REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE MEDEA
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT D'AGRONOMIE



Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de **Master**

En Sciences Agronomiques

Spécialité : Phytopathologie

Par :
AYACHE Asmaa

ZOUANI Wafaa Hazar

Thème :

Impact des interactions biotiques entre scolytes et champignons sur la vulnérabilité des pinèdes dans la région Ksar El Boukhari

Soutenue publiquement le : 23 /06 /2026, Devant le jury composé de :

KIROUANI A.	**Professeur**	U. Médéa	Président
SIOUDA W.	**MCA**	U. Médéa	Examinateur
KHELLAF N.	**MCA**	U. Médéa	Encadreur
DEROUECHE H.	**MCA**	U. Djelfa	Co-Encadreur

Année universitaire 2025/2026


بسم الله الرحمن الرحيم



Remerciements

Avant tout, nous avant tout, nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Licir Mourad, chef du département, pour son soutien et ses encouragements.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrante, Khellaf Nora, pour son encadrement, sa disponibilité, ses conseils précieux et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons également nos sincères remerciements au président du jury, Kirouani Abdel Razak, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider ce jury.

Nos sincères remerciements s'adressent également au premier examinateur, Siouda Wafa, ainsi qu'à Derouèche Houda (Université de Djelfa), pour l'intérêt porté à notre travail et pour leurs remarques constructives.

Nous tenons à remercier chaleureusement les services de la Conservation des Forêts de Médéa, de la Conservation des Forêts de Ksar El Boukhari, ainsi que l'ONM de Médéa, pour leur collaboration, leur collaboration, leur disponibilité ainsi que les moyens mis à notre disposition pour la réalisation de ce travail.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce mémoire.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À celui qui a arraché les épines de mon chemin pour m'ouvrir la voie du savoir,

à mon père, mon héros, que je porte dans mon cœur avec une immense fierté.

À la main douce, au cœur tendre et aux prières sincères,

à ma mère chérie, source inépuisable d'amour, de patience et de soutien.

À mon encadrante Khallef Nora,

Qui nous a accompagnés tout au long de ce parcours et s'est investie avec nous dans la réalisation de ce mémoire.

Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance et de mon respect.

À mon frère Abdel Bassit et à ma sœur Ilham,

Pour leur affection et leur présence à mes côtés ;

Je leur souhaite pleine réussite et un bel avenir.

À toute ma famille, telle qu'elle est,

Avec une pensée particulière pour mon oncle Karim,

Merci pour le soutien, les encouragements et l'amour.

À mes chères amies :

Asmaa, Bouchra, Bicha, Yousra,

Et à toutes mes amies sans exception,

Merci pour votre amitié sincère et votre soutien.

À mes amis,

Fekir Adel, pour son aide précieuse dans la réalisation de ce mémoire,

Et Baahmed Imad Dine, à qui je souhaite beaucoup de réussite.

Enfin, à mon ami Morsli Abdel Karim,

Qui a toujours été à mes côtés dans ma vie, dans mes études et tout au long de mon parcours.

Je l'estime énormément et lui souhaite une longue vie ainsi que la réalisation de tous ses vœux.

Wafaa hazar



Dédicace

À mes très chers parents, sources de mon courage, de ma force et de ma réussite. Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leurs prières qui ont illuminé mon chemin. Que Dieu les protège et leur accorde une longue vie à mes côtés.

À mes chers frères et sœurs, ainsi qu'à leurs enfants, à qui je porte tout mon amour et ma profonde affection.

À mon honorable enseignante encadrante, en témoignage de ma sincère gratitude pour ses précieux conseils, sa patience, son accompagnement et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

À ma très chère amie Hazar Zouani, ainsi qu'à mes chères amies Chayma, Chahinez, Fatima, Bouchra et Lamia, pour leur présence, leur soutien et tous les beaux moments partagés ensemble.

À mes chers amis Ayad Noureddine, Adel Fekir, Ahmed Imad Eddine et M. Abdalah, en signe de reconnaissance pour leurs encouragements, leur soutien et leur présence à mes côtés.

À mes collègues, mes camarades et tous ceux qui ont partagé avec moi ce parcours universitaire, avec ses efforts, ses défis et ses instants de bonheur.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation et à la réussite de ce travail, je dédie ce modeste mémoire avec toute ma reconnaissance et mon profond respect.

Ayache Asmaa

Résume :

Ce mémoire analyse les interactions entre les scolytes, les champignons associés et le Pin d'Alep (*Pinus halepensis*) dans la forêt de Ksar El Boukhari afin d'évaluer leur rôle dans le dépérissement des pinèdes. L'étude a permis d'identifier 198 isolats fongiques, dominés par *Trichoderma*, *Cladosporium* et *Fusarium*, ainsi que plusieurs espèces de scolytes, dont *Tomicus destruens* et *Orthotomicus erosus*. Les résultats montrent que l'action conjointe des scolytes, des champignons et de la sécheresse accentue la vulnérabilité des peuplements. L'étude souligne l'importance du suivi phytosanitaire et de l'utilisation de *Trichoderma* dans la gestion durable des forêts.

Mots-clés : *Pinus halepensis, Scolytes Champignons, associés, Interactions biotiques, Dépérissement forestier, Trichoderma spp.*

الملخص :

تتناول هذه الدراسة التفاعلات الحيوية بين خنافس اللحاء والفطريات المصاحبة لها وصنوبر حلب (*Pinus halepensis*) في غابة قصر البخاري، بهدف تقييم دورها في تدهور الغابات. أسفرت الدراسة عن عزل 198 عزلة فطرية، هيمنت عليها أجناس *Trichoderma* و*Cladosporium* و*Fusarium*، كما تم تحديد عدة أنواع من خنافس اللحاء، أبرزها *Tomicus destruens* و*Orthotomicus erosus*. وأظهرت النتائج أن التفاعل بين خنافس اللحاء والفطريات والجفاف يزيد من قابلية الغابات للتدهور، مما يؤكد أهمية المراقبة الصحية للغابات والاستفادة من *Trichoderma* في الإدارة المستدامة.

الكلمات المفتاحية: صنوبر حلب(Pinus halepensis) ، خنافس اللحاء (السوس القلفي)، الفطريات المصاحبة، التفاعلات الحيوية، تدهور الغابات، الفطريات المضادة حيويًا (Trichoderma spp.)

Abstract :

This study examines the biotic interactions between bark beetles, associated fungi, and Aleppo pine (*Pinus halepensis*) in the Ksar El Boukhari forest to assess their role in forest decline. A total of 198 fungal isolates were identified, with *Trichoderma*, *Cladosporium*, and *Fusarium* as the dominant genera. Several bark beetle species, including *Tomicus destruens* and *Orthotomicus erosus*, were also recorded. The results indicate that the combined effects of bark beetles, fungi, and drought increase the vulnerability of Aleppo pine stands. The study emphasizes the importance of forest health monitoring and the use of *Trichoderma* for sustainable forest management.

Keywords: *Pinus halepensis, Bark beetles, Associated fungi, Biotic interactions, Forest decline, Trichoderma spp.*

Table des matières

Table des matières :

Remerciements

Dédicace

Résume

الملخص

Abstract

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des Tableaux

Introduction générale **……1**

Chapitre I : Bases générales sur le Pin d'Alep, les scolytes et les champignons associés

1. Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis Mill.*) ……...……4

1.1. Description et classification botanique ……..…..…4

1.2. Systématique……...……..7

1.3. Aire de répartition géographique…….…9

1.4. Rôle écologique et dynamique de croissance…….11

1.5. Adaptations physiologiques et phénologiques…….……..11

1.6. Diversité génétique et caractéristiques morphométriques……..…12

1.7. Ravageurs du Pinus halepensis……...……12

1.8. Les propriétés thérapeutiques et usage traditionnel…….……..13

1.9. Composition chimique et activités antimicrobiennes…….……13

2. Les insectes xylophages : cas des scolytes……...13

2.1. Caractéristiques générales et classification……14

2.2. Régime alimentaire……...…16

2.3. Biologie et cycle de développement……..……16

2.4. Mécanismes de défense de l'arbre face aux attaques…….18

2.5. Types et impacts des dégâts……..…….21

Table des matières :

2.6. Méthodes de lutte et de contrôle…….22

2.7. Stratégies adaptatives selon C.G. Mayers…….……26

3. Champignons associés aux scolytes et à l'arbre hôte……26

3.1. Définition et importance écologique……...…...26

3.2. Principaux genres fongiques……..…26

3.3. Fonctions physiologiques et nutritionnelles……...26

3.4. Champignons pathogènes du Pin d'Alep……..…….27

3.5. Facteurs favorisant les infections fongiques……...27

3.6. Mesures de gestion et de prévention …….28

Chapitre II : Interactions scolytes–champignons et leur rôle dans le dépérissement des pinèdes

1. Nature des interactions symbiotiques……30

1.1. Types de symbiose : mutualisme, commensalisme et parasitisme……30

1.2. Spécificité des associations scolyte–champignon……..……31

1.3. Champignons vecteurs et associés aux scolytes……..…..31

1.4. Rôle écologique des mycangia dans la symbiose……..…33

1.5. Évolution et coadaptation entre scolytes et champignons…….33

1.6. Perspectives de lutte biologique ciblant la symbiose…….34

1.7. Étude de cas : Dendroctonus micans en région méditerranéenne……..……35

1.8. Schéma conceptuel des interactions scolyte–champignon……36

1.9. Analyse comparative entre champignons mutualistes et pathogènes……..……..36

1.10. Situation des forêts algériennes : enjeux et perspectives locales…….37

2. Interaction scolyte–arbre hôte……..……38

2.1. Interaction scolyte champignon et arbre hôte…….38

3. Interaction champignon arbre……..39

Table des matières :

4. Cas de Austroplatypus incompertus : un exemple de dimorphisme morphologique et fonctionnel……45

5. Mécanisme d'installation des Scolytes…….46

Chapitre III : Matériel et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude (Ksar El Boukhari) ……..…48

1.1 Situation géographique……...……48

1.2 Situation administrative…….…..……48

1.3 Cadre climatique…….…..……..49

1.4 Travail sur le terrain……...…….50

2. Travail au laboratoire……..……..…56

2.1 Documentation morphologique et imagerie……...….58

3. Méthodes d'analyse des données……..……60

Chapitre IV : Résultats et Discussion

1. Isolement et identification des champignons associés au pin d'Alep……77

1.1 Diversité fongique dans les différentes parties de l'arbre……77

1.2 Répartition des isolats fongiques selon les organes étudiés…….……..88

1.3 Dominance et préférences tissulaires……..89

1.4 Spécialisation tissulaire des genres fongiques dominants……...……90

2. Analyse de la diversité fongique associée aux insectes……90

2.1 Présentation des espèces identifiées……90

2.3 Analyse et discussion de la mycoflore associée…….……90

Conclusion générale ……..……..…99

Référence bibliographique …….……..…..…104

Liste des figures

Liste des figures :

Chapitre I : Données générales sur le Pin d'Alep, les scolytes et les champignons associés

Figure 1 : Arbre du Pin d'Alep……4

Figure 2 : l'écorce du Pin……..…….5

Figure 3 : Les feuilles du Pin d'Alep……..……6

Figure 4 : les chatons males de Pin……..……6

Figure 5 : Les cônes femelles……..…7

Figure 6 : Aire de répartition du Pin d'Alep en région méditerranéenne……10

Figure 7 : Répartition du Pin d'Alep en Algérie…….…….11

Figure 8 : Morphologie des Xyleborini (Coleoptera : Scolytidae). Structure globale du corps, nomenclature de l'armature élytrale, variation des protibias, variation du club antennal……14

Figure 9 : Les trois sous-familles de scolytes : a) Sous-famille des Scolytinae ; b) Sous-famille des Hylesinae ; c) Sous-famille des Ipinae……..…15

Figure 10 : Cycle biologique du scolyte…….……18

Figure 11 : Présentation des dégâts causés par les scolytes……21

Figure12 : Incinération des sujets attaqués…….……24

Figure 13 : Différents types de pièges à phéromone……25

Figure 14 : Comment pulvériser des insecticides chimiques à l'aide d'un avion……25

Chapitre II : Interactions scolytes–champignons et leur rôle dans le dépérissement des pinèdes

Figure 1 : Interactions fonctionnelles entre les scolytes et les champignons……..…36

Figure 2 : Localisation et structure des mycangia chez différentes espèces de scolytes……..40

Liste des figures

Figure 3 : Le cycle du mycangium. Étapes numérotées commedétaillées dans le texte……..……43

Figure 4 : Mycangia de la femelle…….45

Figure 5: Crêtes élytrales de la femelle…….46

Chapitre III : Matériel et méthodes

Figure 1 : Situation géographique de la région de Ksar El Boukhari (Médéa, Algérie)……...……..49

Figure 2: Variation mensuelle moyenne des précipitations……..……51

Figure 3 : Variation mensuelle des températures moyennes……52

Figure 4 : Variation mensuelle de la vitesse moyenne du vent……53

Figure 5 : Variation mensuelle de l'humidité relative…….54

Figure 6: Climagramme pluviométrique d'Emberger de la zone d'étude (2004-2024)……55

Figure 7: Sélection des arbres atteints de symptômes de dépérissement (original)……56

Figure 8: Exemple de prélèvements sur un Pin d'Alep……58

Figure 9: Échantillons collectés sur les sujets de Pin d'Alep (Original)……..59

Figure 10: Scolytinae : Vue d'un coléoptère xylophage……60

Figure 11: Isolement fongique à partir des fragments d'organes sur milieu PDA……63

Figure 12 : Mise en culture des échantillons sur milieu PDA (Original)……..64

Figure 13: Préparation et conservation aseptique des boîtes de PDA. (original 2026)…….65

Figure 14: Préparation aseptique du milieu de culture PDA et sa conservation (original 2026)…….65

Figure 15: Milieu PDA enrichi en gentamicine liquide pour réduire la contamination…...66

Figure 16: Boîtes de Petri préparées avec un milieu PDA stérile (original 2026)……..67

Figure 17: Milieu PDA préparé dans des boîtes de Pétri pour l'isolement fongique (original)……..……67

Figure 18: Vue de face d'une culture fongique sur milieu PDA (CPR. Original)……68

Liste des figures

Figure 19: Vue de dos d'une culture fongique sur milieu PDA (R .S) (original)……..68

Figure 20: Vue de face et Vue de dos d'une culture fongique sur milieu PDA (T) (original)……..69

Figure 21: Caractérisation morphologique d'une souche fongique pour identification. (original)……..70

Figure 22: Vue de face d'une culture fongique sur milieu PDA (.original).....71

Figure 23: Vue de dos d'une culture fongique sur milieu PDA (T) (CRP. original).....72

Figure 24: Stéréomicroscope trinoculaire avec caméra numérique (original 202.....72

Figure 25: Observation macroscopique des différentes espèces.....73

Figure 26: Morphologie macroscopique de Aspergillus sp. (observée à la loupe CRP (original).....74

Figure 27: Morphologie macroscopique de sp. Observée à la loupe (2026).....74

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Figure 1 : Répartition des genres fongiques selon les organes du Pin d'Alep.....83
Figure 2 : Répartition proportionnelle des genres fongiques isolés à partir de l'écorce.....85
Figure 3 : Répartition proportionnelle des genres fongiques isolés à partir des cônes.....86
Figure 4 : Répartition globale des genres fongiques isolés.....87
Figure 5 : Oribatida sp. (acarien oribate).....91
Figure 6 : Tomicus destruens (adulte et larve).....92
Figure 7 : Galeries de Tomicus destruens.....92
Figure 8 : Crypturgus numidicus.....93
Figure 9 : Pityogenes bidentatus.....93
Figure 10 : Tribolium castaneum.....94
Figure 11 : Orthotomicus erosus.....95

Liste des tableaux :

Chapitre II : Interactions scolytes–champignons et leur rôle dans le dépérissement des pinèdes

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques des champignons mutualistes et pathogènes associés aux scolytes.....37

Chapitre III : Matériel et méthodes

Tableau 1 : Caractéristiques climatiques (M, m, P, Q2) de la zone d'étude.....55
Tableau 2 : Coordonnées géographiques des stations d'échantillonnage.....57
Tableau 3 : Matériels utilisés lors des prélèvements et analyses.....61

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Tableau 1 : Répartition des isolats fongiques selon les organes étudié.....77
Tableau 2 : Aspect morphologique des espèces isolées (organes de l'arbre).....81
Tableau 3 : Caractéristiques macroscopiques des principaux genres fongiques isolés au cours de l'étude…….82

Tableau 4 : Répartition des genres fongiques isolés à partir des insectes.....94
Tableau 5 : Aspect morphologique des espèces isolées sur les insectes.....96

Introduction générale

Introduction générale

Introduction

Les écosystèmes forestiers méditerranéens occupent une place essentielle dans le maintien de l'équilibre écologique et environnemental. Parmi les espèces forestières les plus représentatives de cette région figure le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.), connu pour sa grande capacité d'adaptation aux conditions climatiques difficiles, notamment la sécheresse et les fortes températures. En Algérie, cette essence constitue une composante majeure du patrimoine forestier et joue un rôle important dans la protection des sols, la conservation de la biodiversité et la lutte contre la désertification (Kadik, 2011 ; Quézel, 2000).

Les pinèdes sont cependant exposées à de nombreuses contraintes biotiques et abiotiques qui affectent leur stabilité et leur productivité. Parmi les agents biotiques les plus importants figurent les scolytes, insectes xylophages capables de coloniser les tissus ligneux des arbres et de provoquer leur affaiblissement, notamment lorsque ceux-ci sont soumis à des conditions de stress environnemental (Lieutier *et al*., 1992 ; Lieutier, 2004).

Les scolytes entretiennent des relations étroites avec différents champignons transportés lors de la colonisation des arbres hôtes. Ces associations peuvent être mutualistes, commensales ou pathogènes et jouent un rôle déterminant dans la nutrition des insectes, la colonisation du bois ainsi que dans le développement de maladies forestières. L'action conjointe des scolytes et des champignons peut accélérer le dépérissement des arbres et augmenter leur vulnérabilité face aux perturbations environnementales (Francke-Grosmann, 1967 ; Six & Wingfield, 2011 ; Paine *et al*., 1997).

Dans la région de Ksar El Boukhari, les peuplements de Pin d'Alep représentent une composante importante du paysage forestier. Toutefois, l'augmentation des épisodes de sécheresse et la présence d'agents pathogènes favorisent l'installation de complexes scolytes–champignons susceptibles d'altérer la santé des pinèdes. L'étude de ces interactions apparaît donc indispensable pour mieux comprendre les mécanismes de dépérissement observés dans ces écosystèmes forestiers (Guit, 2015)

Le présent travail porte sur l'impact des interactions biotiques entre les scolytes et les champignons sur la vulnérabilité des pinèdes dans la région de Ksar El Boukhari. Son objectif est de mettre en évidence les caractéristiques biologiques de ces organismes, les différents types d'interactions qu'ils développent ainsi que leurs conséquences sur l'état

sanitaire des peuplements forestiers. Pour cela, ce travail est structuré en quatre chapitres : le premier présente les bases générales relatives au Pin d'Alep, aux scolytes et aux champignons associés, tandis que le second traite des interactions scolytes–champignons et de leur rôle dans le dépérissement des pinèdes.

Chapitre I : Données générales sur le Pin d'Alep, les scolytes et les champignons associés

1. Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis Mill.*)

Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis Mill.*) Est une espèce de pin largement répandue dans la zone méditerranéenne, représentant l'une des unités écologiques les plus valorisées et présentes dans les forêts algériennes, tant en termes de superficie qu'il couvre que par le rôle qu'il joue dans l'économie forestière des nations de cette région (Kadik, 1987 ; Guit, 2015).

Cet arbre se distingue nettement dans le paysage par son feuillage vert clair et s'adapte à presque tous les bioclimats, à l'exception des régions arides et hyper-arides, où il constitue avec le genévrier rouge la dernière manifestation forestière précédant les Steppes présahariennes et les formations végétales du Sahara. En Algérie, cette espèce spontanée plastique possède la plus large zone de distribution, étant capable de s'adapter à tous les types de sol (Kadik, 2011). Les forestiers ont été encouragés à l'introduire massivement dans les programmes de reboisement en raison de sa facilité de multiplication et de ses modestes besoins écologiques.

1.1. Description et classification botanique

Le Pin d'Alep est un conifère persistant qui peut atteindre une hauteur de 25 à 27 mètres, et dont la durée de vie ne dépasse généralement pas 150 ans. Au tronc sinueux, asymétrique et ramifié (Abloul et Ladja, 2020) (Figure 1)



Figure 1 : Arbre du Pin d'Alep

Chez les jeunes arbres, l'écorce est lisse et d'un gris argenté, tandis que chez les adultes, elle se transforme en un rhytidome présentant des fissures plus ou moins marquées en écailles fines, larges et aplaties de teinte rougeâtre (ABLOUL et LADJAL, 2020). (Figure 2).



Figure 2 : l'écorce du Pin (ABLOUL et LADJAL, 2020)

- Bourgeons cylindro-coniques, 7-8 mm, non résineux (ABLOUL et LADJAL ,2020)
- Aiguilles très fines (< 1 mm) ; mesurent 5 à 10 cm de long ; réunies par deux, rarement par
- Trois dans une gaine ; groupées en pinceaux à l'extrémité des rameaux (Figure 3) ; de couleur
- Verte jaunâtre, Ces pseudophylles sont persistantes. (ABLOUL et LADJAL, 2020)



Figure 3: Les feuilles du Pin d'Alep (GARRIGE, 2003)

- Les cônes mâles de 6 à 7 cm rassemblant à des chatons dressés, produisent une grande quantité de pollen jaune orangé dispersé par le vent (Figure 04) (NAHAL, 1983).



Figure 4 : les chatons males de Pin (GESLOT, 2018)

- Les cônes femelles, qui sont ligneux, ovoïdes, coniques et dotés d'écailles dures, sont portés par des pédoncules et se présentent de manière isolée ou par paires. Ils arrivent à maturité pendant la seconde année et dispersent généralement leurs graines au cours de la troisième année. Le cône doit avoir été exposé à une chaleur intense qui a détruit les joints de résine.
- Entre les écailles pour pouvoir s'ouvrir. Il contient des graines mates de 7 mm, de couleur brun gris sur un côté et grises avec des taches noires sur l'autre. Dotée d'une aile allongée quatre fois plus longue qu'elle, qui favorise sa propagation rapide (ABLOUL et LADJAL, 2020). (Figure 5)



Figure 5 : Les cônes femelles (NOVIKOVA, 2019)

1.2 Systématique

Le genre *Pinus*, appartenant à la famille des Pinacées (Abiétacées), se subdivise en trois sous-genres. Ces derniers sont à leur tour répartis en sections, qui sont ensuite subdivisées en groupes. La section Halepensoides comprend *Pinus halepensis Mill*. Où peut-on trouver des trachéides aux parois sinueuses ? La section Halepensoides se subdivise en trois catégories, dont fait partie le groupe halepensis, qui se distingue par ses feuilles à deux aiguilles et ses cônes périssables (Kadik, 2011).

Selon Nahal (1962), et Farjon (1996), l9étude taxonomique des pins a permis de déterminer la Systématique suivante :

- **Règne :** Plantae
- **Sous régne :** *Trachéobionta*
- **Embranchement :** *Spermaphyta*
- **Sous-embranchement :** *Gymnospermae*
- **Classe :** *Pinopsida*
- **Ordre :** *Abietales*
- **Famille :** *Pinaceae (Abietaceae)*
- **Sous-famille :** *Pinoïdeae*
- **Genre :** *Pinus*
- **Sous-genre :** *Eupinus*
- **Espèce :** *Pinus halepensis Mill*

Usuellement, multiples noms communs sont utilisés pour désigner cette espèce, et qui peuvent se résumer comme suit :

- ✓ Aleppo pine, Jerusalem pine (Angleterre).
- ✓ Aleppo Kiefer (Allemagne).
- ✓ Pin d9Alep, pin de Jérusalem, pin blanc (France).
- ✓ Pino carrasso (Espagne).
- ✓ Pino di Gerusalemme (Italie).
- ✓ Sanaouber halabi (pays arabes).
- ✓ Azoumbei, Tayada (Noms vernaculaires et Berbère).

Selon (Nahal 1986), l9identification de *Pinus halepensis* repose sur les critères suivants :

- Cône largement pédonculé et réfléchi vers la base du rameau.

- Feuilles très fines, inférieures à l mm, molles, très finement serrulées sur les bords, 5 à 10cm de long ; réunies par deux, rarement par trois dans une gaine ; groupées en pince à l9extrémité des rameaux ; couleur vert jaunâtre.

- Cônes isolés ou par paires, rarement verticillés ; écusson de l9écaille portant au centre un ombilic relevé et muni d9un petit mucron saillant ; graine à aile allongée et droite des deux côtés. Encore adulte, l9écorce est formée d9écailles minces, aplaties et non fissurée.

Outre les critères morphologiques, anatomiques et phytogéographiques précédemment mentionnés, Nahal (1962) a déjà réalisé une révision taxonomique de ces pins en se fondant sur des paramètres issus de la biochimie (composition de l'essence du

pin). En se basant sur l'analyse biochimique et écologique des Pins méditerranéens du groupe « halepensis », on peut tirer les déductions suivantes :

- *Pinus brutia Tenor*, n'est pas une variété de *Pinus halepensis* mais une espèce bien définie et nettement distincte de *Pinus halepensis Mill*.

- *Pinus halepensis Mill.,* n'est pas une espèce homogène dans toute son aire géographique. II se présente sous des formes se distinguant par le port, le caractère des cônes et la morphologie des pollens. Les formes suivantes ont été distinguées :

- forme orientale (Liban)

- forme occidentale (France)

- forme nord-africaine (Algérie)

Il renferme également des races et des écotypes dont il faudra tenir compte pour le reboisement, en particulier les écotypes résistants à la sécheresse et au froid (Nahal, 1986).

1.3. Aire de répartition géographique

- **Dans le monde :**

Le Pin d'Alep se trouve naturellement autour du bassin méditerranéen, à l'exception de l'Égypte. Son axe principal se situe clairement dans le bassin méditerranéen occidental, en particulier en Afrique du Nord, ou plus précisément en Algérie et en Tunisie. (Figure 06)

Le Pin d'Alep se déploie de l'Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tunisie et Libye) au Moyen-Orient (Syrie, Liban, Jordanie, Palestine et Turquie), en passant par le sud de l'Europe méditerranéenne (Grèce orientale, Croatie, Italie du Nord, Est de la France et Espagne orientale) (ABLOUL et LADJAL, 2020).

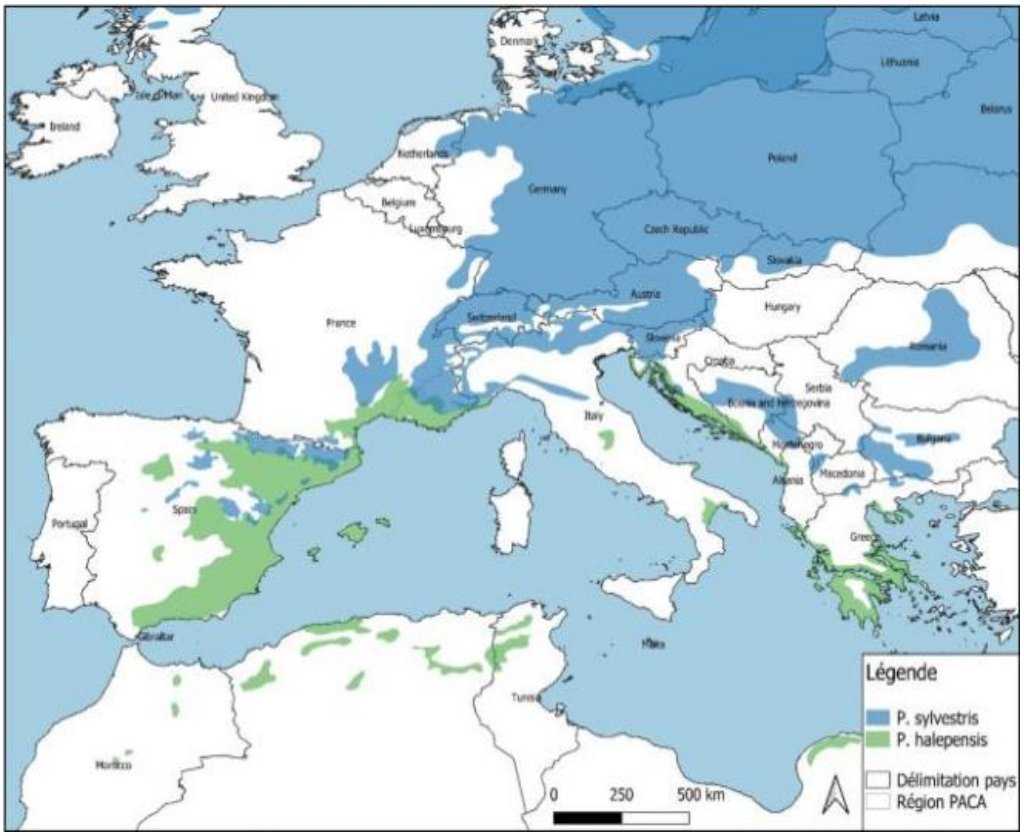


Figure 6 : Aire de répartition du Pin d'Alep en région méditerranéenne (GHOUGALI, 2011)

- **En Algérie :**

Le Pin d'Alep est fréquent dans la surface forestière de l'Algérie (Figure 7), avec 35% de couverture.

On le retrouve dans toutes les variantes bioclimatiques, avec une prédominance dans l'étage semiaride où il est principalement localisé dans les régions suivantes (GUIT, 2015).

• La région de Tbessa, les plateaux constantinois et les Aurès ;

• La région d'Algérie (les forêts de Médéa, Monts des Bibans- sont une chaîne de montagnes du Nord de l'Algérie) ;

• Les forêts de monts de Saida, de mascara, de sidi bel Abbés et De Telagh ;

• L'atlas saharien ; la région de Djelfa (mont d'Oulad Nail)

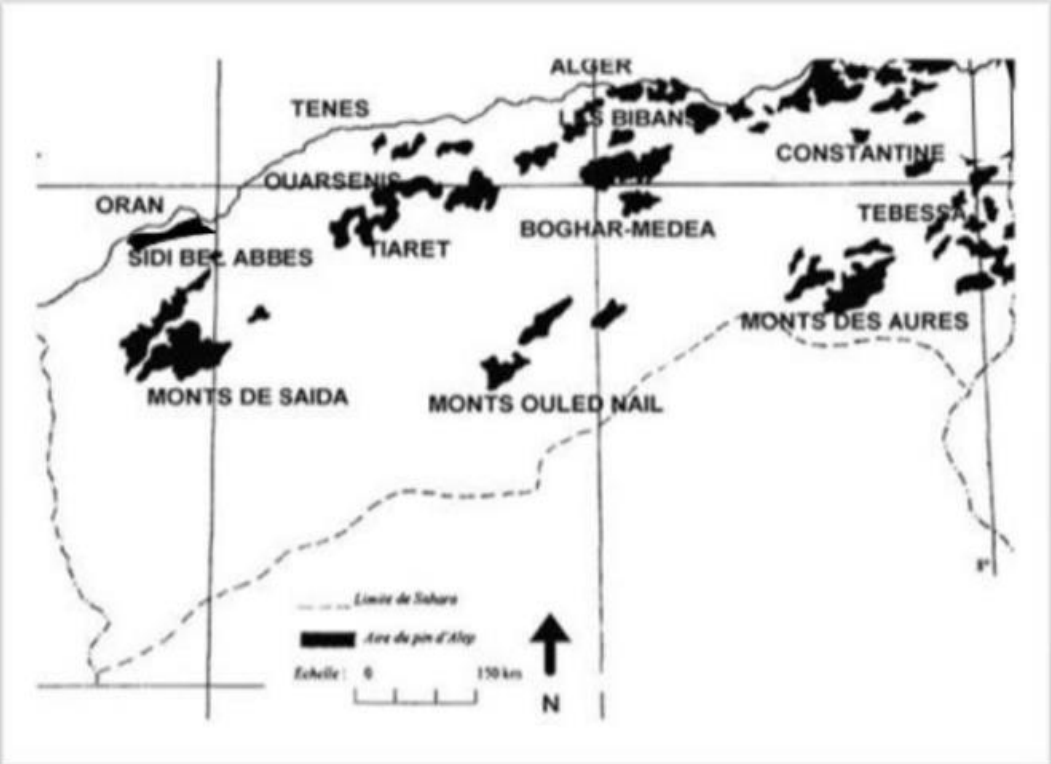


Figure 7 : Répartition du Pin d'Alep en Algérie (BRAKCHI-OUAKOUR, 2015)

1.4. Rôle écologique et dynamique de croissance

Le pin d'Alep joue un rôle crucial pour l'écologie : il défend les sols contre l'érosion, capte le carbone, sauvegarde la biodiversité et résiste aux perturbations comme les incendies ou la sécheresse. Il constitue également une ressource économique et un patrimoine génétique d'une grande importance.

1.5. Adaptations physiologiques et phénologiques

Cette espèce se caractérise par des adaptations morphologiques (des aiguilles étroites, une écorce robuste) et physiologiques (une résistance à la sécheresse, une photosynthèse performante en situation de stress hydrique). Sur le plan phénologique, le pin d'Alep se caractérise par une croissance rapide et une reproduction précoce, des traits qui facilitent sa régénération suite à une perturbation. (Quézel, 2000).

1.6. Diversité génétique et caractéristiques morphométriques

Des recherches ont démontré une variation génétique significative entre les populations naturelles de pin d'Alep, associée à la diversité des conditions écologiques et météorologiques. Cette variabilité se traduit par des disparités morphométriques observables sur les cônes, les aiguilles et dans le processus de croissance. (Bouhraoua, 2002 ; Fady *et al*. 2003).

1.7. Ravageurs de *Pinus halepensis*

. En Algérie :

Les insectes xylophages participent fréquemment au processus de dépérissement, soit en tant que facteur primaire qui initie le phénomène, soit en tant que facteur secondaire qui intensifie et amplifie le processus avec le temps (Lieutier *et al*. 1992). Parmi les insectes ravageurs du pin d'Alep en Algérie, on cite La chenille processionnaire du pin (Thaumetopoea pityocampa), et divers groupes de xylophages, nous citons particulièrement :

- **Les Scolytidae :** (*Tomicus piniperda, Tomicus destruens, Orthotomicus erosus, Orthotomicus laricius, Orthotomicus proximus, Pityogenes bidentatus, Pityogenes calcaratus, Pityogenes bidentatus, Crypturgus cribrellus, Crypturgus numidicus, Crypturgus mediterraneus, Hylurgus ligniperda, Hylurgus micklitzi, Hylastes apacus, Hylastes cunicularius, Rhyncolus sp., Procryphalus sp*.)

- **Les Buprestidae :** (*Chalcophora mariana, Perotis unicolor, Phaenops cyanea, Anthaxia rugicolis*)

- **Les Cerambycidae** : (*Monochamus galloprovincialis, Criocephalus rusticus, Arhopalus ferus, Arhopalus rusticus, Arhopalus syriacus Ergates faber, Hesperophanes sericeus*)

- **Les Curculionidae** : (*Curculio sp*.) ;

- **Les Colydiidae** : (*Colydium elongatus*)

- **Les Histeridae** : (*Platysona angustatus*) ;

Les Stricidae : (*Sirex noctilio*)

1.8. Les propriétés thérapeutiques et usage traditionnel

Les rameaux feuillés du *Pinus halepensis* contiennent une huile essentielle riche en pinène, un antiseptique puissant prisé lors de troubles respiratoires, purifiant par décoction, balsamique et amer (apprécié alors en cas d'inflammation intestinale).

Dans l'aromathérapie, on utilise l'huile de pin pour masser la peau et pour soulager des troubles gastro-intestinaux tels que les ulcères d'estomac. Cette huile agit aussi en tant qu'antidote à la faim, un activateur de l'assimilation des protéines, et un remède naturel pour les affections cardio-vasculaires en raison de sa teneur en acide pinolénique ; cet élément régule le niveau total des lipides sanguins, en limitant l'agrégation des plaquettes, ce qui conduit à une baisse de la pression artérielle. Elle renferme également des antioxydants bénéfiques pour l'ensemble du corps.

L'huile essentielle est utilisée dans le traitement de la leishmaniose qui est une maladie Infectieuse causée par différent espèces de parasite protozoaire du genre leishmania.

L'infusion de bourgeons, d'écorce et de cônes matures ou jeunes, ainsi que la poudre issue des résines et des cônes verts, est employée pour atténuer l'asthme, la bronchite et la toux.

D'après la coutume kabyle, trois cuillères à soupe de résine finement broyée et filtrée, mélangées à un pot de 500g de miel pur, représentent le remède intégral contre la bronchite. (Abloul et Ladjal, 2020).

1.9. Composition chimique et activités antimicrobiennes

Les extraits du pin d'Alep contiennent des composés phénoliques et terpéniques, dotés d'activités antimicrobiennes et antioxydantes. Ces propriétés intéressent la recherche en pharmacologie et en protection des plantes (Harzallah-Skhiri *et al*, 2005 ; Dob *et al*, 2011).

2. Les insectes xylophages : cas des scolytes

Le terme scolyte ou "Bark beetle" est un terme général qui regroupe un large panel de coléoptères endophytes, qui colonisent les tissus des plantes durant la majorité de leur cycle biologique (excepté le stade adulte). Appartenant à la superfamille des Curculionoidea[3], plus précisément la famille des Scolytidae, ils occupent pour la majorité

la strate sous corticale des plantes hôtes (nous excluons les Platypodidae qui sont généralement des mycoxylophages qui s'attaquent aux angiospermes) (Vega et Hofstetter 2015).

2.1. Caractéristiques générales et classification

Les scolytes sont des petits Coléoptères de forme trapue de 0.5 à 8 mm, de couleur terne ou foncée (bruns, bruns acajou, noirs) aux téguments recouverts parfois d'écailles dressées ou imbriquées plus claires (blanche, grises, argentées, rousses…) ou de soies couchées ou relevées (Balachowsky, 1963).

Parmi les espèces les plus connus des scolytes on site ; (*Tomicus piniperda, Tomicus destruens, Orthotomicus erosus, Orthotomicus laricius, Orthotomicus proximus, Pityogenes bidentatus, Pityogenes calcaratus, Pityogenes bidentatus, Crypturgus cribrellus, Crypturgus numidicus, Crypturgus mediterraneus, Hylurgus ligniperda, Hylurgus micklitzi, Hylastes apacus, Hylastes cunicularius, Rhyncolus sp., Procryphalus sp.*) (Talbi, 2019)

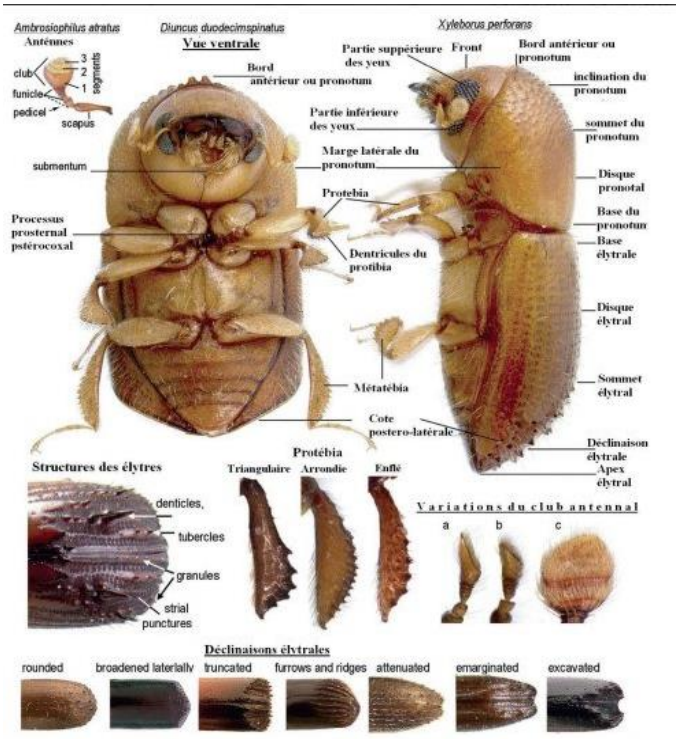


Figure 8 : Morphologie des *Xyleborini* (Coleoptera : Scolytidae).

Structure globale du corps, nomenclature de l'armature élytrale, variation des protibias, variation du club antennal. (Hulcr *et al.* 2015)

Classification et systématique :

Selon Joly (1975) les Scolytidae sont divisés en deux groupes systématiques

- Les Hilesinini (Hylésines)
- Les Ipini (Ips)

La famille des *Scolylidae* se subdivise dans la Paléarctique en deux sousfamilles qui se distinguent par les caractères suivants :

- Tibias antérieurs pourvus d'un processus crochu supéro-externc, à côte externe exceptionnellement denticulée. Pronotum rebordé sur les côtés et en arrière'
- Tibias antérieurs dépourvus de processus crochu supéro-externe ou situé,

lorsqu'il existe, à l'angle supéro-interne. Côte externe des tibias généralement denticulée. Bordure du pronotum nulle sur les côtés, effacée ou faiblement apparente en arrière. Elytres arrondis vers l'apex ou affaissés en déclivité plus ou moins brusque à l'extrémité (Balachowsky, 1949).

Selon (Pfeffer, 1995) Les scolytes sont classifiés comme suit :

- ✓ **Ordre :** *Coléoptère*
- ✓ **Sous ordre :** *Rynchophora*
- ✓ **Super famille :** *Scolytoidae*
- ✓ **Famille :** *Scolytidae*

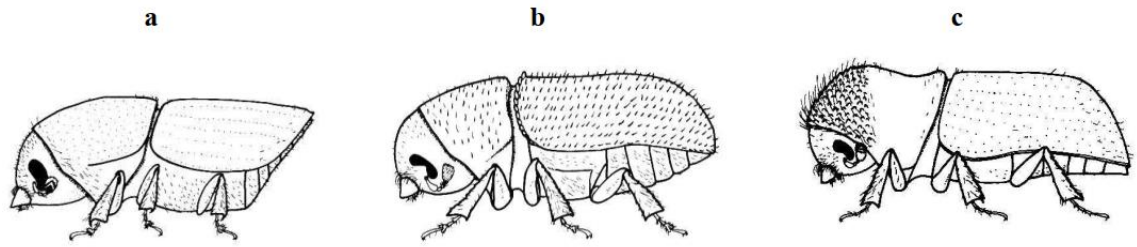


Figure 9 : Les trois sous-familles de scolytes : a) Sous-famille des *Scolytinae* ; b) Sous-famille des *Hylesinae* ; c) Sous-famille des *Ipinae*. (Marion Durand-Gillmann 2014)

2.2. Régime alimentaire

Les scolytes se nourrissent de différents types de tissus végétaux et on note une certaine variabilité dans leur spécificité envers les plantes qu'ils choisissent comme hôtes. Les deux types d'alimentation les plus répandus sont : 1) la phloèmophagie (absorption de phloème), où les espèces forent des tunnels entre l'écorce et l'aubier, et 2) la xylomycétophagie (consommation de champignons symbiotiques cultivés dans les galeries). Il existe d'autres types de régimes alimentaires moins répandus : la xylophagie (l'ingestion de bois mort), la myélophagie (l'absorption de moelle provenant des rameaux), la spermatophagie (la consommation de graines) et l'herbiphagie (le fait de se nourrir de plantes herbacées) (ATKINSON 2019 in CHEVEZ, 2019).

2.3. Biologie et cycle de développement

Le cycle de vie d'un scolyte est organisé, à chaque génération, autour d'un cycle de vie basique en 4 phases : reproduction, développement, maturation et dispersion. Chacune de ces phases peut comporter ses propres caractéristiques et générer une large variabilité des cycles de vie entre les différentes espèces de scolytes

2.3.1 Reproduction

La phase de reproduction (accouplement) commence quand les adultes matures arrivent sur leur hôte, nous nous concentrons donc d'abord sur la biologie des scolytes. La plupart des espèces de scolytes sont agrégatives, c'est-à-dire qu'elles utilisent des phéromones d'agrégation qui entraînent l'arrivée massive d'adultes sur l'hôte en quelques heures, et permettent la rencontre et l'accouplement entre les mâles et les femelles. Cependant, certaines espèces sont attirées uniquement par les composés volatils émis par leurs hôtes. Chez ces dernières, le mécanisme de choix de l'hôte est peu connu. Indépendamment de l'utilisation des phéromones d'agrégation, chez les espèces polygames, le mâle arrive en premier sur l'arbre et commence à creuser une chambre d'accouplement dans le phloème. Il est rejoint par plusieurs femelles qui vont ensuite creuser de deux à sept galeries maternelles qui peuvent être verticales (Ips), horizontales (Pityokteines) ou radiales (Pityogenes, Pityophthorus). Chez les espèces monogames, c'est la femelle qui arrive en premier sur l'hôte et qui initie une galerie maternelle où le mâle la rejoint. La galerie peut être verticale (*Hylastes, Dryocoetes, Tomicus piniperda* et *Tomicus destruens*), horizontale (*Tomicus minor, Xylechinus*) ou élargie

(*Dendroctonus micans*). Les mâles et les femelles se reconnaissent en utilisant une combinaison de stimuli sonores (stridulation) et chimiques.

2.3.2 Développement larvaire

Suite à l'accouplement, les femelles pondent leurs œufs dans des fissures dédiées à la ponte. Les galeries larvaires se forment en direction perpendiculaire aux galeries maternelles et se concluent par une logette destinée à la nymphose. Les larves de scolytes possèdent une peau blanche et souple et n'ont pas de pattes. On compte généralement cinq phases larvaires, à l'exception de quelques cas particuliers.

2.3.3 Maturation et Dispersion

Après la phase imaginale, les scolytes ont besoin d'une période de maturation sexuelle avant de pouvoir se reproduire. Elle permet l'achèvement de la sclérotinisation, la constitution de muscles alaires et d'organes génitaux fonctionnels, et le stockage de réserves énergétiques. Elle peut se dérouler sur le lieu de développement, où les immatures consomment les restes de phloème autour des galeries. Quand ils sont matures, les adultes émergent en utilisant le trou d'entrée de la femelle ou perforent l'écorce pour sortir. Ils recherchent immédiatement un hôte pour se reproduire. La maturation et la dispersion sont deux phases séparées et seulement une période de vol est observée au cours du cycle biologique

Cependant, chez certaines espèces, le repas de maturation ne se déroule pas dans le lieu de développement mais dans les jeunes rameaux du houppier des arbres sains. C'est le cas des espèces du genre *Tomicus* qui creusent une galerie axiale de maturation dans les pousses des arbres sains et se nourrissent de la « moelle », interrompant alors le flux de sève et provoquant le dessèchement rapide de la pousse attaquée. Les scolytes peuvent donc changer de pousses ou d'arbres plusieurs fois durant la maturation. Ainsi chez ces espèces, le cycle biologique présente deux périodes principales de vol, un vol des individus immatures suite à l'émergence des insectes et un vol d'essaimage avant la reproduction, et quelques vols peuvent avoir lieu entre ces deux vols principaux pour le changement de pousses. L'accouplement peut avoir lieu pendant la phase de maturation et de dispersion (Janin & Lieutier 1988, pour *T. piniperda*).

Le cycle peut être répété une ou plusieurs fois par an (espèces pluri- ou monovoltines), et être interrompu par l'hibernation (Lieutier 2004). La durée du cycle

biologique est très variable selon les espèces. Pour les espèces plurivoltines, elle dépend essentiellement des conditions climatiques, notamment de la température. Les contraintes thermiques spécifiques à chacune des espèces de scolytes vont délimiter les frontières potentielles de leur distribution géographique.

Cependant, les scolytes ont un développement plus court que les arbres et sont très mobiles car ils doivent souvent rechercher une ressource rare et dispersée dans le paysage, leur procurant d'importantes capacités adaptatives (Raffa & Berryman 1980).

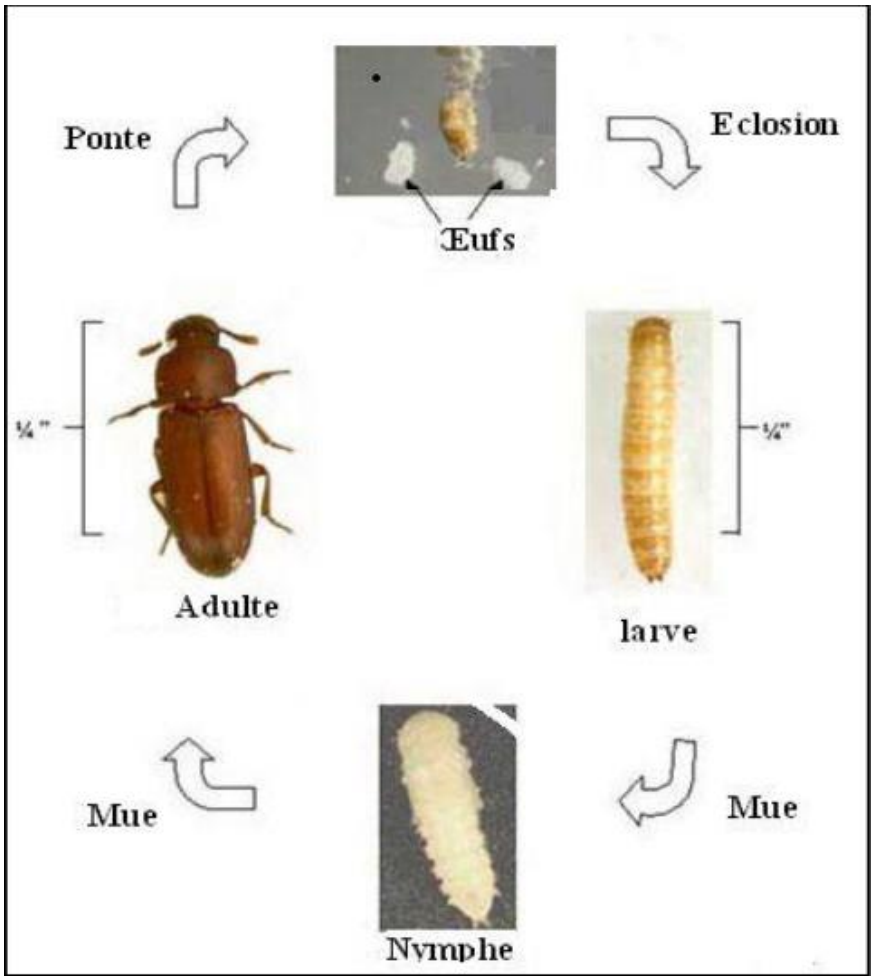


Figure 10 : Cycle biologique du scolyte (Telli Et Ben Gourina.2021)

2.4. Mécanismes de défense de l'arbre face aux attaques

Comme tout organisme vivant, les arbres sont capables de se défendre contre les attaques de scolytes en élaborant divers mécanismes de résistance. La réussite ou l'échec des attaques de scolytes est conditionné à la fois par l'état de santé du végétal et la densité d'attaques qu'il peut supporter. Les chablis qui opposent peu de résistance aux scolytes représentent une source de nourriture importante et facilement accessible pour les

insectes, même lorsqu'ils sont à de faibles densités, contrairement aux arbres sains qui ont un fort niveau de résistance et qui ne deviennent exploitables que lorsque les populations de scolytes atteignent des densités très importantes. La quantité de ressources disponible pour les scolytes est donc reliée directement au niveau de résistance de l'arbre, véritable facteur clé de la dynamique des populations de scolytes (Lieutier 2004). La notion de défense est définie chez l'arbre comme la nécessité de bloquer l'attaque de scolytes afin d'assurer sa survie. La résistance constitue l'ensemble des mécanismes actifs (réaction induite) ou passifs (réaction consitutive) qui entravent l'établissement des scolytes dans l'arbre. Il existe un seuil critique de densité d'attaques au-delà duquel l'arbre ne peut plus opposer de résistance aux insectes. Le niveau de résistance d'un arbre peut être estimé par la valeur de ce seuil, qui varie selon les espèces d'arbres et qui est plus élevée pour un sujet en bonne santé que pour un sujet déficient (Waring & Pitman 1980, Mulock & Christiansen 1986 ; Lieutier *et al.* 1988)

Chez les conifères, la base de la stratégie de défense/résistance implique de multiples structures anatomiques et des substances chimiques qui se chevauchent dans le temps et dans l'espace. Deux types de stratégies de résistance sont observés :

- Les mécanismes de résistance constitutifs, présentent dans l'arbre sans stimulus
- Les mécanismes de résistance induits, générées après la perception du stimulus (corps étranger)

Les systèmes de résistance constitutive sont les premières défenses rencontrées par le scolyte et sont actives avant l'arrivée de l'insecte. Elles sont essentiellement anatomiques et structurelles.

L'épaisseur de l'écorce est la première barrière rencontrée par l'insecte et est souvent responsable de l'échec de l'attaque. Le faible taux d'humidité du phloème peut également empêcher l'oviposition et le développement des larves (Storer & Speight 1996). De même que, la formation des cristaux d'oxalate de calcium dans le phloème des pins contribue à limiter les attaques de scolytes (Franceschi *et al.* 2005). Le système résinifère est également important dans le succès de l'attaque. Ce système est formé selon les espèces de deux structures anatomiques contenant des métabolites secondaires : les canaux résinifères et les poches de résine qui stockent des composés terpéniques, puis les cellules parenchymateuses du phloème (PP cells) qui stockent des quantités variables de corps phénoliques qui agissent comme des composés antifongiques et non appétents (Beckman,

2000). Le système de canaux résinifères est très développé chez les espèces du genre Pinus qui ne possèdent pas de poches de résine contrairement aux espèces du genre Abies qui ont des canaux résinifères peu développés mais qui possèdent ces poches de résine (Lieutier et al. 2004). Le système de canaux résinifères est un réseau de canaux verticaux et radiaux interconnectés autour desquels se trouvent les cellules synthétisant la résine. Le flux de résine est déterminé par le nombre de canaux résinifères verticaux (plus nombreux). Ainsi, ce système de défense est moins efficace chez les espèces qui creusent des galeries verticales car les canaux résinifères verticaux sont coupés uniquement au début de l'attaque. Les « PP cells » sont aussi un site majeur de stockage de l'amidon et/ou des lipides (Franceschi et al. 2005).

Les systèmes de résistance induits par l'attaque sont caractérisés dans un premier temps par l'émission de résine par les cellules entourant les canaux résinifères (Ruel et al. 1998). Puis, une réaction hypersensible se produit dans la zone où a eu lieu l'attaque. Elle est caractérisée par une zone imprégnée de résine associée à des zones nécrotiques dans le phloème et l'aubier, en avant de la zone attaquée par les scolytes et leurs éventuels champignons associés. Cette zone est considérablement appauvrie en sucres et riche en composés terpéniques et phénoliques, qui envahissent les espaces intercellulaires, les cellules du phloème et les trachéides, entraînant la mort des tissus affectés (Christiansen & Ericsson 1986 ; Brignolas et al. 1995). Les cellules impliquées dans la synthèse des terpènes sont les cellules parenchymateuses du phloème (PP cells). Ces PP cells sont aussi responsables de la synthèse de phénols impliqués dans la réaction hypersensible (Rignolas et al. 1995). Lorsque l'attaque est contrôlée par cette réaction hypersensible, la formation d'un périderme est observée, isolant alors la zone de réaction et les agresseurs biotiques du reste de l'arbre (Mullick 1977). La mesure de cette zone de réaction est souvent utilisée pour estimer la capacité de défense d'un arbre (Wallin & Raffa 2001). En effet, la réaction d'hypersensibilité est très coûteuse pour l'arbre sur le plan énergétique. La concentration en sucres et en amidon diminue autour de cette zone de réaction, indiquant que ces réserves sont utilisées par l'arbre en réponse aux attaques (Christiansen & Ericsson 1986). Ces systèmes de résistance ont un rôle crucial dans la réussite de l'attaque (stratégie d'épuisement de l'arbre par les scolytes).

2.5. Types et impacts des dégâts

L'hylésine dévastatrice est un type de scolyte qui crée des tunnels de reproduction dans le liber des arbres, soit la couche entre l'écorce et l'aubier. Les larves se nourrissent en creusant de nouvelles galeries, dont la direction est perpendiculaire aux précédentes. L'acte de percer le trou d'entrée des adultes provoque une réaction de l'arbre qui sécrète de la résine en raison de la coupe des canaux résinifères. L'apparition de cette praline de résine n'est pas toujours garantie, le point d'entrée pouvant être très subtil derrière les fissures de l'écorce (Paca, 2008 in Thameur, 2019).

Les larves s'alimentent en creusant des galeries perpendiculaires à la galerie maternelle. Les femelles peuvent produire plusieurs générations sœurs au cours de l'hiver (DSF, 2012).

Un lien très étroit se crée entre la pousse printanière et l'émergence des imagos. La phase nutritionnelle se déroule pendant l'été, l'insecte effectuant un forage de maturation dans les jeunes pousses qui vont par la suite se courber et tomber à partir de l'automne. La maturation des jeunes adultes au détriment des pousses représente une étape cruciale de dispersion, qui sert de réservoir pour les populations qui sont prêtes à s'en prendre aux arbres (Chakali, 2007).

La plupart des cerambycidae qui s'attaquent aux pins sont considérés comme des nuisibles secondaires. Ils sont saproxyliques et agissent tardivement sur le bois ou les vieux chablis, car leurs larves se développent principalement dans le bois mort et plus occasionnellement dans le vivant. Cela crée un environnement propice pour d'autres organismes (insectes divers, champignons, bactéries, etc.) qui contribueront progressivement à transformer ce bois en humus (Khouja, 2020).



Figure 11 : Présentation des dégâts causés par les scolytes (Khouja, 2020).

2.6. Méthodes de lutte et de contrôle

La lutte contre les insectes nuisibles dans les forêts doit être effectuée en respectant les spécificités de l'écosystème forestier. Les techniques de combattre les insectes nuisibles devraient avoir un coût raisonnable, compte tenu de la valeur relativement inférieure des produits forestiers par rapport à ceux agricoles. Pour être mises en œuvre, elles nécessitent une compréhension approfondie de la biologie des insectes et du fonctionnement global de l'écosystème forestier (ROGE, 1999).

2.6.1 Méthode de lutte biologique

Méthodes de contrôle biologique. La lutte biologique est traditionnellement caractérisée comme l'ensemble des méthodes, telles que l'introduction de prédateurs, de parasitoïdes ou de pathogènes, visant à contrôler la progression des populations d'insectes nuisibles. La gestion de ces populations est jugée efficace lorsque les dommages sont confinés à un niveau acceptable. Niveau évalué sous l'angle économique ou sociologique (LEVIEUX, 1987).

Le parasite *Cephalonomia stephanoderis* est une petite guêpe noire, munie de deux paires d'ailes, mais gui ne vole guère. Longue de moins de deux millimètres, elle s'introduit, pour y rechercher son hôte, dans les galeries creusées par le scolyte dans le grain de café. Elle pond sur les larves et les nymphes du scolyte, dévore ses œufs, ses jeunes larves et tue même le scolyte adulte. De l'œuf déposa par la guèpe sur une nymphe du scolyte éclot une petite larve de guêpe qui, fixée s u r sa nymphe-hôte, en aspire l'hémolymphe jusqu'à la tuer. Ensuite elle se métamorphose dans un cocon en une nouvelle guêpe. Dès son éclosion, elle s'accouple puis repart à la recherche du scolyte (Cochereau *et al*, 1994).

Aux frontières de la lutte biologique : la lutte autocide (encore dénommée lutte par mâles stériles). Elle a pour principe l'introduction (en grand nombre) dans une Population naturelle d'individus mâles (de la même espèce) modifiés (rendus stériles par l'application de rayonnements ionisants) mais au comportement sexuel intact. Ces mâles manipulés (les auxiliaires) seront, une fois lâchés, en compétition avec les mâles sauvages. S'ils sont (par exemple) 9 fois plus nombreux que leurs congénères « naturels », et si les femelles n'acceptent qu'un accouplement, 9 femelles sur 10 n'auront pas de descendance (Jourdheuil, 1991).

Au bout de peu de générations, l'apport de mâles stériles continuant, la population cible est anéantie. Ce mode de lutte fut appliqué en grand pour la première fois (et avec un franc succès pour ce qui est du sud des Etats-Unis) (Jourdheuil, 1991).

2.6.2 Méthode des arbres pièges :

Il s'agit de couper des arbres sains de faible diamètre en tronçons et de les déposer sous forme de tas dans les forêts infestées. Les insectes xylophages sont ainsi attirés par les odeurs des arbres fraichement coupés et viendront pour s'y accoupler et déposer leurs œufs.

Ces arbres pièges sont éliminés et substitués par d'autres tout au long de la période de vol des adultes de l'espèce concernée (D.G.F, 2017).

La méthode la plus utilisée est celle des arbres pièges ; 2 arbres /4ha/mois (Lakehal Et Metrouh, 2019).

Ce type de piégeage a été largement utilisé contre *Phoracantha semipunctata* (Eucalyptus) et contre *Tomicus destruens* (Pinèdes naturelles) avec beaucoup de succès (D.G.F, 2017).

2.6.3 Elimination des arbres atteints :

C'est la méthode essentielle de combat. Il est indispensable d'effectuer de toute urgence un assainissement des zones sinistrées par une coupe sélective des arbres morts sur pied et des arbres en déclin, afin de contrôler la propagation des insectes xylophages. Des mesures préventives seront mises en œuvre pour traiter le bois coupé :

- Incinération si le bois est de mauvaise qualité (Figure.12)
- Poudrage du bois stéré avec l'lindane à 5% (l'opération doit être renouvelée tous les 15 jours).
- Il y a lieu également d'évacuer hors de la forêt tout le bois gisant (chablis, coupes.) et de procéder à son incinération ou à sa transformation, (Charbon de (Charbon de bois …) (KADER, 2019).



Figure 12 : Incinération des sujets attaqué (KHADIR, 2019).

2.6.4 Utilisation des bio- insecticides :

Les scientifiques ont découvert une grande quantité de composés utiles qui peuvent être utilisés comme bio pesticides.

La valorisation des plantes à effet insecticide prend ces dernières années de plus en plus d'ampleur au niveau des programmes de recherches dans le monde. Ces plantes sont exploitées sous plusieurs formes, soit sous forme de poudres végétales, d'huiles essentielles, d'huiles végétales ou d'extraits végétaux (D.G.F, 2017).

2.6.5 Pièges à phéromones :

Cette technique implique la mise en place de pièges à phéromones sexuelles directement au sein des arbres. Le piège sert à libérer une phéromone propre à chaque espèce. Les mâles adultes, attirés, tournent autour de la capsule et finissent par tomber dans l'entonnoir ou se coller à la plaque adhésive (selon le type de piège). Le champ d'action de la phéromone s'étend sur plusieurs dizaines de mètres. Il s'agit de la méthode la plus discriminante qui existe, car elle ne cible que l'espèce souhaitée en piégeant en grand nombre les mâles, réduisant ainsi les possibilités de rencontre et de reproduction.

Les résultats obtenus par cette méthode sont observés durant le cycle suivant de l'insecte et se traduisent par des pourcentages d'infestation réduits. Ce type de lutte est utilisé en Algérie depuis 2009(D.G.F, 2017)



Figure 13 : Différents types de pièges à phéromone (D.G.F, 2021)

2.6.6 Lutte chimique :

De lutte chimique ne devrait être effectuée qu'elles du contrôle des ravageurs sont révélés inefficaces. Les appliques un programme pulvérisant seulement la cime des jeunes pins pour les protéger et des insecticides doivent être aussi localisés que possible (ROGER, 1999).

Un inconvénient souvent oublié de la lutte chimique est son coût élevé Aux états unis le traitement à l'aide de l'insecticide BHC (hexachlorure de benzène) pour protéger les pins contre le Scolytidae Dendroctonus fremtalis coûte entre un et dix dollars par arbre (ROGER, 1999).



Figure 14 : Comment pulvériser des insecticides chimiques à l'aide d'un avion (D.G.F, 2017)

2.7. Stratégies adaptatives selon C.G. Mayers

Les approches innovantes incluent l'utilisation de biocontrôle (champignons entomopathogènes, bactéries), la manipulation des communautés microbiennes Associées aux scolytes et le recours à des stratégies de perturbation chimique (semio chemicals). Ces méthodes ouvrent des perspectives intéressantes pour une gestion durable des populations scolytes (Mayers 2020).

3. Champignons associés aux scolytes et à l'arbre hôte

3.1. Définition et importance écologique

L'interaction entre les scolytes (Scolytinae) et les champignons est qualifiée de symbiose ectosymbiotique complexe et variée. Ces collaborations vont du mutualisme au commensalisme, et peuvent être optionnelles ou impératives. Dans ce contexte, le mot « symbiose » fait référence à l'interaction durable entre le scolyte (l'hôte) et ses compagnons fongiques. Ces champignons jouent un rôle clé dans la nutrition des scolytes, la colonisation des arbres et la dynamique des peuplements forestiers (Francke- Grosmann, 1967 ; Six & Wingfield, 2011).

3.2. Principaux genres fongiques

Parmi les genres les plus fréquemment associés, on retrouve *Ophiostoma*, *Ceratocystis*, *Ascomycètes*, *Leptographium* et *Fusarium*. Ces champignons sont souvent responsables de maladies vasculaires et de chancres, aggravant les dégâts causés par les scolytes (Wingfield et al. 1993).

3.3. Fonctions physiologiques et nutritionnelles

Les champignons associés remplissent plusieurs fonctions :

- **Supplémentation alimentaire :** Les champignons pallient le manque de nutriments dans le phloème (tissu nutritif de l'arbre), en particulier sa faible concentration en azote.
- **Fourniture de nutriments indispensables :** Ils apportent des acides aminés, des vitamines et des stérols (tels que l'ergostérol) nécessaires au développement, à la transformation et à la reproduction des insectes.
- **Amélioration de la condition physique :** La présence de champignons symbiotiques favorise la survie des larves, l'accroissement des adultes et la fertilité des scolytes.

- **Exploitation des niches écologiques :** Ce type de mutualisme donne aux insectes la possibilité d'exploiter des ressources végétales marginales et de minimiser la concurrence entre différentes espèces.
- **Affaiblissement de l'hôte :** dégradent les tissus conducteurs, favorisant l'installation des scolytes.
- **Protection :** certains sécrètent des métabolites secondaires à activité antimicrobienne, réduisant la compétition avec d'autres micro-organismes (Paine et al, 1997 ; Six, 2012).

3.4. Champignons pathogènes du Pin d'Alep

3.4.1. Fusarium acuminatum (Maladie du Damping-Off)

Ce champignon a un impact sur les jeunes plants en pépinière, entraînant une déshydratation rapide et un taux de mortalité élevé. C'est un élément qui limite la régénération artificielle du pin d'Alep (Domsch et al. 1980).

3.4.2. *Crumenul opsissororia* (Maladie chancreuse)

Cette espèce provoque l'apparition de chancres sur le tronc et les branches, entravant le flux de la sève et entraînant des dépérissements localisés (Butin, 1996).

3.4.3. Gibberella circinata (anciennement Fusarium circinatum) Chancre du Pin

Agent pathogène responsable d'une maladie grave en pleine expansion, causant des chancres, la mortalité des jeunes plants et des dépérissements à grande échelle dans plusieurs nations méditerranéennes. Sa présence représente un risque significatif pour les forêts de pin d'Alep (Wingfield et al, 2008).

3.5. Facteurs favorisant les infections fongiques

Facteurs contribuant aux infections fongiques :

- **Stress hydrique et sécheresse :** La sécheresse est l'un des principaux facteurs aggravants des maladies fongiques. Il existe une corrélation positive entre la rareté de l'eau et la propagation des champignons responsables du chancre et du dépérissement.
- **Impact indirect sur la physiologie des arbres :** La sécheresse affaiblit l'état physiologique des arbres, les rendant plus vulnérables à la colonisation par des champignons pathogènes. Ces champignons exploitent cette faiblesse pour passer d'un état parasitaire latent à un état pathogène actif.

- **Intensité et période du stress hydrique :** La durée et la période de la sécheresse influencent considérablement la gravité de l'infection et son interaction avec l'arbre hôte.
- **Conditions climatiques rigoureuses :** Les variations des températures minimales et les sécheresses estivales prolongées affectent la répartition et la croissance des arbres, pouvant les éloigner de leur aire de répartition écologique optimale et, par conséquent, accroître leur sensibilité aux infections. Facteurs humains et animaux : Les interventions humaines et l'activité animale contribuent à modifier l'aire de répartition naturelle des forêts, ce qui peut fragiliser les écosystèmes forestiers et faciliter la propagation des parasites.
- **Propagation des parasites latents :** La présence de parasites vivant de manière invisible dans les tissus constitue une menace constante, car tout stress environnemental (comme un manque de pluie) peut déclencher leur transformation en un stade agressif, entraînant un dépérissement rapide de l'arbre.

3.6. Mesures de gestion et de prévention

La gestion contre les champignons nuisibles s'appuie sur des mesures préventives: sélection de plants sains, perfectionnement des méthodes forestières, observation des zones infectées et suppression des arbres malades.

Des études récentes examinent aussi l'emploi du biocontrôle et le choix de génotypes résistants (Linaldeddu et al, 2009 ; Santini & Ghelardini, 2015).

Chapitre II : Interactions scolytes–champignons et leur rôle dans le dépérissement des pinèdes

1. Nature des interactions symbiotiques

La nature des relations symbiotiques entre les scolytes et les champignons est complexe et varie selon les espèces impliquées. Ces interactions peuvent être de type mutualiste, commensal et, dans certaines situations, pathogène. Parmi les différents types de scolytes, la symbiose avec les champignons ambrosia est celle qui fait l'objet de nombreuses études. Ces derniers cultivent activement ces champignons dans les galeries qu'ils ont creusées dans le bois.

Les coléoptères xylophages du groupe des ambrosia beetles (*Curculionidae : Scolytinae*) créent une relation symbiotique mutuellement profitable avec des champignons, qui représentent leur source alimentaire majeure. Ces champignons sont transportés par des insectes à l'aide de structures spécialisées appelées mycangia, ce qui facilite leur introduction dans le bois lors de l'infestation (Mayers et al.2018).

Cette interaction symbiotique illustre un exemple notable de coévolution. Les champignons tirent parti d'un déplacement et d'une propagation efficaces, tandis que les scolytes profitent d'une alimentation adéquate dans un environnement souvent pauvre en nutriments. Cette symbiose peut également être influencée par des facteurs environnementaux comme la température, l'humidité ou la concurrence entre différentes espèces. Dans certaines circonstances, quelques types de champignons peuvent se comporter comme des agents infectieux, mettant ainsi en péril la survie de l'insecte hôte (Six &Wingfield .2011).

En résumé, les Scolytinae montrent une diversité fonctionnelle dans leurs relations symbiotiques, passant d'un mutualisme strict à des formes d'interactions plus flexibles et optionnelles.

1.1. Types de symbiose : mutualisme, commensalisme et parasitisme

Les insectes xylophages, tels que les Scolytinae, établissent différentes sortes de liens écologiques avec les champignons grâce à leurs interactions symbiotiques, qui peuvent évoluer au fil du temps et selon les conditions environnementales.

Mutualisme : C'est la forme de symbiose la plus répandue entre les scolytes et les champignons ambrosia. Les scolytes cultivent méticuleusement ces champignons dans leurs

galeries pour se sustenter, pendant que ces derniers bénéficient d'un moyen de transport, d'une inoculation dans le bois et d'un environnement favorable à leur développement (Mayers et al. 2018 ;
Biedermann & Vega, 2020).

Commensalisme : Quelques espèces de champignons cohabitent dans les galeries sans infliger de dommages ni offrir de bénéfice direct aux scolytes. Ils exploitent simplement les conditions définies par l'insecte (humidité, nutriments) pour se développer (Harrington, 2005).

Parasitisme : Dans certaines circonstances, les champignons peuvent devenir des agents pathogènes, portant alors préjudice à l'insecte hôte ou à l'arbre infecté. Par exemple, l'Ophiostomaspp. A le potentiel de nuire à la croissance de champignons bénéfiques et de provoquer une hausse du taux de mortalité parmi les larves. (Six et Wingfield, 2011).

1.2. Spécificité des associations scolyte–champignon

La spécificité des relations entre une espèce de scolyte et son ou ses partenaires fongiques détermine le niveau d'exclusivité. Certaines associations sont très spécifiques, tandis que d'autres proposent davantage de flexibilité.

Par exemple, certains insectes du type *Xyleborus*, aussi appelés coléoptères ambrosiaux, sont souvent liés à certaines variétés de champignons comme *Ambrosiellaspp*. Ces derniers sont transmis verticalement grâce aux mycangia. Cette diffusion en temps réel assure une fidélité symbiotique élevée. (Mayers et al, 2018).

Cependant, d'autres espèces de scolytes peuvent transporter diverses sortes de champignons, et leur combinaison peut varier selon la région, la plante hôte ou les conditions environnementales. Cela indique une particularité diminuée et une relation davantage opportuniste.

La spécialisation symbiotique est également influencée par la structure et l'emplacement des mycangia. On associe souvent des mycangia complexes à des relations particulièrement spécifiques. (Francke-Grosmann, 1967)

1.3. Champignons vecteurs et associés aux scolytes

Les scolytes (Scolytinae) maintiennent un lien étroit avec divers genres de champignons, ce qui est essentiel pour leur écologie, leur nutrition et également pour l'impact de leur présence

sur les plantes hôtes. Ces champignons sont dispersés par des insectes via des structures particulières appelées mycangia, qui favorisent une inoculation directe dans le bois lors de leur colonisation. Ces échanges ne profitent pas seulement aux deux parties, ils influencent aussi la santé des forêts.

1.3.1. Impacts sur l'arbre hôte (pathogénicité, flétrissement, mortalité)

Les champignons ont de multiples effets sur l'arbre hôte :

Pathogénie : L'obstruction du xylème causée par la colonisation fongique entraîne un stress hydrique sévère. Cela réduit la robustesse de l'arbre et le rend plus vulnérable aux dégâts. (Wingfield et al, 2010).

Flétrissement : L'accumulation de substances toxiques générées par les champignons et l'altération des tissus provoquent un flétrissement accéléré des parties aériennes, en particulier chez les conifères. (Solheim., 1995).

Taux de mortalité : Lors d'une infestation combinée (scolyte et champignons nuisibles), les arbres peuvent mourir en quelques semaines, particulièrement en cas de stress (sécheresse, chaleur). (Six et Wingfield, 2011).

1.3.2. Dépendance nutritionnelle des coléoptères Ambrosia vis-à-vis des champignons symbiotiques

Les coléoptères Ambrosia (*Curculionidae* : *Scolytinae* et *Platypodinae*) ont une diète extrêmement spécialisée, qui est exclusivement basée sur leur symbiose avec des champignons qu'ils désignent sous le nom de champignons ambrosia. Ces insectes ne consomment pas le bois qu'ils perforent ou d'autres substances végétales, mais se restaurent uniquement des structures fongiques qu'ils cultivent activement dans les galeries qu'ils forment au sein du xylème des arbres.

De nombreuses études, ont confirmé cette nécessité nutritionnelle incontournable. Au cours de trois ans, les auteurs ont isolé huit espèces de champignons récemment identifiées à partir de quinze espèces de coléoptères ambrosia dans ce pays. On classe majoritairement ces champignons dans les ordres Microascales et Ophiostomatales (*Ascomycota*), ainsi que dans l'ordre Polyporales (*Basidiomycota*). Ces champignons ont été identifiés comme la seule nourriture pour les larves et les coléoptères ambrosia adultes, soulignant ainsi l'importance vitale de cette symbiose (Choi et al, 2024).

Un organe spécialisé, appelé mycangium, qui se trouve chez les femelles adultes, est chargé du transfert des spores fongiques. Ce processus donne aux coléoptères la capacité d'inoculer les galeries fraîchement créées, assurant ainsi la multiplication des champignons et, par conséquent, leur propre pérennité. Cette perspective biologique met en avant un modèle d'évolution co-adaptative marqué, où la survie des insectes est fortement liée à celle de leurs partenaires fongiques.

1.4. Rôle écologique des mycangia dans la symbiose scolyte champignon

Les mycangia jouent un rôle écologique crucial dans la symbiose entre les scolytes (*Coleoptera* : *Scolytinae*) et les champignons qu'ils véhiculent. Ces configurations permettent non seulement un déplacement précis des spores, mais aussi une inoculation efficace dans les tunnels créés par les insectes à l'intérieur du bois hôte.

Cette relation symbiotique assure aux larves un environnement nutritif optimal, axé sur la présence de champignons cultivés au sein du bois. Le champignon, en dégradant les parois cellulaires du xylème, rend l'accès aux nutriments plus aisés pour les stades juvéniles du scolyte. (Chase .G.mayers 2020).

De plus, les mycangia favorisent la spécificité entre certains scolytes et les champignons qui leur sont associés, influençant directement la répartition écologique des espèces ainsi que leur impact pathogène sur les forêts. Saisir cette dynamique permet d'identifier des opportunités pour formuler des stratégies de combat axées sur l'interruption de cette interaction.

1.5. Évolution et coadaptation entre scolytes et champignons

Les interactions entre les scolytes (Scolytinae) et les champignons qui leur sont associés ne se limitent pas à une simple relation écologique, mais témoignent fréquemment d'une coévolution à long terme. L'analyse de ces interactions souligne une dynamique adaptative en constante évolution où l'insecte et le champignon avancent ensemble pour optimiser leur survie et leur reproduction dans des milieux lignicoles difficiles.

1.5.1. Coévolution possible des structures mycangiales et du microbiote fongique

Les mycangia, des formations spécialisées qui favorisent le déplacement des spores fongiques, montrent une variété considérable en termes de forme, d'emplacement et de

complexité selon les différentes espèces de scolytes. Il semble que cette diversité structurelle coévolue parallèlement au microbiote fongique spécifique qu'elle transporte.

Les scolytes ambrosia disposent de mycangia bien développés, habituellement internes, qui abritent des espèces fongiques spécifiques comme *Ambrosiella spp*. Cette coévolution garantit un transfert vertical efficace ainsi qu'une forte fidélité symbiotique. (Mayers et al., 2018 ; Francke-Grosmann, 1967).

1.5.2. Spécialisation fonctionnelle selon l'espèce

Il semble que chaque espèce de scolyte ait évolué pour remplir un rôle fonctionnel spécifique dans le contexte de la relation symbiotique. Certains êtres vivants, tels que les coléoptères ambrosia, dépendent presque totalement de leurs champignons mutualistes pour leur subsistance. Quelques-uns ont recours à différents alliés fongiques, adoptant une stratégie plus flexible selon le contexte écologique (type d'arbre, climat, concurrence). Cette spécialisation influence la capacité de l'insecte à s'adapter, sa reproduction et son taux de survie. (Six & Wingfield, 2011 ; Biedermann & Vega, 2020).

1.5.3. Cas des coléoptères ambrosia (Ambrosiabeetles)

Les coléoptères ambrosia sont un parfait exemple de symbiose coévoluée. Ils ne mangent pas le bois, mais se nourrissent exclusivement des champignons ambrosia qu'ils cultivent dans les galeries qu'ils forment dans le bois mort ou dégradé. Le champignon se propage verticalement grâce aux mycangia et ne peut survivre sans l'insecte, créant donc une dépendance réciproque complète.

Ce système symbiotique montre une coévolution profonde, marquée par une adaptation morphologique, comportementale et biochimique conjointe des deux entités. (Biedermann & Vega, 2020)

1.6. Perspectives de lutte biologique ciblant la symbiose

Devant une prise de conscience écologique croissante des relations entre le scolyte et le champignon, des techniques de lutte biologique innovantes émergent, s'adressant non seulement à l'insecte, mais aussi à son compagnon fongique. Ces stratégies ont pour objectif de perturber la symbiose essentielle à la survie des scolytes.

1.6.1. Stratégies de rupture de la transmission fongique

Un des aspects vulnérables potentiels de cette symbiose découle du mode de propagation du champignon, L'interruption mécanique ou chimique de l'activité des mycangia (structures qui véhiculent les spores) pourrait bloquer la capacité de l'insecte à transmettre ses symbiotes, le rendant par conséquent incapable de se nourrir et de se reproduire.

Des études expérimentales ont exploré l'application de composés antifongiques spécifiques pour entraver la germination ou le développement du champignon à l'intérieur des galeries. (Six et Wingfield, 2011).

1.6.2. Approches innovantes basées sur les recherches de Chase. G Mayers

L'étude menée par C.G. Mayers et son équipe (2018) a mis en lumière les spécificités des interactions entre les scolytes et les champignons, ce qui a permis l'élaboration de solutions sur mesure. En repérant les gènes indispensables à la symbiose fongique, il est possible de concevoir des inhibiteurs ciblés qui n'interviennent que sur les champignons en symbiose, sans perturber les autres microorganismes du sol.

Des études récentes suggèrent également l'utilisation de champignons antagonistes (biocontrôle fongique), qui sont capables de rivaliser avec les symbiontes dans les galeries. (Mayers et al, 2018)

1.7. Étude de cas : *Dendroctonus micans* en région méditerranéenne

Le *Dendroctonus micans*, un insecte appartenant à la famille des scolytes, est fréquemment présent dans les forêts de conifères en Europe, notamment autour du bassin méditerranéen. Il est principalement présent dans les forêts de pins et d'épicéas. Ce coléoptère entretient une symbiose marquée avec des champignons du genre *Ophiostoma*, notamment *Ophiostoma minus*, qui favorise la colonisation du bois et peut exercer un impact pathogène.

Selon une recherche réalisée par Solheim (1995), l'inoculation conjointe de *D. micans* et *O. Minus* a entraîné une dégradation rapide des tissus vasculaires chez les arbres affectés, hâtant ainsi le processus de mortalité. Cette relation met en évidence l'importance de la symbiose dans la dynamique de l'infestation (Solheim 1995).

1.8. Schéma illustratif des interactions scolyte–champignon

Interactions entre le scolyte (vecteur), le champignon symbiotique (source de nourriture et facteur pathogène) et l'arbre hôte (entité visée). Le schéma illustre le mouvement du champignon à travers les mycangia, sa propagation dans le bois et son effet physiologique sur la plante hôte.

L'image suivante illustre les interactions entre le scolyte, les champignons symbiotiques et pathogènes, ainsi que l'arbre qui fait office d'hôte.

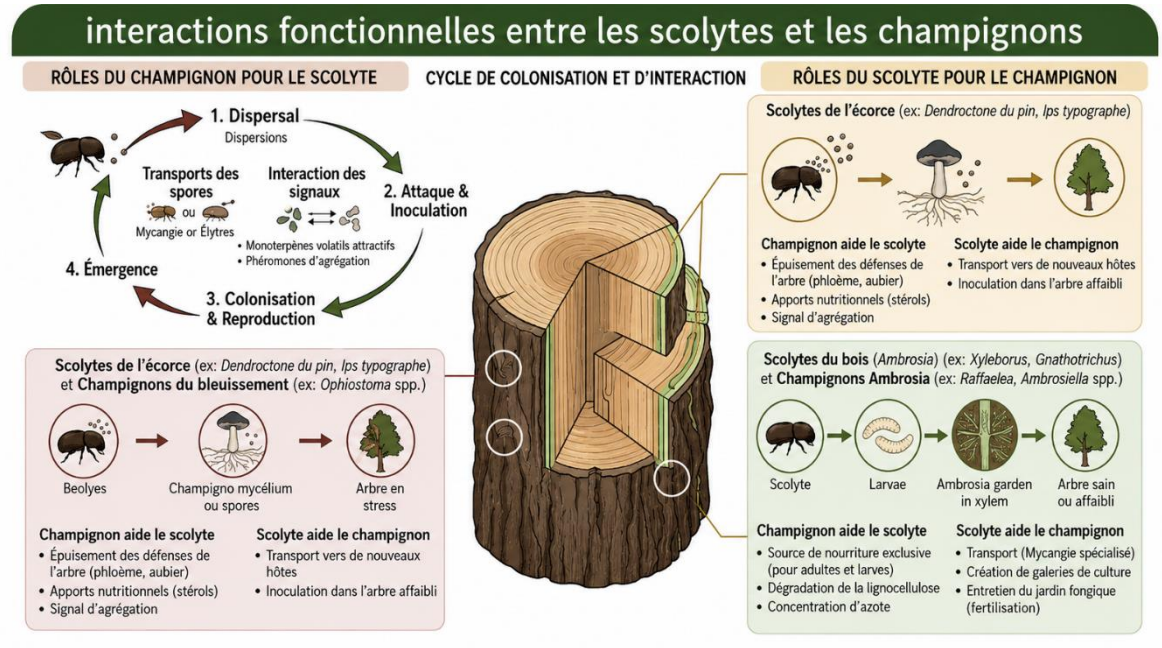


Figure 1 : Interactions fonctionnelles entre les scolytes et les champignons (Hulcr, J., & Stelinski, L. L. 2017).

1.9. Analyse comparative entre champignons mutualistes et pathogènes

Les scolytes interagissent de manière complexe avec divers champignons, certains apportant une aide mutuelle en contribuant à la nutrition et à l'adaptation de l'insecte, tandis que d'autres sont pathogènes et accélèrent la détérioration de l'arbre hôte. La distinction entre ces deux catégories de champignons rend plus aisée la compréhension des impacts écologiques et économiques associés aux infestations, tout en orientant les stratégies de gestion. Le tableau ci-après donne un aperçu des divergences fonctionnelles et biologiques

importantes entre ces deux genres de champignons. (Six &Wingfield, 2011 ; Zhao et al, 2019).

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques des champignons mutualistes et pathogènes Associés aux scolytes. (Adapté de Six & Wingfield, 2011 ; Zhao et al, 2019).

Critères	Champignons mutualistes	Champignons pathogènes
Rôle principal	Nutrition de l'insecte	Dommages à l'arbre hôte
Transmission	Verticale via mycangia	Souvent horizontale ou accidentelle
Exemples	Ambrosiella spp, Raffaelea spp.	Ophiostoma minus, Grosmannia clavigera
Effets sur l'arbre	Neutres ou faibles	Flétrissement, mortalité
Relation avec le scolyte	Obligatoire et coévolutive	Facultative ou accidentelle

1.10. Situation des forêts algériennes : enjeux et perspectives locales

Cette section mettra l'accent sur l'analyse des caractéristiques écologiques présentes dans les forêts algériennes, en particulier dans la région semi-aride de Ksar El Boukhari. Le *Pinus halepensis*, une espèce résiliente, prédomine dans cette région. Cependant, il pourrait devenir vulnérable en cas de périodes prolongées de stress climatique.

Des études de terrain ont démontré la présence de scolytes xylophages, vraisemblablement des genres Tomicus ou Orthotomicus, associés à des indices de dégradation progressive chez les pins. Cette régression se manifeste par une dégradation des branches, un ternissement des aiguilles et une mortalité partielle ou totale des cimes.

L'étude préliminaire révèle un lien fort entre ces insectes xylophages et des champignons associés, notamment ceux appartenant aux genres Ophiostoma ou Leptographium, connus pour obstruer les canaux du xylème, ce qui accentue le stress hydrique de l'arbre hôte en parfaite santé. L'interaction entre le manque d'eau et l'assaut biotique (scolyte + champignon) est un facteur déterminant dans la détérioration des forêts naturelles de cette zone. Il s'agit d'un défi environnemental et forestier qui continue de

grandir en lien avec les effets du réchauffement climatique dans les régions steppiques de l'Algérie.

2. Interaction scolyte arbre

Il semble en effet que la réussite ou l'échec des attaques de Scolytes sur les conifères dépend du résultat du conflit entre les réactions défensives de l'arbre et la densité de population d'insectes (Lieutier et Levieux, 1985). L'interaction entre les scolytes et leurs hôtes arborés constitue un processus complexe où les facteurs physiologiques de l'arbre et les stratégies adaptatives de l'insecte s'entrecroisent. Les scolytes colonisent préférentiellement les arbres affaiblis par des stress abiotiques (sécheresse, gel, déficit hydrique) ou biotiques (attaques fongiques, maladies préexistantes). L'infiltration des galeries dans le phloème et le xylème perturbe le flux de la sève, conduisant à une dégradation progressive de l'arbre. En réaction, l'hôte élabore des systèmes de défense, entre autres l'exsudation de résine et la création de composés phénoliques, dans le but d'entraver l'invasion. Cependant, lorsque la pression d'attaque est forte ou que l'arbre a une vigueur physiologique faible, ces mécanismes de défense perdent leur efficacité. Cela favorise le déclin et, dans certaines situations, peut entraîner la mort de l'arbre (Christiansen et al, 1987 ; Franceschi et al. 2005). Cette interaction dynamique est essentielle pour la régulation des populations de scolytes et le maintien de l'équilibre des écosystèmes forestiers en milieu méditerranéen.

2.1. Interaction scolyte champignon et arbre hôte

Outre les effets directs des scolytes sur leurs hôtes, dus à des mécanismes mécaniques et physiologiques, l'union symbiotique entre ces insectes et certains champignons pathogènes, en particulier ceux du genre Ophiostoma, renforce de manière significative les conséquences des infestations. Ces champignons, présents dans les mycanges des scolytes, s'installent dans les tissus conducteurs de l'arbre, bloquant ainsi les vaisseaux du xylème et entravant le mouvement de la sève. Cette collaboration entre les insectes et les champignons affaiblit vite les mécanismes de défense naturels de l'arbre et hâte son déclin. Par conséquent, la relation entre le scolyte, le champignon et l'arbre ne se limite pas à une simple interaction bilatérale, mais plutôt à un système tripartite complexe où chaque élément influence le résultat final de l'infection. Dans les forêts de pins méditerranéens, cette dynamique constitue un facteur de risque important susceptible d'entraîner des épidémies de pullulations et des pertes considérables en matière de ressources forestières. (Six &Wingfield, 2011 ; Krokene, 2015).

3. Interaction champignon arbre

L'interaction entre les champignons nuisibles et les arbres forestiers se base sur une dynamique complexe où les processus d'infection du champignon affectent directement la physiologie de l'hôte. Les champignons appartenant au genre Ophiostoma, généralement liés aux scolytes, envahissent le xylème et obstruent les vaisseaux conducteurs, ce qui perturbe le transport de l'eau et des minéraux. Cette obstruction entraîne une diminution de la photosynthèse et un déséquilibre hydrique, ce qui intensifie la détérioration de l'arbre. En réaction, l'hôte active des mécanismes de défense structuraux (la formation de tyloses et les dépôts de gommes) et biochimiques (la production de métabolites secondaires et de composés phénoliques). Cependant, l'efficacité de ces mécanismes dépend fortement de l'état physiologique de l'arbre et de la gravité de l'attaque. Par conséquent, sous des conditions de stress abiotiques (comme la sécheresse ou la pauvreté du sol), la susceptibilité de l'arbre s'accroît, facilitant ainsi l'avancement rapide de l'infection fongique. Ainsi, cette relation entre le champignon et l'arbre est un élément crucial du déclin forestier et joue un rôle important dans la dynamique des écosystèmes méditerranéens. (Brasier, 1991 ; Harrington, 2005 ; Wingfield et al.
2016).

3.1 Mycangial Glands :

Pour les scolytes ambrosia, les mycangia sont généralement associés à une abondance de cellules glandulaires. On trouve ces glandes soit dans la paroi du mycangium, soit dans les tissus voisins ou à proximité de son ouverture. (Francke-Grosmann 1956a, 1963; Schedl 1962; Batra
1963; Farris ET Funk 1965; Schneider 1976; Beaver 1989). L'anatomie de ces cellules glandulaires a été soigneusement enregistrée chez différentes espèces. Ces glandes sécrètent des substances qui remplissent l'espace du mycangium, favorisant ainsi une multiplication dynamique du champignon symbiotique. Ils sont qualifiés de limpides, huileux, cireux ou légèrement acides. (Francke Grosmann 1956a ; Batra 1963).

3.2. Mycangia : Définition des diverses symbioses entre scolytes ambrosia et champignons

Les scolytes ambrosia maintiennent une symbiose étroite avec des champignons, qui sont essentiels à leur alimentation et à leur croissance. Ces champignons sont déplacés et

conservés dans des structures spécialisées connues sous le nom de mycangia, qui garantissent l'inoculation du nouvel hôte lors de la colonisation. L'éventail morphologique et fonctionnel des mycangia illustre la diversité des liens évolutifs entre les coléoptères et leurs partenaires fongiques. Il est primordial de comprendre ces symbioses pour saisir le rôle écologique des scolytes ambrosia et leurs effets éventuels sur la santé des forêts.

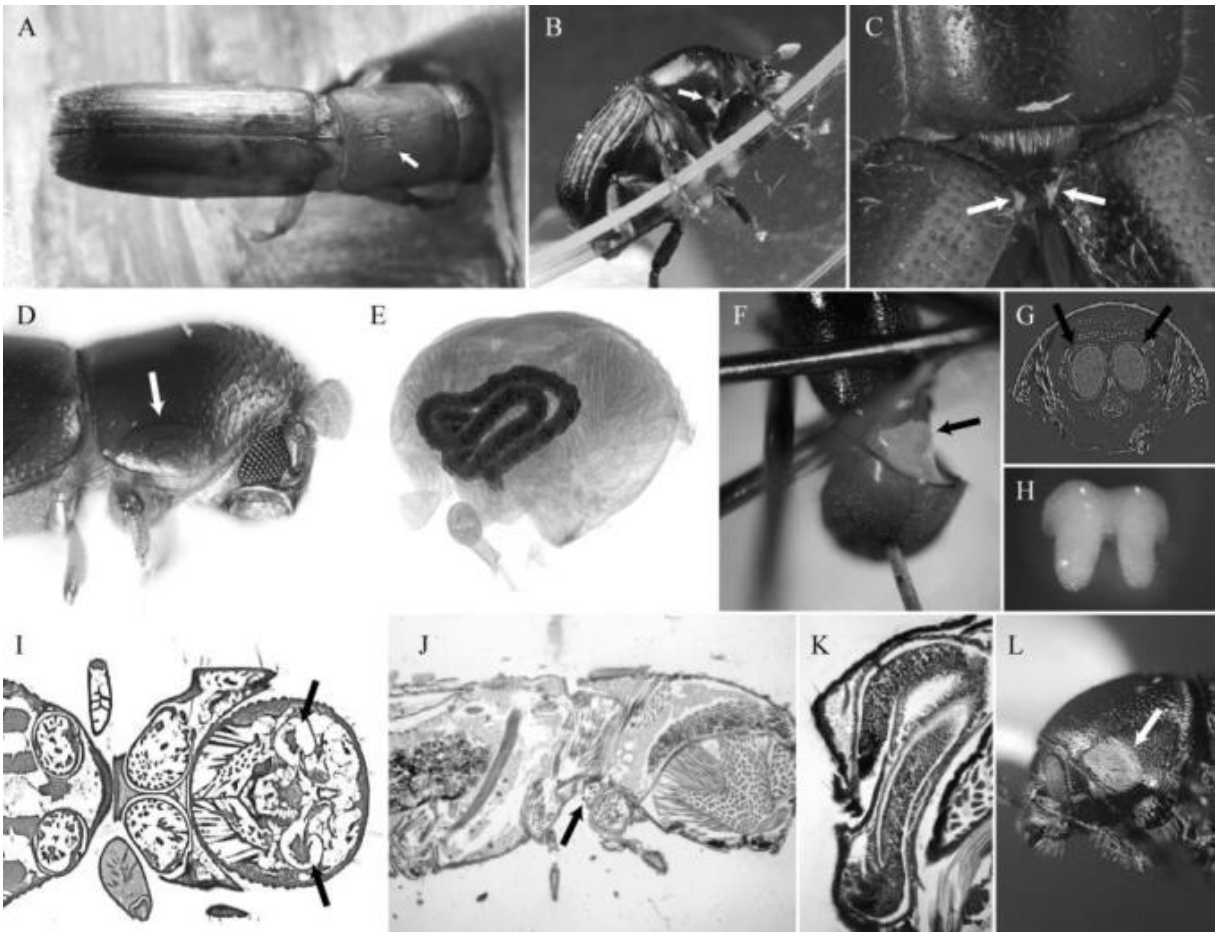


Figure 2 : Localisation et structure des mycangia chez différentes espèces de scolytes (Mayers et al2020).

Diverses sortes de mycangia et méthodes d'imagerie connexes : Localisation et structure des mycangia chez différentes espèces de scolytes (Mayers et al 2020).

- (A)Présence de mycangia en fosse pronotale chez *Oxoplatypus quadridentatus.*
- (B) Mycangia en forme de plaque soyeuse observés chez *Phloeo borus* cf. niger
- (C) Mycangia à encoche élytrote présentes chez *Xyleborinus saxesenii*, avec une prolifération d'hyphes du champignon *ambrosia Raffaelea*.
- (D, E) Mycangia tubulaires prothoraciques présents chez le *Corthylus punctatissimus*
- (D) Mycangium observable à travers l'exosquelette.

- (E)Modèle tridimensionnel de mycangium élaboré par microtomographie (Micro-CT).
- (F–H) Mycangium en poche mésonotale observé chez *Xylosandru samputatus* (F, G) et X. germanus (H).

Technique appelée « draculienne » pour révéler le mycangium (flèche).On observe des lobes doubles en coupe transversale grâce à la Micro-CT

- (H) Mycangium/masses de spores découpées.

Mycangia se multiplient dans une poche pré-orale chez *Premnobius cavipennis*

- (J) Mycangia présentes dans le prothorax du *Xyloterinus* politus.
- (K) Des mycangia en forme de fer à cheval ont été observées chez *Trypodendron betulae*
- (L) Mycangium en revêtement soyeux chez un *Bothros ternini* non identifié.

Micro-CT a été utilisé pour obtenir les images E, G et I, tandis que les images J et K ont été produites par microtomie.

Les images A, B, D à G et I ont été fournies par Craig Bateman, You Li et Jiri Hulcr ; les images J et
K par Lawrence Abrahamson ; et l'image L par Luana de SouzaCovre.

3.3 Cycle du Mycangia

L'accumulation de recherches sur plusieurs décennies a permis d'établir un cycle évolutif standard du mycangium chez les coléoptères ambrosia, mettant en évidence son rôle prépondérant dans la sélection et la conservation des champignons ambrosia spécialisés. Le cycle comporte généralement plusieurs étapes.

3.3.1. Acquisition :

Dès leur éclosion de la pupe ou de leur galerie maternelle, les jeunes adultes se saisissent de propagules fongiques (généralement en conglomérat avec d'autres champignons et débris) dans leurs mycangia vides, en les recueillant sur les parois de la galerie.

3.3.2. Activation des glandes :

Les cellules glandulaires du mycangium s'éveillent juste avant ou au moment où le coléoptère abandonne l'hôte, libérant des composés qui favorisent le développement du principal champignon ambrosia.

3.3.3. Sélection biologique :

Les champignons ambrosia, ayant une croissance rapide, s'établissent et dominent l'espace du mycangium et éliminent les espèces fongiques concurrentes, ce qui entraîne une masse fongique presque pure.

3.3.4. Inoculation

Pendant la création des galeries et le processus de ponte, les spores de champignons sont dispersées de manière volontaire ou passive afin d'envahir les parois des galeries.

3.3.5. Désactivation

Les glandes commencent à se désactiver progressivement, ce qui entraîne la dégradation du mycangium. Pendant l'hiver, ce dernier peut abriter des résidus ou des mycètes secondaires, même si un léger dépôt du champignon symbiote principal pourrait persister. Il semble que ce processus n'utilise pas d'agents antifongiques, mais plutôt un procédé de « filtration biologique », où l'environnement nutritionnel interne du mycangium favorise spécifiquement la croissance du symbiote au détriment des autres. Il est encore nécessaire de valider ce modèle pour certaines variétés de mycangia qui sont plus petites ou moins étudiées.

3.4. Mycangia Define the Diverse Ambrosia Beetle–Fungus Symbioses

Les mycangia sont des structures spécialisées qui permettent aux scolytes ambrosia de transporter leurs champignons en symbiose. Cette relation, vitale à leur nutrition et leur écologie, démontre la variété et l'importance des symbioses entre insectes et champignons dans les forêts. (Biedermann& Vega, 2020).

3.5. Les mycanges préservent les cultivars fongiques

Les scolytes ambrosia, qui se nourrissent de champignons mutualistes, ont mis en place des stratégies spécifiques pour assurer la sauvegarde de ces symbiotes d'une génération

à l'autre. Contrairement à des insectes mycophages comme les termites ou les fourmis qui forment des colonies pérennes, les scolytes doivent constamment créer de nouvelles galeries pour chaque génération, ce qui complique la transmission précise de leurs cultures fongiques. (Biedermann & Vega ,2020).

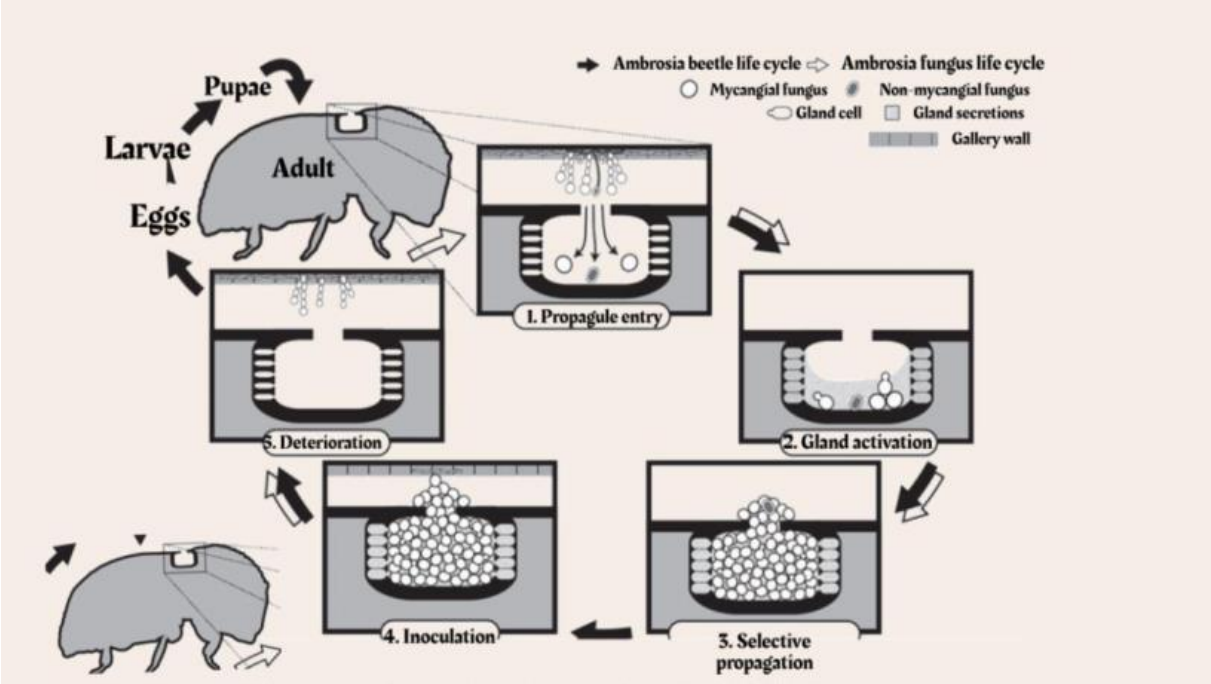


Figure 3 : Le cycle du mycangium. Étapes numérotées commedétaillées dans le texte. (Mayers et al. 2020).

Ces insectes se développent dans un environnement riche en micro-organismes, dont beaucoup sont adaptés à la transmission externe (Batra, 1963 ; Francke-Grosmann, 1967 ; Paine, Raffa & Harrington, 1997 ; Harrington, 2005 ; Six, 2012 ; Bateman et al. 2016 ; Skelton et al. 2018). En creusant le phloème et le bois, ils peuvent aussi emporter des organismes commensaux en surface. Par ailleurs, la composition microbienne des mycanges varie en fonction du stade de développement de l'insecte et des saisons (Batra, 1963, 1966 ; Francke-Grosmann, 1967 ; Schneider & Rudinsky, 1969a, 1969b ; Roeper, 1988 ; Schneider, 1991 ; Kinuura, Hijii & Kanamitsu, 1991 ; Kajimura & Hijii, 1992 ; Kinuura, 1995, 2002 ; Yang, Ye& Zhang, 2008 ; Ibarra-Juarez et al. 2020). Il est possible que ces structures soient sujettes à la contamination par des acariens, des nématodes ou des résidus (Batra, 1966 ; Schneider & Rudinsky, 1969).

De plus, les mycanges peuvent parfois héberger des micro-organismes dits « auxiliaires », tels que des levures (Batra, 1963 ; Baker &Kreger-van Rij, 1964 ; Roeper, 1988; Mayers, Bateman

& Harrington, 2018), des champignons filamenteux (Batra, 1963 ; Francke-Grosmann, 1967; Kinuura, 2002 ; Biedermann et al. 2013 ; Bateman et al. 2016 ; Freeman et al. 2016 ; Lynch et al. 2016) ou encore des bactéries (Hulcr et al. 2012), dont certains peuvent être bénéfiques ou nuisibles.

Malgré ces dangers, des recherches ont démontré que les mycanges des scolytes ambrosia sont habituellement composées de cultures presque exclusivement de champignons ambrosia durant la phase de vol et de colonisation (Francke-Grosmann, 1956a, 1958 ; Abrahamson et al. 1967 ; Schneider & Rudinsky, 1969a ; Nakashima, 1979 ; Gebhardt et al, 2004 ; Harrington, Aghayeva & Fraedrich, 2010 ; Harrington et al, 2014 ; Mayers et al, 2015, 2020a, 2020b ; Mayers,Harrington & Ranger, 2017 ; Mayers, Bateman & Harrington, 2018). Des lignées de scolytes ont maintenu leurs cultivars sur une période de plusieurs millions d'années, ou ont substitué ces derniers par des symbiontes récemment obtenus (Farrell et al, 2001 ; O'Donnell et al, 2015 ; Vanderpool, Bracewell & McCutcheon, 2017 ; Mayers et al, 2020a, 2020b).

Quand le champignon dominant est présent, les actions de désherbage contribuent à réduire la compétition (Francke-Grosmann, 1967 ; Biedermann&Taborsky, 2011 ; Nuotclà, Biedermann&Taborsky, 2019). Par ailleurs, les mycanges appariés ont une importance majeure: si un mycange est infecté par un nématode, l'autre peut poursuivre son fonctionnement normal (Schneider & Rudinsky, 1969). Cette partition est semblable aux tactiques observées chez les fourmis coupeuses de feuilles et les termites (Hart &Ratnieks, 2001 ; Aanen et al, 2009 ; Mueller et al., 2010 ; Kirkendall, Biedermann&Jordal, 2015).

En définitive, même si certains champignons auxiliaires peuvent enrichir l'alimentation (Batra, 1985 ; Mayers et al, 2020a), ils ne sont pas en mesure de substituer le champignon ambrosia sans conséquences indésirables : des recherches ont démontré une baisse de la fécondité, du taux de survie et de la taille des adultes chez les scolytes alimentés par d'autres champignons (Freeman et al, 2012 ; Saucedo et al, 2018 ; Carrillo et al, 2020). Par conséquent, les mycanges jouent un rôle crucial dans la préservation à long terme de la symbiose ambrosia, malgré un environnement microbien complexe et en constante mutation (Biedermann& Vega, 2020).

4. Cas d'Austroplatypus incompertus : un exemple de dimorphisme morphologique et fonctionnel

Austroplatypus incompertus présente un dimorphisme sexuel, le plus évident étant la différence de configuration et d'ornementation des élytres. Chez le spécimen femelle, les élytres présentent une pente prononcée et sont munis d'épines saillantes, alors que chez le mâle, les pointes des élytres sont plus arrondies et les épines sont faiblement développées. Cette distinction sexuelle est rapidement observable à l'œil nu et permet de déterminer le sexe des individus sur site (Beaver, 2010).

Des différences de genre peuvent également être observées en utilisant un microscope stéréo de dissection :

On observe des mycanges au centre du prothorax chez la femelle, ce qui n'est pas le cas chez le mâle ; la femelle présente également une série de crêtes à la base des élytres, contrairement au mâle où elles sont inexistantes. Ces crêtes sont situées entre le troisième et le quatrième interstice, formant une série de crêtes orientées vers l'arrière. (Beaver, 2010).

Elles possèdent une largeur double à leur extrémité frontale (localisée entre le quatrième et le troisième espace), puis se rétrécissent de moitié (exclusivement au troisième) sur approximativement un sixième de la longueur totale des élytres. (Beaver, 2010).

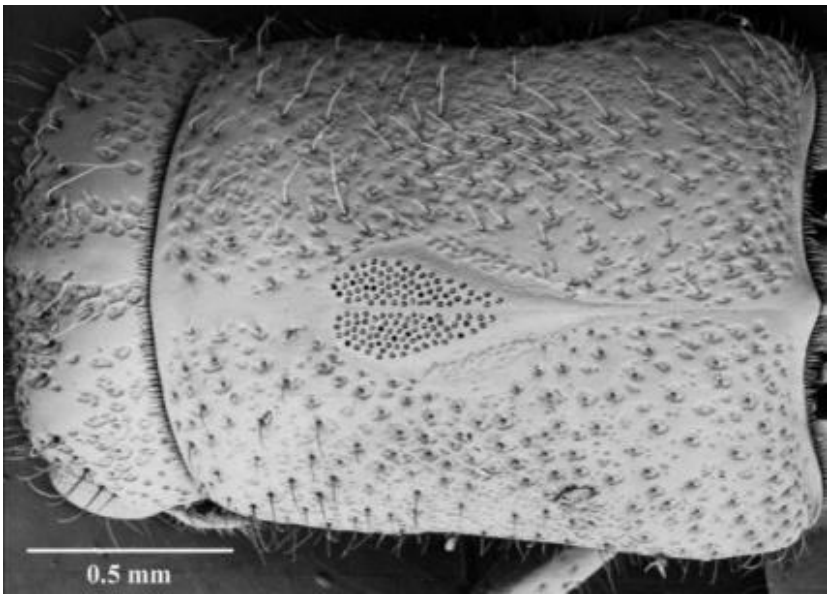


Figure 4 : Mycangia de la femelle (Beaver, 2010).

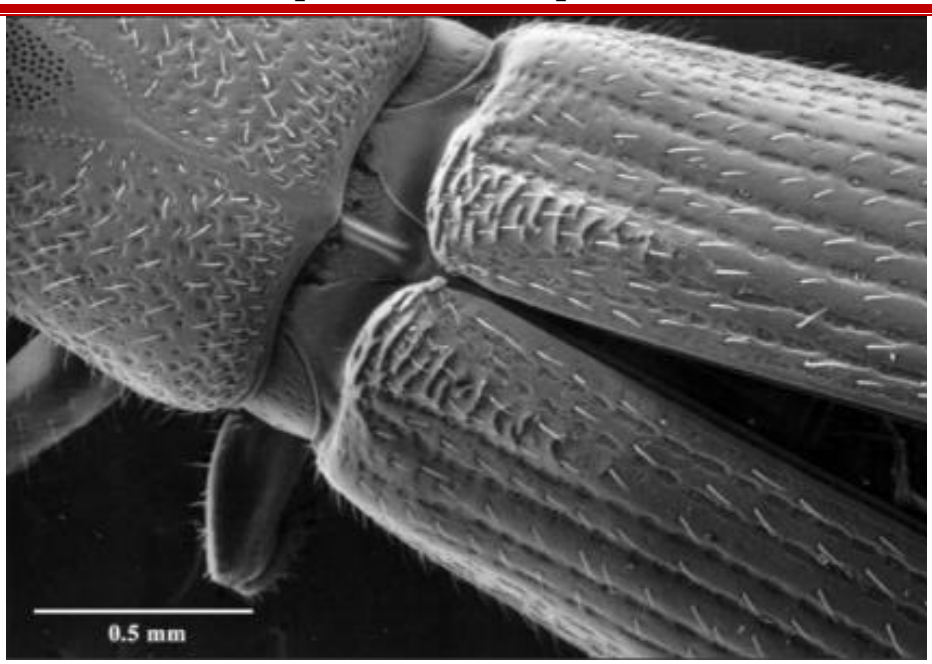


Figure 5 : Crêtes élytrales de la femelle (Beaver, 2010).

5. Mécanisme d'installation des Scolytes

Les attaques de scolytes dans les forêts résineuses résultent de deux facteurs complémentaires : la présence d'arbres dégradés à cause d'un stress et un seuil précis de population de nuisibles (Lieutier& Lev1eux 1985). Les scolytes les plus connus sont ceux qui se nourrissent de conifères en choisissant un arbre hôte spécifique.

Ce processus est conditionné par la présence de composants végétaux spécifiques, à l'instar des terpènes, des sesquiterpènes et des alcools terpéniques, qui exercent une influence particulière sur certaines espèces (Chararas 1982). Il est possible de distinguer diverses phases successives dans le processus d'attaque d'un arbre. L'arbre est solide, cependant suite à un déséquilibre physiologique, des insectes primaires s'installent et sont ensuite suivis par des insectes secondaires lorsque l'arbre perd sa vigueur (Chararas 1959).

Chapitre III :

Matériel et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude (Ksar El Boukhari)

1.1 Situation géographique

La présente étude a été réalisée dans la région de Ksar El Boukhari, située au sud de la wilaya de Médéa, au sein de la région du Titteri. Cette ville se trouve à environ 135 km au sud d'Alger et occupe une position géographique stratégique entre l'Atlas tellien et les Hautes Plaines steppiques.

Les coordonnées géographiques de Ksar El Boukhari sont de 35°08'53" de latitude Nord et 2°45'03" de longitude Est. La région couvre une superficie d'environ 5 387 km² et présente un relief dominé par de vastes plateaux.

1.2 Situation administrative

Sur le plan administratif, Ksar El Boukhari est organisée en quatre daïras regroupant douze communes : la daïra de Ksar El Boukhari (Ksar El Boukhari, Saneg et M'fatha), la daïra d'Ouled Antar (Ouled Antar, Ouled Hellal et Boghar), la daïra d'Aziz (Aziz, Derrag et Oum El Jamil) ainsi que la daïra de Chahbounia (Chahbounia, Bouaiche et Boughezoul).

La région constitue une zone de transition entre la chaîne montagneuse de l'Atlas tellien au nord et les Hautes Plaines de M'Sila et de Djelfa au sud. Les reliefs montagneux situés au nord dépassent fréquemment 1 000 m d'altitude, tandis que les zones méridionales présentent des paysages steppiques plus ouverts.

Les formations forestières de la région sont dominées principalement par le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.), essence caractéristique des écosystèmes méditerranéens semi-arides. Ces peuplements forestiers jouent un rôle écologique important dans la protection des sols contre l'érosion, la préservation de la biodiversité et la lutte contre la désertification. Toutefois, ils demeurent fortement exposés aux contraintes climatiques et aux pressions anthropiques, ce qui favorise leur vulnérabilité aux phénomènes de dépérissement.

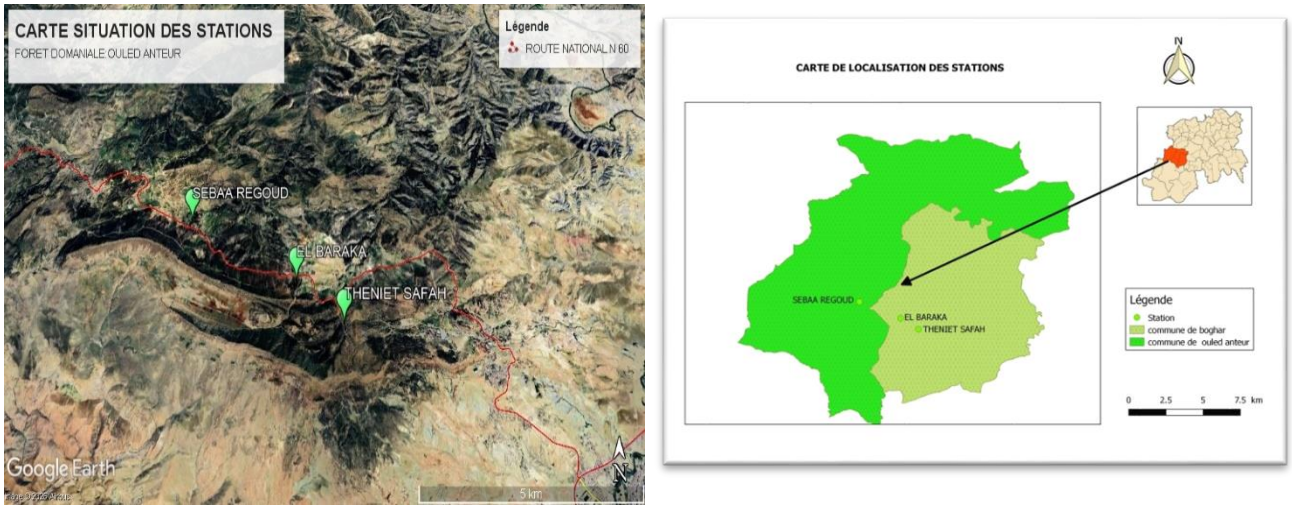


Figure 1 : Situation géographique de la région de Ksar El Boukhari (Médéa, Algérie).

2. Cadre climatique

Le climat constitue l'un des principaux facteurs écologiques influençant la répartition des êtres vivants. Il résulte de l'action combinée de plusieurs paramètres météorologiques tels que la température, les précipitations, l'humidité et le vent, qui conditionnent la distribution et le développement des espèces végétales et animales (Dajoz, 1996).

La zone d'étude comprend les régions d'Aïn Taya, de Boghar et d'Ouled Antar, situées dans la partie sud de la wilaya de Médéa, au sein de la région du Titteri. Cette zone se caractérise par un climat semi-aride à influence méditerranéenne, marqué par deux saisons bien distinctes : un hiver relativement froid et humide et un été chaud et sec.

L'étude climatique a été réalisée à partir des données météorologiques enregistrées à la station de Médéa durant la période 2002–2006.

✓ **Station météorologique :** Office National de la Météorologie (ONM) de Médéa

✓ **Latitude :** 36°16' N

✓ **Longitude :** 2°45' E

✓ **Altitude :** 1030 m

Cette station a été retenue comme station de référence en raison de sa proximité géographique avec les régions de Boghar, Ouled Antar et Aïn Taya, ainsi que de la disponibilité des données climatiques nécessaires à la caractérisation des conditions environnementales de la zone d'étude.

2.1 Méthode de correction

Les données climatiques de la station météorologique de Médéa ont été utilisées comme référence pour caractériser les conditions climatiques de la région d'Aïn Taya (Boghar). En l'absence de station météorologique locale disposant de séries de données complètes, les informations disponibles ont été exploitées afin d'obtenir une représentation générale des conditions climatiques régnant dans la zone d'étude.

2.2. Les précipitations

Les précipitations représentent l'ensemble des formes sous lesquelles l'eau atmosphérique atteint la surface terrestre, notamment la pluie, la neige, la grêle ou encore la rosée (Legrain, 2002). Dans la région étudiée, la pluviométrie présente une forte variabilité saisonnière. Les précipitations sont principalement concentrées durant les saisons automnale et hivernale, tandis que la période estivale est caractérisée par une sécheresse marquée avec des valeurs très faibles.

Cette répartition irrégulière des pluies influence directement la disponibilité en eau pour la végétation et constitue un facteur déterminant dans la dynamique des écosystèmes forestiers.

2.3. Les températures

L'analyse des températures montre que la région est soumise à des étés chauds et secs ainsi qu'à des hivers relativement froids. Les températures maximales sont enregistrées durant les mois de juillet et d'août, alors que les températures minimales sont observées pendant la période hivernale.

Les fortes amplitudes thermiques observées au cours de l'année exercent une influence importante sur le développement du Pin d'Alep et sur la prolifération des insectes ravageurs et des champignons associés.

2.4. Le vent

Le vent constitue un facteur climatique important dans la région. Il participe au dessèchement des sols et de la végétation, accentue le déficit hydrique des arbres et peut favoriser la dispersion des insectes et des agents pathogènes.

2.5. Influence du climat sur le Pin d'Alep

Les conditions climatiques de la région, caractérisées par une sécheresse estivale prolongée et une irrégularité des précipitations, représentent des facteurs de stress importants pour le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). Cet affaiblissement physiologique favorise l'installation des scolytes ainsi que le développement des champignons associés, contribuant ainsi aux phénomènes de dépérissement observés dans les peuplements forestiers.

A/ Les Précipitation moyennes mensuelles (mm)

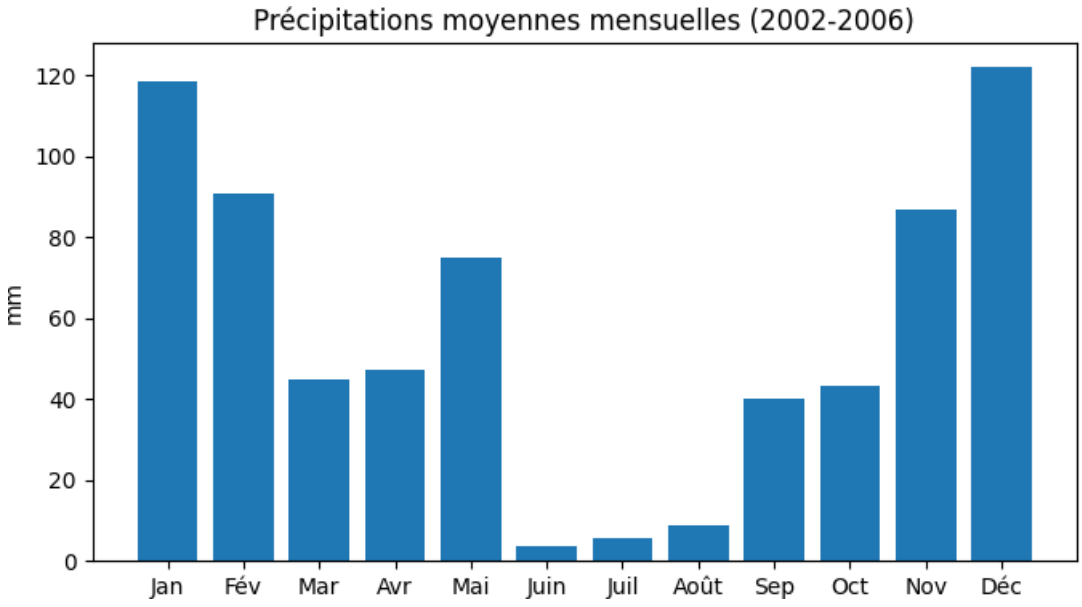


Figure 2: Variation mensuelle moyenne des précipitations.

Selon les données de la station de la forêt Tokersane, la pluviométrie annuelle moyenne est de 309,75 mm. L'examen des histogrammes met en lumière un contraste saisonnier marqué

: le mois de septembre est le plus arrosé avec 38,56 mm, contrastant fortement avec le mois de juillet, le plus sec, qui ne reçoit que 10,22 mm.

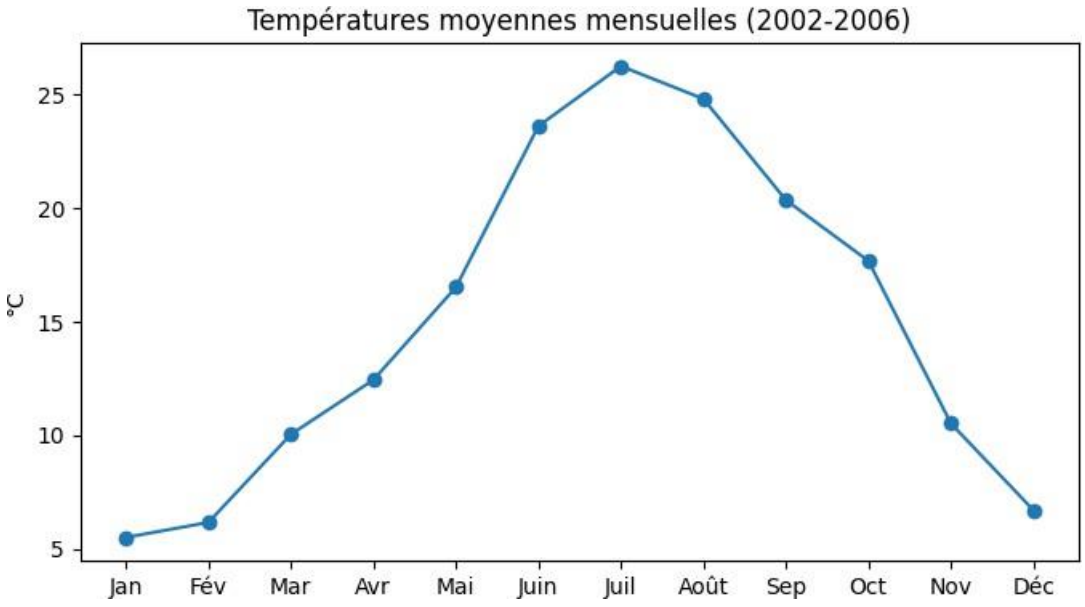


Figure 3 : Variation mensuelle des températures moyennes.

1.1. La température

La caractérisation de la température dans un lieu donné repose généralement sur l'analyse d'au moins cinq variables essentielles : la moyenne des minima, la moyenne des maximas, la moyenne mensuelle, les valeurs absolues minimale et maximale, ainsi que l'amplitude thermique (Djebaili, 1984).

L'examen des données relatives à la température, en particulier la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (**M**) et celle des températures minimales du mois le plus froid (**m**), permet de mieux appréhender le climat de la région. Ces éléments sont synthétisés dans la figure suivante.

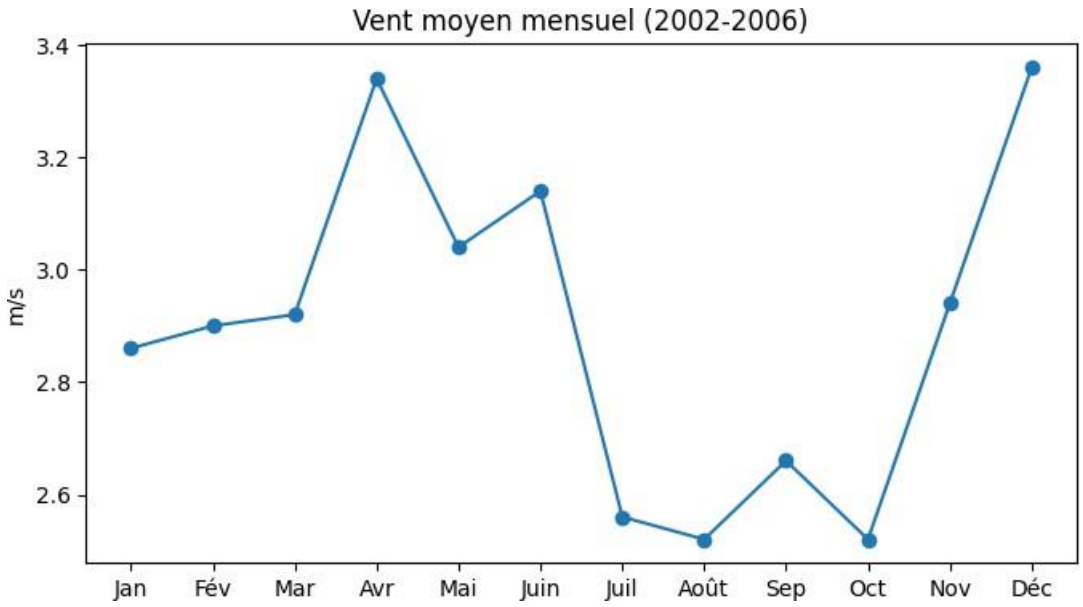


Figure 4 : Variation mensuelle de la vitesse moyenne du vent.

2.4 Synthèse climatique

Pour exprimer de manière synthétique le climat de la région, nous avons retenu différents indices climatiques ainsi que des représentations schématiques**,** notamment le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953) et le climagramme d'Emberger (1955)**.**

2.4.1 Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953) ;

Selon Gaussen, un mois est considéré comme **sec** lorsque la précipitation mensuelle (P, en mm) est inférieure ou égale au double de la température moyenne du même mois (P ≤ 2T). La superposition, sur un même graphique, des températures et des précipitations (avec P = 2T) en fonction des mois de l'année permet de construire un diagramme ombrothermique. Ce dernier met en évidence, de façon immédiate, l'alternance entre périodes sèches et périodes humides (Gérard, 1999).

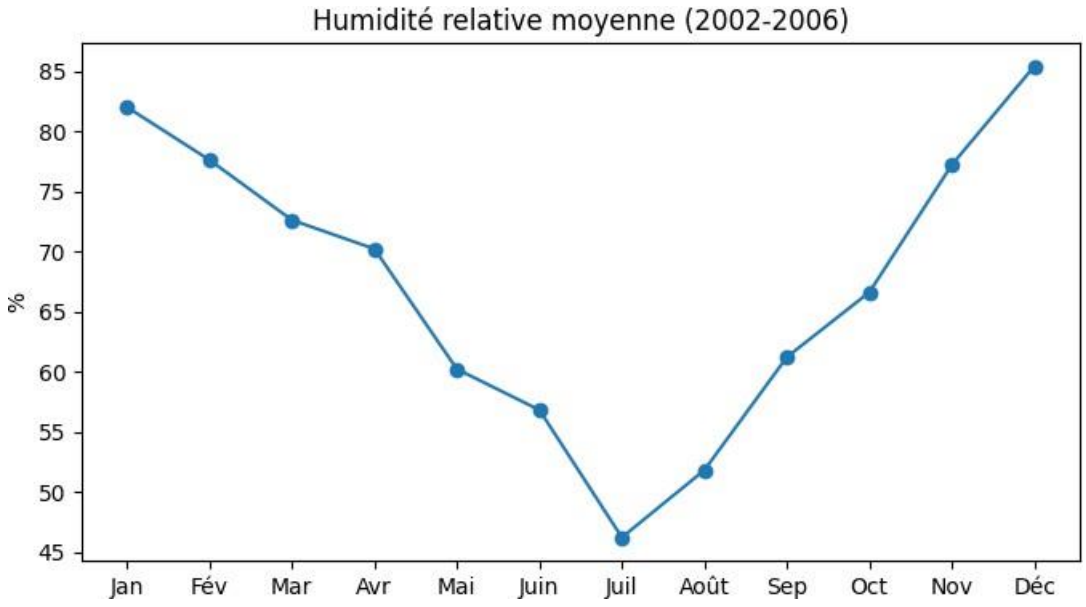


Figure 5 : Variation mensuelle de l'humidité relative.

Le climat de la région se caractérise par deux grandes périodes :

- **Une saison pluvieuse et froide**, qui s'étend du début octobre jusqu'au début mai.
- **Une saison sèche et chaude**, qui s'étale du début mai jusqu'à la fin septembre et qui dure environ **six mois**.

On constate ainsi que la **période de sécheresse** est relativement longue, puisqu'elle s'étend de mai jusqu'au mois d'octobre, soit une durée totale de **six mois consécutifs**.

2.4.2 Diagramme pluviothermique d'Emberger (1955)

La formule proposée par **Emberger (2002)** permet de calculer le **quotient pluviométrique annuel (Q2)** en fonction des précipitations et des températures. Elle s'écrit comme suit :

$$Q2 = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

Avec :

Q2 : quotient pluviométrique d'Emberger.

P : pluviosité moyenne annuelle (mm).

M : température maximale du mois le plus chaud en Kelvin (T° + 273,15), **m** : température minimale du mois le plus froid en Kelvin (T° + 273,15). Les résultats du calcul de **Q2** sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Station	M	m	P	Q2	Etage
Ksar El Boukhari	32,87	-0,02	309,73	**32.51**	**Semi Aride**

Tableau 1: Les valeurs du quotient pluviothermique pour la zone d'étude

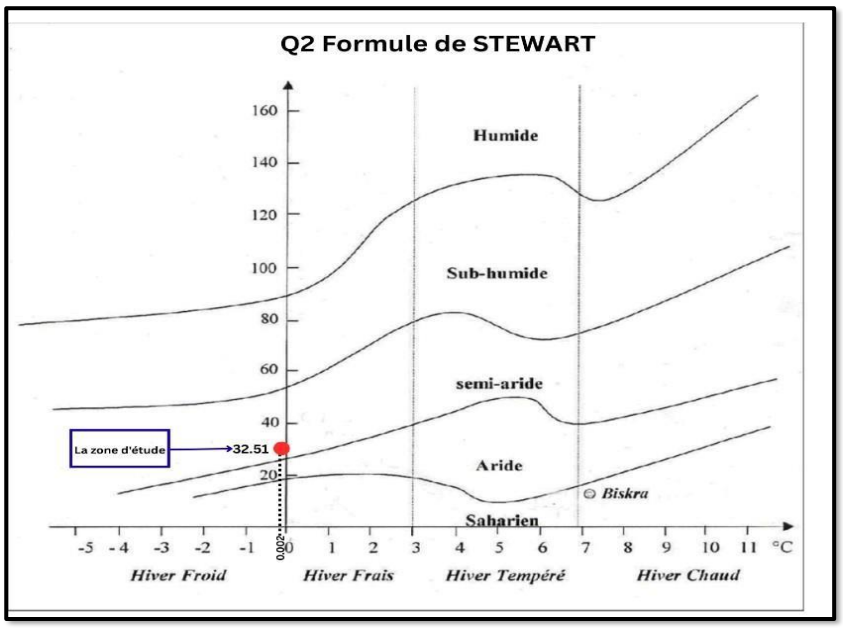


Figure 6: Climagramme pluviométrique d'Emberger de la zone d'étude (2004-2024).

Selon le climagramme d'Emberger, la zone étudiée se situe, pour la période 2004-2024, dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver froid**.**

2. Travail sur le terrain

2.1. Localisation des stations d'échantillonnage

Pour comprendre le mécanisme relationnel entre ces deux agents (Scolyte et champignons) plusieurs sorties ont était effectuer à l'intérieur du foret de SG. Dont le but est de choisir les foyers les plus dépéris. Les séries prises en considération sont (1, 3, 4 et 7) Cette approche méthodologique facilite la compréhension des variations spatiales de la santé forestière, tout en assurant un respect strict du protocole de collecte et d'examen.

Les coordonnées géographiques des séries ou bien des sujets sélectionnés sont enregistrés a l'aide du GPS (Global Positioning System), ces coordonnees ont été enregistrées et placées sur Google Earth pour obtenir l'image satellitaire des sujets choisis.

Un nombre de quatre sujets appartiennent aux différentes séries dans la zone d'étude sont enregistrées a des altitudes variables. Leur localisation précise constitue une étape

essentielle dans l'analyse de la dynamique écologique et l'étude des interactions entre le Pin d'Alep et les organismes associés (**Tab.3).**

Tableau 2: Coordonnées géographiques des trois stations

STATION	ALTITUDE (M)	LATITUDE (N)	LONGITUDE (E)
EL BARAKA	1117	35°55'39.30"	2°39'45.08"
SEBAA REGOUD	1095	35°56'23.15"	2°37'54.77"
THENIET SAFAH	1125	35°55'9.93"	2°40'32.88"

2.2. Protocole de prélèvement

L'objectif de cette étape était de sélectionner les sujets dépérissant, de choisir les séries les plus dégradées, ensuite les échantillons seront prélevés des différentes parties de l'hôte et de collecter les insectes associés.

2.2.1 Sélection des arbres

Les arbres ont été choisis en fonction de leur état de dépérissement (symptômes visibles tels que jaunissement des aiguilles, mortalité partielle des branches, etc.).



Figure 7: Sélection des arbres atteints de symptômes de dépérissement (original 2026).

2.2.2 Prélèvement des échantillons

À partir des sujets dépérissant, divers types de prélèvements ont été effectués sur différentes parties de l'arbre (Aiguille, cônes, écorce, et l'aubier) ainsi que l'insecte vecteur (**Fig.11**.).



Figure 8: Exemple de prélèvements sur un Pin d'Alep.

Les organes étudiés comprennent :

✓ **Aiguilles (feuilles)** : prélevées directement sur les rameaux.

✓ **Écorce (phloème et xylème superficiel)** : découpée à l'aide de couteaux et de scalpels stériles.

✓ **Racines superficielles** : extraites au pourtour de la base de l'arbre.

✓ **Cônes (fruits)** : collectés aussi bien au sol que sur les branches basses. (Fig12.)



Figure 9: Échantillons collectés sur les sujets de Pin d'Alep (Original 2026).

2.2.3 Collecte des insectes

Les insectes (scolytes et autres ravageurs associés) ont été collectés directement à partir de l'écorce et des galeries, à l'aide de pinces fines et les conservés dans des flacons étiquetés contenant de l'Ethanol a 96% pour protéger les indivis récoltées.



Figure 10: Scolytinae : Vue d'un coléoptère xylophage.

3.2.4. Identification des espèces de scolytes récoltée ;

Les échantillons prélevés à partir des écorces des sujets sélectionnés ont été examinés à l'aide d'une loupe binoculaire. Le matériel étudié est présenté dans le tableau (3). L'identification des genres appartenant à la famille des Scolytidae a pris en compte la morphologie des galeries de reproduction. Pour cette étape, plusieurs clés de détermination ont été utilisées, notamment celles de Balachowsky (1949), Chararas (1962), Joly (1975) et Pfeffer (1995).

Tableau 3: Matériels et équipements utilisés lors des prélèvements et analyses

Matériels utilizes	
GPS	Sécateur
Stylo-feutre	Des marqueurs
Un couteau	Pinces
Tubes	Boite de pétri

3. Travail au laboratoire

Afin d'isoler et d'identifier les champignons associés aux scolytes du Pin d'Alep, un protocole standardisé a été suivi en plusieurs étapes.

stérilité ainsi qu'une précision adéquate pour l'analyse morphologique

1. Éthanol, 96%,70%
2. Papier absorbant, Aluminium, film
3. Boîte de Petrie
4. Bec bunsen
5. Parafilm
6. Lame chirurgicale
7. Epingle
8. Eau distillée
9. Micropipette
10. Agitateur
11. Bain marie
12. Masque de protection
13. Stéréo-microscope équipé d'une caméra numérique
14. Etuve de milieu de culture PDA.

4.3. Prélèvement des échantillons

4.2 Matériels utilisés :

Le matériel de laboratoire a permis d'isoler, d'observer et d'identifier les champignons associés aux échantillons collectés. Les équipements utilisés ont garanti des conditions de

Des parties infestées de Pin d'Alep (notamment l'écorce et l'aubier contenant les galeries creusées par les scolytes) ont été prélevées sur le terrain. Les échantillons ont ensuite été placés avec précaution dans des sachets stériles, correctement étiquetés (date, lieu et type de prélèvement), puis transportés au laboratoire pour analyse.

4.3.1 Désinfection superficielle ;

Des fragments de bois et d'écorce (0,5 – 1 cm²) ont été soumis à une désinfection destinée à éliminer les micro-organismes superficiels, selon les étapes suivantes:

1. Immersion dans l'éthanol à 70 % pendant quelques secondes.

2. Trempage dans une solution diluée d'hypochlorite de sodium (NaOCl) durant 1 à 3 minutes.

3. Triple rinçage à l'eau distillée stérile.

4. Séchage des fragments sur papier filtre stérile, sous hotte à flux laminaire.



Figure 11: Isolement fongique à partir des fragments d'organes sur milieu PDA.

Après désinfection, les fragments stérilisés ont été directement déposés sur le milieu PDA afin de permettre l'isolement primaire des champignons associés. Cette étape a permis d'obtenir les premières cultures pures observées (**Fig. 12**).



Figure 12 : Mise en culture des échantillons sur milieu PDA (Original).

4.2.2. Préparations de milieu de culture :

Le milieu de culture PDA (Potato Dextrose Agar) a été utilisé comme substrat principal pour l'isolement et la culture des champignons issus des échantillons prélevés (Fig.14 et 15). Ce milieu, riche en glucides et extrait de pomme de terre, favorise la croissance de divers champignons filamenteux et de levures, comme l'attestent plusieurs travaux récents dans le domaine mycologique (Ribeiro et *al.*, 2025).



Figure 13: Préparation et conservation aseptique des boîtes de PDA. (Original 2026)



Figure 14: Préparation aseptique du milieu de culture PDA et sa conservation (original 2026).

Pour limiter la contamination bactérienne, un antibiotique à large spectre - typiquement de la streptomycine ou de l'ampicilline a été ajouté après stérilisation, à une température d'environ (45–50°C), afin de préserver l'activité de l'antibiotique, conformément aux recommandations méthodologiques classiques (Protocols.io, 2019).

Des études récentes confirment l'efficacité de cette pratique : par exemple, un dosage de **100 mg/L** de streptomycine dans le PDA a permis d'éviter les contaminations sans affecter la croissance de champignons ciblés (Baazeem et *al.*, 2018).

D'autres protocoles utilisent des mélanges d'antibiotiques (streptomycine + pénicilline) à des concentrations similaires (environ **100 ppm**, soit 100 mg/L), ce qui est considéré comme une pratique standard pour les milieux de culture fongique (Ambrosia Symbiosis Lab Protocols, 2025)

Après enrichissement, le milieu a été coulé dans des flacons stériles, avant d'être distribué dans des boîtes de Pétri pour les analyses ultérieures.



Figure 15: Milieu PDA enrichi en gentamicine liquide pour réduire la contamination

Les boîtes de Pétri ainsi remplies en conditions stériles assurent la prévention des contaminations croisées. Elles constituent le support de base pour l'ensemencement et l'isolement ultérieur des champignons (Fig. 18).



Figure 16: Boîtes de Petri préparées avec un milieu PDA stérile (original 2026).

Lors du premier ensemencement sur milieu PDA supplémenté, des subcultures **(**repiquages successifs) sont effectuées de manière systématique afin de séparer les colonies initialement mélangées. Ce procédé permet d'obtenir progressivement des cultures pures (monospores ou monocolonies), chaque boîte de Pétri étant dédiée à l'isolement d'un seul champignon.



Figure 17: Milieu PDA préparé dans des boîtes de Pétri pour l'isolement fongique (original 2026).

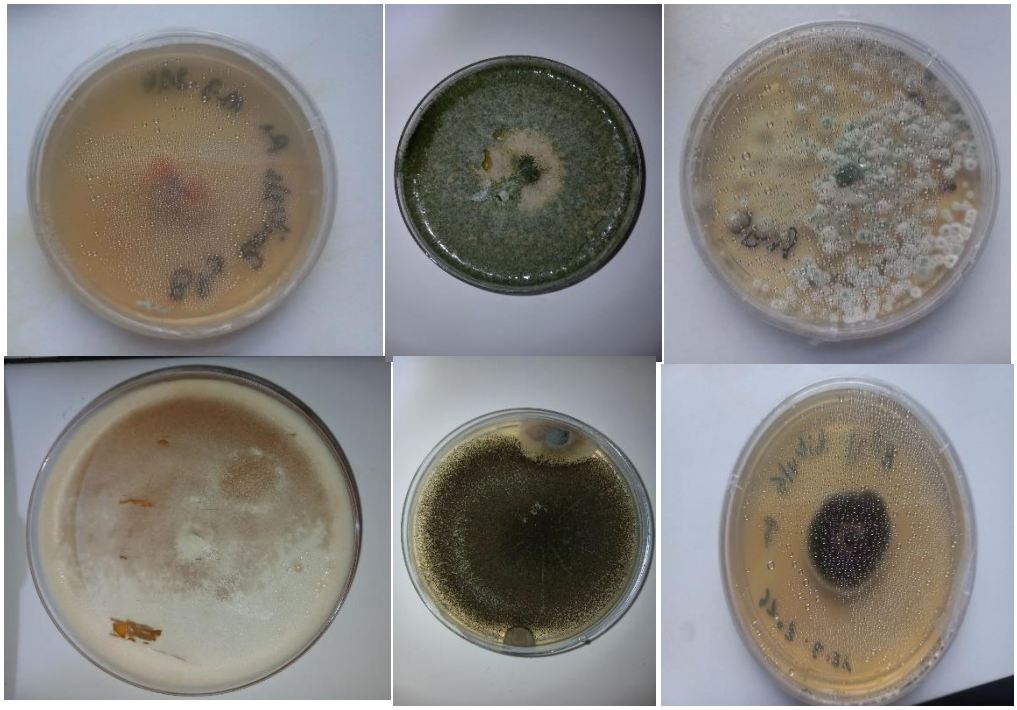


Figure 18: Vue de face d'une culture fongique sur milieu PDA (CPR. Original 2026).

L'examen de la face inférieure des colonies fongiques sur milieu PDA fournit des informations complémentaires sur les caractères culturaux, notamment la pigmentation, la densité et l'organisation du mycélium. Ces observations viennent enrichir l'étude morphologique macroscopique amorcée par la vue de face (Fig. 19).



Figure 19: Vue de dos d'une culture fongique sur milieu PDA (R .S) (original 2026).

4.2.3 Purification des isolats

Les colonies émergentes ont été repiquées sur de nouveaux milieux afin d'obtenir des cultures pures. La purification a été réalisée par la méthode de pointe d'hyphes ou par isolement d'ascospores/conidies, selon la morphologie du champignon observé.

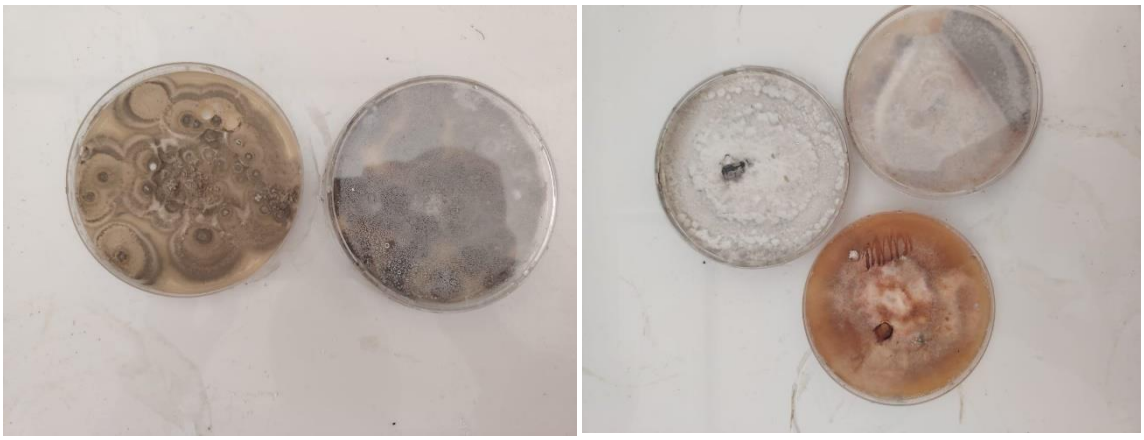


Figure 20: Vue de face et Vue de dos d'une culture fongique sur milieu PDA (T) (original 2026**).**

Après l'obtention de cultures pures sur milieu PDA, une caractérisation morphologique macroscopique et microscopique des souches fongiques a été réalisée. Cette étape constitue la base de l'identification préliminaire des champignons isolés (Fig. 20).

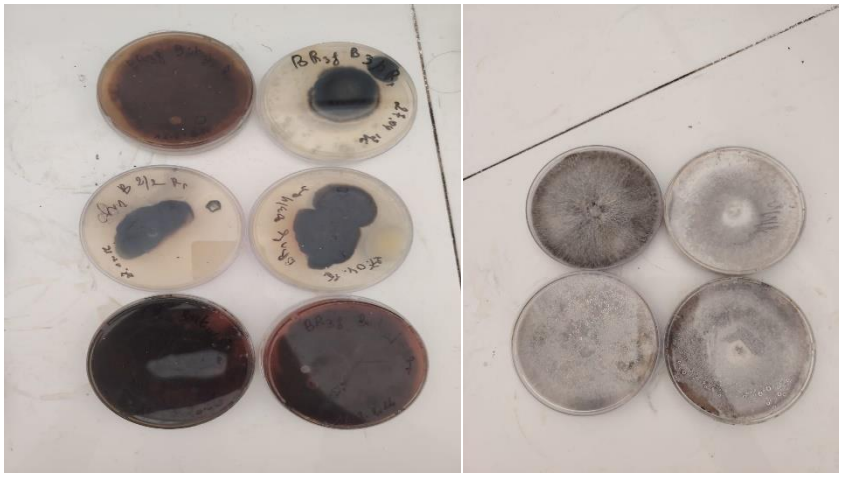


Figure 21: Caractérisation morphologique d'une souche fongique pour identification. (original 2026).

4.2.4 Conservation des isolats fongiques ;

Deux méthodes de conservation ont été envisagées pour les isolats fongiques purs **:**

✓ À court terme : Conservation sur milieu gélosé PDA incliné à 4 °C.

✓ À long terme (méthode standard non utilisée) : Cryoconservation dans du glycérol à 20 % à - 80 °C.

✓ (Seule la méthode de conservation à court terme a été mise en œuvre pour les besoins de cette étude.)

Matériel et protocole :

Les colonies fongiques pures cultivées sur milieu PDA (Potato Dextrose Agar) ont été observées après 7 à 14 jours de croissance à 25°C.

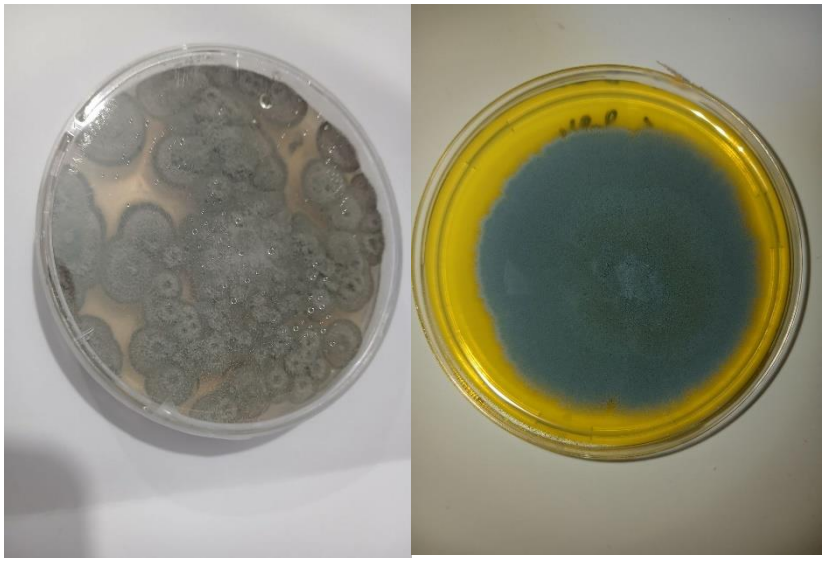


Figure 22: Vue de face d'une culture fongique sur milieu PDA (.original 2026).

L'observation conjointe de la face supérieure (Fig. 23) et de la face inférieure (Fig. 24) des colonies fongiques cultivées sur PDA constituent une étape essentielle pour la caractérisation des traits morpho-culturels**.** Ces deux vues complémentaires fournissent des informations précieuses permettant de mieux distinguer les espèces étudiées.

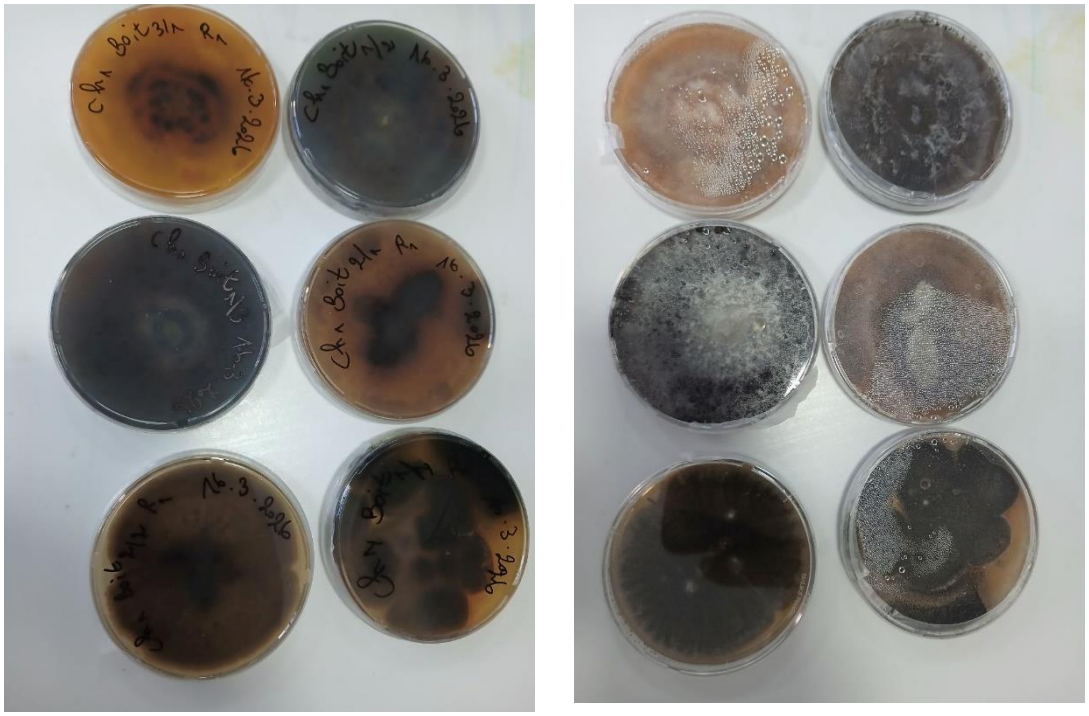


Figure 23: Vue de dos d'une culture fongique sur milieu PDA (T) (CRP. Original 2026).

4.3 Documentation morphologique et imagerie macroscopique des isolats fongiques :

Suite à l'isolement et à la purification des champignons, une analyse morphologique détaillée a été réalisée pour documenter les caractéristiques macroscopiques des colonies de chaque isolat. Cette étape est cruciale pour une identification préliminaire des genres fongiques et la sélection des isolats pour des analyses plus poussées.



Figure 24: Stéréomicroscope trinoculaire avec caméra numérique (original 2026).

L'observation et la capture d'images à faible grossissement ont été effectuées à l'aide d'un stéréomicroscope trinoculaire.

Ce dispositif a permis de visualiser et de photographier avec une grande profondeur de champ les détails de la morphologie coloniale qui ne sont pas discernables à l'œil nu, tels que :

La texture et la topographie du mycélium (cotonneuse, duveteuse, granuleuse, etc.).

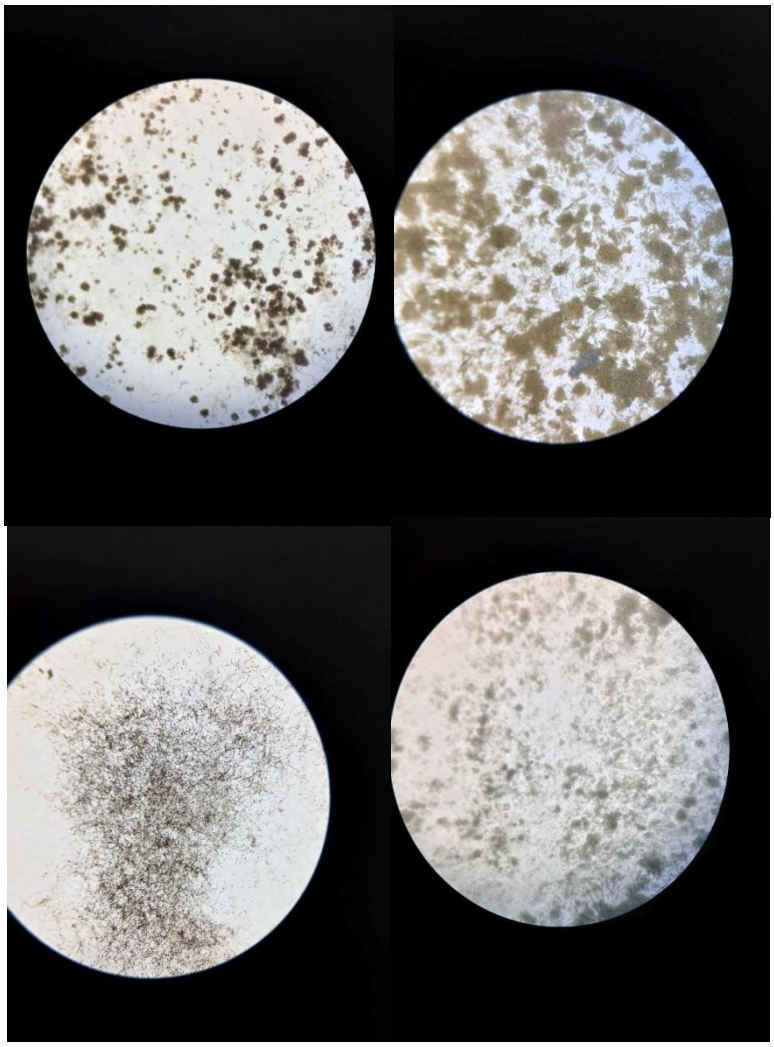


Figure 25: Observation macroscopique des différentes espèces

L'examen macroscopique des différentes colonies fongiques isolées permet de mettre en évidence une diversité morphologique notable. Parmi ces souches, certaines ont pu être attribuées au genre **Aspergillus**, caractérisé par des traits distinctifs observés à la loupe (Fig. 27).



Figure 26: Morphologie macroscopique de Aspergillus sp. (observée à la loupe CRP (original 2026).

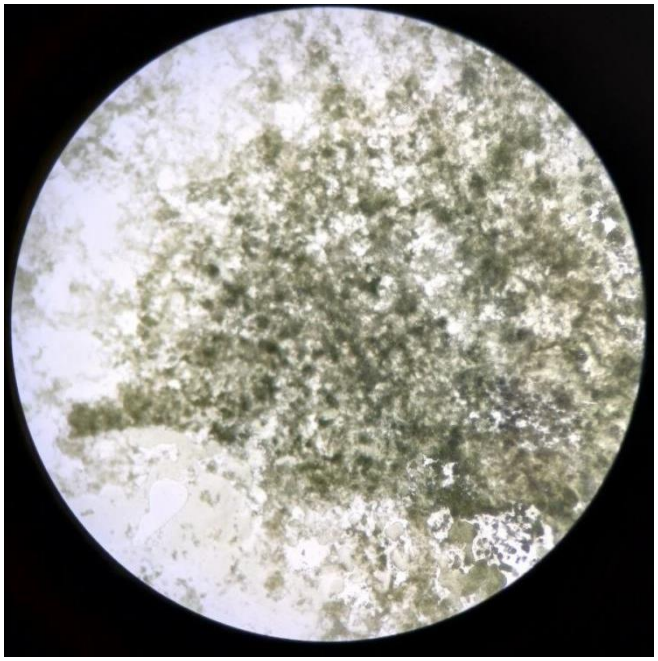


Figure 27: Morphologie macroscopique de sp. Observée à la loupe (original 2026).

La présence et la disposition des structures de reproduction asexuée (comme les conidiophores ou les fructifications).

5. Méthodes d'analyses des données

5.1. Analyse descriptive

Une analyse descriptive a été réalisée sur les isolats fongiques obtenus à partir des différentes parties de l'arbre (aiguilles, écorce, racines, cônes). Cette analyse a permis de déterminer le nombre total d'isolats par organe ainsi que la fréquence relative des genres ou espèces fongiques rencontrés.

5.2. Analyse taxonomique et fréquentielle

Les champignons isolés ont été observés et photographiés à l'aide d'un microscopoptiue couplé à une caméra numérique. Une classification a ensuite été effectuée afin de distinguer les différents morphotypes et de déterminer leur fréquence d'apparition par type de prélèvement.

5.3. Analyse fonctionnelle (pathogènes vs. Bénéfiques)

Les isolats ont été catégorisés en fonction de leur rôle écologique présumé (pathogènes, symbiotiques, saprophytes). Cette étape a permis de distinguer les champignons potentiellement associés aux symptômes de dépérissement de ceux considérés comme non nuisibles, voire bénéfiques pour l'arbre.

5.4. Analyse comparative

Une comparaison entre les différents organes du Pin d'Alep a été réalisée, afin de déterminer la répartition différentielle des champignons. Cette analyse a mis en évidence les organes les plus colonisés et la diversité spécifique associée à chaque partie de l'arbre.

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Ce chapitre présente les résultats détaillés de l'étude sur les interactions biologiques entre les scolytes, les champignons qui leur sont associés et les pins d'Alep dans la forêt de Ksar El Boukhari. Les données recueillies ont été analysées à l'aide d'indicateurs écologiques appropriés et discutées en les comparant à la littérature scientifique nationale et internationale. L'objectif est de mettre en évidence l'effet des facteurs environnementaux sur la dynamique de ces interactions et d'évaluer leur impact sur la santé des forêts.

1. Isolement et identification des champignons associés au pin d'Alep

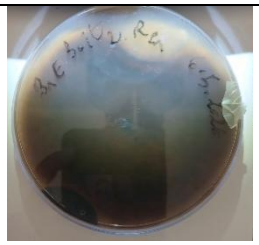
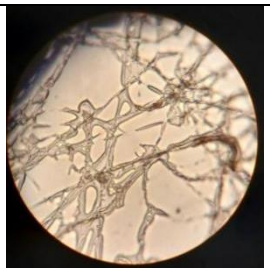
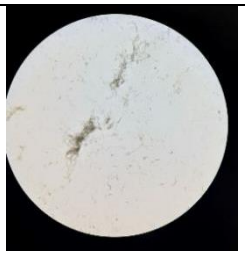
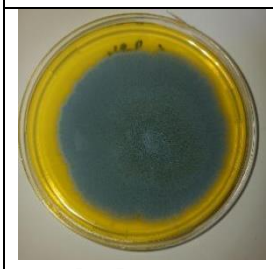
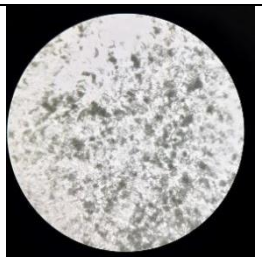
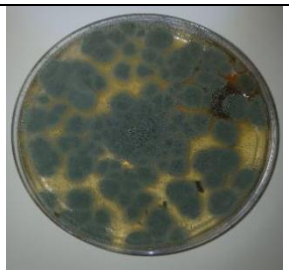
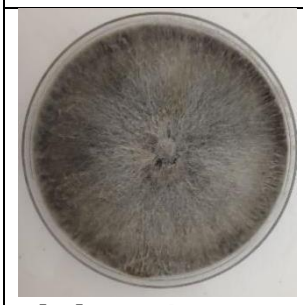
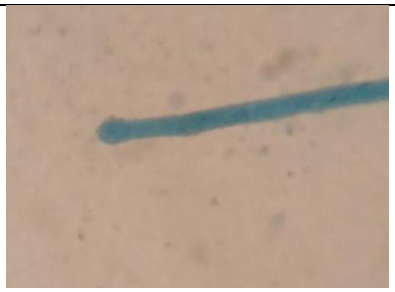
1.1. Diversité fongique dans les différentes parties de l'arbre

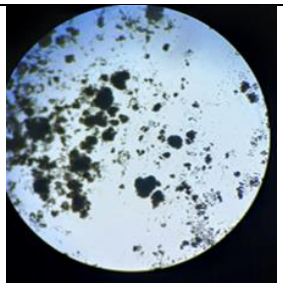
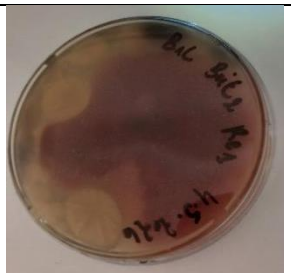
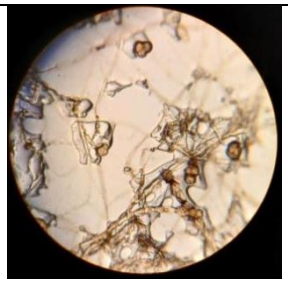
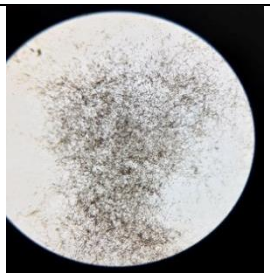
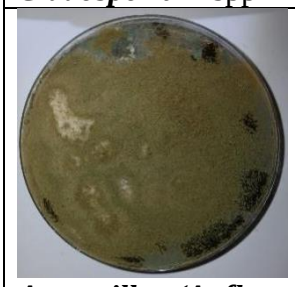
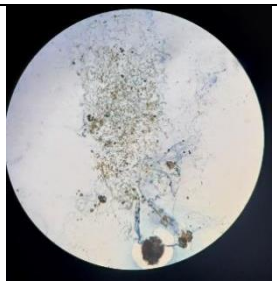
Un total de 198 isolats fongiques a été obtenu à partir de différents organes de l'arbre (aiguilles, écorce, racines, cônes). Les Tableaux 01et 02 illustrent la distribution et l'aspect morphologique de ces isolats en fonction de l'organe végétal et du genre fongique.

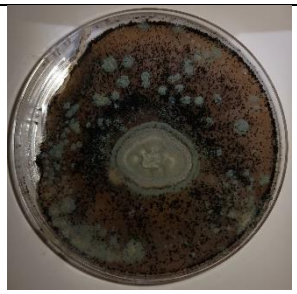
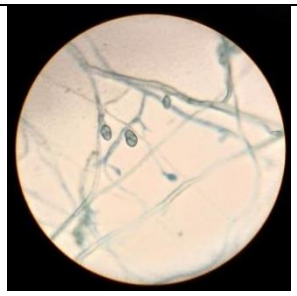
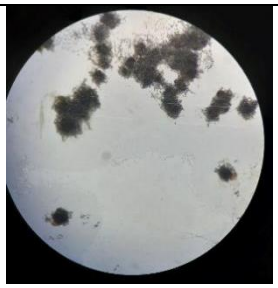
Tableau 1 : Répartition des isolats fongiques selon les organes étudiés

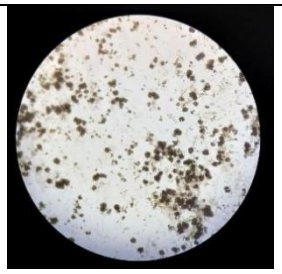
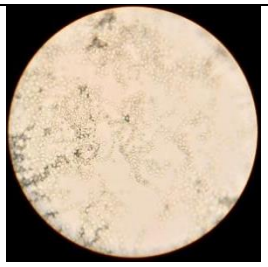
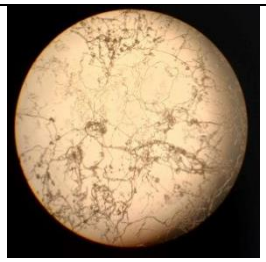
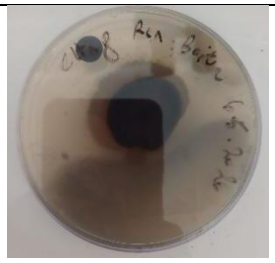
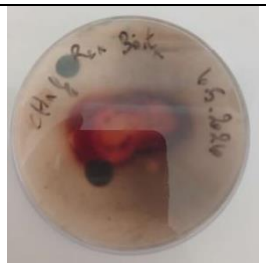
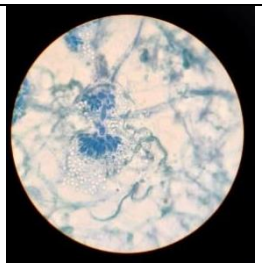
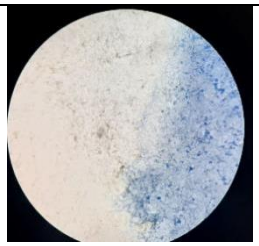
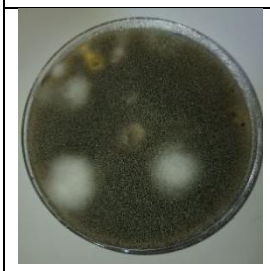
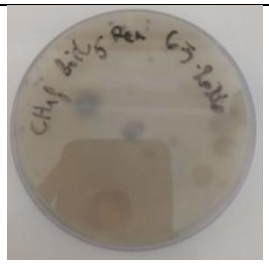
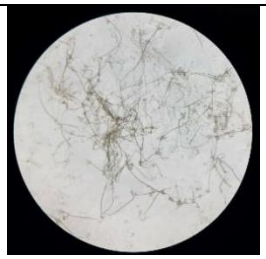
Genre fongique	Aiguilles	Écorce	Cônes	Total
Trichoderma spp.	29	22	3	54
Cladosporium spp.	6	5	35	46
Fusarium spp.	19	12	9	40
Aspergillus flavus	1	0	15	16
Geotrichum	0	0	1	1
Penicillium spp.	0	16	16	32
Alternaria spp.	0	0	9	9
Total	**55**	**55**	**88**	**198**

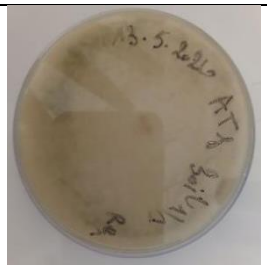
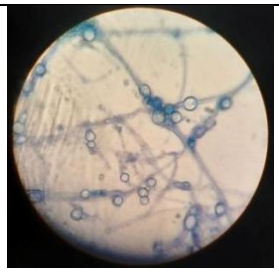
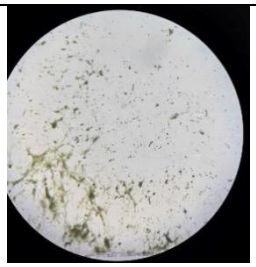
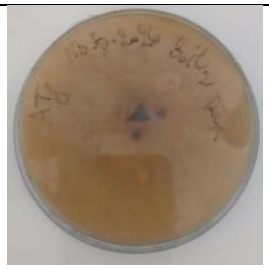
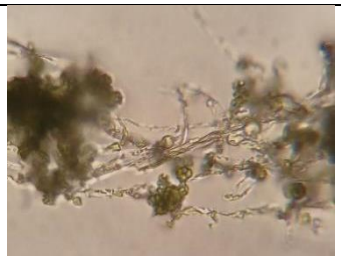
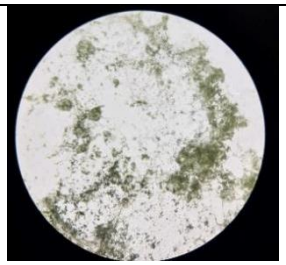
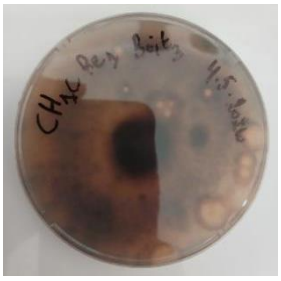
Tableau 02 : Aspect morphologique des espèces isolées

	Recto	Verso	Aspect microscopique	Aspect macroscopique
Ecorce		 ***Trichoderma*** spp.		
	 ***Trichoderma spp***			
Ecorce	 ***Penicillium sp***			
	 ***Cladosporium sp***			

Cones	 ***Cladosporium*** spp			
	 ***Fusarium spp***			
	 ***Cladosporium*** spp			
	 ***Aspergillus (A. flavus)***			
	 ***Cladosporium***			

			 ***Geotrichum***	
	 ***Trichoderma***			

Aiguilles	 ***Penicillium** spp*			
	 ***Cladosporium** spp.*			
	 ***Aspergillus sp***			
	 ***Trichoderma** spp.*			
	 ***Fusarium sp***			

Aiguilles	    ***Fusarium sp***			
	    ***Trichoderma sp***			
	    ***Cladosporium sp***			

Afin de visualiser comparativement la répartition proportionnelle des isolats fongiques, des diagrammes circulaires ont été établis pour chaque organe.

Genre fongique	Aspect macroscopique	Couleur	Texture	Rôle écologique
Trichoderma sp.	Colonie circulaire	Verte	Veloutée	Antagoniste
Fusarium sp.	Mycélium abondant	Blanc à rose	Cotonneuse	Pathogène opportuniste
Alternaria sp.	Colonie compacte	Brun foncé	Poudreuse	Saprophyte
Cladosporium sp.	Colonie circulaire	Vert olive	Veloutée	Saprophyte
Aspergillus sp.	Colonie dense	Noir ou vert	Granuleuse	Saprophyte

Tableau 3 : Caractéristiques macroscopiques des principaux genres fongiques isolés au cours de l'étude

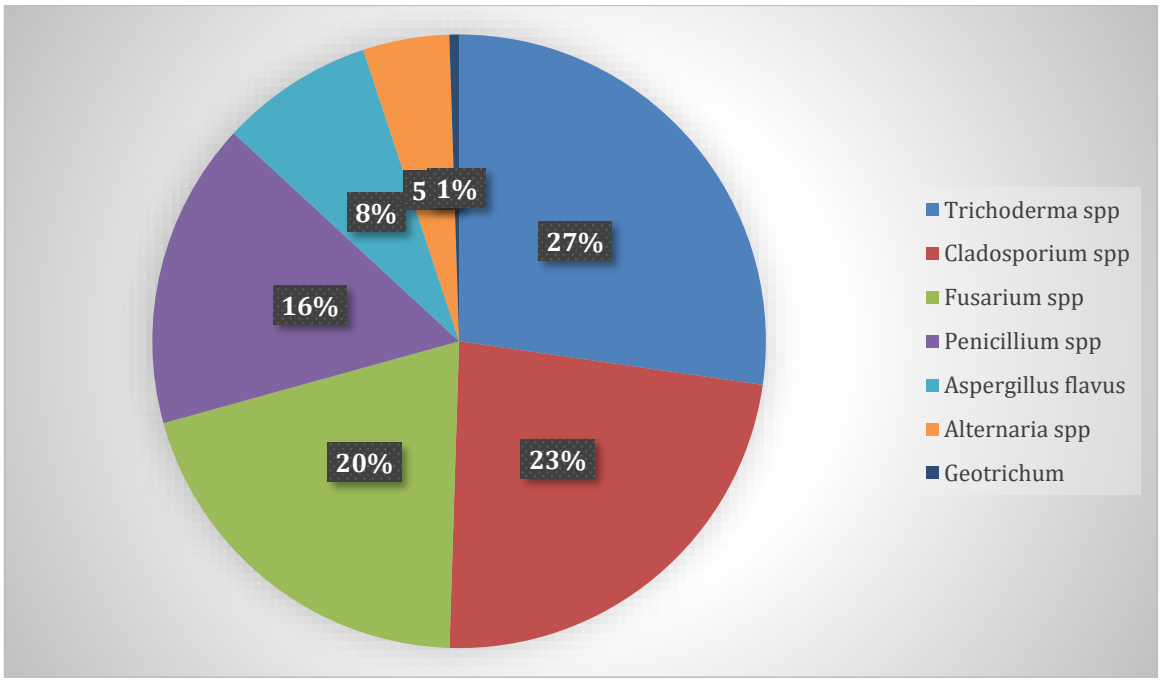


Figure 1 : Répartition des genres fongiques isolés à partir des aiguilles, de l'écorce et des cônes de Pin d'Alep.

La distribution globale des isolats fongiques met en évidence la dominance de *Trichoderma spp.* (27%), avec 54 isolats sur 198. Il est suivi de *Cladosporium spp*. (23%) et de *Fusarium spp.* (20%).

Les autres genres présentent des proportions plus faibles, notamment *Penicillium spp.* (16%), *Aspergillus flavus* (8%), *Alternaria spp*. (5%), tandis que *Geotrichum* est marginal avec moins de 1% de l'ensemble des isolats.

Sur le plan des substrats, les aiguilles et l'écorce sont principalement colonisées par *Trichoderma* et *Fusarium*, alors que les cônes présentent une forte dominance de *Cladosporium* et *d'Aspergillus flavus*.

La forte présence de *Trichoderma spp.* traduit son rôle majeur en tant que champignon saprophyte compétitif et antagoniste, souvent impliqué dans la colonisation précoce des substrats organiques.

La dominance de *Cladosporium spp*. sur les cônes suggère une adaptation à des tissus plus exposés et plus secs, ce qui confirme son comportement de colonisateur aérien fréquent des organes reproducteurs.

Fusarium spp., abondant sur plusieurs substrats, reflète son caractère opportuniste et

potentiellement pathogène, capable d'infecter différents tissus végétaux.

La présence notable de *Penicillium spp*. indique une activité importante de décomposition de la matière organique, particulièrement sur l'écorce et les cônes.

En revanche, *Aspergillus flavus*, bien que moins représenté, confirme sa préférence pour les substrats riches en matière organique sèche comme les cônes.

La très faible occurrence de *Geotrichum* suggère un rôle écologique secondaire dans cet écosystème.

Globalement, cette répartition met en évidence une diversité fonctionnelle équilibrée entre champignons saprophytes, opportunistes et potentiellement pathogènes, reflétant la complexité des interactions fongiques au sein des différents organes du Pin d'Alep.

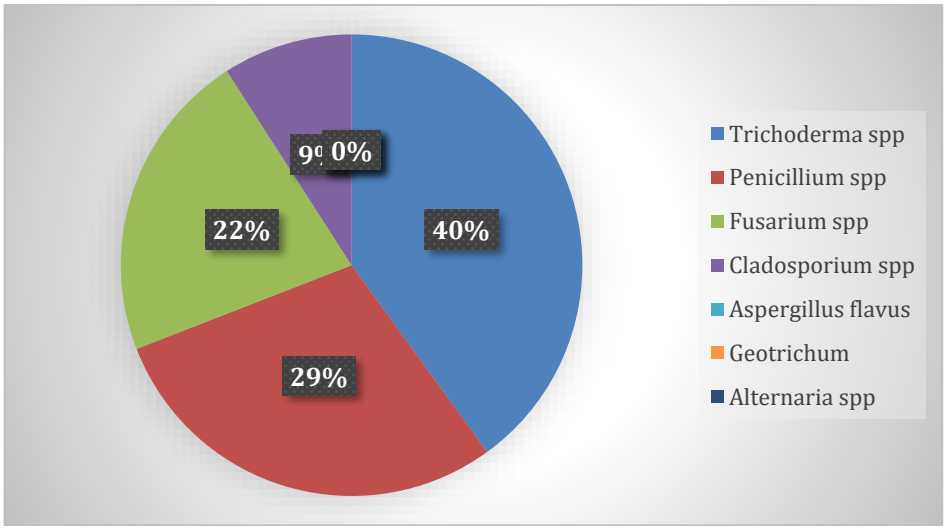


Figure 2 : Répartition proportionnelle des genres fongiques isolés à partir de l'écorce de Pin d'Alep

La répartition des isolats fongiques issus de l'écorce met en évidence une prédominance nette de *Trichoderma spp*. (40%), suivi de *Penicillium spp.* (29.09%) et de *Fusarium spp.* (21.82%).

Le genre *Cladosporium spp.* est faiblement représenté avec 9.09%, tandis que les autres genres (*Aspergillus flavus*, *Geotrichum* et *Alternaria spp*.) sont absents de ce substrat (0%).

La forte dominance de *Trichoderma spp.* Suggère une activité saprophyte importante, liée à la dégradation de la matière organique et à son rôle d'antagoniste naturel limitant le développement d'autres champignons.

La présence notable de *Penicillium spp.* Indique une forte implication dans les processus de

décomposition de l'écorce, particulièrement dans les phases de dégradation avancée de la matière organique lignocellulosique.

Fusarium spp., avec une proportion significative, traduit un potentiel opportuniste pouvant inclure des espèces à comportement pathogène, capables de coloniser les tissus affaiblis.

La faible représentation de *Cladosporium spp.* Reflète une présence secondaire, généralement associée à des colonisations superficielles et aérogènes.

Globalement, cette distribution montre une communauté fongique dominée par des espèces saprophytes actives, accompagnées de quelques taxons opportunistes, illustrant une dynamique écologique centrée sur la décomposition et la colonisation progressive de l'écorce.

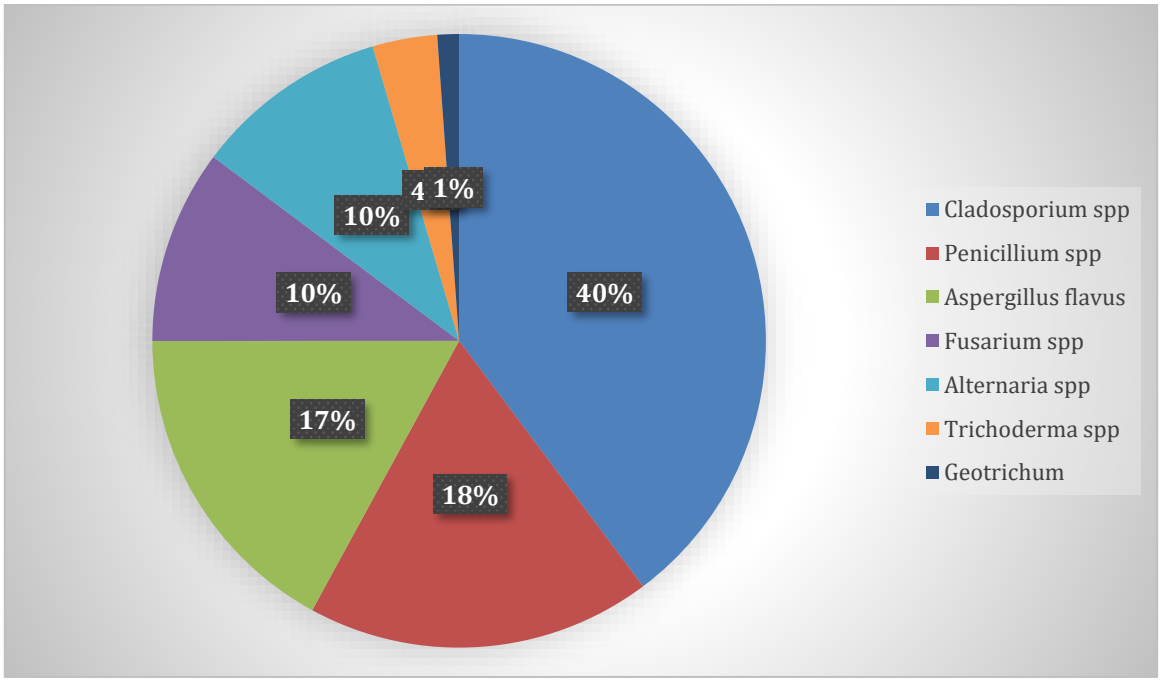


Figure 3 : Répartition proportionnelle des genres fongiques isolés à partir des cônes de Pin d'Alep dans la forêt de Ksar El Boukhari.

La distribution des isolats fongiques issus des cônes met en évidence une nette dominance de *Cladosporium spp.* (39,77%), suivi de *Penicillium spp*. (18,18%) et *Aspergillus flavus* (17,05%).

Les genres *Fusarium spp.* et *Alternaria spp.* Présentent des proportions équivalentes de 10,23% chacun, tandis que *Trichoderma spp.* (3,41%) et *Geotrichum* (1,14%) sont faiblement représentés.

La forte dominance de *Cladosporium spp.* Suggère une colonisation importante des cônes par des champignons aérogènes, souvent associés aux surfaces exposées et aux organes reproducteurs en phase de maturation ou de dégradation.

La présence notable de *Penicillium spp*. Confirme son rôle majeur dans la décomposition de la matière organique des cônes, notamment dans les stades avancés de sénescence.

La proportion élevée d *Aspergillus flavus* indique une adaptation à des substrats secs et riches en nutriments, ce qui peut également soulever des préoccupations en lien avec la production potentielle de métabolites secondaires.

Les genres *Fusarium spp.* Et *Alternaria spp.*, bien représentés, traduisent un potentiel pathogène et opportuniste pouvant affecter la viabilité des structures reproductrices.

Enfin, la faible présence de *Trichoderma spp.* et de *Geotrichum* reflète une activité secondaire, liée respectivement à la compétition microbienne et à la décomposition avancée.

Globalement, cette répartition met en évidence une communauté fongique dominée par des espèces saprophytes et aérogènes, avec une implication notable de taxons opportunistes susceptibles d'influencer la qualité e la viabilité des cônes.

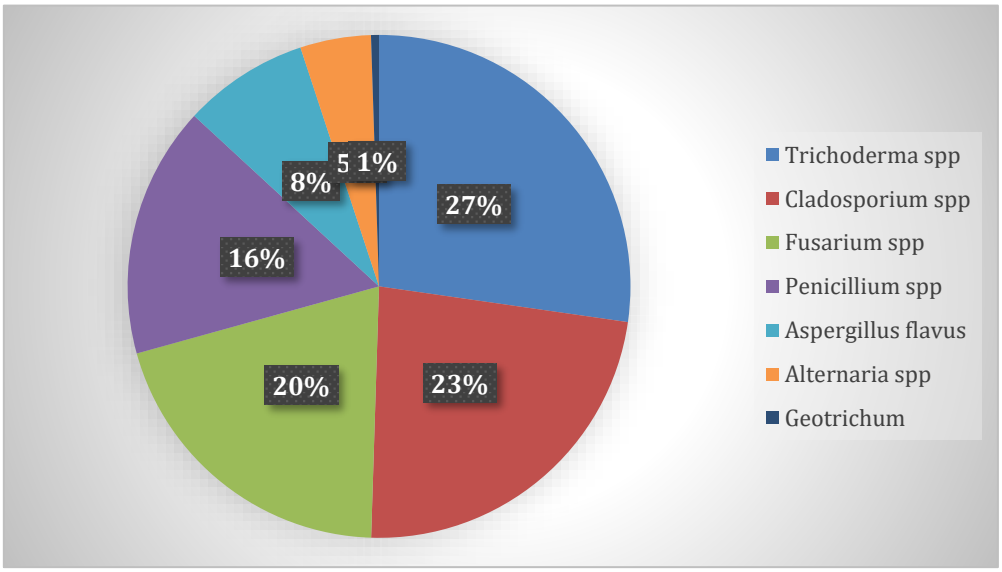


Figure 4 : Répartition proportionnelle du total des genres fongiques isolés à partir de l'ensemble des échantillons.

La communauté fongique globale est dominée par *Trichoderma spp.* (27,27%), suivi de *Cladosporium spp.* (23,23%) et *Fusarium spp.* (20,20%), qui constituent ensemble la majorité de la flore fongique isolée.

Les genres *Penicillium spp.* (16,16%) et *Aspergillus flavus* (8,08%) occupent une position intermédiaire, tandis que *Alternaria spp.* (4,55%) et *Geotrichum* (0,51%) sont faiblement représentés.

La dominance de *Trichoderma spp.* traduit un rôle central des champignons saprophytes et antagonistes dans la dynamique microbienne globale, indiquant une forte activité de compétition biologique au sein des substrats étudiés.

La présence importante de *Cladosporium spp.* Et *Fusarium spp.* Met en évidence un équilibre entre espèces saprophytes aérogènes et taxons à potentiel pathogène, suggérant une forte interaction entre colonisation opportuniste et dégradation des tissus végétaux.

Penicillium spp. et *Aspergillus flavus,* de proportions intermédiaires, confirment l'importance des processus de décomposition de la matière organique, notamment dans les phases de sénescence et de fragmentation des tissus.

La faible proportion d'*Alternaria spp*. Indique une contribution secondaire mais persistante de ce genre opportuniste, tandis que la présence quasi marginale de *Geotrichum* reflète un rôle écologique limité dans l'ensemble de la communauté.

Globalement, cette structure fongique met en évidence une communauté équilibrée entre saprophytes dominants, champignons opportunistes et potentiels pathogènes, illustrant une forte complexité écologique influencée par la diversité des substrats et l'état physiologique des tissus végétaux.

1.2. Recommandations pratiques

Diagnostic ciblé

Prioriser l'identification au niveau spécifique des genres Fusarium et Alternaria, puis évaluer leur pouvoir pathogène afin de distinguer les espèces réellement impliquées dans les symptômes observés et leur degré de virulence.

Surveillance entomologique

Renforcer le suivi des populations de scolytes afin de mieux comprendre leur rôle dans la dissémination des champignons associés.

Valorisation des antagonistes

Isoler et caractériser les souches locales de **Trichoderma spp.** Afin d'évaluer leur potentiel de biocontrôle contre les agents pathogènes dominants.

Mesures sylvicoles préventives

Améliorer les conditions de croissance des peuplements (drainage, réduction des blessures mécaniques) et assurer la gestion de la litière contaminée pour limiter la charge inoculaire fongique.

Contrôle sanitaire des semences

Contrôler la qualité des graines issues des cônes en raison de la présence de champignons tels que **Penicillium spp.** et **Aspergillus spp.**, pouvant affecter la viabilité des semences.

1.3. Dominance et préférences tissulaires

La communauté fongique totale de l'étude (198 isolats) est dominée par ***Trichoderma spp.*** **(27,3%)**, suivi de ***Cladosporium spp.*** **(23,2%)** et ***Fusarium spp.*** **(20,2%)**, confirmant la coexistence de champignons saprophytes, opportunistes et potentiellement pathogènes.

L'analyse par organe met en évidence des préférences écologiques distinctes :

- **Écorce** : site à forte activité microbienne dominé par ***Trichoderma spp.*** et ***Penicillium spp.***, traduisant une activité saprophyte et compétitive importante dans la dégradation de la matière organique.
- **Aiguilles** : substrat dominé par ***Trichoderma spp.*** et ***Fusarium spp.***, indiquant à la fois une activité antagoniste et un potentiel pathogène foliaire opportuniste.
- **Cônes** : forte dominance de ***Cladosporium spp.***, suivie de ***Penicillium spp.***, traduisant une colonisation aérienne et une forte implication dans la dégradation des structures reproductrices.

1.4. Spécialisation tissulaire des genres fongiques dominants

La distribution des principaux genres met en évidence une organisation écologique différenciée selon les substrats. *Cladosporium spp*. Est majoritairement associé aux cônes, *Trichoderma spp*. Se retrouve dominant dans l'écorce et les aiguilles, tandis que *Fusarium spp.* Présente une présence plus équilibrée entre les différents organes.

Globalement, cette structuration illustre une spécialisation écologique partielle des genres fongiques en fonction du type de tissu, confirmant l'influence combinée des conditions micro-environnementales et de la disponibilité des substrats sur la composition de la communauté fongique.

2. Analyse de la diversité fongique associée aux insectes

2.1. Présentation des espèces identifiées

Au cours de l'étude, la présence d'acariens (Acari sp.) vivant sous l'écorce des pins a été observée. Ces acariens se caractérisent par une diversité écologique remarquable, pouvant présenter un régime alimentaire prédateur, se nourrissant d'œufs et de larves d'autres insectes, ou un régime fongivore, se nourrissant de champignons et de moisissures. De manière générale, ces acariens ne sont pas considérés comme nuisibles directement pour la santé de l'arbre. Ils font plutôt partie intégrante de la communauté biotique inféodée au subéricole et contribuent à la biodiversité et aux processus de décomposition dans l'écosystème forestier (Boulanger *et al.*, 2011). Ils peuvent également jouer un rôle indirect dans la dynamique des champignons associés aux scolytes en agissant comme vecteurs de spores fongiques, un phénomène connu sous le nom d'hyperphorésie (Hofstetter et al., 2013).



Figure 05*: Oribatida sp.* (Acarien oribate) original

L'observation a également permis d'identifier la présence d'acariens oribates (Oribatidasp.) au niveau de l'interface entre le sol et la base des arbres, ainsi que sous l'écorce. Ces acariens, composants majeurs de la mésofaune du sol, jouent un rôle écologique fondamental en tant que détritivores et fongivores. Leur régime alimentaire est principalement basé sur la consommation de matière organique en décomposition, de mycélium et de spores fongiques. Leur action contribue de manière significative à la fragmentation de la litière, à la régulation des communautés microbiennes et au cycle des nutriments, facilitant ainsi les processus de décomposition et d'humification (Norton, 1994; Maraun *et al*., 2003). Bien qu'étant des acteurs essentiels de l'écosystème édaphique et corticole, ils ne sont pas considérés comme pathogènes ou nuisibles pour les arbres vivants.

Caractéristique : Se nourrit de champignons et d'algues microscopiques sur l'écorce. N'est pas un véritable ravageur des arbres, mais indique souvent une humidité présente.

Tomicus destruens

Les espèces appartenant au genre *Tomicus* sont classées parmi les ravageurs primaires dont on sait qu'elles attaquent des sujets en pleine vitalité (Chararas, 1962). De plus ce groupe d'insectes peuvent être secondaires lorsqu'ils sont sous corticale (Dajoz, 1980). Les espèces du genre *Tomicus* peuvent se reproduire en masse sur les arbres affaiblis par 5 années de déficit pluviométrique (DSF, 2008). Les températures conditionnent les populations chez le groupe de l'Hylésine qui possède une meilleure survie à 20°C (Horn, 2006).

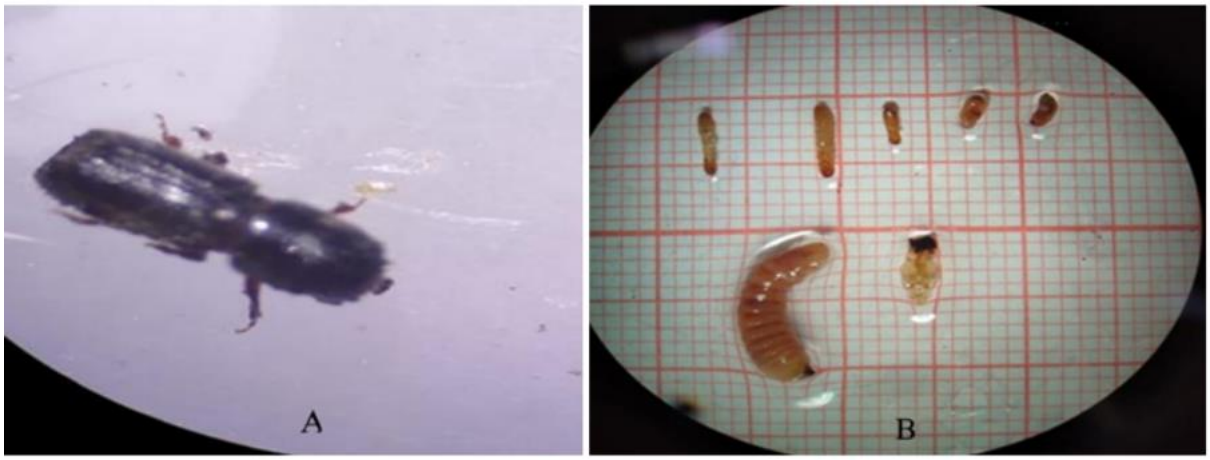


Figure 6 : T*omicus destruens* (Originale)

A : *Tomicus destruens* adulte . B : Larve de *tomicus destruens.*

Le développement de l'espèce de *Tomicus destruens* se déroule dans des galeries creusées par les adultes et larves, ces galeries sont forées dans l'écorce ou au niveau du liber (Fig.). Sur les arbres attaqués ou dépérissant l'écorce présente de nombreux trous, au niveau desquels s'échappe la sciure (Ben jamâa, 2007).



Figure 7: Galeries maternelles et l'ensemble des tracés larvaires sur tronc et l'écorce

Le genre Crypturgus :

Le genre *Crypturgus* est représenté par les espèces sympatriques voisines *Crypturgus numidicus* et *Crypturgus mediteranus* (Fig.86), la deuxième espèce est moins fréquente que la première et se distingue de la précédente par un corselet plus long que large à côtés

parallèles au- delà du milieu, puis progressivement rejeté en forme trapézoïdale en avant (Balachowsky, 1949).



Figure 8 : Différentes faces de l'espèce *Crypturgus numidicus* (Originale)

Pîtyogenes bidentatus

Ce groupe d'insectes ne dépasse pas trois millimètres (Fig.), il colonise les branches de pins à écorce fine. L'espèce de *Pityogenes bidentatus* se caractérise par deux dents développées au niveau de la déclivité élytrale et possède une caractéristique sur la forme des galeries qu'elle confectionne en étoile (Balachowsky, 1949).



Figure 9: Différentes faces de l'espèce ***Pîtyogenes bidentatus*** (Originale)

4 . Tribolium castaneum

Les *Tenebrionidae constituent* l'une des plus vastes familles des Coléoptères,qui contient de plus des espèces décrites. Les adultes qui sont de couleur sombre, présentent une grande variété d'aspects. En revanche, les larves sont de forme cylindrique, leur tégument est généralement sclerotinisé, elles sont classées parmi les espèces les plus nuisible aux stocks de céréales. Le régime alimentaire des Tenebrionidae est avant tout saprophage, certaines des espèces citées comme nuisible aux produits emmagasinés. Parmi ces insectes le genre *Triboluim* comprend deux espèces principales cosmopolites et nuisible : *Tribolium castaneum* et *Tribolium comfusum*

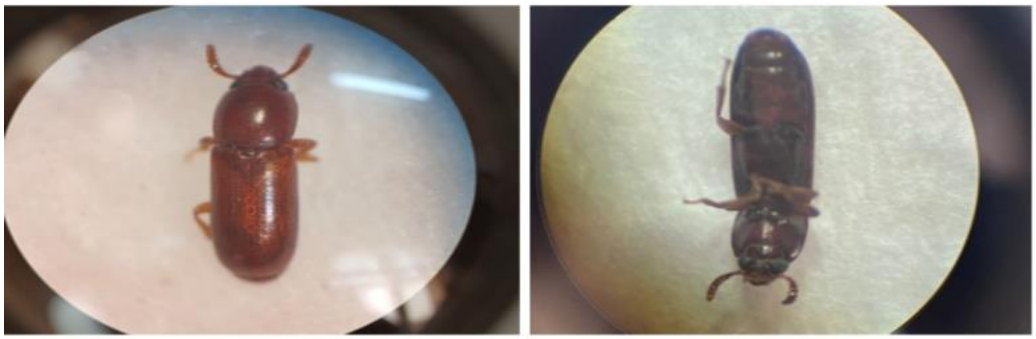


Figure 10: Différentes faces de l'espèce ***Tribolium castaneum.*** (Originale)

***Orthotomicus erosus* (Wollaston, 1857)**

Les espèces appartenant à ce genre, *Orthotomicus erosus et Orthotomicus proximus* sont moins redoutables que *T. destruens* puisqu'elles se développent particulièrement aux dépens d'arbres affaiblis. Notons que l'état physiologique des pins âgés offre un milieu favorable à la multiplication des espèces du genre *Orthotomicus* (Chakali, 1992). Néanmoins, avec de fortes densités elles deviennent menaçantes par le comportement de l'effet de groupe. L'espèce *Orthotomicus erosus* est facilement reconnaissable grâce au deuxième denticule très large de forme triangulaire au niveau de la déclivité élytrale (Fig.).



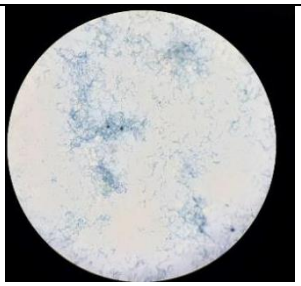
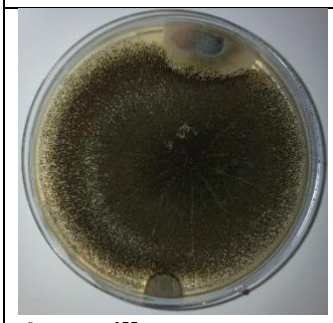
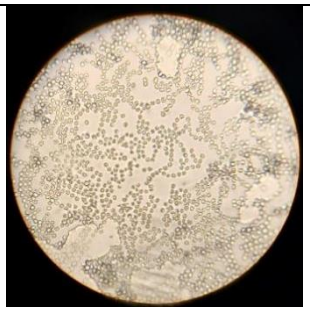
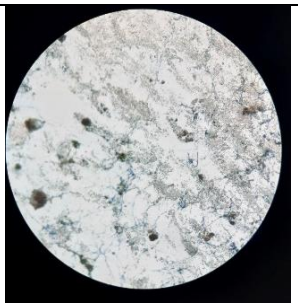
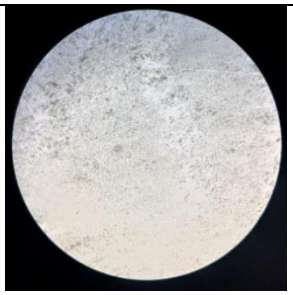
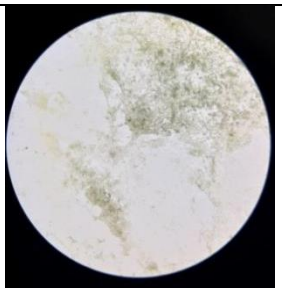
Figure 11 : *Orthotomicus erosus* (Originale)

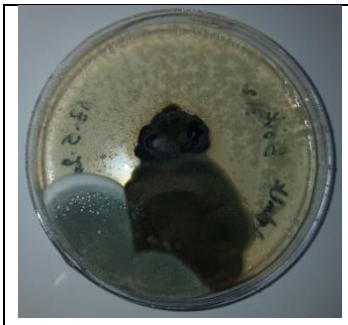
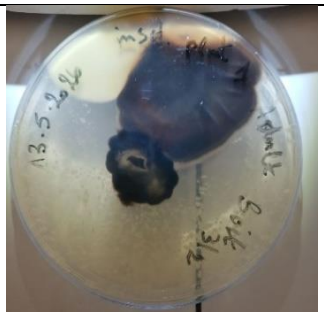
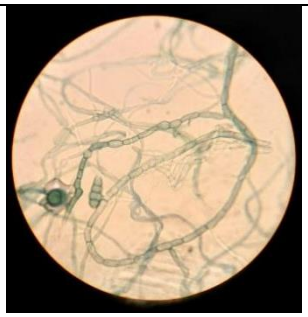
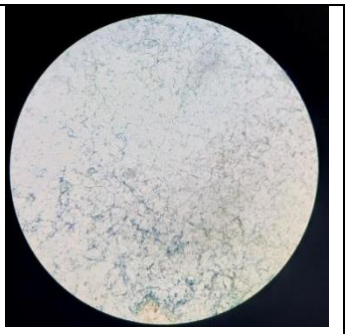
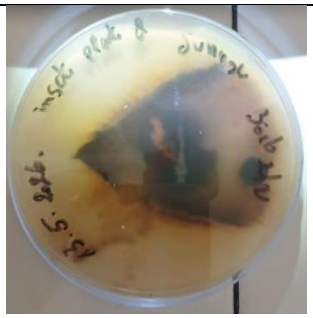
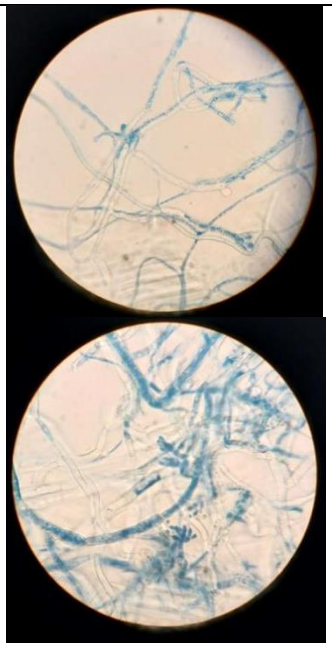
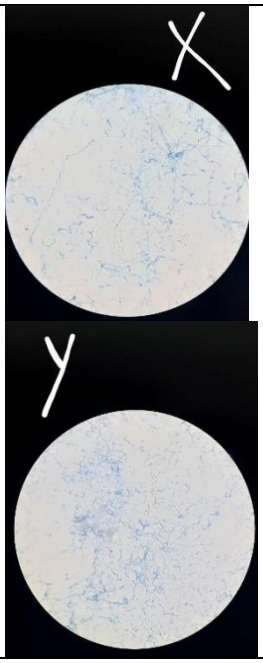
L'analyse des champignons isolés à partir des insectes collectés a permis d'identifier cinq genres fongiques différents. Au total, 10 isolats fongiques ont été recensés. La répartition des genres identifiés est présentée dans les tableaux 3 et 4.

Tableau 4 : Répartition des genres fongiques isolés à partir des insectes

Genre fongique	Nombre d'isolats	Fréquence (%)
Aspergillus	4	40,0
Geotrichum sp.	3	30,0
Saccharomyces	1	10,0
Cladosporium	1	10,0
Fusarium sp.	1	10,0
Total	**10**	**100**

Tableau 5 : Aspect morphologique des espèces isolées sur les insectes

Recto	Verso	Aspect microscopique	Aspect macroscopique
	 ***Aspergillus sp***		
 ***Aspergillus sp***			
 ***Saccharomyces sp***			
		 ***Geotrichum sp***	

 ***Cladosporium***			
 ***Fusarium sp***			

Les résultats montrent une prédominance du genre *Aspergillus*, représentant 40 % des isolats obtenus, suivi de *Geotrichum sp.* avec 30 %. Les genres Saccharomyces, *Cladosporium* et *Fusarium sp*. présentent chacun une fréquence de 10 %.

Discussion :

La dominance de *Aspergillus* suggère une forte capacité de ce genre à coloniser les insectes et les microenvironnements associés. Ces champignons sont fréquemment rencontrés dans les écosystèmes forestiers et peuvent intervenir dans la décomposition de la matière organique ainsi que dans diverses interactions avec les insectes.

La présence de *Geotrichum sp.* à une fréquence relativement élevée (30 %) indique également une association notable avec les insectes étudiés. Ce genre est souvent retrouvé

dans les substrats végétaux en décomposition et pourrait être transporté passivement par les insectes.

Les genres *Saccharomyces*, *Cladosporium* et *Fusarium sp.*, bien que moins abondants, témoignent de la diversité de la mycoflore associée aux insectes. La détection de Fusarium sp. est particulièrement importante en raison du potentiel phytopathogène de certaines espèces appartenant à ce genre, susceptbles de contribuer à l'affaiblissement des tissus végétaux.

L'étude de la mycoflore associée aux insectes a révélé une diversité fongique modérée dominée par *Aspergillus* (40 %) et *Geotrichum sp.* (30 %). La présence de genres potentiellement phytopathogènes tels que *Fusarium sp.* souligne le rôle potentiel des insectes dans le transport et la dissémination des champignons au sein des écosystèmes forestiers. Ces résultats confirment l'existence d'interactions étroites entre les insectes et les communautés fongiques associées.

Les résultats obtenus confirment que les interactions entre les scolytes et les champignons jouent un rôle important dans le dépérissement des pinèdes. Les scolytes ne provoquent pas uniquement des dégâts mécaniques par le creusement de galeries, mais facilitent également l'introduction de champignons dans les tissus de l'arbre. Certains de ces champignons peuvent accélérer la nécrose des tissus conducteurs, diminuer les défenses de l'hôte et favoriser la réussite de la colonisation par les insectes.

La forte fréquence de Trichoderma observée dans cette étude pourrait traduire son importance écologique comme champignon antagoniste limitant le développement de certains agents pathogènes. En revanche, la présence de Fusarium, Alternaria et Cladosporium indique l'existence d'une communauté fongique diversifiée pouvant intervenir dans le processus de dépérissement, notamment lorsque les arbres sont soumis à un stress hydrique. Ces observations sont en accord avec les travaux de Six et Wingfield (2011), qui montrent que les interactions scolytes–champignons représentent un facteur déterminant dans la vulnérabilité des forêts méditerranéennes

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le présent travail a permis d'apporter une contribution à la compréhension de la diversité fongique associée au Pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et aux insectes xylophages, particulièrement les scolytes, dans un contexte marqué par un dépérissement croissant des peuplements forestiers méditerranéens. L'étude des interactions entre l'arbre, les insectes et les microorganismes associés constitue une étape essentielle pour mieux comprendre les mécanismes impliqués dans l'affaiblissement et la mortalité des arbres.

L'isolement et l'identification des champignons présents dans les différents organes du Pin d'Alep (aiguilles, écorce et cônes) ont révélé une communauté fongique diversifiée représentée par 198 isolats appartenant à plusieurs genres. Les résultats obtenus montrent une dominance de *Trichoderma spp.* (27,3 %), suivi de *Cladosporium spp.* (23,2 %) et *Fusarium spp.* (20,2 %), confirmant la coexistence de plusieurs groupes fonctionnels comprenant des champignons saprophytes, compétiteurs, opportunistes et potentiellement phytopathogènes.

La forte présence de *Trichoderma spp.* témoigne de l'importance des microorganismes saprophytes dans l'équilibre biologique des tissus végétaux. Ce genre, reconnu pour ses propriétés antagonistes, pourrait jouer un rôle naturel dans la régulation des populations fongiques par compétition pour les ressources, production de métabolites antifongiques et occupation rapide des niches écologiques disponibles. Sa dominance au niveau de l'écorce et des aiguilles indique une adaptation aux tissus végétaux exposés à une forte activité microbienne.

Par ailleurs, la présence importante de *Cladosporium spp.*, particulièrement au niveau des cônes, met en évidence l'influence des conditions environnementales et des caractéristiques physiologiques des organes végétaux sur la colonisation fongique. Les cônes, riches en matières organiques et davantage exposés aux conditions atmosphériques, constituent un substrat favorable au développement des champignons aérogènes et saprophytes.

La détection de *Fusarium spp.* dans plusieurs organes du Pin d'Alep représente un résultat important sur le plan phytosanitaire. Certaines espèces appartenant à ce genre sont capables de coloniser des tissus affaiblis et peuvent participer au processus de dépérissement en interaction avec d'autres facteurs de stress. Leur présence suggère que les arbres soumis à des contraintes environnementales, notamment le déficit hydrique prolongé, peuvent devenir plus vulnérables à l'installation de microorganismes opportunistes.

L'analyse de la distribution des champignons selon les organes étudiés a également montré une organisation écologique différenciée. L'écorce apparaît comme un compartiment riche en champignons saprophytes tels que *Trichoderma* et *Penicillium*, impliqués dans la décomposition de la matière organique. Les aiguilles présentent une association importante entre champignons antagonistes et opportunistes, tandis que les cônes hébergent une communauté dominée par *Cladosporium*, *Penicillium* et *Aspergillus flavus*, traduisant une dynamique particulière liée aux tissus reproducteurs.

L'étude de la mycoflore associée aux insectes xylophages a permis de confirmer l'existence d'une relation étroite entre les scolytes et les champignons. Les insectes collectés ont été associés à une diversité fongique représentée principalement par *Aspergillus* (40 %) et *Geotrichum spp.* (30 %), avec également la présence de *Fusarium spp.*, *Cladosporium* et *Saccharomyces*. Cette diversité indique que les insectes peuvent constituer des supports de transport et de dispersion des spores fongiques dans l'environnement forestier.

Les observations réalisées sur les scolytes, notamment *Tomicus destruens*, *Orthotomicus erosus*, *Pityogenes bidentatus* et *Crypturgus spp.*, montrent que ces insectes exploitent principalement des arbres présentant une faiblesse physiologique. Cependant, lorsque les populations augmentent, ils peuvent devenir des facteurs aggravants du dépérissement en provoquant des blessures mécaniques, en interrompant les échanges physiologiques sous l'écorce et en favorisant l'introduction de microorganismes associés.

Ainsi, le dépérissement du Pin d'Alep ne peut pas être considéré comme la conséquence d'un seul agent causal, mais plutôt comme le résultat d'un complexe d'interactions entre les facteurs abiotiques, les insectes xylophages et les communautés microbiennes associées. Le stress climatique, en particulier les périodes prolongées de sécheresse, semble jouer un rôle déterminant en réduisant la capacité de défense naturelle des arbres et en favorisant l'installation simultanée des scolytes et des champignons opportunistes.

Cette étude met donc en évidence l'importance d'une approche intégrée de surveillance sanitaire des forêts, basée sur l'étude conjointe des populations d'insectes, de la diversité fongique et de l'état physiologique des arbres. Les résultats obtenus constituent une base scientifique pour développer de futures stratégies de gestion durable visant à limiter les pertes dans les peuplements de Pin d'Alep.

Les résultats de cette étude montrent que la vulnérabilité des pinèdes de Ksar El Boukhari résulte de l'action combinée des scolytes, des champignons associés et des facteurs

environnementaux, en particulier la sécheresse. Les scolytes assurent la dissémination de plusieurs champignons, tandis que ces derniers facilitent à leur tour la colonisation des arbres et accélèrent leur dépérissement. Une gestion durable des pinèdes doit donc prendre en considération cette interaction biologique, à travers un suivi phytosanitaire régulier, une détection précoce des foyers d'infestation et le développement de méthodes de lutte biologique basées notamment sur les espèces antagonistes telles que Trichoderma

Perspectives :

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs axes de recherche afin d'approfondir la compréhension des interactions entre scolytes et champignons associés.

En premier lieu, il serait nécessaire de compléter l'identification morphologique des champignons par des approches moléculaires, notamment par le séquençage de la région ITS de l'ADN ribosomal. Cette approche permettrait une identification plus précise au niveau spécifique, particulièrement pour les genres complexes comme *Fusarium*, *Aspergillus* et *Cladosporium*, et permettrait de distinguer les espèces réellement impliquées dans les processus pathologiques.

Une seconde perspective concerne l'évaluation du pouvoir pathogène des champignons isolés. Des tests d'inoculation sur des plants de Pin d'Alep pourraient être réalisés afin de déterminer la capacité de chaque souche à provoquer des symptômes, à coloniser les tissus végétaux et à accélérer le dépérissement. Cette étape permettrait de différencier les simples colonisateurs des véritables agents impliqués dans les dommages forestiers.

Il serait également intéressant d'étudier plus précisément la relation entre les scolytes et leurs champignons associés. L'analyse du contenu des galeries sous-corticales, l'étude des spores transportées par les insectes et l'observation des mécanismes de transmission permettraient de mieux comprendre le rôle des scolytes comme vecteurs microbiens.

Une autre perspective importante concerne l'impact des changements climatiques sur cette interaction. Des études à long terme intégrant les paramètres climatiques (température, précipitations, déficit hydrique) permettraient d'établir des modèles prédictifs du risque de dépérissement et d'anticiper les périodes favorables aux pullulations de scolytes.

La valorisation des microorganismes bénéfiques constitue également un axe prometteur. Les souches locales de *Trichoderma spp.*, largement représentées dans cette étude, pourraient

être étudiées pour leurs propriétés antagonistes et leur potentiel comme agents de biocontrôle contre certains champignons phytopathogènes.

Enfin, une gestion durable des peuplements de Pin d'Alep devrait intégrer des mesures préventives telles que le suivi régulier des populations de scolytes, l'élimination des arbres fortement infestés, la limitation des blessures mécaniques, l'amélioration de la résistance des peuplements par des pratiques sylvicoles adaptées et la conservation de la biodiversité microbienne naturelle.

En conclusion, l'avenir de la protection des forêts méditerranéennes repose sur une meilleure compréhension du système complexe « arbre–champignon–insecte–environnement ». Une approche multidisciplinaire combinant écologie, entomologie, mycologie et gestion forestière apparaît indispensable pour préserver durablement les écosystèmes de Pin d'Alep.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- Abloul, A., & Ladja, A. (2020). L'impact de la transformation digitale sur la performance des entreprises : Cas des PME algériennes. Revue des Réformes Économiques et Intégration en Économie Mondiale
- Atkinson, T. H. (2019). Bark beetle-feeding habits and host specificity.
- Baazeem, A., et al. (2018). Effect of antibiotics on fungal isolation...
- Balachowsky, A. S. (1949). Faune de France, Volume 50 : Coléoptères Scolytides. Librairie de la Faculté des Sciences, Paul Lechevalier, Paris.
- Balachowsky, A. S. (1963). Entomologie appliquée à l'agriculture. Tome I : Coléoptères. Masson et Cie Éditeurs, Paris.
- Batra, L. R. (1963). Ecology of ambrosia fungi and their dissemination by beetles. Trudy Mezhdunarodnogo Simpoziuma.
- Beaver, R. A. (1989). Insect-fungus relationships in the Scolytidae and Platypodinae. Insect-Fungus Interactions.
- Beaver, R. A. (2010). A review of the genus Austroplatypus Browne (Coleoptera: Curculionidae: Platypodinae), with release of new biological data. Journal of Natural History.
- Beckman, C. H. (2000). Phenolic-storing cells: Keys to programmed cell death and periderm formation in defense against subcortical pests. Phytopathology.
- Benhanifia, K. (2015). Analyse des agents et causes de la déforestation – site pilote FFEM Djelfa.
- Biedermann, P. H., & Vega, F. E. (2020). Ecology and evolution of insect–fungus mutualisms. Annual Review of Entomology.
- Bouhraoua, R. T. (2002). Variabilité morphométriques des cônes, des graines et des aiguilles de Pinus halepensis Mill. en Algérie.
- Brakchi-Ouakour, L. (2015). Etude de la biodiversité des formations à Pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) en relation avec les facteurs de perturbation dans le nord de l'Algérie.
- Brasier, C. M. (1991). Ophiostoma novo-ulmi sp. nov., causative agent of the current Dutch elm disease pandemic. Mycological Research.
- Brignolas, F., Lacroix, B., Lieutier, F., Sauvard, D., & Yart, A. (1995). Induced responses in phloem and sapwood of European Scots pine over time after inoculation with bark beetle-associated fungi. Canadian Journal of Forest Research.

- Butin, H. (1996). Tree diseases and disorders: Causes, biology, and control in forest and amenity trees. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Carrillo, D., Duncan, R. E., & Pena, J. E. (2020). Ambrosia beetles and their associated fungi: a review of their mutualistic symbiosis and impact on agriculture. Florida Entomologist.
- Chakali, G. (2007). Bio-écologie des scolytes des pins en Algérie : Dynamique des populations et impact sur les écosystèmes forestiers. Revue Forestière Algérienne.
- Chararas, C. (1959). L'attractivité exercée par les conifères à l'égard des scolytides et le rôle des substances terpéniques. Revue de Pathologie Végétale et d'Entomologie Agricole de France.
- Chararas, C. (1982). Éco-physiologie des insectes parasites des forêts. Editions Lechevalier. Paris.
- Chévez, J. A. (2019). Biologie, écologie et gestion des scolytes (Coleoptera : Curculionidae : Scolytinae) dans les écosystèmes forestiers. Thèse de Doctorat / Rapport scientifique, Université de Montpellier / INRAE.
- Choi, Y., Kim, S., Kim, J., & Kim, G. H. (2024). Diversity and taxonomic characterization of ambrosia fungi associated with ambrosia beetles in South Korea. Fungal Diversity.
- Christiansen, E., & Ericsson, A. (1986). Starch depletion in Norwegian spruce (Picea abies) injury caused by bark beetle-associated fungi. Scandinavian Journal of Forest Research.
- Cochereau, P., Borbón, O., & Verger, C. (1994). Élevage massal et cycle biologique de Cephalonomia stephanoderis (Hymenoptera : Bethylidae), parasitoïde du scolyte des grains de café Hypothenemus hampei (Coleoptera : Scolytidae).
- D.G.F. (2017). Guide technique de la protection des forêts contre les ravageurs xylophages (Tomicus spp. et Phoracantha spp.). Direction Générale des Forêts, Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Alger, Algérie.
- D.G.F. (2021). Rapport technique sur les méthodes de piégeage et de biosurveillance des ravageurs forestiers en Algérie. Direction Générale des Forêts, Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Alger, Algérie.
- DGF (2019). Étude bioclimatique des forêts de la zone steppique.
- DGF (Direction Générale des Forêts, Djelfa). Rapports annuels.

Dhingra, O.D., & Sinclair, J.B. (1995). *Basic Plant Pathology Methods.*

- Dob, T., Berramdane, T., Chelghoum, C., & Dahmane, D. (2011). Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of essential oil of Pinus halepensis Mill. From Algeria. Journal of Essential Oil Bearing Plants.
- Domsch, K. H., Gams, W., & Anderson, T. H. (1980). Compendium of soil fungi. Academic Press, London, UK.
- DRAAF PACA. (2008). Les scolytes des pins : Biologie, surveillance et gestion dans les peuplements forestiers. Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt Provence-Alpes-Côte d'Azur, Note technique, France.
- DSF. (2012). La santé des forêts (France) en 2011 : Rapport des professionnels de la santé des forêts. Département de la Santé des Forêts, Direction Générale de l'Alimentation, Ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire, Paris, France.
- Durand-Gillmann, M. (2014). Facteurs d'attractivité et dynamique de colonisation des scolytes associés aux peuplements de conifères. Thèse de Doctorat, Écologie et Entomologie Forestière, Université d'Orléans / INRAE, France.
- Fady, B., Semerci, H., & Vendramin, G. G. (2003). Genetic resources of Aleppo pine (Pinus halepensis) and Brutia pine (Pinus brutia). IPGRI / FAO Technical Guidelines for genetic conservation, Rome, Italy.
- Farjon, A. K. (1996). Biodiversity of Pinus (Pinaceae) in Mexico: Speciation and palaeoendemism. Bot. J. Linn. Soc. (London).
- Farris, S. H., & Funk, A. (1965). Repositories of symbiotic fungus in the ambrosia beetle Platypus wilsoni Swaine. The Canadian Entomologist.
- Franceschi, V. R., Krokene, P., Christiansen, E., & Krekling, T. (2005). Anatomical and chemical defenses of conifer bark against bark beetles and pathogenic fungi. New Phytologist.
- Francke-Grosmann, H. (1956). Hautdrüsen als Träger der Pilzsymbiose bei Ambrosiakäfern. Zeitschrift für Morphologie und Ökologie der Tiere.
- Francke-Grosmann, H. (1967). Ectosymbiosis in wood-inhabiting insects. In S. M. Henry (Ed.), Symbiosis: Vol. II. Associations of Invertebrates, Birds, Ruminants, and Other Biota.
- Francke-Grosmann, H. (1973/1963). Some new aspects in forest entomology. Annual Review of Entomology.

Ganley, R.J., & Newcombe, G. (2006). Fungal endophytes in seeds and needles.

- Garrige. (2003). Illustration botanique de Pinus halepensis (Pin d'Alep).

- Geslot, A. (2018). Morphologie et appareil reproducteur de Pinus halepensis Mill. (Cônes mâles). Université d'Aix-Marseille.
- Ghougali, K. (2011). Écologie, caractérisation morpho-biométrique et aptitude à la germination des graines de Pinus halepensis Mill. dans la région des Aurès. Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie.
- Guit, B. (2015). Croissance et état sanitaire des peuplements de pin d'alep (Pinus halepensis Mill.) dans le massif forestier de Senalba (région de Djelfa). Thèse de doctorat en sciences agronomiques, Ecole nationale supérieure d'Agronomie, Alger.
- Hart, A. G., & Ratnieks, F. L. (2001). Waste management in the leaf-cutting ant Atta colombica. Behavioral Ecology and Sociobiology.
- Harzallah-Skhiri, F., et al. (2005). Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oils from Pinus halepensis Mill. Growing in Tunisia. Journal of Essential Oil Research.
- Hulcr, J., & Stelinski, L. L. (2017). The ambrosia symbiosis: from evolutionary ecology to practical management. Insect-Fungus Interactions.
- Hulcr, J., Atkinson, T. H., Cognato, A. I., Jordal, B. H., & McKenna, D. D. (2015). Morphology, taxonomy, and phylogenetics of bark beetles. In Vega, F. E., & Hofstetter, R. W. (Eds.), Bark Beetles: Biology and Ecology of Native and Invasive Species.
- Janin, G., & Lieutier, F. (1988). Le cycle biologique de Tomicus piniperda L. (Col., Scolytidae) dans la région d'Orléans. Annales des Sciences Forestières.
- Joly, R. (1975). Les insectes ennemis des forêts. Tome I : Généralités, Coléoptères. Éditions du Moniteur des Travaux Publics, Paris.
- Jourdheuil, P. (1991). La lutte autocide ou la technique des mâles stériles : principes, applications et perspectives en protection des cultures et des forêts. Innovations Agronomiques.
- Kader, A. (2019). Contribution à l'étude des méthodes de gestion et de lutte contre les insectes xylophages des pinèdes en Algérie.
- Kadik, B. (1983). Contribution à l'étude du Pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) en Algérie. Ecologie, dendrométrie, morphologie. Thèse de doctorat sciences Naturelles. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Kadik, L. (2011). Phytosociologie Et Phytoécologie Des Forêts a Pin D'Alep. Édition Universitaire Européenne.

- Khadir, A. (2019). Contribution à l'étude des méthodes de gestion et de lutte contre les insectes xylophages des pinèdes en Algérie.
- Khouja, M. L. (2020). Biodiversité entomologique et rôle écologique des insectes saproxyliques dans les écosystèmes forestiers méditerranéens. Annales de l'INRGREF.
- Krokene, P. (2015). Conifer defense strategies against bark beetles and associated fungi. In Bark Beetles: Biology and Ecology of Native and Invasive Species.
- Lakehal, S., & Metrouh, R. (2019). Évaluation de l'efficacité du piégeage mécanique (arbres pièges) contre les insectes xylophages des forêts.

Lazreg, F., et al. (2013). First Report of Fusarium acuminatum...

- Levieux, J. (1987). La lutte biologique en forêt : concepts, méthodes et limites. Revue Forestière Française, 39 (Numéro spécial : La protection des forêts).
- Lieutier, F. (2004). Host resistance to bark beetles and associated fungi. In Lieutier, F., Day, K. R., Battisti, A., Grégoire, J. C., & Evans, H. F. (Eds.), Bark and Wood Boring Insects in Living Trees in Europe, a Synthesis.
- Lieutier, F., & Levieux, J. (1985). Les réactions de défense des conifères contre les scolytes et leurs champignons associés. Revue Forestière Française.
- Lieutier, F., Day, K. R., Battisti, A., Grégoire, J. C., & Evans, H. F. (Eds.). (2004). Bark and Wood Boring Insects in Living Trees in Europe, a Synthesis. Springer, Dordrecht.
- Lieutier, F., Vouland, G., & Khous, M. G. (1992). Rapport de mission sur les dépérissements forestiers en Algérie et le rôle des insectes xylophages. Projet de coopération INRA, France / INRF Algérie.
- Lieutier, F., Yart, A., Garcia, J., Ham, M. C., Morelet, M., & Glynn, A. (1988). Induced defensive reactions of Scots pine, Pinus sylvestris L., and Aleppo pine, Pinus halepensis Mill., to attacks by bark beetles and ihren assoziierten Pilzen. Journal of Applied Entomology.
- Linaldeddu, B. T., Franceschini, A., Luisi, N., Scanu, B., Alves, A., & Phillips, A. J. L. (2009). Diplodia corticola and Phytophthora cinnamomi: the main pathogens involved in cork oak decline in Italy. Journal of Plant Pathology.
- Linaldeddu, B. T., Sanna, T., Franceschini, A., & Scanu, B. (2009). Innovative preventive measures and sanitation practices for the management of fungal pathogens in Mediterranean forest nurseries and woodlands. Phytopathologia Mediterranea.

- Mayers, C. G., et al. (2020). Mycangia define the diverse ambrosia beetle–fungus symbioses. Fungal Ecology.
- Mayers, C. G., McNew, D. L., Harrington, T. C., Roeper, R. A., Fraedrich, S. W., Biedermann, P. H., ... & Six, D. L. (2018). Three cymbal-like mycangia in Scolytinae and Platypodinae (Coleoptera, Curculionidae) and associated ambrosia fungi. Arthropod Structure & Development.
- Meddour-Sahar, O. (2010). Les écosystèmes forestiers algériens : vulnérabilité et adaptation aux changements climatiques.
- Mullick, D. B. (1977). The non-specific nature of defense in bark and wood: The concept of necrophylactic periderm. Recent Advances in Phytochemistry.
- Mulock, P., & Christiansen, E. (1986). The response of Norwegian spruce to attack by the bark beetle Ips typographus: Induced defence and critical attack density. Canadian Journal of Forest Research.
- Nahal, I. (1962). Le Pin d'Alep (Pinus halepensis Mill). Etude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole. Extr. Annales Ecole Nationale Eaux et Forêts, Nancy.
- Nahal, I. (1983). Contribution à l'étude écologique du Pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) en Méditerranée. Options Méditerranéennes, Série Etudes, (83-I), Centre International de Hautes Études Agronomiques Méditerranéennes.
- Nahal, I. (1986). Taxonomie et aire géographique des pins du groupe halepensis. CIHEAM Options Méditerranéennes.
- Novikova, E. (2019). Diversité des cônes et aiguilles de conifères : Étude morphologique comparée.
- Nuotclà, J. A., Biedermann, P. H., & Taborsky, M. (2019). Pathogen defence of a cooperative breeder: asocial and social resistance in an ambrosia beetle. Frontiers in Ecology and Evolution.
- Paine, T. D., Raffa, K. F., & Harrington, T. C. (1997). Interactions among bark beetles, phytopathogenic fungi, and host pines. Annual Review of Entomology.
- Pfeffer, A. (1995). Zentraleuropäische und mediterrane Borken- und Kernkäfer (Coleoptera: Scolytidae, Platypodidae). Pro weisbader : Documents faunistiques, Genève.

Présentation SENALBA (2016). Direction des Forêts de la Wilaya de Djelfa.

QUÉZEL, P. & MÉDAIL, F. (2003). *Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen.*

- Quézel, P. (2000). Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen. Écologia Méditerranéenne.
- Quézel, P., & Médail, F. (2003). Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Paris : Elsevier.
- Raffa, K. F., & Berryman, A. A. (1980). Flight responses and host selection by bark beetles. Insects Ecology and Management.

Ribeiro, J. A., et al. (2025). Evaluation of different culture media...

- Rogé, J. P. (1999). Principes de protection des forêts et gestion des populations d'insectes ravageurs. Revue Forestière Française.
- Ruel, J. J., Ayres, M. P., & Lorio, P. L. (1998). Lorio's growth-differentiation balance hypothesis and resin defense in pines. Forest Ecology and Management.

Samson, R.A., et al. (1988). *Introduction to Food- and Airborne Fungi.*
Samson, R.A., et al. (2019). *Food and Indoor Fungi.*

- Santini, A., & Ghelardini, L. (2015). Plant resistance to fungal pathogens in forestry. In Sustainable Management of Bark Beetles and Fungal Pathogens in Forest Ecosystem.
- Saucedo-Carabez, J. R., Carrillo, D., Ploetz, R. C., Konkol, J., Castro, J. E., & Kessler, S. (2018). Nutritional suitability of symbionts associated with the ambrosia beetle Xyleborus bispinatus. Fungal Ecology.
- Schedl, K. E. (1962). Scolytidae und Platypodidae Afras. Rev. Zool. Bot. Afr.
- Schneider, I. A. (1976). Untersuchungen über die Symbiose von Ambrosiakäfern mit Pilzen. Zeitschrift für Angewandte Entomologie.
- Schneider, I. A., & Rudinsky, J. A. (1969). Mycangial glands and symbiotic fungus of the ambrosia beetle Gnathotrichus sulcatus. Journal of Invertebrate Pathology.
- Six, D. L. (2012). Bark beetle-fungus symbioses. In Biocomplexity of Plant-Associated Organisms.
- Six, D. L., & Wingfield, M. J. (2011). The bark beetle-fungus symbiosis: what do we really know? Annual Review of Entomology.
- Solheim, H. (1995). Early stages of blue-stain fungus invasion in Sapwood of Norway spruce inoculated with Ophiostoma polonicum. European Journal of Forest Pathology.
- Storer, A. J., & Speight, M. R. (1996). Relationships between tree bark thickness, phloem moisture content, and the colonization success of bark beetles (Coleoptera: Scolytidae). Journal of Applied Entomology.

- Talbi, S. (2019). Inventaire, bio-écologie et impact des scolytes (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) associés au Pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.).
- Telli, A., & Ben Gourina, M. (2021). Bio-écologie et dynamique des populations des scolytes associés aux essences forestières.
- Thameur, A. (2019). Bio-écologie, inventaire et impact des insectes ravageurs des forêts (Cas des scolytes du Pin d'Alep).
- Vega, F. E., & Hofstetter, R. W. (Eds.). (2015). Bark Beetles: Biology and Ecology of Native and Invasive Species. Academic Press (Elsevier), San Diego, USA.
- Wallin, K. F., & Raffa, K. F. (2001). Effects of host quality on bark beetle colonization success and survival: Measured by induced defensive responses. Environmental Entomology.
- Waring, R. H., & Pitman, G. B. (1980). Amyelois and bark beetle: Host resistance in relation to tree vigor and attack density. Forest Science.

Watanabe, T. (2011). *Pictorial Atlas of Soil and Seed Fungi.*

- Wingfield, M. J., de Beer, Z. W., Bresler, G., Hurley, B. P., Barnes, I., Roets, F., ... & Slippers, B. (2010). Fungal pathogens of forest trees: a global perspective. Southern Forests: a Journal of Forest Science.
- Wingfield, M. J., Garnas, J. R., Hajek, A., Hurley, B. P., Barnes, I., & Slippers, B. (2016). Planted forest health: the need for a global strategy. Biological Invasions.
- Wingfield, M. J., Hammerbacher, A., Ganley, R. J., Steenkamp, E. T., Gordon, T. R., Wingfield, B. D., & Coutinho, T. A. (2008). Pitch canker caused by Fusarium circinatum: a growing threat to pine plantations and forests worldwide. Australasian Plant Pathology.
- Wingfield, M. J., Seifert, K. A., & Webber, J. F. (Eds.). (1993). Ceratocystis and Ophiostoma: Taxonomy, Pathology, and Ecology. APS Press, the American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota, USA.
- Zhao, T., Kandasamy, D., Krokene, P., Schmidt, A., Gershenzon, J., & Hammerbacher, A. (2019). Fungal associates of the tree-killing bark beetle Ips typographus vary in virulence, ability to degrade host defenses and environmental tolerance. Fungal Ecology.