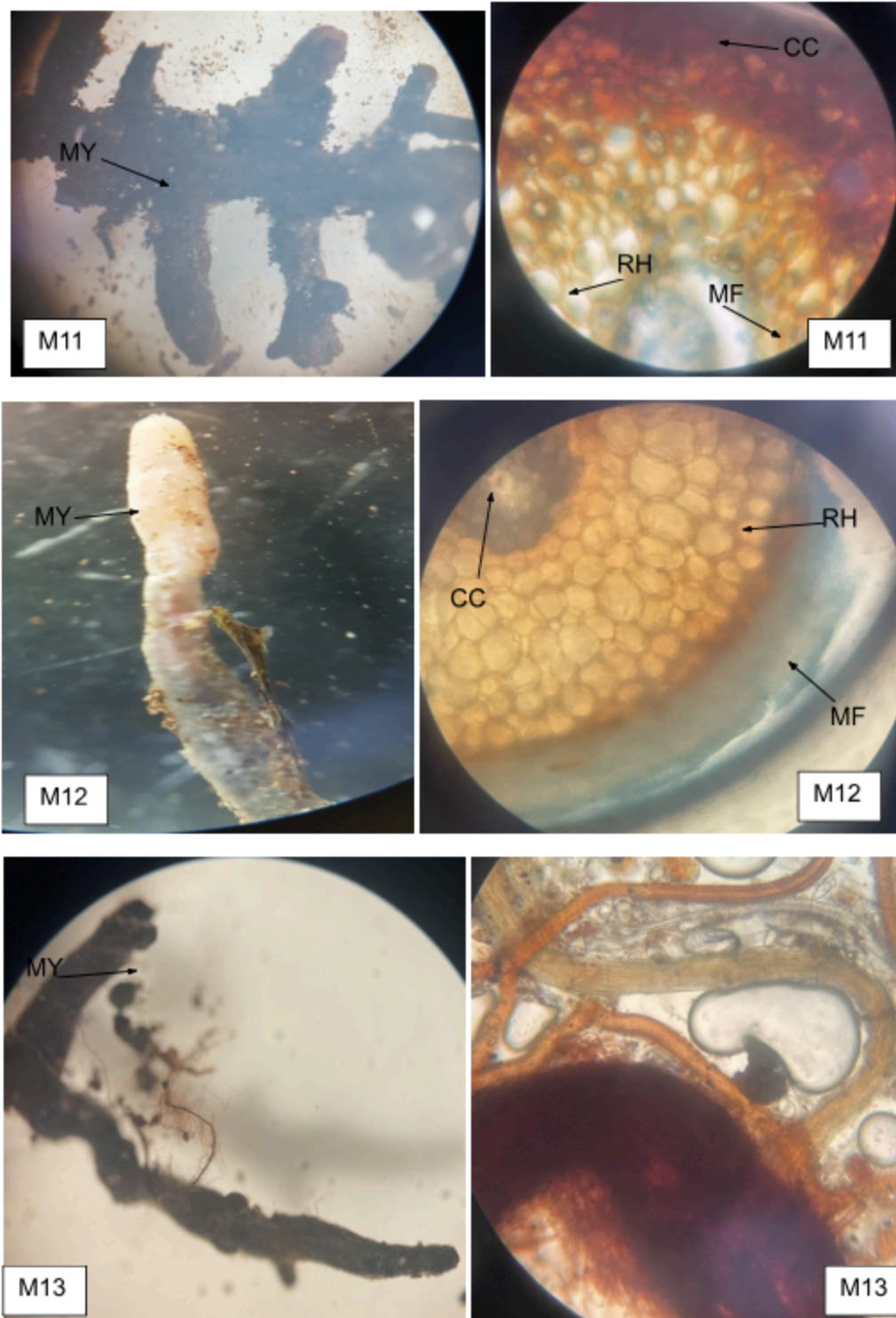
Il est de couleur noire intense, à une distribution simple et une forme courbée. La phase extra-matricielle est lisse (fig15).

Un rhizomorphe d'une capacité d'exploration de moyenne distance et de type a été observé (fig15).



**Figure 14 : Aspect morphologique et anatomique de (M07 M08 M10 et M09) et de son rizomorphe observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)**

MY : Mycorhize, RH : Réseau de Hartig, MF : Manteau fongique, REM : Réseau extra matriciel, CC :Cylindre central



**Figure 15 : Aspect morphologique et anatomique de (M11 M12 M13) observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)**

MY : Mycorrhize, RH : Réseau de Hartig, MF : Manteau fongique, REM :Réseau extra matriciel, CC :Cylindre central

- **Morphotype 14 :**

Il est de couleur jaune uniforme sur toute la mycorhization, à distribution simple et de forme courbée. La phase extra matricielle est de type en feutrage (fig16). La coupe transversale montre un manteau fongique, et un réseau de Hartig s'étalant sur sept couches corticales (fig16).

- **Morphotype 15 :**

Il est de couleur marron foncé, à distribution monopodiale penée et forme courbée. La phase extra matricielle est cotonneuse (fig16). Un rhizomorphe bien développé d'une capacité d'exploration de moyenne à longue distance et de type (fig16).

- **Morphotype 16 :**

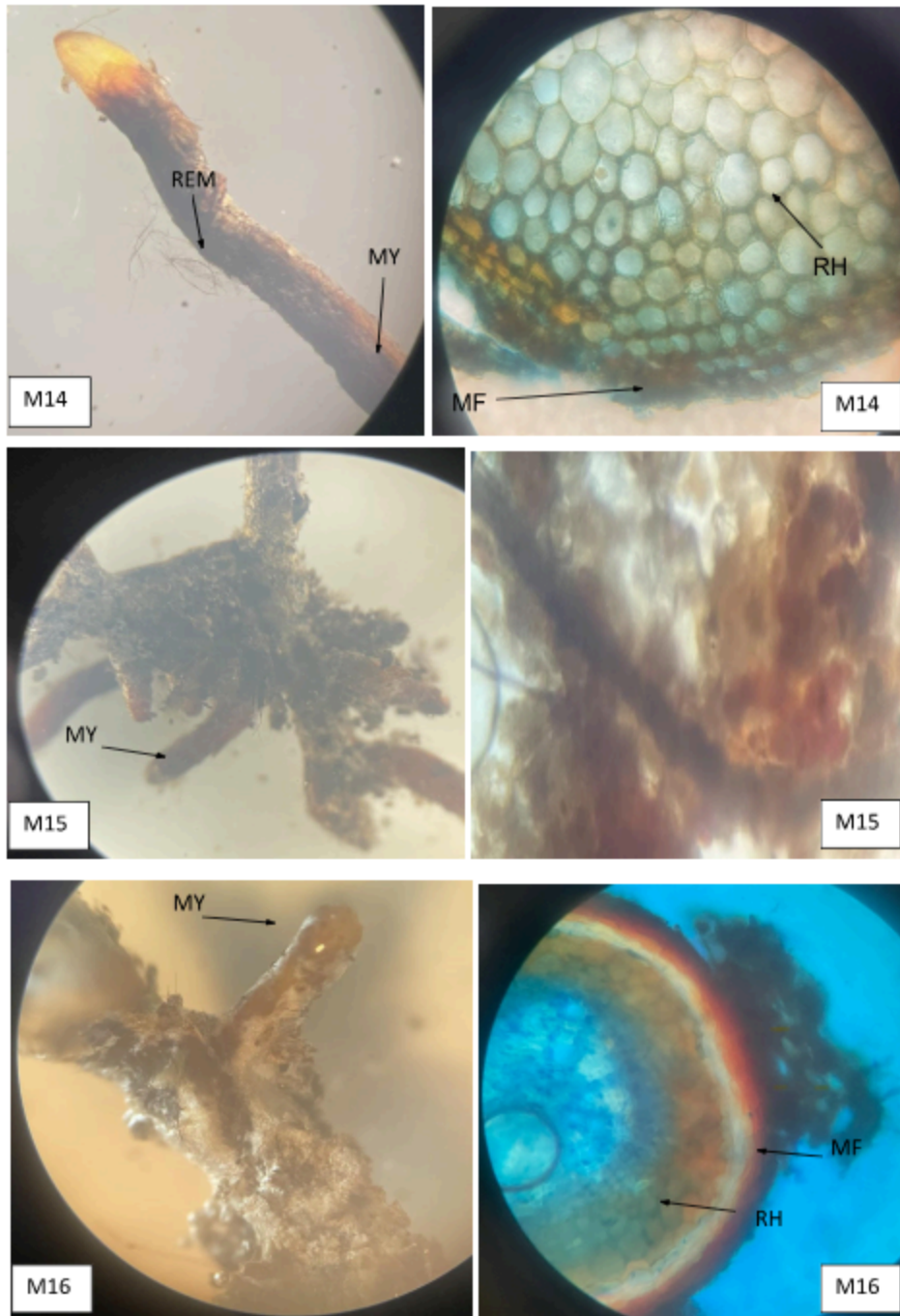
Il est de couleur blanche, à distribution simple et de forme droite .La phase extra matricielle est cotonneuse (fig16). La coupe transversale montre un manteau fongique, et un réseau de Hartig s'étalant sur deux couches corticales (fig16).

- **Morphotype 17 :**

Il est de couleur orange, à distribution simple et de forme courbée. La phase extra matricielle de la mycorhize est granuleuse (fig17). La coupe transversale révèle la présence d'un manteau fongique ainsi qu'un réseau de Hartig s'étendant sur toutes couches de cellules corticales (fig17).

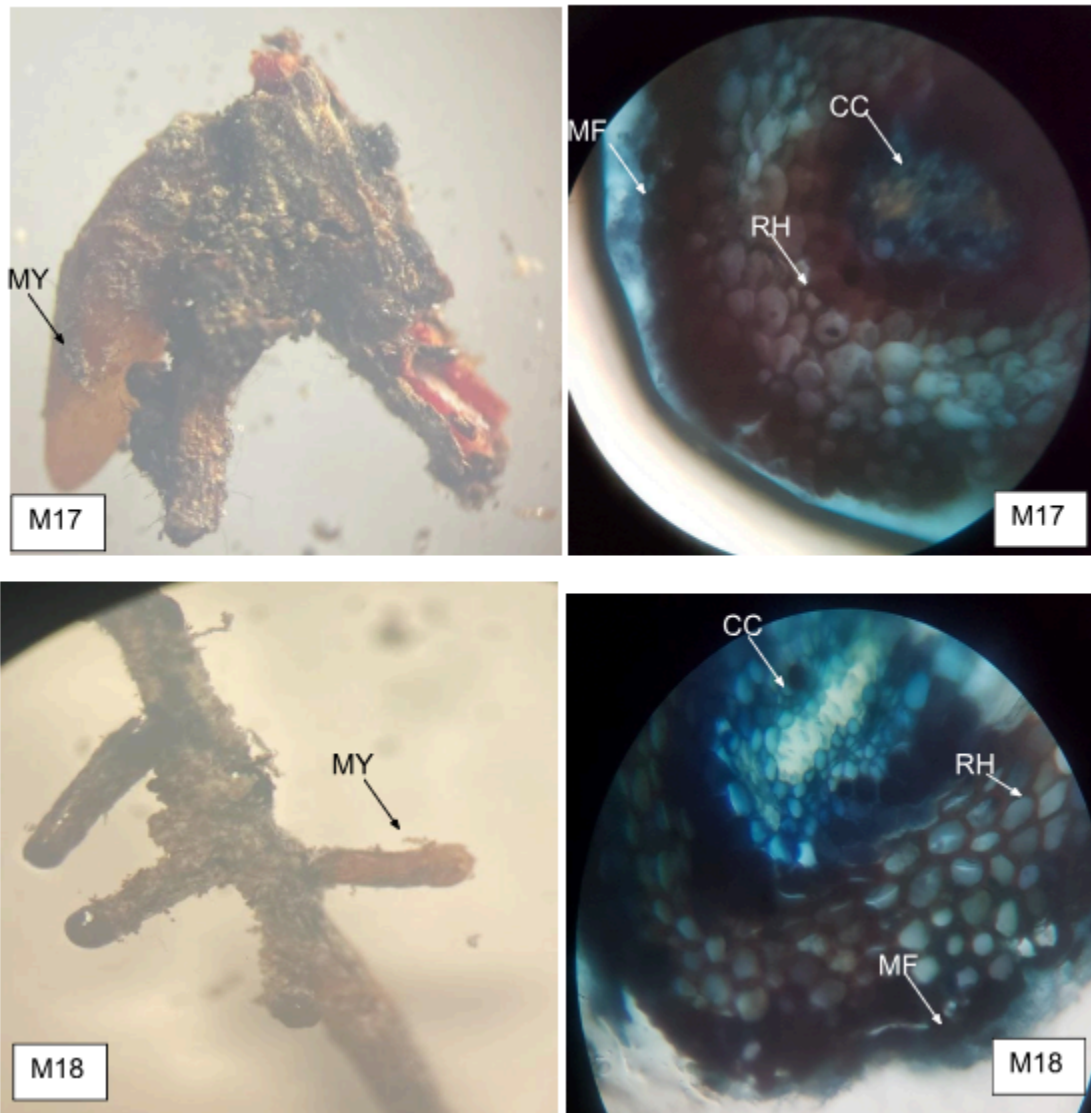
- **Morphotype 18 :**

Il est couleur marron clair, une morphologie simple et une forme courbée, une phase extra matricielle cotonneuse et l'absence de rhizomorphe (fig17). La coupe transversale révèle la présence d'un manteau fongique ainsi qu'un réseau de Hartig s'étendant sur toutes couches de cellules corticales (fig17).



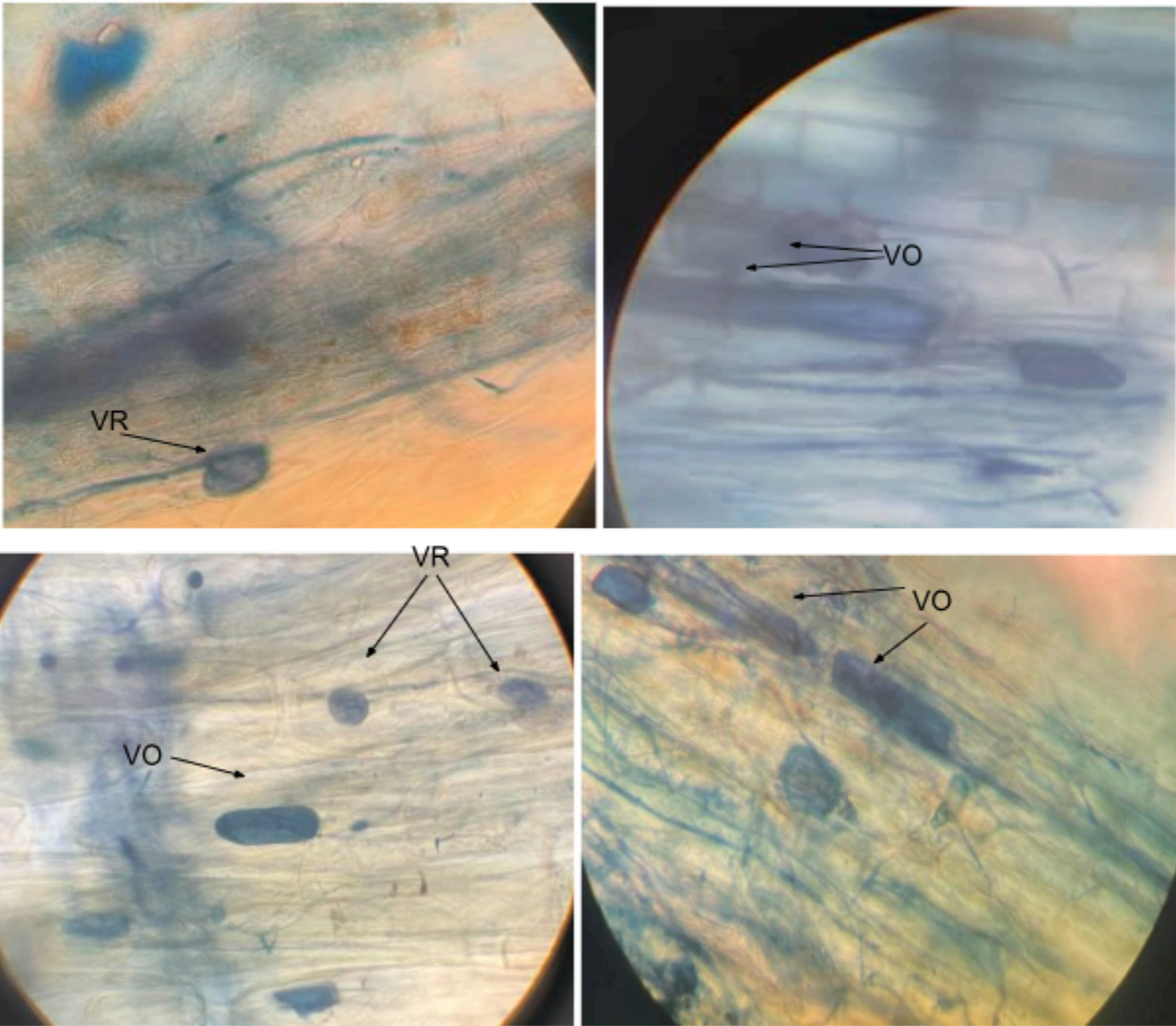
**Figure 16 : Aspect morphologique et anatomique de (M16) et (M14 M15) et leurs rizomorphes observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)**

MY : Mycorhize, RH : Réseau de Hartig, MF : Manteau fongique, REM : Réseau extra matriciel, CC : Cylindre central



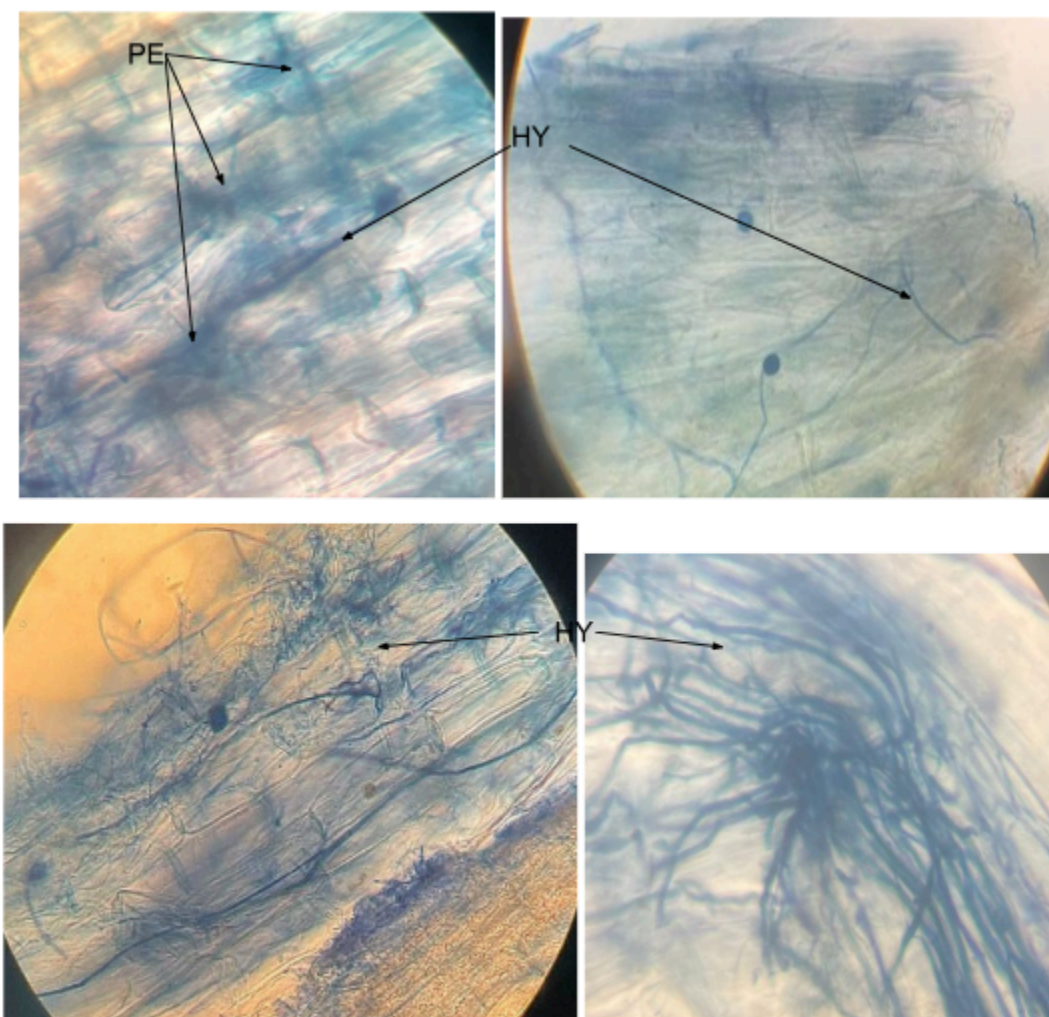
**Figure 17: Aspect morphologique et anatomique de (M17) et M18) observés à la loupe binoculaire (G : 40) et au microscope optique (G : 400)**

MY : Mycorhize, RH : Réseau de Hartig, MF : Manteau fongique, REM : Réseau extra matriciel, CC : Cylindre central



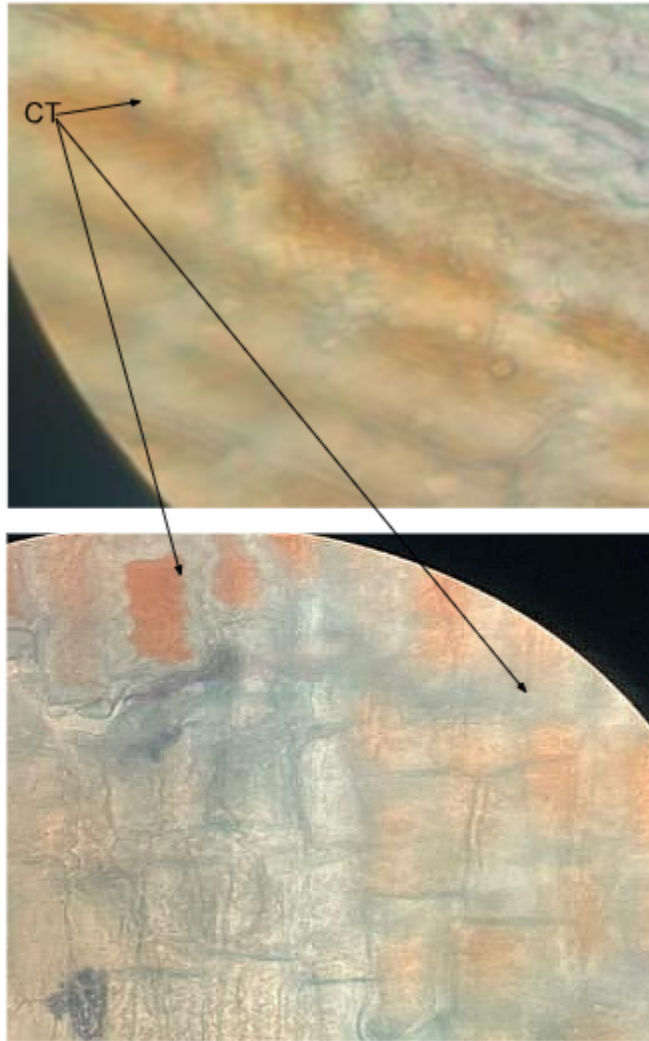
**Figure 18 : Vésicules observées sous microscope optique au grossissement 400**

VO :Vesicules ovales ; VR  
:Vesicules ronde.



**Figure 19 : Hyphes observés sous microscope optique au grossissement 400**

HY : Hyphes,  
Pe: Pelotons



**Figure 20: Cellules tannins observées sous microscope optique au grossissement 400**

(CT : Cellules tana)

# IV Discussion et conclusion

## Discussion

L'étude morphologique et fonctionnelle des symbioses mycorhiziennes chez *Cedrus atlantica* a permis de mettre en évidence une cohabitation entre deux types majeurs de mycorhizes : les ectomycorhizes (ECM), qui forment des structures externes différenciées, et les endomycorhizes (AM), caractérisées par une colonisation intracellulaire du cortex racinaire. Cette double symbiose, bien que rarement décrite de façon simultanée chez une même espèce, a déjà été rapportée chez certaines Pinaceae dans des contextes environnementaux particuliers (Smith & Read, 2008 ; Brundrett, 2009).

## Diversité morphologique et fonctionnelle des ectomycorhizes

### 2 Caractéristiques macroscopiques générales

- **Couleur** : Les morphotypes observés présentent des teintes variées allant du noir (1, 3, 5, 9, 10, 13) au marron foncé (2, 4, 6, 15), marron clair (7, 11, 18), marron (8), jaune (14), orange (17) et blanc (12, 16).
- **Forme** : La majorité des morphotypes est de forme courbée (1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 13, 14, 15, 17, 18), tandis que certains sont droits (6, 9, 11, 12, 16).
- **Distribution** : La plupart des morphotypes présentent une ramification simple, à l'exception des morphotypes 8, 11 et 15, qui sont à ramification monopodiale pennée.
- **Phase extra-matricielle** : Elle est cotonneuse dans la majorité des cas (1, 2, 4,

6, 7, 8, 11, 15, 16, 18), granuleuse dans deux cas (3, 17), lisse dans plusieurs morphotypes (5, 9, 10, 12, 13), et en feutrage pour les morphotypes 11 et 14.

- **Présence de rhizomorphes** : Certains morphotypes montrent des rhizomorphes de moyenne à longue distance (2, 4, 13, 15), alors que la majorité n'en présente pas.

### 3 Caractéristiques microscopiques

- Le manteau fongique variait de fin (mycorhize 1) à moyennement épais (4, 6), voire épais (5).
- Le réseau de Hartig s'étalait généralement sur plusieurs couches de cellules corticales. Dans certains cas, il restait superficiel (ex : 1 et 5 – 3 ou 4 couches sans atteindre le cylindre central), tandis que dans d'autres (ex : mycorhize 4), il atteignait toutes les couches jusqu'au cylindre central.

## 4 Classification selon la diversité morphologique et fonctionnelle des ectomycorhizes

La diversité morphologique des ectomycorhizes s'accompagne d'une diversité fonctionnelle, qui peut être analysée à travers le type de mycélium extramatriciel. Cette approche, développée notamment par Agerer (2001) et reprise par Garbaye (2013), classe les ectomycorhizes en fonction de leur capacité à explorer le sol à différentes échelles, selon la structure, l'extension et l'organisation de leur réseau hyphale. On distingue ainsi quatre grands types d'exploration :

- **Type d'exploration par contact**

Ce type regroupe les mycorhizes dont le mycélium extramatriciel est quasi inexistant ou réduit à de très courts hyphes, en contact étroit avec les

particules du sol ou les débris organiques (**Ex : morphotypes : 01, 03, 05, 06, 10,18....**).

Elles sont typiquement retrouvées dans la couche superficielle de l'humus, plaquées contre les feuilles ou les agrégats de sol.

Ce type de mycorhize joue un rôle dans l'exploration immédiate du sol en contact direct avec la racine, sans déploiement à distance.

- **Type d'exploration à moyenne distance**

Ce type regroupe les mycorhizes dont le mycélium extramatriciel est modérément développé (**Ex : morphotypes 02 , 04** ) Il se manifeste généralement sous forme de mèches fongiques simples ou d'hyphes isolés, qui s'étendent à quelques millimètres ou centimètres de la racine. Ces structures ne forment pas de cordons organisés ni de rhizomorphes bien définis, mais elles permettent une exploration légèrement étendue de la rhizosphère.

- **Type d'exploration à longue distance**

Ce type regroupe les mycorhizes capables de former des rhizomorphes ou des cordons hydrophobes, leur permettant d'atteindre des poches de nutriments situées à plusieurs décimètres, voire mètres de la racine.

Dans l'échantillon analysé, aucun morphotype ne présente de resomorphe bien formé, ce qui suggère l'absence de mycorhizes à grande distance d'exploration. Cela peut s'expliquer par :

- les conditions écologiques du site (sol peu profond ou peu structuré),
- ou une dominance de champignons à stratégie localisée, typique des jeunes plants ou des sols pauvres.

- **Type d'exploration moyen à longue distance**

Ce type désigne une forme intermédiaire entre les mycorhizes à moyenne distance et celles à longue distance (**Ex: morphotypes 13 , 15** ). Il est caractérisé par la présence de cordons mycéliens plus ou moins organisés, capables de parcourir quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres dans le sol. Ces structures restent néanmoins moins développées que les véritables rhizomorphes du type à longue distance.

Chacun de ces types reflète une stratégie écologique particulière de captation des nutriments, influencée par les conditions du sol, la physiologie du champignon symbiotique et les besoins de l'arbre hôte.

## **5 Observation microscopique des structures endomycorhiziennes**

L'observation des coupes de racines fines de *Cedrus atlantica* a permis de mettre en évidence plusieurs structures caractéristiques des endomycorhizes (ou mycorhizes à arbuscules), témoignant d'une colonisation active par des champignons symbiotiques de type Glomeromycètes.

Les principales structures observées sont les suivantes :

- **Vésicules intra- et intercellulaires**

Ces structures sont bien visibles à l'intérieur et entre les cellules corticales des racines. Elles présentent des formes variées, allant de l'ovale au rond, et montrent également des tailles différentes. Les vésicules jouent un rôle de réserve lipidique pour le champignon, et peuvent également contribuer à la longévité de la symbiose. (fig18)

- **Hyphes intracellulaires formant des arbuscules**

Ces structures arborescentes sont insérées à l'intérieur des cellules corticales. Elles constituent la zone principale d'échange entre le champignon et la plante hôte, permettant le transfert de nutriments minéraux (notamment le phosphore) en échange de composés carbonés. Leur présence est un indicateur fort de symbiose fonctionnelle (fig19).

- **Hyphes intercellulaires formant des pelotons**

On observe également des réseaux denses d'hyphes occupant les espaces intercellulaires, formant ce qu'on appelle des pelotons fongiques. Bien que plus couramment associés à des mycorhizes de type orchidée, ces structures peuvent exister sous une forme simplifiée dans certaines endomycorhizes, notamment lors de colonisations mixtes ou atypiques (fig19).

Ces observations confirment la présence d'une symbiose endomycorhizienne active chez le cèdre de l'Atlas. Cette association pourrait jouer un rôle important dans la nutrition minérale de l'arbre, particulièrement dans les sols pauvres ou stressés, en complément ou en parallèle de l'ectomycorhization (fig19).

## **6 Observation des cellules de type à tannins**

Lors des observations microscopiques des racines de cèdre de l'Atlas, de nombreuses cellules de type tannins ont été identifiées. Ces cellules se présentent généralement sous une forme allongée et irrégulière, avec un contenu cytoplasmique dense, souvent en relation avec les structures mycorhiziennes intracellulaires.

Les cellules Tannins sont typiquement associées à des stades avancés de colonisation endomycorhizienne, et peuvent jouer un rôle dans la stockage ou la redistribution de métabolites fongiques.

Elles sont parfois interprétées comme un signe de réaction physiologique de la plante hôte face à la pénétration des hyphes, notamment lorsqu'elles apparaissent aux abords des arbuscules en dégénérescence ou des pelotons intrusifs.

La fréquence élevée de ces cellules dans les échantillons analysés suggère une activité symbiotique dynamique et probablement une forte implication fonctionnelle des endomycorhizes dans le métabolisme racinaire du cèdre de l'Atlas. Leur présence peut également être corrélée à un taux élevé de colonisation observé dans la quantification mycorhizienne (fig20)

Les 18 morphotypes d'ECM identifiés sur les apex racinaires du cèdre de l'Atlas témoignent d'une diversité notable, tant au niveau macroscopique (forme, couleur, surface, ramification, présence de rhizomorphes) que microscopique (épaisseur du manteau, structure du réseau de Hartig). Cette diversité est révélatrice d'une variabilité fonctionnelle, que l'on peut regrouper selon la typologie des types d'exploration proposée par Agerer (2001) et précisée par Garbaye (2013):

- Le type à exploration par contact est le plus abondants montrant un développement hyphal réduit, ce qui limite son extension dans le sol. Ce

type est généralement bien adapté aux milieux humiques et aux sols où les ressources sont accessibles localement.

- Les types à exploration moyenne distance sont dans notre cas les moins représentés. ils présentent un mycélium extramatriciel plus développé, leur permettant une prospection modérée du sol. Ce groupe est souvent associé aux jeunes arbres ou à des environnements où les ressources sont réparties de manière hétérogène, sans formation de rhizomorphes complexes (Parladé et *al.*, 2004).
- Aucun morphotype à exploration longue distance n'a été observé. Cette absence pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs : la jeunesse des plants, la faible structuration du sol, ou la présence dominante de champignons à stratégie localisée (Garbaye, 2013 ; Courty et *al.*, 2010). Un ou deux morphotypes (notamment le morphotype 04) présentent cependant des traits intermédiaires, pouvant relever du type moyen à longue distance, avec un réseau hyphal plus dense, mais sans rhizomorphes pleinement développés.

Cette typologie fonctionnelle traduit des stratégies écologiques variées. Les mycorhizes à exploration courte sont souvent associées à une réponse rapide aux apports ponctuels de matière organique, tandis que les types à exploration plus longue permettent une mobilisation à distance du phosphore et de l'eau (Agerer, 2001 ; Tedersoo & Smith, 2013)

Cette absence des types à longue distance est notable, surtout en comparaison avec d'autres études réalisées également à Tikjda. En effet, une étude antérieure (auteur et l'année) avait identifié 36 morphotypes, dont 67% présentaient des structures à exploration longue distance. Ce contraste peut s'expliquer par :

- La jeunesse des plants échantillonnés, où les racines secondaires ne sont

peut-être pas encore suffisamment développées pour accueillir des champignons à exploration distante.

- Un contexte écologique différent (pente, exposition, humidité, perturbations micro-locales), qui peut influencer la composition de la communauté fongique.

Enfin, la rareté des types à grande distance peut aussi refléter une dynamique temporelle : ces types apparaissent souvent plus tardivement, lorsque les arbres ont un système racinaire plus développé et que les ressources deviennent plus difficiles à atteindre (Smith & Read, 2008 ; Bahram et *al.*, 2011).

Cette différence souligne donc la forte variabilité inter-sites des communautés ectomycorhiziennes, même à l'intérieur d'un même massif forestier, selon l'âge des arbres, les conditions édaphiques et la disponibilité en ressources (Bahram et *al.*, 2011 ; Courty et *al.*, 2010).

### **Structures endomycorhiziennes et colonisation mixte**

L'analyse microscopique des racines fines a révélé la présence de structures typiques des endomycorhizes : arbuscules intracellulaires, vésicules, pelotons intercellulaires, et cellules à Tanins. Ces dernières sont souvent interprétées comme des sites de réaction associés aux stades avancés de colonisation et peuvent

témoigner d'une forte activité métabolique entre la plante hôte et le champignon (Yamato et *al.*, 2005).

La présence de tanins dans certains mycorhizes (M1, M4, M5, M12, M14, M15, M16, M17) suggère une régulation chimique des interactions symbiotiques. Ces composés phénoliques, produits par la plante hôte, jouent un rôle dans la sélection des partenaires fongiques, favorisant certaines espèces tout en inhibant d'autres (Wang et *al.*, 2020). Leur présence pourrait également indiquer une réponse de défense ou un mécanisme de coévolution entre *Cedrus Atlantica* et les champignons associés (Marx, 1973)

Cette colonisation endomycorhizienne active, coexistant avec les ECM, indique une symbiose mixte. Ce phénomène, déjà rapporté chez certaines espèces de Pinaceae, peut être une réponse adaptative aux contraintes du milieu, notamment une faible disponibilité en phosphore (préférée par les AM) ou un sol peu développé (Smith & Read, 2008 ; Teste et *al.*, 2020). La complémentarité entre les deux types permet à l'arbre de mobiliser à la fois le phosphore inorganique (via les AM) et l'azote organique (via les ECM), optimisant ainsi sa nutrition dans des contextes édaphiques contraints.

## Conclusion

L'étude menée sur "La Mycorhization du cèdre de l'Atlas" à Tikjda a permis de mettre en évidence une double association mycorhizienne chez *Cedrus atlantica*, combinant ectomycorhizes et endomycorhizes. Dix-huit morphotypes d'ectomycorhizes ont été décrits, illustrant une grande diversité morphologique et fonctionnelle. Parallèlement, la présence de structures caractéristiques des endomycorhizes confirme une colonisation intracellulaire active. Cette coexistence souligne l'importance de la mycorhization dans l'adaptation et la nutrition du cèdre de l'Atlas dans les conditions écologiques du site d'étude.

La coexistence des deux types de mycorhizes pourrait conférer au cèdre une plasticité nutritionnelle accrue, lui permettant d'exploiter à la fois les formes inorganiques du phosphore (via les AM) et l'azote organique (via les ECM), optimisant ainsi sa survie et sa croissance dans un environnement montagnard potentiellement pauvre en nutriments.

Cette modeste contribution souligne également l'intérêt de combiner les approches macroscopiques, microscopiques et fonctionnelles pour mieux comprendre les dynamiques symbiotiques dans un contexte écologique donné.

Les résultats obtenus au cours de ce travail ouvrent la voie à plusieurs perspectives de recherche visant à approfondir la compréhension des interactions mycorhiziennes. Il serait tout d'abord pertinent d'identifier les champignons impliqués à l'aide de méthodes moléculaires, afin de préciser la diversité réelle des partenaires symbiotiques. Par ailleurs, l'étude de l'évolution des symbioses au fil des saisons permettrait de mieux cerner la dynamique temporelle de ces associations et leur réponse aux variations

environnementales. L'influence des caractéristiques physico-chimiques du sol sur le degré de mycorhization représente également une piste importante pour expliquer les différences observées entre sites. En outre, des essais d'inoculation de jeunes plants en pépinière pourraient contribuer à optimiser les conditions de production et de reprise au moment du reboisement. Enfin, la valorisation des mycorhizes dans les programmes de restauration écologique et de reboisement du Cèdre de l'Atlas apparaît comme une application concrète de ces travaux, susceptible d'améliorer la survie et la croissance des plants dans des environnements dégradés.

# Références bibliographiques

## A

(Agerer, 1994 in Bournine, 2017) (Hrchaoui,2017) Bournine-Harchaoui C., 2017. La double symbiose mycorhizienne chez deux espèces forestières, *Taxus baccata* L. et *Populus nigra* L., situées dans la région de Tizi-Ouzou (Tikjda, Akfado et Ait Ziki). Thèse de doctorat en sciences biologiques. FSBSA, UMMTO. 136P

Anonyme (1983). Étude morphologique des structures reproductrices chez le cèdre de l'Atlas.

Abdessemed, A. (1981). Contribution à l'étude écologique et sylvicole du cèdre de l'Atlas en Algérie. Mémoire d'Ingénieur, INA El Harrach, 130 p.

Agerer, R. (1994). Colour Atlas of Ectomycorrhizae. Einhorn-Verlag Eduard Dietenberger GmbH, Schwäbisch Gmünd, Allemagne.

APG III (Angiosperm Phylogeny Group III). (2009). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2), 105–121.

Anonyme (1983). Étude des structures reproductives du *Cedrus atlantica*. Bulletin Forestier, INRF, Algérie.

Alger-Roi. *Thikdja, station climatique (Kabylie)*. [En ligne]

<https://alger-roi.fr/Alger/tikjda/thikdja.htm> (consulté le 26 juin 2025).

## B

Barriteau,P.,Ferrandes, P. (1990). Le cèdre de l'Atlas. *Forêt Méditerranéenne*, 11(4), 239–248.

Brundrett, M.C. (2004). Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews*.

Boullard (1990) Boullard, 1990. Guerre et paix dans le règne végétal. Editions marketing. 336P.

Béreau,M., Louisanna, E., de Grandcourt, A., Garbaye, J. (2003). Symbiose mycorhizienne et nutrition minérale

Bonanomi G., Vinale F., Scala F., 2009. The Role of Natural Products in Plant-Microbe. Bonfante P., Balestrini R., Genre A., Lanfranco L., 2009. Establishment and Functioning of Arbuscular Mycorrhizas, *The Mycota VH*, Deising (Ed) 2nd Edition. *Plant Relationships*, .259- 274p.

Bâ A., Duponnois R., Diabeté M. et Dreyfus B., 2011. Les champignons ectomycorhiziens des arbres forestiers en Afrique de l'ouest: Méthodes d'étude, diversité, écologie, utilisation en foresterie et comestibilité. Marseille. Institut de Recherches pour le Développement Editions. 252P.

Bago B ,Pfeffer PE,Shachar-Hill Y.Plant physiology 124(3),946-958,2000

Bentouati, A., Bariteau, M. (2006). Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti): Un patrimoine forestier à préserver. *Revue Forêt Méditerranéenne*, 27(3), 267–276.

Boudy, P. (1952). L'Économie forestière Nord-Africaine. Tome II: Monographies et traitement des essences forestières. La maison rustique, Paris.

Barthelemy, D., Sabatier, S., (1994). Architecture et développement du cèdre de l'Atlas. *Revue Forestière Française*, 46, 199–210.

Boutekedjiret, C., et al. (2005). Anatomie comparée des rameaux de *Cedrus atlantica*. *Acta Botanica Gallica*, 152(3), 231–238.

Brundrett, M.C. (2004). Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews*.

Brundrett, M.C. (2004). Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews*.

Benzyane, M., M'Hirit, O., & Boudy, P. (2002). Les grandes forêts du Maroc. Ed. ENFI. Boudy, P. (1952). Économie forestière nord-africaine, Tome I – Monographies et traitement des essences forestières.

Benabid, A. (1994). Biogéographie, phytosociologie et phytodynamique des cédraies de l'Atlas. Thèse de Doctorat d'État, Université Cadi Ayyad, Marrakech.

Benzyane, M. (1982). Le cèdre de l'Atlas : écologie et possibilités de gestion.

Boukef, K. (1986). Plantes médicinales traditionnelles utilisées en phytothérapie au Maghreb.

Benzyane, M. (1997). Stratégies de conservation du cèdre au Maroc. Boudy, P. (1952). Économie forestière nord-africaine, Tome I. Benzyane, M. (1982). Le cèdre de l'Atlas : écologie et gestion.

Bâ, A.M., et al. (2011). Les champignons mycorhiziens et la gestion durable des sols tropicaux. IRD Éditions.

Bago, B., Pfeffer, P.E., Shachar-Hill, Y. (2000). Carbon metabolism and transport in arbuscular mycorrhizas. *Plant Physiology*, 124(3), 949–957.

Brundrett, M. (2004). Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews*, 79(3), 473–495.

(Besserer et al, 2008) Besserer, A., Becard, G., Jauneau, A., Roux, C. and

Sejalon-Delmas, N., 2008. GR24, a synthetic analogue of strigolactones, stimulates the mitosis and growth of the arbuscular mycorrhizal fungus *Gigaspora rosea* by boosting its energy metabolism, *Plant Physiol*, 148: 402-413.

Bonanomi G., Vinale F., Scala F., 2009. The Role of Natural Products in Plant-Microbe Interactions, A. E. Osbourn and V. Ianzotti (eds.), *Plant-derived Natural Products*, 301-320p.

(Benmouffok, 1995 *in* Ouramdane et Smah, 2012)

Bournine-Harchaoui C., 2017. La double symbiose mycorrhizienne chez deux espèces forestières, *Taxus baccata* L. et *Populus nigra* L., situées dans la région de Tizi-Ouzou (Tikjda, Akfado et Ait Ziki). Thèse de doctorat en sciences biologiques. FSBSA, UMMTO. 136P

Benmouffok, 1995

## C

Cumins, G.B., & Richter, F.I. (1948). In: Fowler, D.P. (1964). *Pollination and cone development in conifers*. US Forest Service Bulletin.

Chevalier, G., Planchette, C., et al. (1990). *Mycorhizes et nutrition minérale des plantes*. INRA, Paris.

## D

Dommergues et Mangenot, 1970. *Ecologie microbienne du sol*. Ed Masson & Cie, 796P.

Duponnois R., Hafidi M., Ndoye I., Ramanankierana H. et Bâ A., 2013. *Des champignons symbiotiques contre la désertification*. IRD Editions, Marseille.

Duponnois R., Hafidi M., Ndoye I., Ramanankierana H. et Bâ A., 2013. *Des champignons symbiotiques contre la désertification*. IRD Editions, Marseille.

Derridj, A. (1990). *Le cycle reproducteur du cèdre de l'Atlas*. *Revue Forestière Française*.

Derridj, A. (1990). *Phénologie et écologie du cèdre en Algérie*.

Debazac, E. (1964). *Les forêts naturelles de l'Algérie*. *Revue Forestière Française*, 16(4), 351–360.

Derridj, A. (1990). *Le cèdre de l'Atlas: Biologie, écologie, répartition et problèmes de conservation*. *Revue de l'INRF, Algérie*.

Duponnois, R., et al. (2011). Les symbioses mycorhiziennes, un outil pour la réhabilitation écologique des écosystèmes dégradés. CIRAD, UMR LSTM.

Duponnois, R., et al. (2013). Interactions sol-plante-microorganisme et restauration des écosystèmes. CIRAD Éditions.

Dommergues et Mangenot, 1970. Ecologie microbienne du sol. Ed Masson & Cie, 796P.

## E

Ezzahiri, B. (2000). Régénération du cèdre de l'Atlas dans les cédraies marocaines. Ezzahiri, B. (2000). Régénération naturelle du cèdre de l'Atlas au Maroc.

Egli S, Brunner I, 2002. Les mycorhizes. Notice pour le praticien 35(8)

Egli, S., Brunner, I. (2002). Mycorrhiza and soil organisms. In: Gange & Brown (Eds.), Multitrophic Interactions in Terrestrial Systems. Blackwell.

Extrait de : Fondation Klorane Botanical, *Le Cèdre de l'Atlas*, « Organes de reproduction », consulté le 26 juin 2025, sur le site de la Fondation :

<https://www.kloranebotanical.foundation/la-botanique/fiches-plantes/le-cedre-de-latl as>

## F

Fortin-Gagnon, O.L.V.I.E.R. 2016. L'INCERTITUDE MACROECONOMIQUE AU CANADA ET AU QUEBEC.

(Fortin et Fortin, 1973 in Harchaoui, 2003) Harchaoui, 2003. La mycorhization du peuplier. Influence de l'environnement sur cette mycorhization. Thèse de Magistère. Mouloud Mammeri TiziOuzou.

Fortin-Gagnon, O. L.V. I. E. R. (2016). L'INCERTITUDE MACROECONOMIQUE AU CANADA ET AU QUEBEC.

Fondation Klorane Botanical. *Le Cèdre de l'Atlas*. [En ligne] Disponible sur :

<https://www.kloranebotanical.foundation/la-botanique/fiches-plantes/le-cedre-de-latl as>

(consulté le 26 juin 2025).

## G

Garbaye, J., & Churin, J.L. (1997). Mycorrhization contrôlée du cèdre de l'Atlas avec *Pisolithus tinctorius*. INRA.

(Garbaye, 2013). Garbaye J. 2013. La symbiose mycorhizienne : une association entre les plantes et les champignons, Editions Quae, 280p.

(Genre et al, 2005). Genre A., Chabaud M., Timmers T., Bonfante P., Barker D.G., 2005. Arbuscular

mycorrhizal fungi elicit a novel intracellular apparatus in *Medicago truncatula* root epidermal

cells before infection. *Plant Cell.*, 17:3489-3499

Gaussen, H. (1967). Les gymnospermes actuelles. Tome 1, fascicule 2. Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Paris.

Gauquelin, T., et al. (2005). Les cédraies de l'Atlas marocain : écologie, dynamique et enjeux. *Sécheresse*, 16(4), 257–264

Garbaye, J., & Churin, J.L. (1997). Mycorrhization contrôlée du cèdre de l'Atlas avec *Pisolithus tinctorius*. INRA.

Garbaye, J. (2013). La symbiose mycorhizienne en foresterie : bénéfiques et applications. *Revue Forestière Française*.

Garbaye, J., & Churin, J.L. (1997). Mycorrhization contrôlée du cèdre de l'Atlas avec *Pisolithus tinctorius*. INRA.

Gauquelin, T., et al. (2005). Les cédraies de l'Atlas marocain : écologie, dynamique et enjeux. *Sécheresse*, 16(4), 257–264.

Gauquelin, T., et al. (2005). Conservation des cédraies de l'Atlas: approche biogéographique et enjeux. *Forêt Méditerranéenne*, 26(2), 135–150.

## H

Harley JL (1989), The significance of mycorrhiza. *Micological Research* 92 :129-139. Harley, J.L., Smith, S.E. (1983). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, London.

## I

Interactions, A. E. Osbourn and V. Lanzotti (eds.), *Plant-derived Natural Products*, 301-320p.

## J

JACQUIOT C., 1978. *Ecologie des champignons forestiers*. Ed. Bordas. Paris, 194p

Javot H., Penmetsa R.V., Terzagui N., Cook D.R. & Harrison M.J. 2007. *Medicago truncatula* phosphate transporter indispensable for the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104: 1720-1725

Jacquot, C. (1978). Les mycorhizes des arbres forestiers. Revue Forestière Française, 30, 417-427.

## K

Krouchi, F. (2010). Étude de la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas dans la forêt de Guerrouche (Jijel, Algérie). Thèse de Magister, INRF.

## L

LANIER L., 1976. Mycologie et pathologie forestières. Tome II. Pathologie forestière. Edition Masson. Paris. 16-26.

Lanier, L., et al. (1976). Les mycorhizes des arbres forestiers. Bois et Forêts des Tropiques, 161, 3-14.

Le Tacon F., Jung G., Mugnier J. et Michelot P., 1985. Efficiency in a forest nursery of an ectomycorrhizal fungus inoculum produced in a fermentor and entrapped in polymeric gels. Canadian Journal of Botany. 63: 1664-1668.

## M

MOSSE B.,(1973).Advance in the study of vascular arbutular mycorrhiza. Ann.Rev phytopathol.11:171-196

M'Hirit, O. (2006). Le cèdre de l'Atlas : écologie et aménagement.

Mardaga. Maire, R. (1952). Flore de l'Afrique du Nord. Vol. II. Lechevalier, Paris.

Martin, F., et al. (2001). Molecular basis of symbiosis between ectomycorrhizal fungi and trees. In Mycorrhizal Technology in Agriculture.

M'Hirit, O. (2006). Le cèdre de l'Atlas: écologie et aménagement. IAV Hassan II, Maroc.

## N

Nezzar-Hocine, K. (1998). Étude de l'écologie du cèdre de l'Atlas en Algérie et impact des mycorhizes. Thèse de Doctorat, Université de Tizi-Ouzou.

(Nezzar-Hocine, 1998). Nezzar-Hocine H., 1998. Associations

mycorhiziennes naturelles de Cedrus atlantica dans le

massif du Djurjura (Algérie) et mycorhization contrôlée. Thèse de doctorat en

Biologie et

Physiologie végétale, UNV Blaise Pascal, France. 479P.

Nezzar-Hocine, K. (1998). Étude de l'écologie du cèdre de l'Atlas en Algérie et impact des mycorhizes. Thèse de Doctorat, Université de Tizi-Ouzou.

(NICOLSON, 1959; MOSSE, 1981).NICOLSON.T H.,(1959).Mycorrhizas in the Gramineae.I-vesicular-arbuscular endophyte,with special reference to the external phase .Trans.Brit.Mycol.Soc.p:42,421-438.

## O

Ouramdane et Smah,  
2012).

## P

Peterson R.L., Massicotte H.B et Melville L.H. 2004. Mycorrhizas: anatomy and cell biology. CABI publishing. 182p.

PLANCHETTE C., 1982. Les endomycorhizes à vésicules et arbuscules. Un potentiel à exploiter en agriculture. Phytoprotection, 63 (2), 86-108.

(Pinus nigra subsp mauretunica) au Djurdjura. Thèse de doctorat en sciences biologiques.FSBSA, UMMTO. 216P.

Peyret-Guzzon M., 2014. Etudes moléculaires de la diversité des communautés et populations des champignons mycorhiziens à arbuscules (Glomeromycota). Sciences agricoles. Université de Bourgogne, France. 191P.

Pichot, C., et al. (2006). Biologie de la reproduction du cèdre de l'Atlas. Forêt Méditerranéenne, 27(2), 97–108.

## Q

Quézel, P., & Médail, F. (2003). Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Elsevier.

Quézel, P., & Médail, F. (2003). Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Elsevier.

Quézel, P., Médail, F. (2003). Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Elsevier, Paris.

Quézel, P., & Médail, F. (2003). Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Elsevier.

## R

Rameau, J.-C., Mansion, D., & Dumé, G. (1989). Flore forestière française. Tome 1 : Plaines et collines. IDF.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dumé, G. (1989). Flore forestière française: guide écologique illustré. Tome 1. Institut pour le développement forestier.

Rincón, A., et al. (2005). Ectomycorrhizal fungal communities associated with Pinus and Cedrus in reforested areas. Mycorrhiza.

Rincón, A., et al. (2005). Ectomycorrhizal fungal communities associated with Pinus and Cedrus in reforested areas. Mycorrhiza.

ROCHE E., 2006. Palynologie de la région méditerranéenne. Université de Liège. Notes de cours, inédit

## S

Strullu D. G., 1991. Les mycorhizes des arbres et plantes cultivées. Edition Lavoisier. 254P.

Smith S.E et Read D. 2008. Mycorrhizal symbiosis, third ed. Academic Press, New York

Strullu D.G. 1991. Les mycorhizes des arbres et plantes cultivées. Technique de documentation, Lavoisier, Paris, 250p.

Son CL ,Smith SE ,1988.Mycorrhizal growth responses :interactions between photon irradiance and phosphorus nutrition .New physiologist 108(3),305-314

Strullu D. G., 1991. Les mycorhizes des arbres et plantes cultivées. Edition Lavoisier. 254P.

St-Arnaud M., Hamel C., Vimard B., Caron M. et Fortin J.A., 1997. Inhibition of Fusarium oxysporum f.sp. dianthi in the non-VAM species Dianthus caryophyllus by coculture with Tagetes patula companion plants colonized by Glomus intraradices. Canadian Journal of Soil Science. 54: 725-733.

Smail (2017) Smail A., 2017. Etude de la biodiversité des microorganismes symbiotiques chez le Pin Noir

Schaarschmidt S, González M-C,Roitsch T, Strack D, Sonnewald U,2007. Hause B. Regulation of arbuscular mycorrhization by carbon.The symbiotic interaction cannot be improved by increased Carbon availability accomplished by root-specifically enhanced invertase activity. Plant physiology 143(4)1827-1840

Smith, S.E., & Read, D.J. (2008). Mycorrhizal Symbiosis. Academic Press.

Smith, S.E., Read, D.J. (2008). Mycorrhizal Symbiosis. 3rd edition. Academic Press, London.

Strullu, D.G. (1991). Mycorhizes. Fonctionnement, rôle et intérêt agronomique.

Lavoisier, Paris.

## T

Toth, J. (1980). Les cédraies des Aurès : contraintes écologiques. Toth, B. (2005). Biologie de la reproduction chez les Cèdres. Revue de Botanique Forestière.

Toth, J. (1970). Le cèdre de l'Atlas : Étude écologique et sylvicole.

Toth, J. (1980). Les cédraies de l'Aurès : contraintes climatiques et régénération naturelle.

Toth, J. (1970). Le cèdre de l'Atlas : écologie et sylviculture.

Toth, J. (1980). Les cédraies des Aurès : contraintes écologiques.

Toth, J. (1980). Le cèdre en Algérie. Forêt Méditerranéenne, 2(3), 189–200.

Toth, J. (2005). Le cèdre de l'Atlas: Bilan écologique et perspectives sylvicoles. Forêt Méditerranéenne, 26(1), 9–16.

## W

Wright SF, Upadhyaya A, 1998. A survey of soils for aggregates stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. Plant and Soil 198: 97- 107









# Annexes :

Annexe 01

	granuleuse ou verruqueuse
	densément laineux
	très cotonneuse
	denses ficelles
	en feutrage (réticulée)
	lisse

[Morphologie des extrémités non ramifiées des ectomycorhizes \(www.Deemy de.\)](http://www.Deemy.de)

Annexe 02

	simple
	monopodiale-pennée
	monopodiale-pyramidale
	dichotomique
	Irrégulière, pennée à dichotomique
	coralloide
	noduleuse
	tressée

[Morphologie des extrémités non ramifiées des ectomycorhizes \(www.Deemy de\)](http://www.Deemy.de)

**Préparation du fixateur FPA :**

Acide propionique.	5%
Formol	3%
Alcool à 70° (éthanol).	92%

**Annexe 03****Préparation de la potasse à 10% :**

Potasse en pastilles	100g
Eau distillée.	1L

Préparation de 1000 ml de solution colorante de Bleu trypan au lacto-glycérole

Colorant bleu	0.5g
Acide lactique	333ml.
Glycérol	333ml.L %27
Eau distillé	333 ml.

Agitation magnétique environ 30min.

**Annexe 05****Acide lactique à10%**

Acide lactique	100ml
Eau distillé	1000ml

# Résumé :

*Cedrus atlantica* (cèdre de l'Atlas) est une espèce forestière emblématique des montagnes d'Afrique du Nord. L'objectif principal de notre contribution est de caractériser les types de mycorhizes associés à cette espèce dans la région de Tikjda (Algérie). Une étude morphologique et anatomique a permis d'identifier deux types de symbioses : les endomycorhizes et les ectomycorhizes. Dix-huit morphotypes d'ectomycorhizes ont été décrits et selon leur couleur, forme, distribution, phase extra matricielle et présence ou absence de rhizomorphes. Une classification selon les types d'exploration fongique a également été proposée.

Des structures endomycorhiziennes ont été également observées, suggérant l'existence d'une double symbiose chez *Cedrus atlantica*. Un échantillonnage plus exhaustif permettrait de confirmer cette coexistence des deux types de mycorhize.

**Mots clés:** *Cedrus atlantica*, ectomycorhizes, types exploratoires, endomycorhizes.

# Summary:

*Cedrus atlantica* (Atlas cedar) is an emblematic forest species of the North African mountains. The main objective of our contribution is to characterize the types of mycorrhizae associated with this species in the Tikjda region (Algeria). A morphological and anatomical study identified two types of symbioses: endomycorrhizae and ectomycorrhizae. Eighteen ectomycorrhizae morphotypes were described based on their color, shape, distribution, extra-matrix phase, and presence or absence of rhizomorphs. A classification based on fungal exploration types was also proposed.

Endomycorrhizal structures were also mentioned, suggesting the existence of a dual symbiosis in *Cedrus atlantica*. More exhaustive sampling will confirm this

coexistence of the two types of mycorrhizae. Keywords: *Cedrus atlantica*, ectomycorrhizae, exploratory types, endomycorrhizae.

**Keywords:** *Cedrus atlantica*, ectomycorrhizae, exploratory types, endomycorrhiza