

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Département d'Ecologie et Environnement

Mémoire de fin d'étude
En Vue de l'Obtention Du Diplôme de Master 2

Filière : Ecologie et Environnement
Spécialité : Biodiversité et Ecologie Végétale

Présenté par :
BENAMEUR Thinhinane et MESSAOUI Sarah
Le : 23/09/2024

Thème

**Contribution à l'étude de la diversité des champignons épiphytes et endophytes des
feuilles de *Posidonia oceanica* de la région de Beni Ksila, wilaya de Béjaia, Algérie.**

Devant le jury composé de :

Président : OUDJIANE A.
Promotrice : SAADOUN N.
Co-promotrice : TAOURIRT N.
Examinateur : LHADJ MOHAND A.

MCB, UMMTO
Pr, UMMTO
Doctorante, UMMTO
MAA, UMMTO

Année universitaire : 2023–2024

Résumé

Posidonia oceanica (L.) Delile est une espèce clé des écosystèmes marins méditerranéens, formant des herbiers sous-marins essentiels à la biodiversité. Cette étude explore la diversité fongique épiphyte et endophyte associée à *P. oceanica* dans la région de Beni Ksila (Béjaïa). Trois genres épiphytes et quatre genres endophytes, appartenant aux *Ascomycota*, ont été identifiés, avec une prédominance marquée de *Penicillium*. Ce genre, en produisant des métabolites secondaires, joue un rôle crucial dans la protection de *P. oceanica* face aux stress biotiques et abiotiques. Les autres genres, tels que : *Aspergillus*, *Alternaria* et *Cladosporium*, participent également à la dynamique écologique des herbiers.

Les résultats suggèrent que le microclimat et le microhabitat spécifiques à chaque site d'étude influencent fortement la composition fongique, comme en témoigne la comparaison avec des études antérieures menées dans les autres régions étudiées. Ces variations régionales reflètent l'impact des conditions environnementales locales sur les communautés fongiques associées à *P. oceanica*.

Mots clés : *Posidonia oceanica*, champignons marins, microhabitat, phyllosphère, Beni Ksila.

Remerciements

"Préserver la biodiversité, c'est protéger l'avenir de l'humanité." – Jean-Marie Pelt

Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude à notre promotrice, Madame **SADOUNE N.**, pour son encadrement exceptionnel, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son expertise, sa rigueur scientifique et sa patience ont été des sources d'inspiration et nous ont permis d'évoluer tant sur le plan académique que personnel.

Nous lui sommes reconnaissantes pour la confiance qu'elle nous a accordée et pour ses encouragements constants, qui ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail. Merci infiniment pour votre soutien et votre bienveillance.

Madame, se fut un honneur de travailler sous votre supervision.

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à notre co-promotrice, Mademoiselle **TOURIRT N.**, qui a été bien plus qu'un soutien académique tout au long de ce travail. Sa disponibilité, son écoute et son implication ont été inestimables. Son accompagnement attentif et son engagement nous ont permis d'avancer avec confiance et sérénité.

Elle a su être présente à chaque étape, nous guidant avec bienveillance et nous offrant des conseils précieux. Nous lui sommes infiniment reconnaissantes pour sa générosité et son dévouement.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres du jury

A Monsieur **OUDJIANE A.** pour avoir accepté de présider et d'évaluer notre travail. Son expertise et son observation constructive apporteront une grande valeur à ce mémoire.

Nous sommes très honorés que Monsieur **LHADJ MOHAND A.** examine notre travail et fasse partie du jury. Ses critiques et commentaires seront bénéfiques pour enrichir nos connaissances.

Nous les remercions sincèrement pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de notre travail et pour l'honneur qu'ils nous ont fait en participant à cette évaluation. Leurs remarques

constructives seront assurément reçues avec une profonde reconnaissance

Dédicace

A ma Famille bien-aimée

Socrate nous enseigne que le secret du changement est de concentrer toute notre Energie non pas à lutter contre le passe, mais à construire l'avenir.

Papa, maman tout au long de se parcourt vous avez incarne cette sagesse, votre amour et votre soutien m'ont constamment poussé vers l'avant, m'encourageant à construire mon avenir plutôt que de m'attarder sur les difficultés merci a vous a votre amour je vous aime.

"La famille est une des œuvres d'art de la nature" Iounis ,juba, aghiles, vous êtes ce qui rend cet oeuvre si belle.

Vous êtes mes compagnons de route, mes alliés indéfectibles, chacun à vôtre manière, vous m'apportez force, joie et réconfort.

A Imane qui est plus qu'une simple sœur qui est ma Confidente et amie, tu apportes douceur et compassion. Ta présence et indispensable, à ma chère petite Mélina Tu es mon rayon de soleil, illuminant nos vies de ta joie et de ton innocence. Tu es aimée au-delà des mots, ma petite étoile et mon 'hamburger'

A nana nida et dada Kaci, Vous êtes les piliers silencieux de notre famille, offrant sagesse et soutien avec une générosité sans pareille. Votre amour et votre dévouement envers nous tous sont une source d'inspiration constante. Merci pour tout.

À ma chère et unique amie et binôme, Sarah, tu as états un support toute au long de cette année tu su te montre patiente, toujours à l'écoute ,je n'aurais jamais espérer mieux ,même espérer tout court

À mon grand frère, krim Les mots semblent insuffisants pour exprimer tout ce que tu représentes pour moi, mais je vais essayer de te dire à quel point tu es important dans ma vie.

Depuis mon plus jeune âge, tu as été mon phare, mon guide, mon protecteur. Tu n'es pas seulement mon frère aîné, tu es mon héros, mon modèle, celui vers qui j'ai toujours levé les yeux avec admiration et respect. Tu as su être là dans chaque moment crucial de ma vie. Dans mes moments de doute, tu as été la voix rassurante qui m'a poussé à croire en moi. Dans mes moments de joie, tu as été le premier à célébrer mes succès comme si c'étaient les tiens. je peux pas en dire plus mais Merci d'être toi, merci d'être là, merci pour tout. Je t'aime plus que les mots ne peuvent l'exprimer ta petite sœur.

Thinhinane

Dédicace

Papa Maman,

Pour votre amour inconditionnel, votre soutien indéfectible, et vos sacrifices silencieux.

Merci pour votre foi en moi, pour m'avoir inculqué la persévérance, et pour avoir toujours été mes premières sources d'inspiration.

Ce travail est le reflet de vos valeurs et de votre confiance en mes capacités.

Je vous dédie ce mémoire avec une profonde gratitude et tout mon amour.

À ma petite sœur,

Ta douceur, ton sourire et ta joie de vivre ont toujours été une source d'inspiration.

Merci d'être là, de m'encourager et de m'apporter tant de bonheur.

À mon mari,

Pour ton amour, ta patience et ton soutien inébranlable à chaque étape de ce parcours.

Merci de toujours croire en moi et de me donner la force d'aller plus loin.

Ce mémoire est autant le tien que le miens.

À meilleure amie et binôme,

Pour ta présence constante et ton soutien exceptionnel tout au long de ce voyage. Ton amitié précieuse a été un pilier solide sur lequel je me suis appuyée, tout comme ton courage, ta persévérance et notre complicité sans faille. Ce mémoire est un hommage sincère à la beauté de notre amitié.

Je dédie ce modeste travail à mes chers proches

Sarah

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 01. Les champignons	4
1.1 Introduction	5
1.2 Modes de vie	5
1.2.1 Symbiose.....	5
1.2.2 Saprophytisme.....	5
1.1.3 Parasitisme	6
1.2 Reproduction chez les champignons	6
1.2.1 Reproduction asexuée	6
1.2.2 Reproduction sexuée	7
1.3 Structure de l'appareil végétatif et cellulaire	7
1.4 Classification des champignons	8
1.4.1 Chytridiomycota	8
1.4.2 Zygomycota	9
1.4.3 Glomeromycota.....	10
1.4.4 Dikarya (Ascomycota et Basidiomycota)	11
1.5 Les champignons épiphytes et endophytes	11
1.5.1 Champignons épiphytes	12
1.5.1.1 Généralités.....	12
1.5.1.2 La diversité des champignons épiphytes	12
1.5.2 Champignons endophytes	13
1.5.2.1 Définition	13

1.5.2.2	La diversité des champignons endophytes	13
1.5.2.3	Modes de transmission des champignons endophytes	14
1.5.2.4	Relation du mycoendophyte avec l'espèce hôte	15
1.5.2.5	Classification des champignons endophytes	16
1.5.2.6	Intérêt et rôle des champignons endophytes	17
1.5.3	Relation épiphytes et endophytes.....	17
1.6	Les Champignons Marins : diversité, écologie et applications.....	18
	Chapitre 02. La posidonie.....	20
2.1	Introduction	21
2.2	Distribution de <i>P.oceanica</i> dans le milieu marin.....	22
2.2.1	Répartition horizontale.....	22
2.1.1	Répartition verticale.....	22
2.3	Évolution et adaptation de <i>Posidonia oceanica</i>	23
2.3.1	Origine terrestre et migration vers le milieu marin.....	23
2.3.2	Adaptations de <i>P. oceanica</i> au milieu marin.....	23
2.3.2.1	Adaptations Morphologiques	23
2.3.2.2	Adaptations Physiologiques	25
2.3.2.3	Reproduction de <i>P .oceanica</i>	26
2.4	Rôles Écologiques	28
2.5	Coévolution avec d'Autres Organismes	28
2.6	Facteurs menaçant <i>Posidonia oceanica</i>	30
	Chapitre 03. Matériels et méthodes.....	31
3.1	Description de la zone d'étude.....	32

3.2	Etude bioclimatique de la région de Beni ksila.....	32
3.2.1	Températures.....	32
3.2.2	Précipitations.....	33
3.2.3	Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен.....	33
3.2.4	Climaramme d'Emberger.....	34
3.3	Echantillonnage sur terrain.....	35
3.4	La mise en culture des champignons.....	35
3.4.1	Préparation du milieu de culture PDA (Potato-Dextrose-Agar)	35
3.4.2	L'isolement et la mise en culture des champignons épiphytes.....	36
3.4.2.1	Isolement des champignons épiphytes	36
3.4.2.2	La mise en culture	37
3.4.3	L'isolement et la mise en culture des champignons endophytes	38
3.4.3.1	Stérilisation superficielle.....	38
3.4.3.2	La mise en culture	39
3.5	Identification des champignons.....	39
3.6	Analyse statistique.....	40
3.7	Analyse en composantes principales (ACP)	41
	Chapitre 04. Résultats et discussion	32
4.1	Abondance des genres fongiques épiphytes et endophytes à Béni Ksila.....	43
4.2	Description des genres fongiques recensés	44
4.3	Analyses statistiques des genres fongiques épiphytes recensés dans la région de Béni Ksila	47
4.3.1.	Abondance des genres fongiques épiphytiques des feuilles de la posidonie	47

4.3.2 Analyse de variance (ANOVA) des épiphytes fongiques de la région de Béni Ksila	50
4.3.3 Matrice de corrélation des épiphytes fongiques de la région de Béni Ksila	51
4.3.4 Analyse en composantes principales des épiphytes de la région de Beni Ksila.....	51
4.4 Comparaison entre les cortèges fongiques épiphytes de Tizirt/Tipaza/Ain Tagourait/Béni Ksila	53
4.4.1 Analyses de variance comparatives du cortège épiphyte entre les différentes régions étudiées	53
4.4.2 Matrice de corrélation comparative entre le cortège épiphyte des différentes régions étudiées	57
4.4.3 Analyse en composantes principales comparative entre les cortèges fongiques épiphytes de Tizirt/Tipaza/Ain Tagourait/Béni Ksila	60
4.5 Analyses statistiques des mycoendophytes recensés dans la région de Béni Ksila.....	62
4.5.1 Abondance des genres fongiques endophytes.....	62
4.5.2 Analyse de variance (ANOVA)	64
4.4.3 Matrice de corrélation	65
4.4.4 Analyse en composantes principales des mycoendophytes de Béni Ksila.....	66
4.6 Comparaison entre les cortèges fongiques endophyte de Tizirt et de Béni Ksila.....	67
4.6.1 Analyse de variance comparative des mycoendophytes entre Béni Ksila et Tizirt.....	67
4.6.2 Matrice de corrélation entre les régions de Tizirt et Béni Ksila.....	69
4.6.3 Analyse en composantes principales comparative entre les mycondophytes de Tizirt et Béni Ksila.....	70
4.7. Analyse en composantes principales entre les épiphytes et les endophytes de la région de Béni Ksila	71
Conclusion générale et perspectives	75
Références bibliographiques.....	76

Liste des figures

Figure 1. Diversité fongique impliquée dans le cycle des nutriments, la décomposition et la pathogénicité (Adnan <i>et al.</i> , 2022)	6
Figure 2. Multiplication végétative (en haut du schéma), et le cycle monogénétique halophasique, du genre <i>Mucor</i> (en bas du schéma) (Roland et Vian, 1985).....	7
Figure 3. Arbre phylogénétique simplifié des champignons montrant les cinq principaux embranchements actuellement définis. Pour chaque embranchement, un exemple morphologique typique est présenté (Bindschedler <i>et al.</i> , 2016).....	8
Figure 4. Structure d'une Chytridiomycètes, <i>Chytridium confervae</i>	9
Figure 5. Morphologie de <i>Rhizopus stolonifer</i> (Ehrenberg) Vuillemin 1902 (Mucorales). (Voigt & Kirk, 2014)	10
Figure 6. Le genre <i>Glomus</i> du Phylum Glomeromycota.....	10
Figure 7. Conidies et hyphes septés du genre <i>Penicillium</i>	11
Figure 8. Modes de croissance des champignons endophytes dans les tissus des plantes hôte (Kusari <i>et al.</i> , 2012).....	14
Figure 9. Distribution géographique de <i>P.oceanica</i>	22
Figure 10. <i>Posidonia oceanica</i> : a) prairie (d'après Boudouresque et Meinesz, 1982) ; b) croquis de la plante avec fruit (Cavallaro <i>et al.</i> , 2011)	24
Figure 11. Adaptation physiologique des Phanérogames marines (Olsen <i>et al.</i> , 2016).....	26
Figure 12. Représentation schématique des trois stades de reproduction sexuée de <i>P. oceanica</i> , incluant la dispersion et la colonisation.....	27
Figure 13. Diagramme conceptuel illustrant la productivité primaire dans les herbiers marins	28
Figure 14. Localisation géographique du site d'échantillonnage à Beni Ksila, Béjaia (Google maps, 2024)	32
Figure 15. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен de la région de Beni Ksila.	33
Figure 16. Position de la région de Beni Ksila dans le climagramme d'Emberger (1991-2021).	34
Figure 17. Préparation du milieu P.D.A	35
Figure 18. Milieu P.D.A.....	36

Figure 19. Centrifugation des fragments de feuilles de Posidonie.....	37
Figure 20. Ensemencement du surnageant sur les boites Pétri	38
Figure 21. Stérilisation superficielle des feuilles de posidonie.....	38
Figure 22. Opération de la mise en culture des feuilles de posidonie.....	39
Figure 23. Observations macroscopique et microscopique du genre <i>Alternaria</i> (x400) (2024).	44
Figure 24. Observations macroscopique et microscopique du genre <i>Aspergillus</i> (x400) (2024).	45
Figure 25. Observations macroscopique et microscopique du genre <i>Cladosporium</i> (x400) (2024)	46
Figure 26. Observations macroscopique et microscopique du genre <i>Penicillium</i> (x400) (2024)	46
Figure 27. Abondances des champignons épiphytes (%) isolés à partir des feuilles de <i>Posidonia oceanica</i> de la région de Beni ksila.....	47
Figure 28. Abondances des genres fongiques épiphytes communs entre les différentes régions étudiées en (%) sur les feuilles de la posidonie	49
Figure 29. Analyse en composantes principales représentant les genres de champignons épiphytes des prélèvements des feuilles de <i>Posidonie oceanica</i> de larégion de Beni ksila	52
Figure 30. Analyse en composantes principales entre les cortèges fongiques épiphytes de Tigzirt/Tipaza/Ain Tagourait/Beni Ksila	60
Figure 31. Abondances des genres fongiques endophytes (%) isolés à partir des feuilles de <i>Posidonia oceanica</i> de la région de Beni ksila.....	62
Figure 32. Analyse en composantes principales de la région de Beni Ksila	66
Figure 33. Analyses en composantes principales comparative entre Tigzirt et Beni Ksila.....	70
Figure 34. Analyse en composantes principales comparative entre les champignons épiphytes et endophytes de Beni Ksila	72

Liste des tableaux

Tableau 1. Températures mensuelles moyennes de la région d'étude pour la période 1991-2021(Climat-data, 2024)	32
Tableau 2. Précipitations moyennes mensuelles et annuelles pour la région d'Aïn Tagourait pendant la période allant de 1991 à 2021.....	33
Tableau 3. Genres fongiques recensés des feuilles de <i>P. oceanica</i> dans la région de Beni ksila	
Tableau 4. Abondances des genres fongiques épiphytes (%) isolés à partir des feuilles de <i>Posidonia oceanica</i> de la région de Beni ksila.....	47
Tableau 5. Diversité et abondances des genres fongiques épiphytes (%) sur les feuilles de la posidonie	49
Tableau 6. ANOVA des genres fongiques épiphytes de la région de Beni Ksila.....	50
Tableau 7. Matrice de corrélation entre les genres épiphytes de Beni Ksila.....	51
Tableau 8. Analyses de variances comparatives du cortège épiphyte entre les différentes régions étudiées	54
Tableau 9. Comparaison multiple du genre <i>Alternaria</i>	55
Tableau 10. Comparaison multiple du genre <i>Candida</i>	55
Tableau 11. Comparaison multiple du genre <i>Cladosporium</i>	55
Tableau 12. Comparaison multiple du genre <i>Gymnoascus</i>	55
Tableau 13. Comparaison multiple du genre <i>Penicillium</i>	56
Tableau 14. Comparaison multiple du genre <i>Phialophora</i>	56
Tableau 15. Matrice de corrélation de comparaison du cortège épiphyte entre les différentes régions étudiées	58
Tableau 16. Abondances des genres fongiques endophytes (%) isolés à partir des feuilles de <i>Posidonia oceanica</i> de la région de Beni ksila.....	62
Tableau 17. Test ANOVA des mycoendophytes foliaires de <i>Posidonia oceanica</i> de la région de Beni Ksila	64
Tableau 18. Matrice de corrélations de la région de Beni Ksila.....	65
Tableau 19. Analyse des variances des genres endophytes de Beni Ksila et Tizirt	68
Tableau 20. Comparaison multiple du genre <i>Penicillium</i>	69

Tableau 21. Comparaison multiple du genre <i>Trichophyton</i>	69
Tableau 22. Matrice de corrélation entre les genres mycondophytes des régions Tizirt et Beni Ksila	69

Introduction générale

Introduction générale

Depuis des millénaires, les écosystèmes marins et plus particulièrement les prairies sous-marines de *Posidonia oceanica*, ont joué un rôle central dans le maintien de la biodiversité marine méditerranéenne (Boudouresque *et al.*, 2006). *Posidonia oceanica*, espèce endémique de la mer Méditerranée, constitue un habitat clé pour une multitude d'espèces et agit comme un stabilisateur des fonds marins tout en contribuant à la séquestration du carbone et à la production d'oxygène (UNEP/MAP, 2016; Vassallo *et al.*, 2013). Ces prairies sous-marines se trouvent le long des côtes méditerranéennes, notamment dans des régions où elles prospèrent grâce à une transparence de l'eau élevée et une pénétration lumineuse importante (Chefaoui *et al.*, 2017).

Dans ce contexte, les champignons marins épiphytes et endophytes qui colonisent les feuilles de *Posidonia oceanica* constituent un groupe encore méconnu, mais crucial pour la compréhension de la biodiversité marine. Bien qu'il soit estimé que plus de 10 000 espèces de champignons marins existent, seulement environ 1 100 ont été décrites à ce jour (Amend *et al.*, 2019; Jones, 2011). Ces champignons interagissent avec leur hôte de diverses manières, allant de la symbiose au commensalisme et leurs interactions adaptatives révèlent des mécanismes fascinants pour s'acclimater aux conditions écologiques marines (Strobel, 2002; Raghukumar, 2017).

Malgré la reconnaissance croissante de leur importance écologique, les herbiers de *Posidonia oceanica* et particulièrement leur mycoflore associée, restent largement sous-explorés. Or, ces champignons marins pourraient avoir des implications significatives pour la santé des écosystèmes marins et des applications biotechnologiques futures (Vassallo *et al.*, 2013).

Cette étude vise à établir un inventaire de champignons épiphytes et endophytes présents sur les feuilles de *Posidonia oceanica* dans la région de Béni Ksila. Cette recherche s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés dans d'autres régions méditerranéennes en Algérie telles que Tizirt (Bouguessir, 2022 et Taourirt, 2022), Tipaza (Khalef, 2023), Ain Tagourait (Khemici, 2024) et a pour objectif de fournir des données supplémentaires sur la diversité fongique dans cette région spécifique. En explorant la diversité et l'écologie des champignons associés à *Posidonia oceanica*, cette étude peut contribuer à une meilleure compréhension des interactions écologiques dans les écosystèmes marins méditerranéens et à la conservation de ces habitats vitaux.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre des recherches menées par le laboratoire Ressources Naturelles de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. Il est structuré en quatre chapitres principaux, chacun abordant un aspect spécifique de l'étude des champignons associés à *Posidonia oceanica* dans la région de Béni Ksila.

Le Chapitre 1 présente les caractéristiques générales des champignons, avec une attention particulière portée aux champignons marins, aux champignons épiphytes et aux

Introduction générale

mycoendophytes. Il explore leurs interactions avec les espèces végétales et leurs implications écologiques et biotechnologiques.

Le chapitre 2 est dédié à la description détaillée de *Posidonia oceanica*, mettant en lumière ses rôles écologiques et son importance dans les écosystèmes marins méditerranéens.

Le chapitre 3 décrit le matériel et les méthodes utilisés dans cette étude expérimentale, en précisant les techniques de collecte et d'analyse des échantillons de champignons.

Le chapitre 4 présente les résultats obtenus, suivis d'une discussion approfondie pour interpréter ces résultats en relation avec les études antérieures.

Le mémoire se termine par une synthèse des principaux résultats et des perspectives pour de futures recherches dans le domaine des champignons marins et les écosystèmes de *Posidonia oceanica*.

Chapitre 01. Les champignons

1.1 Introduction

(Jennings & Lysek, 1999) l'ampleur de la diversité fongique était estimée de manière « conservatrice » à environ 1,5 million d'espèces (Hawksworth, 2001). Au début de l'histoire de la mycologie, Fries (1825) avait prédit que les champignons se révéleraient être analogues aux insectes en termes de richesse spécifique, rendant la mycologie plus vaste que le reste de la botanique. Il n'a pas donné de chiffre global, mais d'après ses publications ultérieures, il envisageait un nombre bien supérieur à 140 000 espèces. Anciennement considérés comme des végétaux, les champignons constituent aujourd'hui un règne autonome appelé Mycota (Reboux *et al.*, 2010), dépourvus de chlorophylle, ce qui les distingue nettement du règne végétal (Chabasse *et al.*, 2002). Ils peuvent être uni- ou pluricellulaires, certaines espèces optant pour les deux formes, tandis que d'autres sont restreintes à l'une ou l'autre (Jennings & Lysek, 1999). Les champignons représentent différents modes de vie, modes de reproduction et interactions écologiques, ce qui leur permet de prospérer dans une grande variété d'environnements (Deacon, 2005).

1.2 Modes de vie

1.2.1 Symbiose

La symbiose est une association spécifique durable entre deux espèces. De nombreux champignons symbiotiques forment des mycorhizes, une relation bénéfique avec les racines des plantes. Les mycorhizes arbusculaires et ectomycorhizes sont des exemples courants de cette symbiose, où le champignon aide la plante à absorber les nutriments du sol, notamment le phosphore, en échange de sucres produits par la photosynthèse (Smith & Read, 2008). Un autre exemple de symbiose fongique est la lichenisation, où les champignons forment une association avec des algues ou des cyanobactéries, créant ainsi les lichens (Honegger, 1991). Dans les environnements aquatiques, des champignons symbiotiques sont impliqués dans des interactions avec des algues marines par exemple, contribuant à la santé et à la croissance des écosystèmes marins (Amend *et al.*, 2019).

1.2.2 Saprophytisme

Les espèces saprophytes se développent aux dépens des substances mortes d'origine animale ou végétale (Bouchet *et al.*, 2005). Dans le sol, les champignons participent au cycle de l'azote par la dégradation de l'humus. Ils ont la capacité de dégrader la cellulose et la lignine, et sont considérés comme les principaux recycleurs de la matière organique à partir du matériel végétal (Lutzoni *et al.*, 2004). Les saprophytes comme les champignons lignicoles jouent un rôle crucial dans la décomposition du bois, contribuant à la formation de l'humus et au recyclage des nutriments dans les écosystèmes forestiers (Boddy, 2001). Dans les environnements aquatiques, les champignons saprophytes décomposent la matière organique

en suspension et les débris végétaux, jouant un rôle clé dans le cycle des nutriments (Gessner & Chauvet, 1994).

1.1.3 Parasitisme

Leuckart (1879) a défini les parasites comme des organismes qui trouvent dans un autre organisme leur habitat et leur nourriture (Leuckart, 1879). Selon Brumpt (1913), les parasites sont tous les êtres vivants, qu'ils soient végétaux ou animaux, qui dépendent, au moins pendant une partie de leur vie, d'un autre organisme (Brumpt, 1913). Le parasitisme est généralement nuisible et souvent nocif (Bouchet *et al.*, 2005). En milieu aquatique, des champignons causent des infections dévastatrices chez les poissons, affectant notamment les populations de poissons d'eau douce et marins (Ferguson, 2023).

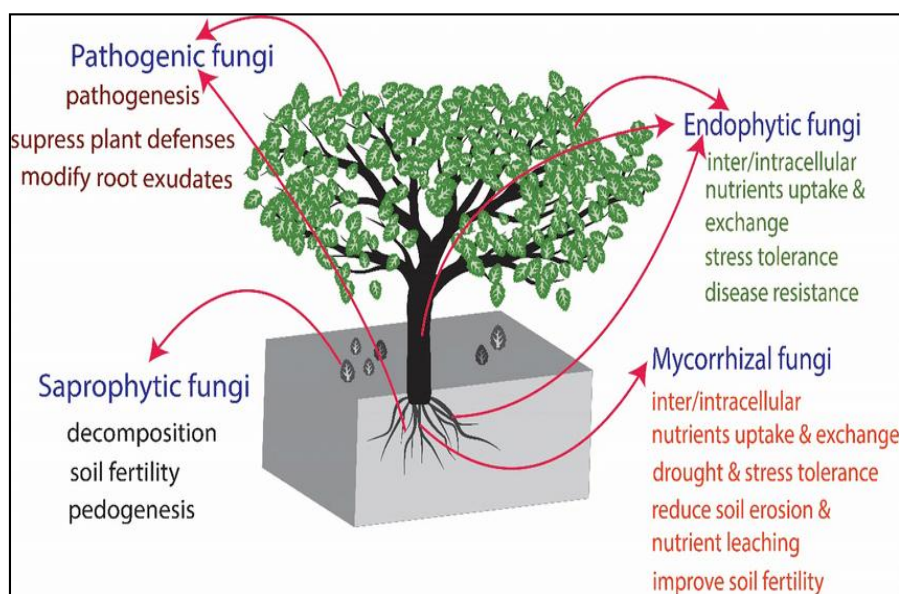


Figure 1. Diversité fongique impliquée dans le cycle des nutriments, la décomposition et la pathogénicité (Adnan *et al.*, 2022)

1.2 Reproduction chez les champignons

Les champignons se reproduisent principalement par l'intermédiaire des spores, qui sont des structures uni- ou multicellulaires, avec diverses formes et tailles, capables de se reproduire. Ces spores peuvent se former par voie asexuée ou sexuée (Jennings & Lysek, 1999) (Fig. 02).

1.2.1 Reproduction asexuée

La reproduction asexuée des champignons se fait sans fusion de gamètes. Elle correspond majoritairement à la dispersion de spores asexuées, permettant la propagation des champignons afin de coloniser d'autres substrats (Moulinier, 2002). Ces spores sont produites

soit dans des structures appelées sporocystes, soit à partir des cellules des hyphes appelées cellules conidiogènes (Dufresne, 2021).

1.2.2 Reproduction sexuée

Comme chez les autres organismes vivants, la reproduction sexuée chez les champignons implique la fécondation, aboutissant à l'union de deux noyaux. Le cycle sexué des champignons se déroule en trois étapes : plasmogamie, caryogamie et méiose (Jennings et Lysek, 1996). La plasmogamie correspond à la fusion cytoplasmique entre deux cellules haploïdes, créant une cellule contenant deux noyaux haploïdes distincts, appelée dicaryon. Les deux noyaux fusionnent lors de la caryogamie pour former un noyau diploïde, puis la méiose convertit ce noyau diploïde en quatre noyaux haploïdes (Carlile *et al.*, 2001).

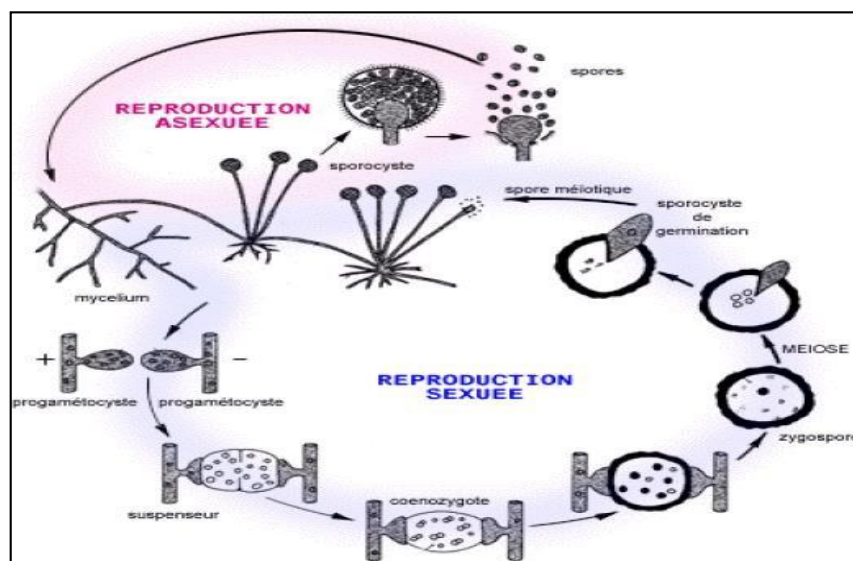


Figure 2. Multiplication végétative (en haut du schéma), et le cycle monogénétique halophasique, du genre *Mucor* (en bas du schéma) (Roland et Vian, 1985).

1.3 Structure de l'appareil végétatif et cellulaire

Les champignons peuvent être unicellulaires (levures), ou bien pluricellulaires (champignons filamenteux) (Bueno & Silva, 2014). L'appareil végétatif des champignons pluricellulaire, aussi appelé thalle est composé de filaments tubulaires appelés hyphes qui forment l'unité structurelle de base des champignons (Carlile *et al.*, 2001). Ces hyphes forment un réseau dense connu sous le nom de mycélium, qui constitue la principale structure du champignon, responsable de l'absorption des nutriments depuis le substrat. Cet appareil végétatif peut être très complexe, avec différentes structures cellulaires adaptées à la croissance, la reproduction et la survie dans des environnements variés (Alexopoulos *et al.*, 1996). En effet, les hyphes peuvent être tubulaires multicellulaires (septés) c'est-à-dire divisés par des cloisons transversales appelées septa, qui séparent les cellules individuelles, ou bien coenocytiques (non compartimentés ou non septés) dans les quels il n'y a pas de séparation

entre les cellules, et le cytoplasme, avec plusieurs noyaux, circule librement (Moore *et al.*, 2000)

Les hyphes sont entourés d'une paroi cellulaire rigide principalement composée de chitine, un polysaccharide qui donne à la cellule sa structure et sa résistance (Lenardon *et al.*, 2010)

Les cellules des hyphes, qu'elles soient septées ou non, contiennent les éléments cellulaires habituels présents dans les cellules eucaryotes tels que le noyau, les vacuoles, Mitochondries, Réticulum endoplasmique et appareil de Golgi (Kendrick, 2000).

1.4 Classification des champignons

Les champignons constituent un règne du vivant regroupant environ 99 000 espèces réparties en une dizaine de phylums, dont la classification est régulièrement révisée (Blackwell, 2011; Hibbett *et al.*, 2007; James *et al.*, 2006). Parmi ces phylums, les principaux sont les Chytridiomycota, les Zygomycota, les Glomeromycota, les Basidiomycota et les Ascomycota. Ces deux derniers, classés dans le sous-règne des Dikarya, rassemblent la grande majorité des espèces décrites (Fig. 3).

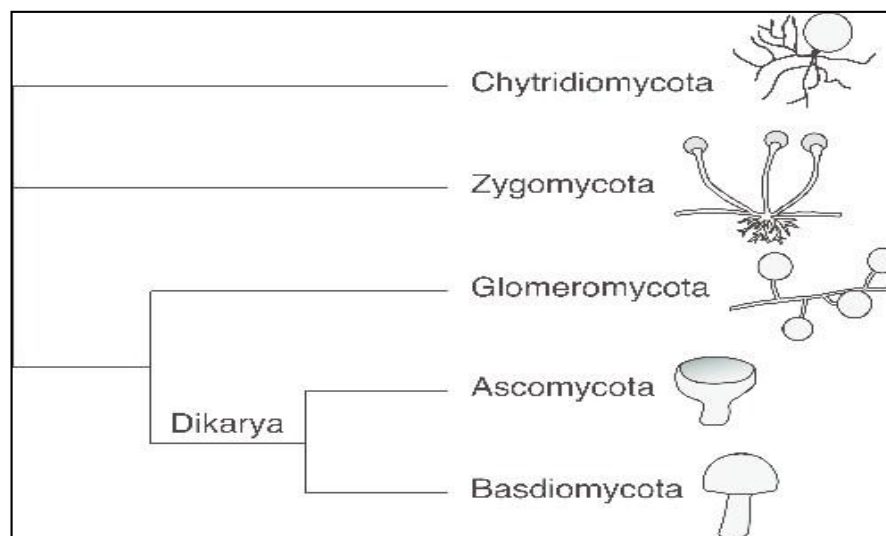


Figure 3. Arbre phylogénétique simplifié des champignons montrant les cinq principaux embranchements actuellement définis. Pour chaque embranchement, un exemple morphologique typique est présenté (Bindschedler *et al.*, 2016)

1.4.1 Chytridiomycota

D'après Jennings et Lysek (1996), les organismes de ce phylum sont les seuls champignons à posséder des spores uniflagellées (zoospores). C'est la lignée évolutive la plus ancienne des champignons (James *et al.*, 2006), constituant un clade polyphylétique qui a des positions basales qui n'ont jamais été clairement établies et supportées de façon robuste

(James *et al.*, 2006). Les organismes de ce phylum sont souvent microscopiques, mais peuvent aussi produire le mycélium. La plupart des chytrides sont saprotrophes, aérobies ou anaérobies, et capables de dégrader un grand nombre de substrats (Shearer *et al.*, 2007) (Fig. 4).

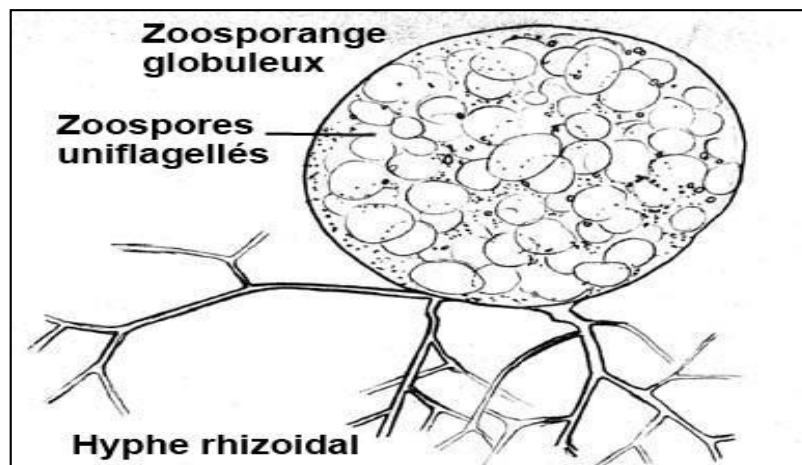


Figure 4. Structure d'une Chytridiomycètes, *Chytridium confervae*¹

1.4.2 Zygomycota

Les Zygomycota sont un phylum de champignons principalement terrestres, souvent trouvés dans le sol, les débris végétaux et les matières en décomposition. Ce phylum comprend environ 1 060 espèces réparties dans deux sous-phylums : les Mucoromycotina et les Entomophthoromycotina (Spatafora *et al.*, 2016). Les Zygomycètes sont caractérisés par la formation de zygospores résultant de la fusion de gamétanges haploïdes. Les hyphes sont généralement coenocytiques, c'est-à-dire qu'ils contiennent de nombreux noyaux non séparés par des cloisons transversales (Voigt & Kirk, 2014). Ces champignons peuvent être saprotrophes, parasites ou symbiotiques. Un exemple bien connu de Zygomycète est *Rhizopus stolonifer*, le champignon du pain (Benny *et al.*, 2001) (Fig. 5).

¹ https://www.researchgate.net/figure/Structure-dune-Chytridiomycetes-Chytridium-confervae_fig1_281035050

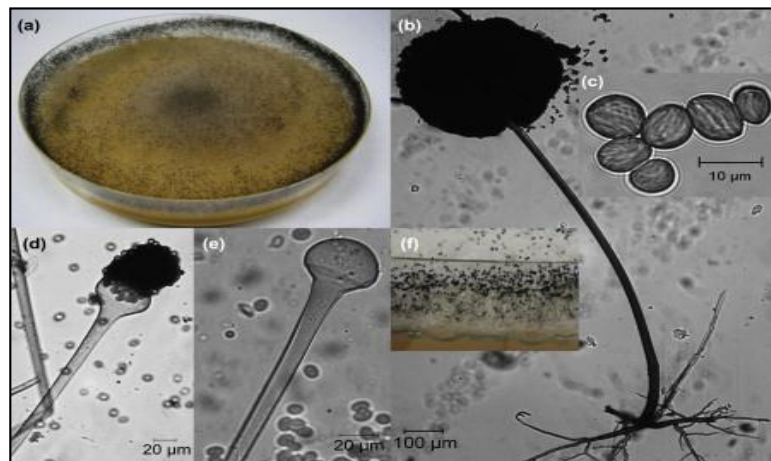


Figure 5. Morphologie de *Rhizopus stolonifer* (Ehrenberg) Vuillemin 1902 (Mucorales). (Voigt & Kirk, 2014).

1.4.3 Glomeromycota

Historiquement, les organismes de ce phylum étaient placés au sein des Zygomycota, dans l'ordre des Glomérales, un groupe de champignons mycorhiziens à arbuscules (Morton et Benny, 1990) (Morton & Benny, 1990). Une analyse phylogénétique du gène codant pour l'ARNr 18S a démontré la morphologie unique des champignons mycorhiziens à arbuscules, ce qui a conduit à l'érection d'un nouveau phylum : les Glomeromycota (Schüßler *et al.*, 2001). Les espèces de ce phylum présentent un mode de vie symbiotique, établissant une association mycorhizienne arbusculaire avec leur hôte. Quinze familles et 38 genres ont été décrits. Les espèces les plus connues appartiennent à la famille des Glomeraceae, dont le genre *Glomus* est le plus utilisé dans les travaux d'expérimentation (Mechiah, 2015) (Fig. 6).



Figure 6. Le genre *Glomus* du Phylum Glomeromycota²

² <https://biology-forums.com/index.php?action=gallery;sa=view;id=809>

1.4.4 Dikarya (Ascomycota et Basidiomycota)

Les phylums Ascomycota et Basidiomycota forment le groupe des Dikarya et représentent la majorité des espèces de champignons décrites, soit environ 67 000 espèces sur les 100 000 recensées (Taylor *et al.*, 2004). L'appareil végétatif de ces deux phylums est septé, c'est-à-dire que leurs hyphes sont divisés par des cloisons transversales appelées septa (Alexopoulos *et al.*, 1999) (Fig. 7).

Les Basidiomycota regroupent environ 22 000 espèces décrites (Taylor *et al.*, 2000). Leur mode de vie est principalement saprophyte, et ils possèdent les capacités de dégradation de matériel ligno-cellulosique les plus élaborées (Hibbett & Donoghue, 2001). On trouve également des organismes symbiotiques de plantes ou parasites d'animaux dans ce phylum.

Les Ascomycota comptent environ 45 000 espèces décrites à ce jour (Hawksworth, 2001; Taylor *et al.*, 2000) et constituent la quasi-totalité des champignons capables de former des associations lichéniques. Les modes de vie saprophytes et parasites sont également largement répandus chez ces organismes. On y retrouve aussi des champignons utilisés en agroalimentaire (comme *Saccharomyces cerevisiae*) ou en pharmacologie (comme *Penicillium chrysogenum*).

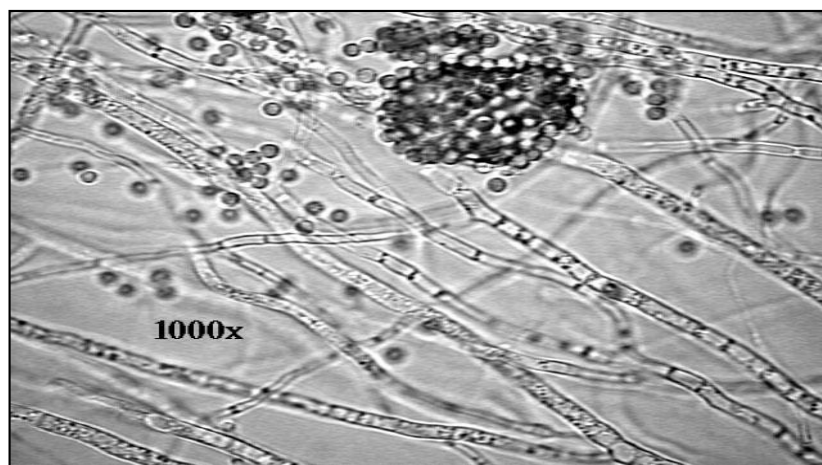


Figure 7. Conidies et hyphes septés du genre *Penicillium*³

1.5 Les champignons épiphytes et endophytes

Les champignons, avec leur diversité de modes de vie, de mécanismes de reproduction et de rôles écologiques, occupent une multitude de niches écologiques. Parmi ces diverses stratégies de survie et d'interaction, les champignons épiphytes et endophytes méritent une attention particulière. Les champignons épiphytes, qui vivent à la surface des plantes, jouent un rôle dans les interactions avec les hôtes en créant des microhabitats sur les tissus végétaux (Schulz & Boyle, 2005). En revanche, les champignons endophytes adoptent un mode de vie

³ <https://search.library.wisc.edu/digital/APAGZD7RQNHTWF8L>

unique en colonisant les tissus internes des plantes sans provoquer de symptômes apparents de maladie, contribuant ainsi à la santé et à la défense des plantes (Arnold *et al.*, 2003; Carrol, 1988) (Arnold, 2007; Carroll, 1988).

1.5.1 Champignons épiphytes

1.5.1.1 Généralités

Les champignons Les champignons épiphytes jouent un rôle clé dans les écosystèmes végétaux. Les phyllosphères, c'est-à-dire les surfaces des feuilles, sont colonisées par une grande diversité de micro-organismes épiphytes (Lindow & Brandl, 2003). Ces micro-organismes proviennent de multiples sources, telles que l'atmosphère, l'eau, le sol, ainsi que des insectes et d'autres animaux (Whipps *et al.*, 2008). Bien que la majorité des champignons épiphytes dépendent des nutriments provenant de l'atmosphère ou exsudés par les feuilles, agissant ainsi souvent comme des décomposeurs, ils ne causent généralement pas de symptômes visibles de maladie chez la plante hôte. Au contraire, ils établissent fréquemment des relations mutualistes, apportant divers bénéfices à leur hôte végétal (Xu *et al.*, 2020).

1.5.1.2 La diversité des champignons épiphytes

Selon Pie *et al.* (2023), la diversité des microorganismes épiphytes joue un rôle crucial dans la santé et la qualité des plantes. La composition du microbiome, qu'il soit endophyte ou épiphyte, est étroitement liée à l'environnement de la plante et aux espèces présentes (Pie *et al.*, 2023). Ces microorganismes contribuent à la production d'hormones de croissance et à l'acquisition de nutriments par la plante. En retour, les plantes s'adaptent aux conditions environnementales grâce à ces communautés microbiennes (Hongsanant *et al.*, 2016).

La croissance des champignons épiphytes est influencée par des facteurs environnementaux tels que la vitesse du vent, la température, l'humidité relative et l'ensoleillement, plutôt que par les caractéristiques de la plante-hôte (Yin *et al.*, 2024).

La présence des champignons épiphytes est également influencée par la disponibilité des nutriments, l'humidité, l'âge et le type de feuille, ainsi que la présence d'inhibiteurs, ainsi, leur colonisation des feuilles est un processus dynamique, *et alors* leur présence étant modulée par des facteurs abiotiques plutôt que par les caractéristiques intrinsèques de l'hôte végétal, par exemple, la croissance de ces champignons est favorisée par des niveaux d'humidité élevés et des températures modérées (Pardow *et al.*, 2012).

1.5.2 Champignons endophytes

1.5.2.1 Définition

Le terme "endophyte" provient du grec et signifie étymologiquement "à l'intérieur d'une plante". Il a été utilisé et défini pour la première fois en 1866 par De Bary comme un organisme colonisant asymptomatiquement un végétal (Oulhen *et al.*, 2016). Les champignons endophytes constituent un groupe polyphylétique très diversifié, principalement composé d'espèces appartenant au phylum Ascomycota. Toutes les plantes dans les écosystèmes naturels semblent établir des relations avec des champignons endophytes (Rodriguez *et al.*, 2009). Carroll (1988) a défini les endophytes comme "des champignons mutualistes qui colonisent les parties aériennes des tissus végétaux vivants et ne provoquent pas de symptômes de maladie" (Carroll, 1988). Petrini (1991) a proposé une extension de cette définition pour inclure "tous les organismes vivant dans les organes végétaux qui, à un certain moment de leur vie, peuvent coloniser les tissus végétaux internes sans causer de dommages apparents à l'hôte". Par ailleurs, Bacon et White (2000) donnent une définition inclusive et largement acceptée des endophytes : "des microbes qui colonisent les tissus internes vivants des plantes sans causer d'effets négatifs immédiats, ce qui inclut pratiquement tous les organismes à l'intérieur d'une plante hôte" (Selim *et al.*, 2012).

Bien que colonisant l'intérieur des plantes, les champignons endophytes sont acceptés par le système immunitaire de leur hôte, probablement à la suite d'une longue coévolution (Petrini, 1991).

Les champignons endophytes sont ubiquistes car ils ont été détectés dans pratiquement toutes les espèces de plantes et une même espèce de champignon endophyte est capable de coloniser plusieurs hôtes différents (Rodriguez *et al.*, 2009).

1.5.2.2 La diversité des champignons endophytes

Les champignons endophytes forment un groupe très diversifié, principalement issu du phylum des Ascomycètes, mais comprenant également des représentants d'autres taxons tels que les Deutéromycètes, Basidiomycètes et Zygomycètes (Saar *et al.*, 2001). Les estimations indiquent qu'il pourrait exister environ un million d'espèces de champignons endophytes, basées sur les ratios espèces fongiques-plantes (Sun et Guo, 2012). Cependant, ce chiffre pourrait être beaucoup plus élevé, étant donné que seule une fraction des espèces fongiques (environ 5%) a été décrite jusqu'à présent (Chávez *et al.*, 2015)

Les champignons endophytes ne sont pas limités à un type spécifique de plante ou d'environnement. Ils ont été détectés dans une grande variété d'espèces végétales, y compris les algues marines, les fougères, les lichens, les mousses et les plantes vasculaires (Amend *et al.*, 2019; Deutsch *et al.*, 2021; Tan & Zou, 2001). Leur présence a également été observée dans des plantes provenant de régions tropicales, subtropicales, tempérées et boréales (Zhang *et al.*, 2006).

Les variations géographiques sont un facteur clé contribuant à la diversité des champignons endophytes. Les souches isolées d'un même hôte végétal peuvent varier considérablement d'une région à l'autre (Collado *et al.*, 1999). En général, les champignons endophytes semblent être plus diversifiés dans les zones tropicales que dans les régions tempérées ou froides (Fisher *et al.*, 1995; Arnold *et al.*, 2007) (Arnold, 2007).

L'âge de la plante hôte influe également sur la diversité des champignons endophytes. Les plantes âgées hébergent généralement plus d'endophytes dans leurs tissus que les plantes jeunes (Arnold, 2007).

(Stone *et al.*, 2000) La colonisation des tissus internes des plantes par les endophytes peut se faire de trois manières (Fig. 8) (Stone *et al.*, 2000):

- Intracellulaire : Limitée à quelques cellules spécifiques.
- Intercellulaire : Localisée ou systémique.
- À la fois intra- et intercellulaire.

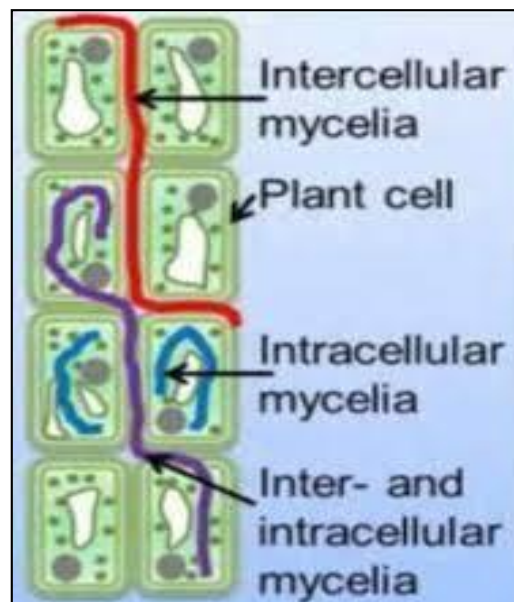


Figure 8. Modes de croissance des champignons endophytes dans les tissus des plantes hôtes (Kusari *et al.*, 2012).

1.5.2.3 Modes de transmission des champignons endophytes

Le mode de transmission est le moyen par lequel le champignon endophyte peut coloniser un autre individu végétal à partir de l'hôte initial, deux modes de transmission sont observés chez ces derniers, à savoir la transmission verticale et horizontale.

La transmission verticale : Ce mode implique la colonisation d'un nouvel hôte à partir de la progéniture de l'hôte primaire. Il se fait par la pénétration d'un hyphes de champignon endophyte dans une graine, un grain de pollen ou une autre propagule de la plante hôte (Frank

et al., 2017). Ce mode permet la contamination de la descendance de l'hôte primaire. Le champignon reste génétiquement identique (reproduction asexuée) mais peut coloniser soit un clone (colonisation d'une propagule), soit un nouvel individu génétiquement différent (colonisation d'un grain de pollen ou d'une graine) (Manoharachary *et al.*, 2005). La transmission verticale par la graine a principalement été observée chez certaines espèces de champignons endophytes de la famille des Clavicipitaceae, qui colonisent les Poaceae, Cypéraceae et Juncaceae (Manoharachary & D Dr, 2016). Cependant, d'autres espèces d'endophytes ont été observées dans diverses espèces non graminoides, par exemple *Pinus spp.*, *Vigna unguiculata*, *Theobroma cacao*, *Castanea spp.*, *Colophospermum mopane* (Tintjer *et al.*, 2008).

La transmission horizontale : Ce mode concerne la colonisation d'un nouvel hôte, souvent sans lien direct avec l'hôte primaire (Tintjer *et al.*, 2008). Il se fait par la dissémination de spores par un vecteur de dispersion. Après germination, l'hye pénètre le nouvel hôte soit par les stomates, soit par pénétration directe à travers l'épiderme (Petrini, 1991). La majorité des espèces d'endophytes, qui colonisent une grande partie des végétaux, présentent ce mode de transmission. Les spores peuvent provenir de la reproduction sexuée ou asexuée du champignon (Frank *et al.*, 2017).

1.5.2.4 Relation du mycoendophyte avec l'espèce hôte

La spécificité de l'hôte, la récurrence de l'hôte, la sélectivité de l'hôte et la préférence d'hôte sont des aspects clés des relations entre les champignons endophytes et les plantes (Zhou & Hyde, 2001).

- Spécificité de l'hôte : Relation entre un champignon et un seul hôte ou un groupe d'hôtes apparentés, mais pas avec d'autres plantes dans le même habitat (Huang *et al.*, 2001).
- Récurrence de l'hôte : Fréquence ou prédominance d'un champignon sur une plante ou un groupe de plantes, mais pouvant aussi se produire, bien que rarement, sur d'autres plantes dans le même habitat (Zhou & Hyde, 2001)(Zhou et Hyde, 2001). Lorsque le champignon se lie avec deux espèces de plantes apparentées mais préfère l'une d'elles, on parle de sélectivité de l'hôte (Zhou et Hyde, 2001; Cohen, 2006).
- Préférence de l'hôte : Dominance ou occurrence unique d'un champignon sur un hôte particulier, et différences dans la composition des communautés fongiques et la fréquence d'isolement des différentes plantes hôtes (Suryanarayanan et Kumaresan, 2000; Bettucci *et al.*, 2004; Zhou et Hyde, 2001; Cohen, 2006).
- Spécificité des tissus : Certains champignons endophytes se trouvent dans des parties spécifiques de la plante telles que les racines, les feuilles ou les brindilles, tandis que d'autres peuvent infecter plusieurs de ces parties. Par exemple, des espèces systémiques comme *Neotyphodium* et *Epichloë* infectent les espaces intercellulaires des feuilles, les tiges reproductives et les graines de leurs hôtes, et peuvent être isolés à partir de différentes parties de la même plante (Zabalgozcoa, 2008). Des différences dans l'assemblage des champignons endophytes ont été observées dans

différents tissus de la même espèce végétale ou même dans les différents tissus d'une plante unique, indiquant une spécificité des tissus pour certains champignons endophytes (Ganley et Newcombe, 2006; Collado *et al.*, 2011). La chimie des tissus peut parfois altérer la colonisation par différents champignons endophytes. Cependant, certains endophytes peuvent tolérer les toxines produites par l'hôte, ce qui affecte l'abondance, la diversité et la composition des communautés fongiques (Hammerschmidt, 1999; Osbourn, 1999; VanEtten *et al.*, 2001; Osbourn *et al.*, 2003).

1.5.2.5 Classification des champignons endophytes

Les champignons endophytes se divisent en deux grands groupes, différents par leur taxonomie, leurs hôtes, leur mode de transmission et de colonisation, leurs spécificités tissulaires et leurs fonctions écologiques : les endophytes Clavicipitaceae et non-Clavicipitaceae. Ces deux groupes sont à leur tour divisés en quatre classes (Rodriguez *et al.*, 2009).

Endophytes Clavicipitaceae (Classe 1)

- Les endophytes de cette classe appartiennent à la famille Clavicipitaceae (Ascomycota), qui comprend actuellement 37 genres. Quatre d'entre eux possèdent des espèces endophytiques : *Balansia*, *Epichloë*, *Ephelis* et *Neotyphodium* (Sénéquier- Crozet & Canard, 2016). Ils colonisent principalement les tiges et les rhizomes (Rodriguez *et al.*, 2009).

Endophytes non-Clavicipitaceae

Ce groupe très diversifié phylogénétiquement appartient principalement aux Ascomycota. Ils ont été isolés à partir de toutes les plantes étudiées dans tous les écosystèmes terrestres, allant des tropiques à la toundra. Ils sont divisés en trois classes, selon le type de colonisation, le mécanisme de transmission et les avantages conférés à leur hôte (Rodriguez *et al.*, 2009).

Classe 2

- Ces endophytes appartiennent au règne des Dikarya, principalement aux Ascomycota (uniquement des Pezizomycotina), mais comprennent également quelques représentants des Basidiomycota (Agaricomycotina, Pucciniomycotina) (Sénéquier- Crozet & Canard, 2016). Ils colonisent principalement les racines (Rodriguez *et al.*, 2009).

Classe 3

- Cette classe inclut principalement les Pezizomycotina (familles des Sordariomycetes, Dothideomycetes, Pezizomycetes et Eurotiomycetes), ainsi que des Basidiomycota, plus souvent présents dans les tissus ligneux que dans les tissus foliaires. Ils peuvent coloniser en grand nombre les parties aériennes des plantes (Sénéquier-Crozet & Canard, 2016), et se retrouvent principalement dans les tiges (Rodriguez *et al.*, 2009).

Classe 4

- Cette classe n'est pas encore clairement établie. Les membres potentiels de cette classe appartiendraient aux Ascomycota du sous-embranchement des Pezizomycotina, notamment aux ordres des Pleosporales, Pezizales et Helotiales. Ils sont associés à des arbustes ou des arbres et colonisent uniquement les racines des plantes (Sénéquier-Crozet & Canard, 2016). Ils se trouvent principalement dans les racines (Rodriguez *et al.*, 2009)

1.5.2.6 Intérêt et rôle des champignons endophytes

Les champignons endophytes jouent des rôles écologiques et économiques significatifs. Ils sont reconnus pour :

- **Amélioration de la tolérance au stress** : Ils aident leurs plantes hôtes à tolérer divers stress abiotiques tels que la sécheresse, la salinité et les températures extrêmes en améliorant la régulation hydrique et la résistance aux conditions défavorables (Rodriguez *et al.*, 2009).
- **Protection contre les pathogènes** : Ils peuvent produire des composés bioactifs qui protègent les plantes contre les pathogènes et les herbivores en agissant comme agents de biocontrôle naturels (Arnold, 2007).
- **Promotion de la croissance des plantes** : Certains champignons endophytes stimulent la croissance des plantes en améliorant l'absorption des nutriments ou en produisant des phytohormones telles que les auxines et les cytokinines (Tan & Zou, 2001).

1.5.3 Relation épiphytes et endophytes

Les épiphytes peuvent se transformer en endophytes grâce à divers mécanismes qui facilitent leur colonisation interne des plantes hôtes. Ce processus est significatif car il permet à ces micro-organismes d'exploiter les ressources de la plante tout en pouvant améliorer la santé de celle-ci.

Mécanismes de Transition :

- Points d'entrée : Les épiphytes peuvent pénétrer dans les tissus des plantes par des ouvertures naturelles telles que les stomates, les blessures ou les systèmes racinaires, établissant une relation symbiotique sans causer de dommages (Patil et al., 2023).
- Adaptation génétique : Au fil du temps, les épiphytes peuvent subir des modifications génétiques qui leur permettent de prospérer dans l'environnement interne de la plante, menant à un mode de vie endophyte stable) (Ghasemnezhad et al., 2021).
- Production de métabolites : Les épiphytes et les endophytes produisent tous deux des composés bioactifs qui peuvent bénéficier à la plante hôte, tels que des agents antimicrobiens et des substances favorisant la croissance, ce qui peut faciliter leur intégration dans le microbiome de la plante (Anand et al., 2023).

Bien que la transition de l'épiphyte à l'endophyte soit bénéfique, il est essentiel de considérer que tous les épiphytes ne parviendront pas à s'établir comme endophytes, car les conditions environnementales et les réponses des plantes hôtes peuvent varier

1.6 Les Champignons Marins : diversité, écologie et applications

Les champignons marins représentent un domaine de recherche captivant en raison de leur rôle écologique crucial et de leur potentiel d'applications dans divers domaines (Burgaud *et al.*, 2022). Ils jouent un rôle clé dans les écosystèmes marins, notamment en contribuant à la décomposition de la matière organique et au recyclage des nutriments (Jones & Pang, 2012).

La première description d'un champignon exclusivement marin, *Phaeosphaeria typharum*, est attribuée à Desmazières en 1849. Cependant, l'étude systématique des champignons marins a véritablement commencé en 1944 avec la publication de Barghoorn et Linder, qui ont décrit des champignons isolés de mangroves se développant sur le bois en décomposition (Barghoorn *et al.*, 1944).

Dans les années 1960, un champignon était qualifié de marin s'il pouvait se développer en présence de sels marins (Schwartz, 1963). Cependant, cette définition basée sur une caractéristique physiologique a été révisée par Kohlmeyer et Kohlmeyer (1979), qui ont introduit une dimension écologique. Ainsi, deux groupes ont été définis : (i) les champignons dits obligatoires, qui se développent, sporulent et se reproduisent exclusivement dans un milieu marin, et (ii) les champignons dits facultatifs, d'origine terrestre ou d'eau douce, capables de se développer et de sporuler en milieu marin. Cette définition dichotomique a été largement acceptée (Jones, 2011). Selon cette classification, environ 1 112 espèces de champignons marins obligatoires ont été décrites, bien que le nombre estimé de champignons marins dépasse les 10 000 espèces (Jones, 2011).

Les champignons marins sont également connus pour produire une variété de composés bioactifs avec des applications potentielles en médecine, en agriculture et en biotechnologie (Raghukumar, 2017). Malgré ces découvertes prometteuses, la connaissance de la diversité de

la microflore fongique océanique reste encore embryonnaire. Cette lacune est en partie due à la notion prévalente que les champignons sont principalement des organismes terrestres en raison de leur histoire évolutive (Richards *et al.*, 2012). Toutefois, au cours des vingt dernières années, des recherches ont mis en évidence le potentiel des champignons marins pour isoler des molécules utiles, soulignant leur importance pour les applications industrielles et pharmaceutiques (Pang *et al.*, 2016). ces organismes habitent divers écosystèmes incluant les mangroves, les océans et les zones littorales (Hyde *et al.*, 2000), colonisant ainsi plusieurs organismes tels que les herbiers marins, les algues, les invertébrés, les bois flottants, les sédiments, et l'écume de mer (Poli *et al.*, 2022), en adoptant principalement trois modes de vie : la symbiose, le parasitisme et le saprophytisme.

Bien que le nombre d'études sur les champignons marins soit encore limité, la plupart des recherches se sont concentrées sur la zone littorale (Shearer *et al.*, 2007). Les études sur les champignons océaniques ont révélé la présence d'Eumycota filamenteux (principalement du phylum Ascomycota) et de levures (majoritairement du phylum Basidiomycota), ces groupes étant les plus répandus (Kohlmeyer & Kohlmeyer, 1979). Les champignons du phylum Zygomycota semblent être absents des écosystèmes marins (Shearer *et al.*, 2007). Il est évident que de nombreux substrats et milieux marins restent à explorer pour évaluer la diversité fongique, et l'inventaire de la flore fongique marine pourrait révéler de nouveaux taxons et réévaluer la diversité fongique, probablement sous-estimée (Hawksworth, 2001).

En 1979, Kohlmeyer et Kohlmeyer avaient observé que certains champignons pouvaient se développer dans des environnements marins profonds et s'adapter à des pressions élevées. Cependant, les données sur les champignons des grands fonds restent limitées. La plupart des publications sur les écosystèmes océaniques profonds ont principalement étudié les levures (Nagahama *et al.*, 2001), et peu d'espèces de champignons filamenteux ont été recensées. Des levures et des champignons filamenteux barophiles ont été isolés de sédiments marins profonds (Raghukumar & Raghukumar, 1988; Damare *et al.*, 2006).

Très récemment, un grand nombre de phylotypes fongiques des phyla Ascomycota et Basidiomycota ont été détectés dans la Méditerranée (Poli *et al.*, 2020). Il a été proposé que la fréquence d'isolement des levures diminue avec la profondeur de l'échantillonnage : les levures du phylum Ascomycota seraient majoritaires dans les eaux peu profondes, tandis que celles du phylum Basidiomycota prédomineraient dans les grandes profondeurs (Munn, 2004).

Chapitre 02. La posidonie

2.1 Introduction

Les herbiers marins sont un groupe exceptionnel de plantes à fleurs ayant complètement adapté leur vie à l'immersion sous-marine, exerçant une influence significative sur les écosystèmes côtiers en modifiant leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques (Orth *et al.*, 2006). Ces plantes jouent un rôle crucial en tant qu'ingénieurs écologiques, offrant de nombreux services écologiques essentiels (Pergent-Martini *et al.*, 2005). Bien que les herbiers marins soient répartis à l'échelle mondiale, ils représentent un groupe relativement restreint et diversifié au sein des angiospermes, comprenant environ 60 à 70 espèces réparties en quatre familles : Posidoniaceae, Zosteraceae, Hydrocharitaceae et Cymodoceaceae (Les *et al.*, 1997), contre environ 250 000 espèces terrestres (Brock *et al.*, 2003). Pour prospérer sous l'eau, les herbiers marins ont développé des adaptations uniques en termes d'écologie, de physiologie et de morphologie (Beer & Koch, 1996).

Posidonia oceanica appartenant à la famille des Posidoniaceae, est une plante marine endémique de la mer Méditerranée, souvent considérée comme l'une des espèces les plus importantes de cet écosystème. Cette phanérogame marine, souvent confondue avec les algues, est en réalité une plante à fleurs, dotée de feuilles rubanées pouvant atteindre plus d'un mètre de longueur (Pergent-Martini *et al.*, 2005). Les herbiers de *P. oceanica* forment des prairies sous-marines denses, ancrées dans les fonds marins par des rhizomes robustes et étendus. Ces rhizomes jouent un rôle crucial non seulement dans la stabilisation des sédiments marins, mais aussi dans la propagation clonale de la plante, permettant une expansion lente mais continue des herbiers (C. F. Boudouresque *et al.*, 2006).

Posidonia oceanica se distingue également par sa longue durée de vie et sa croissance extrêmement lente, avec certains rhizomes vivant plusieurs centaines d'années, voire plus d'un millénaire (Arnaud *et al.*, 2002). Cette longévité exceptionnelle est l'une des raisons pour lesquelles *P. oceanica* est considérée comme une espèce clé pour la conservation de la biodiversité en Méditerranée. En plus de sa longévité, *P. oceanica* est connue pour sa production de matières organiques, notamment à travers la formation de "matte", une structure complexe composée de rhizomes, de racines, et de sédiments, qui peut s'accumuler sur plusieurs mètres d'épaisseur au fil des siècles (Mateo & Romero, 1997). De plus, cette espèce possède une capacité d'adaptation physiologique remarquable, lui permettant de survivre dans des conditions environnementales variées, bien que son optimum soit en eaux claires et peu profondes, où elle peut bénéficier d'une lumière solaire abondante pour la photosynthèse (Nakaoka, 2005).

2.2 Distribution de *P.oceanica* dans le milieu marin

2.2.1 Répartition horizontale

Posidonia oceanica est présente exclusivement dans le bassin méditerranéen, où elle occupe une vaste étendue côtière le long de plusieurs pays riverains. On trouve cette espèce le long des côtes de l'Espagne, de la France, de l'Italie, de la Grèce, de la Turquie, ainsi que dans les eaux entourant les îles Baléares, la Corse, la Sardaigne, la Sicile, Chypre, et Malte. Elle est également présente sur les côtes de l'Afrique du Nord, notamment en Tunisie, en Algérie, et au Maroc (Pergent-Martini *et al.*, 2005). En Croatie et en Slovénie, les herbiers de *P. oceanica* sont également bien développés et constituent un élément clé des écosystèmes marins locaux (UNEP/MAP, 2017) (Fig. 9).

Il est important de noter que la superficie totale occupée par les herbiers de posidonie en Méditerranée est estimée entre 25 000 et 50 000 km² (Houngnandan *et al.*, 2020). Cependant, ce chiffre est en constante évolution, principalement en raison des pressions anthropiques croissantes sur le milieu marin méditerranéen.

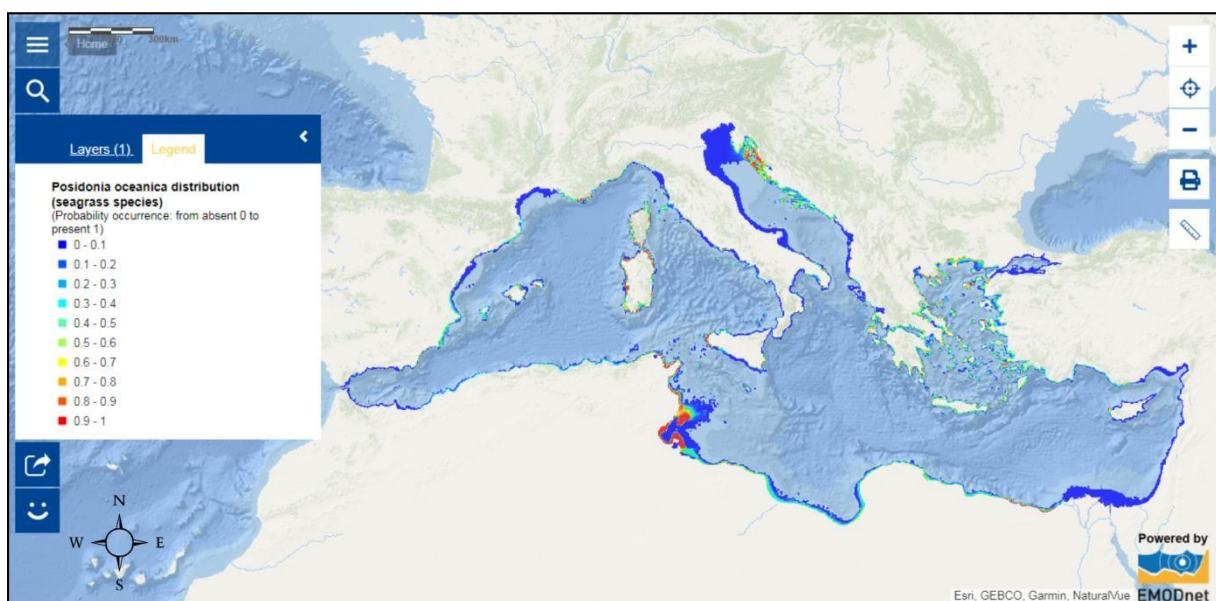


Figure 9. Distribution géographique de *P.oceanica*⁴

2.1.1 Répartition verticale

La répartition verticale de la posidonie est tout aussi remarquable que sa distribution horizontale. Cette plante marine peut se développer depuis la surface jusqu'à une profondeur de 40 mètres dans les eaux les plus claires (Tonielli *et al.*, 2016).

⁴https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/atlas/maritime_atlas/#lang=EN;p=w;bkgd=5;theme=631:0.75;c=833156.8139059972,4927319.214934402;z=5

Cependant, la distribution de la posidonie n'est pas uniforme et dépend fortement de plusieurs facteurs environnementaux. La qualité de l'eau, en particulier sa transparence, est un élément déterminant (Pergent-Martini *et al.*, 2005). Dans les zones où la turbidité est élevée, limitant ainsi la pénétration de la lumière, la profondeur maximale de développement de la posidonie est considérablement réduite (Duarte *et al.*, 1999).

La température de l'eau est un autre facteur déterminant, qui ne doit pas descendre en dessous de 10°C ou dépasser 28°C pour permettre une croissance optimale (Rinaldi *et al.*, 2023).

La salinité joue également un rôle crucial dans la répartition de cette espèce. La posidonie est absente des zones où la salinité est trop faible, comme à proximité des embouchures des grands fleuves (Mancuso *et al.*, 2023). Cette sensibilité aux variations de salinité explique en partie sa distribution discontinue le long de certaines côtes méditerranéennes.

2.3 Évolution et adaptation de *Posidonia oceanica*

L'évolution de *Posidonia oceanica* est le résultat d'un processus complexe d'adaptation qui a permis à cette plante de passer d'un environnement terrestre à un milieu marin. Ce processus, qui s'est déroulé sur des millions d'années, a conduit à des changements morphologiques, physiologiques, et reproductifs essentiels pour survivre dans un habitat aussi distinct que l'environnement marin (Orth *et al.*, 2006).

2.3.1 Origine terrestre et migration vers le milieu marin

Les ancêtres des phanérogames marines, y compris *Posidonia oceanica*, étaient initialement des plantes terrestres. Ces plantes ont migré vers des environnements aquatiques au cours du Crétacé, il y a environ 100 à 120 millions d'années (C. Boudouresque *et al.*, 2006). Ce passage des terres aux eaux côtières peu profondes a nécessité des ajustements évolutifs majeurs. Les phanérogames marines ont dû s'adapter à un milieu salin, ce qui a impliqué la sélection naturelle de traits qui permettent de tolérer la salinité élevée, de maintenir l'intégrité des cellules végétales, et de gérer les déséquilibres osmotiques (Orth, 2006).

2.3.2 Adaptations de *P. oceanica* au milieu marin

2.3.2.1 Adaptations Morphologiques

Posidonia oceanica est une plante marine complexe, avec une morphologie spécialisée qui lui permet de s'adapter et de prospérer dans les environnements marins méditerranéens. Cette espèce présente une structure en trois parties principales : les feuilles, les rhizomes et les racines (Fig. 10).

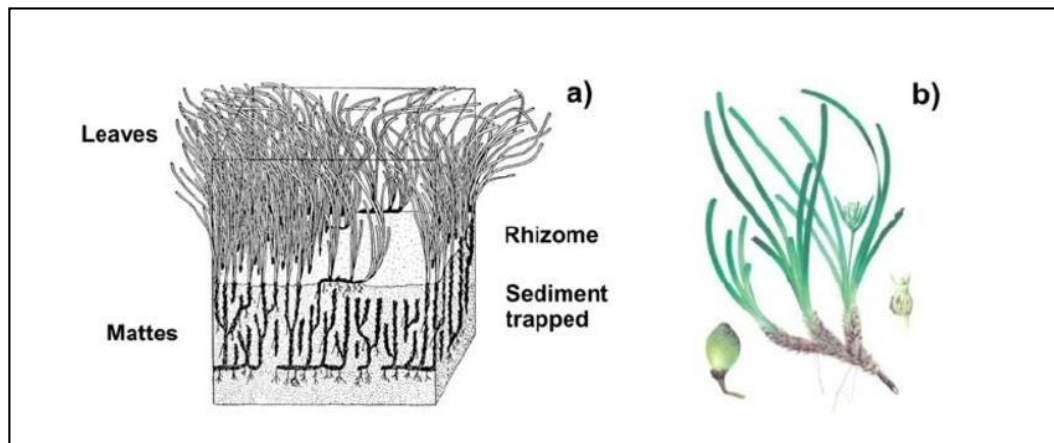


Figure 10. *Posidonia oceanica* : a) prairie (d'après Boudouresque et Meinesz, 1982) ; b) croquis de la plante avec fruit (Cavallaro *et al.*, 2011)

Les Feuilles

Les feuilles de *P. oceanica* sont longues, rubanées et aplaties, pouvant atteindre 1 à 1,5 mètre de longueur et environ 1 cm de largeur (Boudouresque *et al.*, 2006). Elles sont disposées en faisceaux denses à l'extrémité des rhizomes. Les feuilles sont organisées en trois zones : une base engainante, un limbe principal et une extrémité apicale souvent effilée. La couleur des feuilles varie du vert vif lorsqu'elles sont jeunes, au brunâtre lorsqu'elles vieillissent, avant de se détacher et de contribuer à la formation des "banquettes" de feuilles mortes sur les plages (Pergent-Martini *et al.*, 2005).

Les Rhizomes

Les rhizomes sont la partie souterraine ou semi-enterrée de la plante, jouant un rôle clé dans l'ancrage de *P. oceanica* au substrat marin et dans sa propagation clonale. Il existe deux types de rhizomes : les rhizomes horizontaux, qui s'étendent sous le substrat et permettent la colonisation de nouvelles zones, et les rhizomes verticaux, qui assurent la croissance en hauteur de l'herbier (Mateo & Romero, 1997). Ces rhizomes sont robustes et ligneux, avec un diamètre pouvant atteindre plusieurs centimètres. Leur croissance est extrêmement lente, contribuant à la formation de "matte", une accumulation de rhizomes, de racines et de sédiments sur plusieurs mètres d'épaisseur.

Les Racines

Les racines de *P. oceanica* se développent principalement à partir des rhizomes horizontaux et servent à ancrer fermement la plante dans le substrat marin, en particulier dans les sédiments meubles comme le sable ou la vase (Boudouresque *et al.*, 2006). Elles jouent également un rôle important dans l'absorption des nutriments nécessaires à la croissance de la plante. Les racines sont relativement courtes, mais nombreuses, formant un réseau dense qui aide à stabiliser le substrat et à limiter l'érosion (Boudouresque *et al.*, 2006).

Les Fleurs et Fruits

Posidonia oceanica est une plante à fleurs (phanérogame) qui produit des inflorescences sous-marines, généralement en automne. Les fleurs sont hermaphrodites et se présentent sous forme de petits épis cylindriques, peu visibles et dépourvus de pétales (Ott, 2008). Après la pollinisation, qui se fait par l'eau (hydrophilie), *P. oceanica* produit des fruits flottants appelés "olives de mer". Ces fruits, ovales et de couleur verte, contiennent une seule graine et sont disséminés par les courants marins (Hartog *et al.*, 2007).

2.3.2.2 Adaptations Physiologiques

Ces adaptations incluent des mécanismes de transport interne des gaz, des chloroplastes épidermiques, une pollinisation sous-marine et une dispersion marine (Sculthorpe, 1967) (Fig. 11).

- Tolérance à la Salinité : L'une des adaptations clés de *Posidonia oceanica* est sa capacité à tolérer des niveaux élevés de salinité. Les cellules de *Posidonia* ont développé des mécanismes pour réguler leur équilibre ionique et éviter la déshydratation, ce qui est essentiel pour survivre dans l'eau de mer (Touchette, 2007).
- Photosynthèse sous l'Eau : La capacité de *Posidonia* à photosynthétiser sous l'eau est une autre adaptation critique. La plante utilise une forme de chlorophylle efficace pour capter la lumière disponible, même à des profondeurs où l'intensité lumineuse est faible. Cela permet à *Posidonia* de prospérer à des profondeurs allant jusqu'à 40 mètres, là où d'autres plantes ne pourraient pas survivre (Alcoverro *et al.*, 2001).
- Cycle de vie et reproduction : Le cycle reproductif de *Posidonia* a également évolué pour s'adapter à la vie marine. Les fleurs de *Posidonia* sont hermaphrodites et la pollinisation se fait sous l'eau, ce qui est rare parmi les plantes. Les fruits, connus sous le nom d' "olives de mer", flottent à la surface avant de couler et de germer, une stratégie qui favorise la dispersion des graines sur de grandes (Balestri *et al.*, 1998).
- Enfin, la posidonie possède des mécanismes de défense contre les herbivores et les pathogènes marins. Ses tissus contiennent des composés chimiques qui la rendent peu appétissante pour de nombreux herbivores marins. De plus, elle est capable de produire rapidement des composés antimicrobiens en réponse à une infection, ce qui lui confère une résistance aux maladies (Davis et Wilson, 2018).

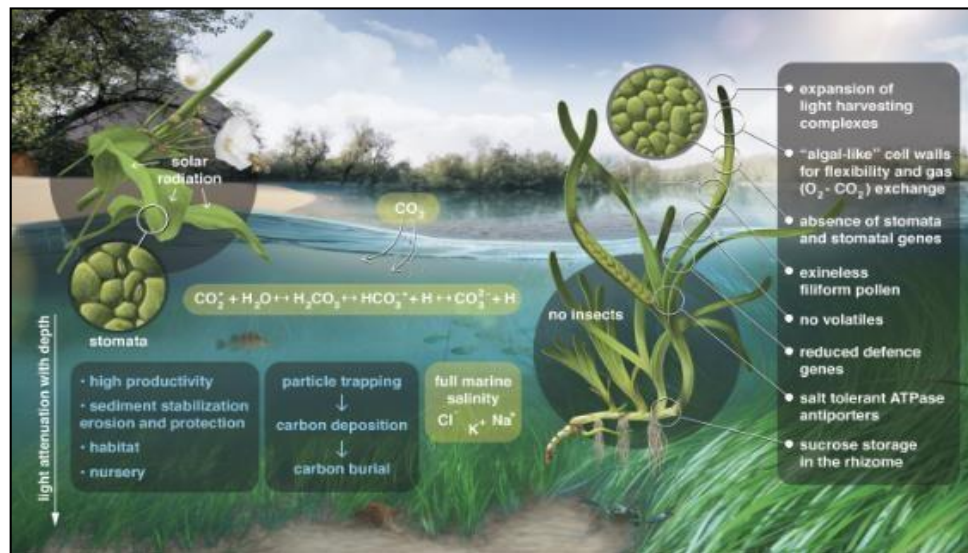


Figure 11. Adaptation physiologique des Phanérogames marines (Olsen *et al.*, 2016)

2.3.2.3 Reproduction de *P. oceanica*

La reproduction de *Posidonia oceanica* se fait de deux manières principales : par reproduction sexuée et par reproduction asexuée, chacune jouant un rôle essentiel dans la survie et la propagation de cette espèce dans les écosystèmes marins méditerranéens.

- Reproduction sexuée

Posidonia oceanica se reproduit sexuellement en produisant des fleurs et des fruits. Ce processus est relativement rare et se produit généralement à l'automne, entre septembre et octobre (Mazzella *et al.*, 1993). Les fleurs hermaphrodites de *P. oceanica* sont regroupées en inflorescences cylindriques et sont pollinisées par l'eau, un processus appelé pollinisation hydrophile, adapté aux conditions marines (Duarte & Sand-Jensen, 1990) (Fig. 12).

Après la pollinisation, la plante produit des fruits flottants, souvent appelés "olives de mer", qui contiennent une seule graine. Ces fruits sont dispersés sur de longues distances par les courants marins, permettant ainsi la colonisation de nouveaux habitats (Kuo & Hartog, 2006). La germination des graines a lieu lorsque celles-ci atteignent un substrat approprié, généralement en eaux profondes.

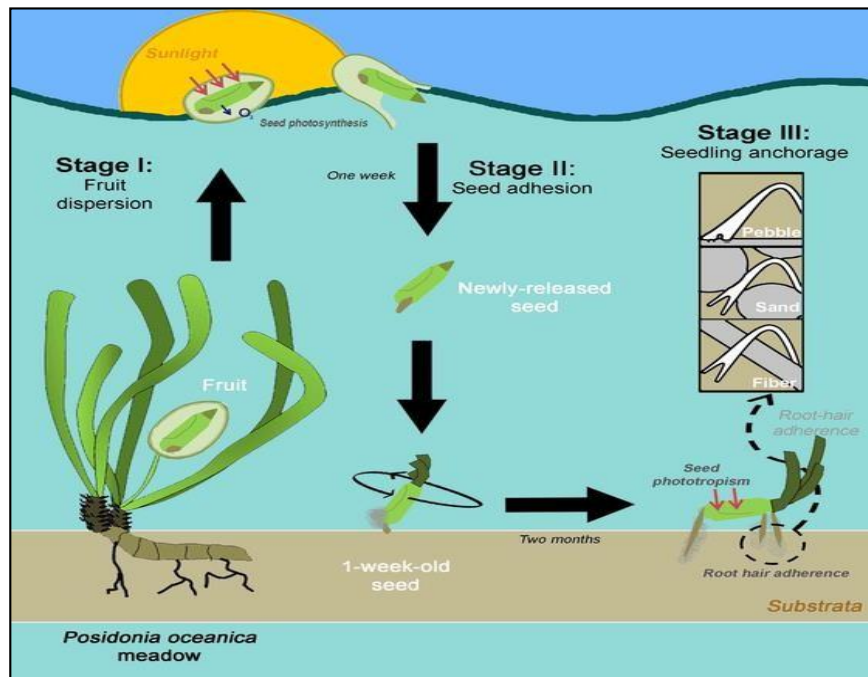


Figure 12. Représentation schématique des trois stades de reproduction sexuée de *P. oceanica*, incluant la dispersion et la colonisation⁵

- Reproduction asexuée

La reproduction asexuée est la méthode la plus courante pour *P. oceanica*, se faisant principalement par propagation clonale à travers les rhizomes. Les rhizomes horizontaux s'étendent latéralement sous le substrat, produisant de nouveaux faisceaux de feuilles à intervalles réguliers, tandis que les rhizomes verticaux permettent à la plante de croître en hauteur (Procaccini *et al.*, 2001). Ce mode de reproduction assure une colonisation lente mais efficace des fonds marins et contribue à la formation des vastes prairies sous-marines caractéristiques de *P. oceanica*. Cette propagation clonale est cruciale pour la persistance et la résilience des herbiers, en particulier dans des environnements où les conditions pour la reproduction sexuée ne sont pas favorables. Cependant, elle limite la diversité génétique, ce qui peut rendre les populations plus vulnérables aux maladies et aux changements environnementaux (Procaccini *et al.*, 2001) (Fig. 13).

⁵ <https://journals.plos.org/plosone/article/figures?id=10.1371/journal.pone.0207345>

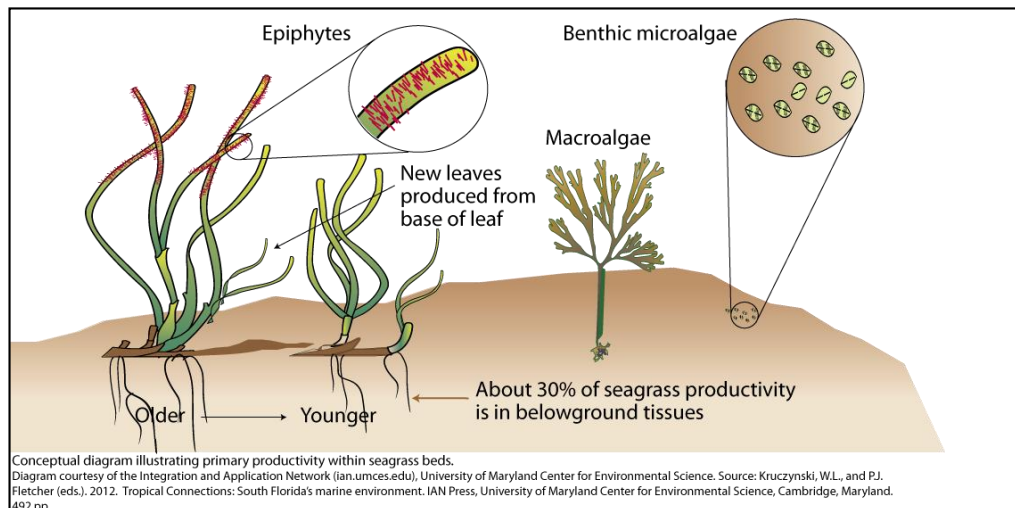


Figure 13. Diagramme conceptuel illustrant la productivité primaire dans les herbiers marins⁶

2.4 Rôles Écologiques

L'évolution de *Posidonia oceanica* ne se limite pas à ses adaptations morphologiques et physiologiques. Cette espèce joue également un rôle écologique et biologique fondamental. Parmi ses rôles les plus notables :

- **Protection côtière** : Les herbiers de *P. oceanica* jouent un rôle crucial dans la stabilisation des sédiments marins, réduisant ainsi l'érosion côtière. Les racines et les rhizomes de cette plante forment une structure dense qui protège les côtes contre les vagues et les tempêtes (Marbà & Duarte, 2010).
- **Productivité et biodiversité** : Les herbiers de *P. oceanica* sont parmi les écosystèmes marins les plus productifs. Ils offrent un habitat, une nurserie et une zone d'alimentation pour une grande diversité d'espèces marines, y compris des poissons, des crustacés et des mollusques (Boudouresque *et al.*, 2009).
- **Séquestration du carbone** : *P. oceanica* contribue à la lutte contre le changement climatique grâce à sa capacité à capturer et à stocker du carbone sur le long terme, une fonction connue sous le nom de "carbone bleu" (Fourqurean *et al.*, 2012).
- **Filtration de l'eau** : Les herbiers de *P. oceanica* jouent également un rôle dans la purification de l'eau en filtrant les particules en suspension, améliorant ainsi la clarté de l'eau et la qualité de l'environnement marin (Orth *et al.*, 2006).

2.5 Coévolution avec d'Autres Organismes

Posidonia oceanica a également coévolué avec une variété d'organismes marins, développant des relations symbiotiques qui renforcent la santé de l'écosystème. Par exemple, La coévolution des champignons épiphytes et endophytes associés à *Posidonia oceanica* est

⁶ <https://ian.umces.edu/media-library/primary-productivity-of-seagrass-beds/>

un sujet d'intérêt croissant dans l'écologie marine. Les champignons épiphytes vivent à la surface des feuilles de *P. oceanica*, tandis que les champignons endophytes colonisent les tissus internes de la plante. Ces associations symbiotiques jouent un rôle crucial dans la santé et le bien-être de la plante ainsi que dans la dynamique des écosystèmes marins.

En Algérie, plusieurs études ont été menées pour analyser la diversité des champignons épiphytes et endophytes associés aux feuilles de *Posidonia oceanica*. Le travail de Bouguessir (2022) dans la région de Tigzirt (Wilaya de Tizi Ouzou) a identifié huit genres de champignons épiphytes, à savoir *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Neoscytalidium*, *Penicillium*, *Phialophora*, *Rhizopus*, *Trichoderma*, ainsi qu'une souche non identifiée (SNI). Parmi ces genres, *Penicillium* était le plus abondant, suivi de près par *Cladosporium*, tandis que les autres étaient présents en proportions plus faibles.

L'étude de Khalef (2023), réalisée sur les feuilles de *Posidonia oceanica* dans la région de Tipaza, a révélé la présence de onze genres épiphytes : *Acremonium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Botryotrichum*, *Candida*, *Cladosporium*, *Gymnoascus*, *Neoscytalidium*, *Penicillium*, et *Torula*.

Par ailleurs, l'étude de Khemici (2024) a mis en évidence huit genres distincts d'épiphytes fongiques après une période d'incubation de deux mois des fragments de feuilles à température ambiante : *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Cladosporium*, *Neoscytalidium*, *Penicillium*, *Rhodotorula*, *Stachybotrys*, et *Trichocladium*.

En ce qui concerne les champignons endophytes, la recherche menée par Taourirt (2022) à Tigzirt a identifié douze genres, à savoir : *Alternaria*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Meria*, *Neoscytalidium*, *Nigrospora*, *Penicillium*, *Rhizoctonia*, *Trichoderma*, *Trichophyton*, ainsi que deux genres non identifiés (SNI).

2.6 Facteurs menaçant *Posidonia oceanica*

Posidonia oceanica est actuellement menacée par plusieurs facteurs anthropiques et naturels :

- **Pollution** : La pollution marine, notamment les rejets d'eaux usées et les polluants chimiques, affecte gravement les herbiers de *P. oceanica*, réduisant leur santé et leur capacité de reproduction (Telesca *et al.*, 2015).
- **Changement climatique** : L'augmentation des températures de l'eau et l'acidification des océans, causées par le changement climatique, menacent directement la survie de *P. oceanica*. Cette espèce est particulièrement sensible aux variations de température (Marbà & Duarte, 2010).
- **Aménagement côtier et ancrage des bateaux** : Les activités humaines telles que le développement côtier, le dragage et l'ancrage des bateaux causent des dommages physiques aux herbiers, entraînant leur fragmentation et leur destruction (C. F. Boudouresque *et al.*, 2006).

Chapitre 03.

Matériels et méthodes

3.1 Description de la zone d'étude

L'échantillonnage a été réalisé sur la plage de Cap Sigli, située dans la région de Beni Ksila, une daïra de la wilaya de Béjaïa en Algérie, dans la région de Kabylie. Les coordonnées géographiques du site d'échantillonnage sont les suivantes : 36.882507, 4.726195 (Fig. 14).



Figure 14. Localisation géographique du site d'échantillonnage à Beni Ksila, Béjaïa (Google maps, 2024).⁷

3.2 Etude bioclimatique de la région d'Ain Tagourait

Afin d'analyser un environnement, le climat est un élément essentiel. Il comprend divers phénomènes météorologiques, principalement la température et les précipitations. En tant que précurseur de toute recherche sur le fonctionnement des systèmes écologiques, le climat joue un rôle fondamental.

3.2.1 Températures

Les valeurs des températures mensuelles enregistrées dans la zone d'étude entre 1991 et 2021 sont compilées dans le tableau 1.

Tableau 1. Températures mensuelles moyennes de la région d'étude pour la période 1991-2021 (Climat-data, 2024)⁸

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc
m (°C)	8.6	8.3	10.1	12	14.8	18.4	21.4	22.3	20.1	17.4	12.7	9.8
M (°C)	13.5	13.4	15.5	17.4	20.2	24.2	27.4	28.1	25.3	22.7	17.6	14.7
(M+m)/2(°C)	11.05	10.85	12.8	14.7	17.5	21.3	24.4	25.2	22.7	20.05	15.15	12.25

⁷https://www.google.com/maps/place/Beni+Ksila/@36.882599,4.7261269,639m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x128d15156c24f737:0xd9206ee17b3afe48!8m2!3d36.8811537!4d4.664796!16s%2Fm%2F03wdn_x?entry=ttu

⁸<https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/bejaia/beni-ksila-888521/>

m : les températures minimales en degrés Celsius.

M : les températures maximales en degrés Celsius.

D'après les données du tableau 1, le mois le plus chaud de l'année est août, avec une température maximale de 28,1 °C. En revanche, février se distingue comme le mois le plus froid, avec une température minimale de 8,3 °C.

3.2.2 Précipitations

Les quantités de précipitations en millimètres enregistrées dans la région de Beni Ksila de 1991 à 2021 sont groupées dans le tableau 2.

Tableau 2. Précipitations moyennes mensuelles et annuelles pour la région d'Aïn Tagourait pendant la période allant de 1991 à 2021⁹.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jlt	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Total
Précipitations (mm)	136	103	85	65	46	10	2	8	41	75	127	139	837

D'après les données du tableau 2, le mois de décembre a connu les précipitations les plus élevées, avec 139 mm, sur la période de 1991 à 2021. À l'inverse, le mois de juillet a enregistré la plus faible quantité de précipitations, avec seulement 2 mm en moyenne sur cette même période.

3.2.3 Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Selon le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (Fig. 15), la région de Beni Ksila présente une saison sèche s'étendant sur 4 mois et demi, de mi mai à septembre.

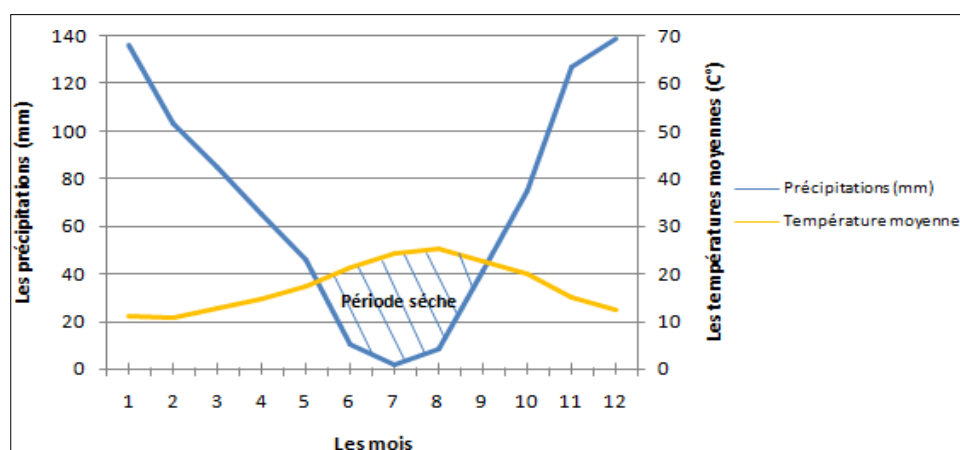


Figure 15. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen de la région de Beni Ksila.

⁹ <https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/bejaia/beni-ksila-888521/>

3.2.4 Climaramme d'Emberger

Nous avons également utilisé le climagramme d'Emberger pour déterminer l'étage bioclimatique de la région de Beni Ksila. Pour ce faire, nous avons calculé le quotient pluviothermique d'Emberger (Q_2) à l'aide de la formule suivante :

$Q_2 = 2000P / (M^2 - m^2)$, où :

- P représente les précipitations annuelles en mm ;
- m est la moyenne des minima du mois le plus froid en °K ;
- M est la moyenne des maxima du mois le plus chaud en °K ;
- avec $1^\circ\text{K} = T^\circ + 273$.

Le quotient pluviothermique varie selon les températures, ce qui influence sa valeur écologique. La valeur de m est particulièrement importante car elle indique le degré et la durée des gelées critiques ; en général, des valeurs plus basses de m correspondent à des gelées plus sévères. Pour une évaluation complète, il est donc crucial de prendre en compte à la fois Q_2 et m, dont les valeurs sont listées ci-dessous

Station	P (mm)	M (°K)	m (°K)	(M ² -m ²)	2000P	Q ₂	Etage bioclimatique et variante
Beni Ksila	837	301.1	281.3	11531.52	1674000	145.16	Humide à hiver chaud

L'analyse du quotient Q_2 sur une période de 30 ans (1991-2021) de la région de Beni Ksila indique que cette zone correspond à l'étage bioclimatique humide, avec des hivers chauds (Fig. 16).

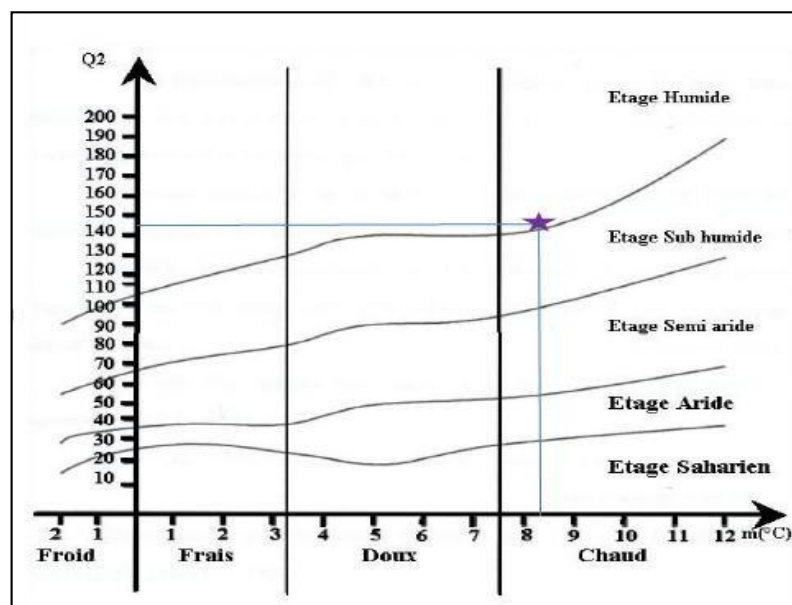


Figure 16. Position de la région de Beni Ksila dans le climagramme d'Emberger (1991-2021).

3.3 Echantillonnage sur terrain

L'échantillonnage est effectué sur dix sujets de *Posidonia oceanica*, le 27 avril 2024, de manière aléatoire. Les échantillons ont ensuite été placés dans des bocaux en verre étiquetés de 1 à 10 et transportés au laboratoire des Ressources Naturelles de la Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. La mise en culture des feuilles a été faite dans les 24 h qui ont suivies le prélèvement.

3.4 La mise en culture des champignons

3.4.1 Préparation du milieu de culture PDA (Potato-Dextrose-Agar)

Le milieu de culture que nous avons employé pour la culture des champignons épiphytes et endophytes est un milieu semi-synthétique « Potato dextrose agar » ou P.D.A composé de pomme de terre, de dextrose et d'agar (fig. 17), dont la formulation est la suivante :

- 200 g de pomme de terre.
- 20 g de glucose.
- 20 g d'agar-agar.
- 1000 ml d'eau distillée.
- 36 g de sel.

Afin de préparer le milieu, les pommes de terre ont d'abord été pelées, lavées et découpées en fines tranches. Elles ont ensuite été cuites dans 200 ml d'eau distillée pendant 15 à 20 minutes.



Figure 17. Préparation du milieu P.D.A

Le mélange résultant a été filtré, et le filtrat a été transvasé dans un Erlenmeyer d'un litre. Du glucose et de l'agar-agar ont été ajoutés au filtrat, puis le volume a été complété à 1 litre par l'eau distillée stérilisée salée préalablement préparé en mélangeant 36g de sel dans un

litre d'eau distillée stérilisée. L'Erlenmeyer est ensuite placé sur un agitateur chauffant (Fig. 18).



Figure 18. Milieu P.D.A

Une fois le milieu devenu homogène et limpide, il a été versé dans des petits flacons et stérilisé dans l'étuve à 120°C pendant 30 minutes.

Après refroidissement, quelques milligrammes d'antibiotique ont été incorporés au milieu afin d'éviter la prolifération des bactéries, afin de faire couler les boîtes pétri.

3.4.2 L'isolement et la mise en culture des champignons épiphytes

3.4.2.1 Isolement des champignons épiphytes

Afin d'isoler les champignons épiphytes des feuilles de la posidonie, nous avons adopté le protocole suivant :

Préparation des feuilles de posidonie

- Sortir les feuilles de posidonie du bocal.
- Sélectionner celles qui sont en bon état.
- Découper ces feuilles en fragments de 2 cm de long.

Sélection et préparation pour centrifugation

- Prendre au hasard 5 fragments de feuilles de posidonie.
- Placer ces fragments dans un flacon de centrifugation.

Préparation de la solution saline stérile

- Préparer une solution saline en dissolvant 36 g de sel dans une fiole de 1000 ml.
- Compléter avec de l'eau distillée stérilisée jusqu'au trait de jauge.
- Agiter la fiole pour bien mélanger.

Ajout de la solution saline

- Remplir le flacon de centrifugation contenant les fragments de feuilles avec 10 ml de la solution saline stérile préparée.

Centrifugation

- Étiqueter chaque flacon.
- Placer les flacons dans la centrifugeuse.
- Centrifuger pendant 10 minutes à une vitesse de 4 250 tours par minute.

Ainsi, les champignons épiphytes présents sur les feuilles de posidonie seront séparés des autres organismes pour une mise en culture ultérieure.



Figure 19. Centrifugation des fragments de feuilles de Posidonie

3.4.2.2 La mise en culture

La mise en culture des champignons épiphytes isolés se fait à l'aide d'une micropipette, en prélevant 1 ml du surnageant du flacon après la centrifugation et le déposer dans une boîte Pétri placée entre deux becs Bunsen. Cette opération est répétée trois fois pour chaque flacon afin d'obtenir trois répétitions par prélèvement pour obtenir 30 bites Pétri à la fin, après avoir étiqueter les boîtes de Pétri et les fermer avec du papier film (Fig. 20).



Figure 20. Ensemencement du surnageant sur les boîtes Pétri.

3.4.3 L'isolement et la mise en culture des champignons endophytes

3.4.3.1 Stérilisation superficielle

Pour isoler et identifier les champignons endophytes présents dans les feuilles de *Posidonia oceanica*, il est indispensable de supprimer les champignons épiphytes. Dans le cadre de cette étude, nous avons suivi le protocole de stérilisation recommandé par Helander et ses collaborateurs (1994) (Fig. 21), qui consiste en :

- Immersion des feuilles dans de l'éthanol à 95% pendant 2 minutes.
- Rinçage des feuilles à l'eau distillée stérilisée.
- Traitement des feuilles avec de l'eau de javel (NaOCl) pendant 3 minutes.
- Rinçage secondaire à l'eau distillée stérilisée.
- Deuxième immersion dans de l'éthanol à 95% pendant 30 secondes.
- Troisième rinçage à l'eau distillée stérilisée.



Figure 21. Stérilisation superficielle des feuilles de posidonie

3.4.3.2 La mise en culture

Après cette procédure de stérilisation superficielle appliquée à cinq feuilles pour chaque prélèvement, nous avons découpé cinq fragments de 0,5 cm² de chaque feuille stérilisée. Ces fragments ont été placés dans des boîtes de Pétri, en utilisant deux becs Bunsen pour assurer un environnement stérile (Fig.22). En tout, 50 boîtes Pétri ont été ensemencés.



Figure 22. Opération de la mise en culture des feuilles de posidonie

3.5 Identification des champignons

L'identification des champignons épiphytes et endophytes des feuilles de *Posidonia oceanica* s'est appuyée principalement sur l'analyse des caractères morphologiques, tant macroscopiques que microscopiques. Selon Dufresne (2021), la description macroscopique des colonies inclut plusieurs caractéristiques distinctives (Dufresne, 2021), telles que :

Texture des colonies

- Les colonies laineuses présentent un mycélium aérien abondant, donnant une apparence duveteuse.
- Les colonies duveteuses possèdent un mycélium aérien plus court et moins dense.
- Les colonies poudreuses se distinguent par un mycélium aérien produisant une grande quantité de conidies, évoquant une surface granuleuse.
- Les colonies glabres montrent un mycélium aérien peu abondant avec une surface lisse.

Topographie

- Les colonies peuvent être planes, surélevées, cérébriformes ou présenter des stries radiales.

Couleur

- La couleur des colonies et leur revers, ainsi que leur capacité à diffuser des pigments, sont des critères essentiels. Les champignons dématiés se manifestent par des teintes brunes, grises ou noires, tandis que les champignons hyalins se distinguent par des couleurs plus claires (blanc, rouge, vert, jaune, mauve, etc.).

L'analyse microscopique complète cette identification en examinant diverses structures des champignons filamenteux, telles que l'appareil végétatif, les organes de fructification, et les spores (Lecellier, 2013). Selon Dufresne (2021), cette analyse inclut :

- Hyphes : Septés ou non septés, avec une variation de largeur.
- Conidiophores : Absents, simples ou ramifiés.
- Cellules conidiogènes : Anellides ou phialides.
- Conidies : Unicellulaires ou pluricellulaires, présentes seules, en amas ou en chaînes, avec des formes variées (ronde, ovale, massue).
- Organes de fructification : Périthèces, cléistothèces (sexués), ou pycnides (asexués).

3.6 Analyse statistique

- Abondance des genres

L'abondance des genres fongiques épiphytes et endophytes a été évaluée pour chaque échantillon prélevé à Beni Ksila. La formule utilisée pour calculer cette abondance est :

$$A = \frac{N_t}{N_g} \times 100$$

où :

A : représente l'abondance des genres en pourcentage

N_g : est le nombre de fois qu'un genre fongique a été recensé chez un sujet, et N_t le nombre total de répétitions ayant fructifié avec 0.05% de marge d'erreur

Ces abondances ont ensuite été comparées aux données issues des études antérieures menées sur les épiphytes à Tizirt Bouguessir (2022), Tipaza Khalef (2023), Ain Tagourait Khmisi (2024), ainsi que sur les endophytes à Tizirt Taourirt (2022).

- Analyse de variance (ANOVA)

Une ANOVA a été réalisée pour évaluer la variabilité des abondances des différents genres fongiques entre les différents sites étudiés, y compris les sites de Beni Ksila (2024) et des études antérieures. L'objectif était de déterminer si les différences observées entre les genres fongiques épiphytes et endophytes sont significatives d'un point de vue statistique.

Cette ANOVA a été suivie d'une comparaison multiple des moyennes, réalisée à l'aide du test de Newman et Keuls, afin d'identifier quels genres présentent des différences significatives entre les différents sites. Le logiciel Stat Box 6.40 a été utilisé pour effectuer ces analyses.

3.7 Analyse en composantes principales (ACP)

Deux ACP distinctes ont été effectuées pour visualiser la distribution spatiale des genres fongiques :

- La première ACP a été réalisée pour les champignons épiphytes identifiés à partir des échantillons de Beni Ksila, en les comparant aux données antérieures sur les épiphytes collectées à Tizirt Bouguessir (2022), Tipaza Khalef (2023), et Ain Tagourait Khemici (2024).
- La seconde ACP a été réalisée pour les champignons endophytes, en comparant les résultats de Beni Ksila avec ceux obtenus lors de l'étude sur les endophytes de Tizirt Taourirt (2022).

Une ACP de synthèse a ensuite permis de comparer les cortèges fongiques épiphytes et endophytes de Beni Ksila.

Ces analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel Stat Box 6.40, permettant de dégager les principaux axes expliquant la variance dans la distribution des genres fongiques entre les différents sites et types de champignons (épiphytes vs endophytes).

Chapitre 04.

Résultats et discussion

Ce chapitre examine d'abord l'ensemble des cortèges fongiques épiphytes et endophytes recensés dans la zone d'étude. Une analyse détaillée de la diversité épiphyte est ensuite proposée, accompagnée d'une comparaison avec les travaux antérieurs réalisés à Tizirt par Bouguessir (2022), à Tipaza par Khalef (2023) et à Ain Tagourait par Khemici (2024), en intégrant les analyses statistiques correspondantes. L'accent sera ensuite mis sur la diversité des champignons endophytes à Béni Ksila, avec une comparaison approfondie avec l'étude de Taourirt (2022) à Tizirt, incluant les traitements statistiques appropriés. Ce chapitre se conclura par une synthèse comparative des cortèges fongiques épiphytes et endophytes de Beni Ksila.

4.1 Abondance des genres fongiques épiphytes et endophytes à Béni Ksila

À partir de l'identification macroscopique et microscopique des souches, trois genres de champignons épiphytes ont été répertoriés sur les feuilles de *Posidonia oceanica*, à savoir : *Cladosporium*, *Aspergillus* et *Penicillium*. Par ailleurs, quatre genres de champignons endophytes ont été identifiés, à savoir : *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium* et *Penicillium* (Tab. 3).

Tableau 3. Genres fongiques recensés au niveau des feuilles de *P. oceanica* dans la région de Béni Ksila.

Genres recensés	Phylum	Ordre	Famille
<i>Alternaria</i>	Ascomycota	Pleosporales	Pleosporaceae
<i>Aspergillus</i>	Ascomycota	Eurotiales	Trichocomaceae
<i>Cladosporium</i>	Ascomycota	Capnodiales	Davidiellaceae
<i>Penicillium</i>	Ascomycota	Pleosporales	Pleosporaceae

Les résultats représentés dans le tableau 3 indiquent que tous les taxons fongiques identifiés appartiennent au phylum des Ascomycota, qui est le groupe taxonomique le plus représentatif des écosystèmes marins (Hyde *et al.*, 2000). D'après Burgaud *et al.* (2010), ainsi que Jones *et al.* (2015), le phylum des Ascomycota est de loin le plus abondant en milieu marin comparativement aux autres phylums. Les résultats des différents travaux en Algérie de Bouguessir (2022) et Taourirt (2022) à Tizirt, Khalef (2023) à Tipaza et Khemici (2024) à Ain Tagourait confirment nos résultats.

L'étude menée par Velez et ses collaborateurs (2022) portant sur différents herbiers marins a conclu à l'absence de champignons marins proprement dits dans ces écosystèmes. Cependant, elle a mis en évidence la présence de champignons facultatifs dans ce milieu. Une autre étude (Ambayeram *et al.*, 2015) a abouti à la même conclusion.

Les genres *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium* et *Penicillium* sont fréquemment rencontrés dans les environnements marins en tant que champignons facultatifs, originaires d'environnements terrestres (Grossart *et al.*, 2019). Ces genres fongiques ont développé des caractéristiques morphologiques et physiologiques leur permettant de s'adapter aux conditions marines, comme la capacité à produire des enzymes ligninolytiques et des tannases, utiles pour dégrader et détoxifier les résidus lignocellulosiques en présence de fortes concentrations en sel (Varese *et al.*, 2018). Ils contribuent ainsi de manière significative aux processus de biotransformation des algues et du matériel végétal dans les écosystèmes marins (Varese *et al.*, 2018).

4.2 Description des genres fongiques recensés

Alternaria

Le genre *Alternaria* appartient au phylum des Ascomycota et à l'ordre des Pleosporales. Ces champignons sont caractérisés par des colonies à croissance rapide, présentant généralement une texture duveteuse ou laineuse, avec des colorations allant du gris au noir olivâtre (Woudenberg *et al.*, 2013). Microscopiquement, *Alternaria* se distingue par ses conidiophores simples ou ramifiés, portant des conidies en chaînes. Ces conidies sont multicellulaires, de forme ovoïde à oblongue, avec des septas transversaux et longitudinaux, leur donnant un aspect caractéristique en "muriform" (Lawrence *et al.*, 2016). La capacité d'*Alternaria* à produire des métabolites secondaires, dont certains sont des mycotoxines, contribue à son importance en pathologie végétale et en santé humaine (Andersen *et al.*, 2015). Dans les environnements marins, *Alternaria* a montré une adaptabilité remarquable, colonisant divers substrats et jouant un rôle dans la décomposition de la matière organique (Jones *et al.*, 2015) (Fig. 23).

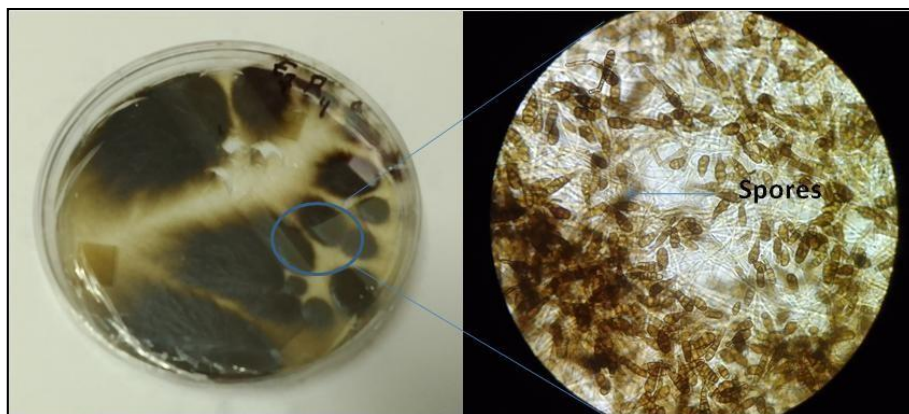


Figure 23. Observations macroscopique et microscopique du genre *Alternaria* (x400).

Aspergillus

Le genre *Aspergillus*, membre du phylum des Ascomycota, comprend une grande diversité d'espèces d'importance économique et écologique considérable (Samson *et al.*, 2014). Ce groupe taxonomique complexe est divisé en plusieurs sous-genres et sections, reflétant sa

variabilité morphologique et génétique (Houbraken *et al.*, 2020). Les espèces d'*Aspergillus* sont ubiquitaires, colonisant divers substrats et environnements, ce qui souligne leur adaptabilité remarquable (Kocsubé *et al.*, 2016). L'identification des espèces d'*Aspergillus* repose sur une combinaison de caractéristiques macroscopiques et microscopiques (Hubka *et al.*, 2016). Les colonies présentent généralement une texture poudreuse ou granuleuse, avec des colorations variées allant du blanc au noir, en passant par diverses nuances de vert, de jaune ou de brun (Visagie, 2014). La structure reproductive distinctive du genre, le conidiophore, se compose d'un stipe terminé par une vésicule portant des cellules conidiogènes (phialides), directement ou via des cellules intermédiaires (métules) (Samson *et al.*, 2014) (Fig. 24).

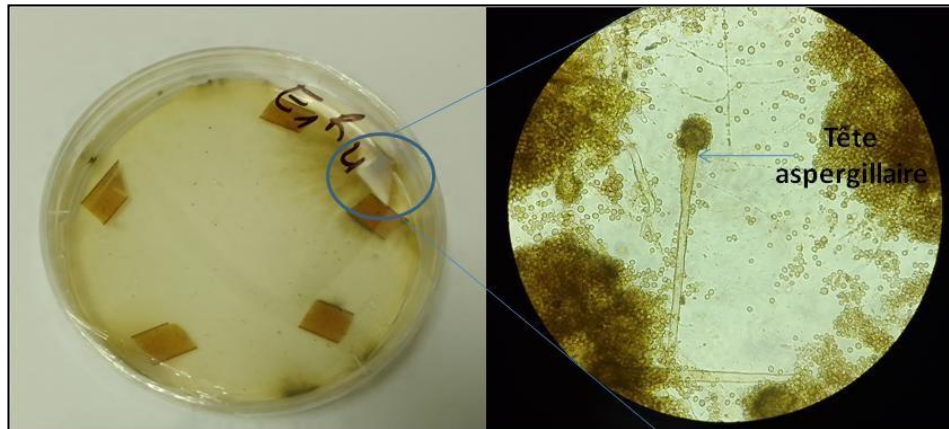


Figure 24. Observations macroscopique et microscopique du genre *Aspergillus* (x400).

Cladosporium

Cladosporium, un autre genre important des Ascomycota, est omniprésent dans l'environnement et joue des rôles écologiques variés (Bensch *et al.*, 2012). Ces champignons sont connus pour leur capacité à coloniser les surfaces foliaires, où ils peuvent exister en tant qu'épiphytes ou endophytes, influençant ainsi la santé des plantes (Zalar *et al.*, 2007).

Morphologiquement, les colonies de *Cladosporium* sont caractérisées par une croissance lente à modérée et une texture veloutée à poudreuse (Bensch *et al.*, 2012). La coloration des colonies varie du vert olive au brun foncé, reflétant la production de pigments mélaniques (Sandoval-Denis *et al.*, 2016). Au niveau microscopique, *Cladosporium* se distingue par ses conidiophores ramifiés et ses conidies en chaînes, souvent avec des cicatrices de connexion distinctives (Bensch *et al.*, 2018) (Fig. 25).

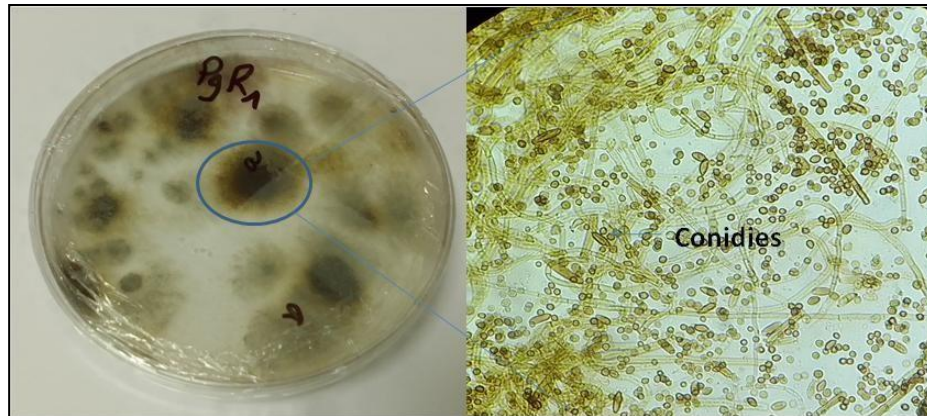


Figure 25. Observations macroscopique et microscopique du genre *Cladosporium* (x400).

Penicillium

Le genre *Penicillium*, célèbre pour la découverte de la pénicilline, occupe une place centrale dans la mycologie appliquée et fondamentale (Houbraken *et al.*, 2021). Ce groupe diversifié comprend de nombreuses espèces d'importance industrielle, médicale et environnementale (Frisvad *et al.*, 2019).

Les colonies de *Penicillium* sont généralement à croissance rapide, avec une texture veloutée à poudreuse et des colorations allant du bleu-vert au gris-vert, parfois avec des nuances de jaune ou de rose (Samson *et al.*, 2011). La structure reproductive caractéristique du genre, le pénicille, consiste en un conidiophore ramifié portant des verticilles de métules et de phialides (Visagie *et al.*, 2014). Cette organisation unique en "pinceau" est à l'origine du nom du genre et constitue un critère clé pour son identification (Houbraken *et al.*, 2021) (Fig. 26).

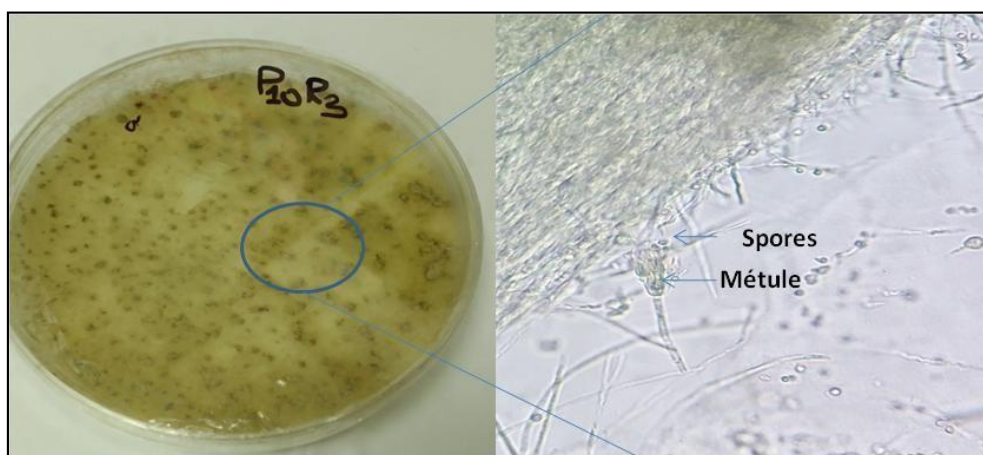


Figure 26. Observations macroscopique et microscopique du genre *Penicillium* (x400).

4.3 Analyses statistiques des genres fongiques épiphytes recensés dans la région de Béni Ksila

4.3.1. Abondance des genres fongiques épiphytiques des feuilles de la posidonie

Afin d'évaluer la diversité fongique épiphytes, nous avons calculé les abondances des différents genres identifiés (Tab.4 et Fig. 27).

Tableau 4. Abondances des genres fongiques épiphytes (%) isolés à partir des feuilles de *Posidonia oceanica* de la région de Béni Ksila.

Genres de champignon	Abondance (%)
<i>Aspergillus</i>	5 ± 4,74
<i>Cladosporium</i>	7,67 ± 3,43
<i>Penicillium</i>	87,33 ± 5,16

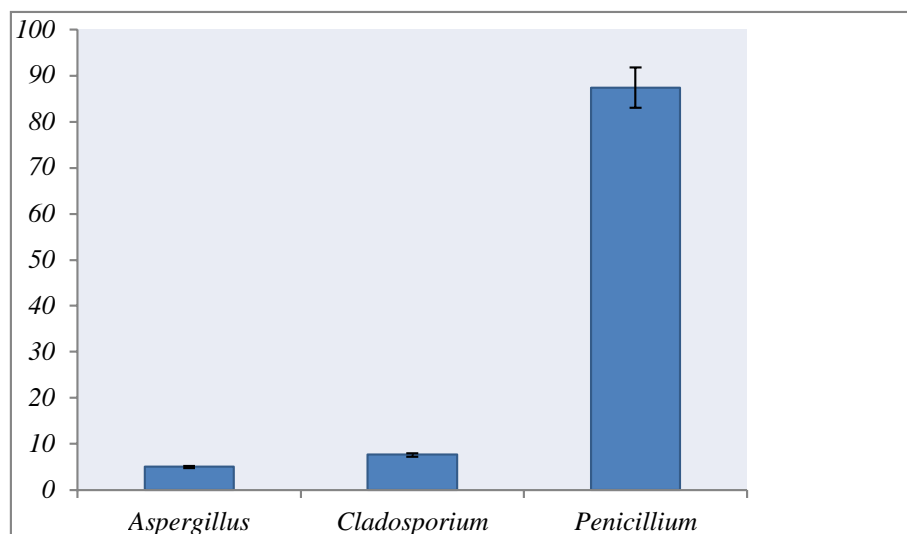


Figure 27. Abondances des champignons épiphytes (%) isolés à partir des feuilles de *Posidonia oceanica* de la région de Béni Ksila

Les résultats présentés montrent une prédominance de certains genres fongiques épiphytes au niveau des feuilles de *Posidonia oceanica*. Le genre *Penicillium* se distingue par sa prévalence, représentant 87,33% de l'abondance totale, suivi de *Cladosporium* à 7,67% et d'*Aspergillus* à 5%.

Les résultats de Khemici (2024) montrent la présence de 8 genres fongiques dans la région d'Ain Tagourait (Tab. 5 et Fig. 28), qui est majoritairement dominée par le genre *Penicillium*, représentant 67,58% des occurrences. Le genre *Cladosporium* avec 8,91%, et *Aspergillus* apparaît avec des proportions de 1,66%.

L'étude conduite par Bouguessir (2022) dans la région de Tizirt révèle la présence de 8 genres fongiques également (Tab.5 et Fig. 28), bien que le genre *Penicillium* soit aussi le plus abondant, représentant 75,25% de la phyllosphère fongique de *Posidonia oceanica*. Il est suivi par *Cladosporium* avec 20,7%. Tandis que le genre *Aspergillus* représente une abondance de 0,5%

Dans la région de Tipaza, Khalef (2023) a observé 11 genres (Tab.5 et Fig. 28). Le genre dominant est *Penicillium*, représentant 21,94% de la phyllosphère fongique, suivi de près par *Cladosporium* 21.69% et *Aspergillus* 8,74%.

La dominance marquée de *Penicillium* (87,33%) à Béni Ksila, ainsi que sa forte présence dans les autres sites étudiés dans les travaux précédents, pourrait être attribuée à sa capacité exceptionnelle à produire une large gamme d'enzymes extracellulaires, notamment des cellulases et des pectinases, qui lui permettent de dégrader efficacement les composants structurels des feuilles de *Posidonia oceanica* (Gnavi *et al.*, 2017). Cette adaptabilité enzymatique confère à *Penicillium* un avantage compétitif significatif dans la colonisation de la phyllosphère marine (Raghukumar, 2017).

La variabilité des abondances de *Penicillium* entre les différents sites (87,33% à Béni Ksila, 67,58% à Ain Tagourait, 75,25% à Tizirt, et 21,94% à Tipaza), pourrait être liée à des facteurs environnementaux spécifiques à chaque site, tels que la température de l'eau, la salinité, la disponibilité en nutriments, ou même la pollution anthropique (Gomes *et al.*, 2018). Ces variations soulignent l'importance des conditions locales dans la structuration des communautés fongiques épiphytes (Cook *et al.*, 2022).

La présence constante mais variable de *Cladosporium* dans tous les sites étudiés met en évidence sa capacité à s'adapter à différentes conditions environnementales incluant le milieu marin (Bensch *et al.*, 2012). Cette adaptabilité pourrait être liée à sa tolérance au sel et à sa capacité à produire des mélanines, qui offrent une protection contre les rayons UV et le stress oxydatif dans l'environnement marin (Garzoli *et al.*, 2015).

L'abondance relativement faible d'*Aspergillus* à Béni Ksila et sa variabilité dans les autres sites pourraient indiquer que ce genre est plus sensible aux fluctuations des conditions environnementales ou qu'il est moins compétitif dans la colonisation de la phyllosphère de *P. oceanica* par rapport à *Penicillium* et *Cladosporium*. L'étude d'Arnold et son équipe (2007) examinent diverses stratégies de compétition, y compris la production de composés bioactifs et l'acquisition de ressources, contribuant à la compétitivité des champignons au sein des plantes hôtes. De plus, cette sensibilité pourrait être liée à des exigences nutritionnelles spécifiques ou à une moindre tolérance aux stress abiotiques présents dans l'environnement marin (Amend *et al.*, 2019).

Tableau 5. Diversité et abondances des genres fongiques épiphytes (%) sur les feuilles de la posidonie

Prélèvement	Béni Ksila 2024	Tipasa 2023	Tigzirt 2022	Ain Tagourait 2024
<i>Aspergillus</i>	5	8,74	0,5	1,66
<i>Cladosporium</i>	7,66	21,69	20,7	8,91
<i>Penicillium</i>	87,33	21,94	75,25	67,58
<i>Acremonium</i>	0	2,5	0	0
<i>Alternaria</i>	0	6,11	0	0
<i>Aureobasidium</i>	0	1,66	0	10
<i>Gymnoascus</i>	0	17,33	0	0
<i>Neoscytalidium</i>	0	3,99	0,36	2,66
<i>Candida</i>	0	5,99	0	0
<i>Botryotrichum</i>	0	6,66	0	0
<i>Torula</i>	0	3,33	0	0
<i>Phialophora</i>	0	0	1,21	0
<i>Rhizopus</i>	0	0	0,99	0
<i>Trichoderma</i>	0	0	0,45	0
SNI	0	0	0,2	0
<i>Rhodotorula</i>	0	0	0	1,66
<i>Strachybotrys</i>	0	0	0	2,5
<i>Trichocladium</i>	0	0	0	5

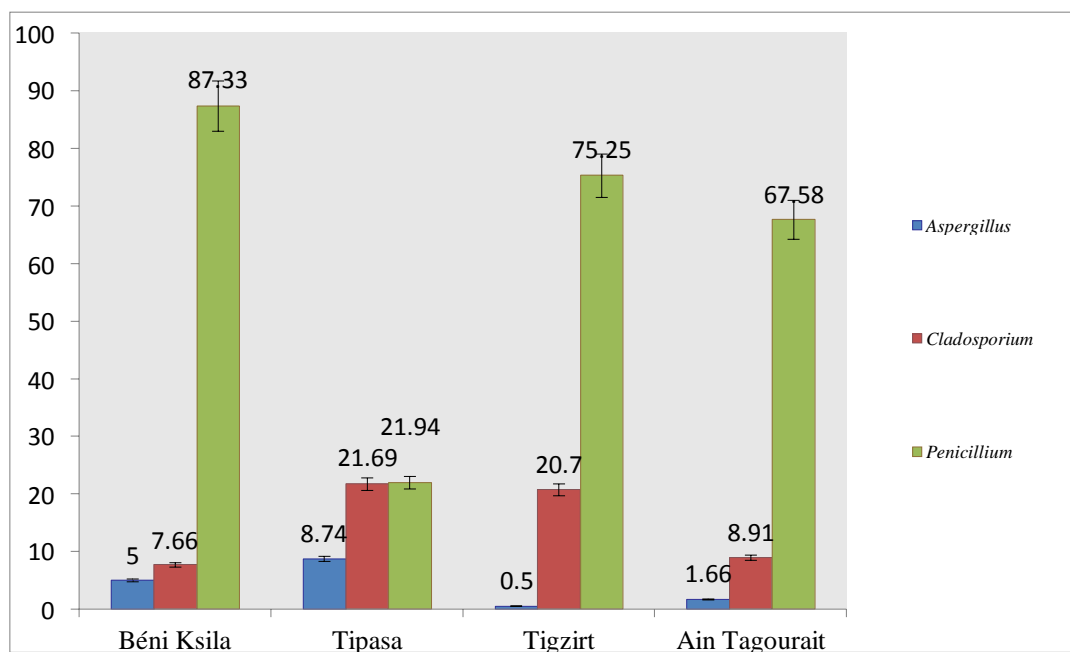


Figure 28. Abondances des genres fongiques épiphytes communs entre les différentes régions étudiées en (%) sur les feuilles de la posidonie.

Penicillium est clairement dominant dans notre étude, corroborant les travaux de Bouguessir (2022) à Tizirt, Khalef (2023) à Tipaza, Khemici (2024) à Ain Tagouraiten Algérie et de Pannoet *al.* (2011) en Italie. En effet, ces auteurs avaient également identifié ce champignon comme le genre le plus significatif parmi les espèces fongiques associées à l'herbier de posidonie.

La diversité fongique observée dans les échantillons reste modeste, indiquant une diversité plus restreinte que prévue par rapport aux autres études mentionnées.

4.3.2 Analyse de variance (ANOVA) des épiphytes fongiques de la région de Béni Ksila

Cette approche permet de déterminer la signification de la présence des différents genres fongiques dans l'écosystème étudié et d'évaluer la variabilité de la communauté mycologique associée aux feuilles de cette plante marine (Tab. 6).

Tableau 6. ANOVA des genres fongiques épiphytes de la région de Béni Ksila.

Genres	Prob (p)	Comparaison	Conclusion
<i>Aspergillus</i>	0.47	0.47>0.05	Non significative
<i>Cladosporium</i>	0.17	0.17>0.05	Non significative
<i>Penicillium</i>	0.18	0.18>0.05	Non significative

Les variations observées entre les différents genres de champignons (Tab. 6), tels que *Aspergillus* ($p = 0,47$), *Cladosporium* ($p = 0,17$) et *Penicillium* ($p = 0,18$), ne sont pas suffisamment marquées pour être considérées comme significatives d'un point de vue statistique. Cette absence de signification pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs, tels que la similarité des conditions environnementales dans le site d'étude, sachant que la reproduction asexuée de la posidonie crée une uniformité génétique, entraînant des individus génétiquement identiques. Cela peut conduire à un microbiome similaire, y compris pour les champignons épiphytes, réduisant ainsi la diversité fongique. De plus, les clones de *Posidonia* vivent souvent dans des habitats écologiquement homogènes, ce qui limite les variations des espèces fongiques entre les échantillons et peut expliquer l'absence de différences significatives observées avec l'ANOVA, un échantillonnage insuffisant, ou encore une faible variabilité des données entre les différents genres de champignons observés. Par conséquent, il est possible que les différences entre ces genres ne soient pas assez prononcées pour être détectées.

4.3.3 Matrice de corrélation des épiphytes fongiques de la région de Béni Ksila

La matrice de corrélation présentée montre les interactions entre les genres fongiques *Aspergillus*, *Cladosporium* et *Penicillium* dans la phyllosphère de la posidonie (Tab. 7).

Tableau 7. Matrice de corrélation entre les genres épiphytes de Béni Ksila.

	<i>Aspergillus</i>	<i>Cladosporium</i>	<i>Penicillium</i>
<i>Aspergillus</i>	1		
<i>Cladosporium</i>	-0,24	1	
<i>Penicillium</i>	-0,76	-0,45	1

La corrélation négative entre *Aspergillus* et *Penicillium* (-0.76) indique une relation inverse significative entre ces deux genres. Lorsque la présence d'*Aspergillus* augmente, celle de *Penicillium* diminue fortement. Cela pourrait indiquer une compétition entre ces deux genres pour les ressources ou les niches écologiques dans cet environnement.

La matrice révèle des corrélations négatives entre les genres fongiques, indiquant qu'il pourrait y avoir une certaine compétition pour les ressources dans la phyllosphère de *Posidonia oceanica*. Plus précisément, *Penicillium* semble avoir une relation fortement inverse avec *Aspergillus*, suggérant qu'ils ne cohabitent pas facilement, peut-être en raison d'une compétition directe pour les mêmes ressources. Les corrélations moins fortes entre les autres paires montrent que bien que des interactions existent, elles ne sont pas aussi marquées.

4.3.4 Analyse en composantes principales des épiphytes de la région de Beni Ksila

Une analyse en composantes principales est réalisée (Fig. 29). Cette ACP nous a fourni des indications sur la nature, la force et la pertinence des liens entre les différents prélèvements et les épiphytes fongiques recensés. Le plan 1/2 de l'ACP représentant 100% de l'inertie totale, avec 60% pour l'axe 1 et 40% pour l'axe 2.

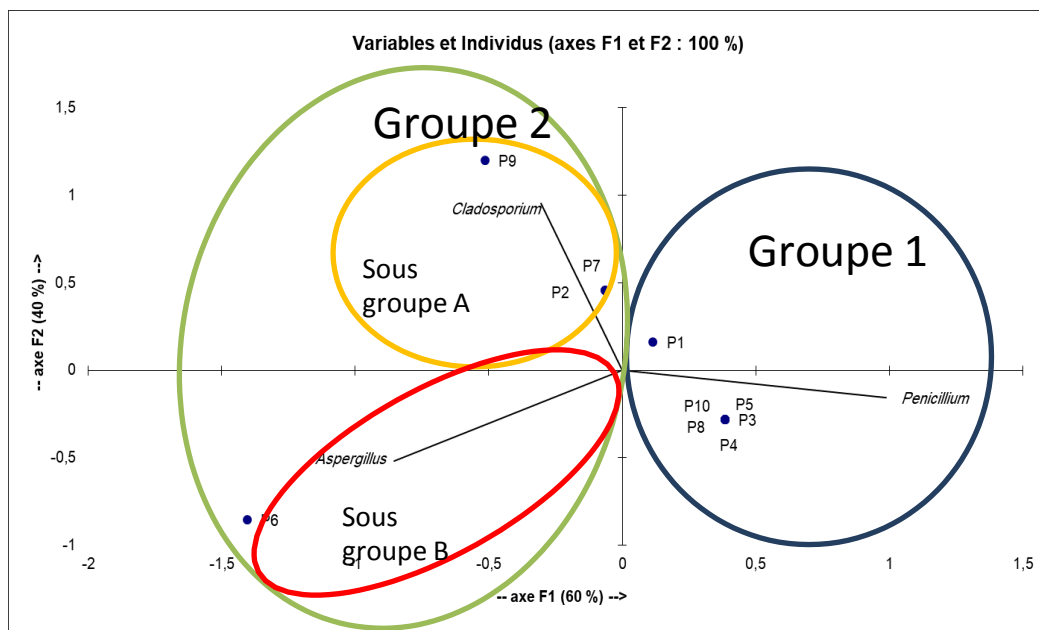


Figure 29. Analyse en composantes principales représentant les genres de champignons épiphytes des prélèvements des feuilles de *Posidonia oceanica* de la région de Béni Ksila.

A partir de cette ACP, nous pouvons noter la présence de deux groupes. Le premier groupe (1) comporte les prélèvements P1, P, P4, P5, P8 et P10, où le genre *Penicillium* est prédominant. Le second groupe (2), qui est en opposition avec le groupe (1), qui comprend deux sous groupes

(a) contenant les prélèvements P2, P7, et P9 où le genre *Cladosporium* est dominant, et le sous groupe (b) où le genre *Aspergillus* est présent dans le P6 seulement. Cette opposition est due à l'existence des corrélations négatives entre les trois genres fongiques, en particulier celle noté entre *Penicillium* et *Aspergillus*, car elle est fortement négative (-0.76), cela peut s'expliquer par les rôles différents que peuvent jouer ces champignons, lorsqu'ils sont en interaction avec la plante.

Cette analyse révèle une structure complexe de la communauté fongique épiphyte, avec des groupements distincts dominés par différents genres. Cette ségrégation spatiale dans l'ACP pourrait refléter des stratégies écologiques divergentes ou des préférences de niches distinctes au sein de la phyllosphère de *P. oceanica* (Fryar *et al.*, 2019).

Le groupe dominé par *Penicillium* (prélèvements : P1, P3, P4, P5, P8 et P10) pourrait indiquer des zones de la phyllosphère où les conditions sont particulièrement favorables à ce genre, probablement caractérisées par une plus grande disponibilité de substrats facilement dégradables ou des conditions physico-chimiques optimales pour son développement (Imhoff *et al.*, 2011).

Le sous-groupe où *Cladosporium* est prédominant (prélèvements P2, P7, et P9) pourrait représenter des microenvironnements au sein de la phyllosphère où ce genre trouve un avantage compétitif, peut-être en raison de sa capacité à utiliser des composés récalcitrants ou à résister à des stress environnementaux spécifiques (Gnavi *et al.*, 2014).

L'isolement d'*Aspergillus* dans un sous-groupe distinct (prélèvement P6) suggère que ce genre pourrait occuper une niche écologique très spécifique au sein de la phyllosphère de *P. oceanica*, potentiellement liée à des conditions micro-environnementales particulières ou à des interactions spécifiques avec la plante hôte ou d'autres microorganismes (Panno *et al.*, 2013).

La corrélation négative observée entre *Penicillium* et *Aspergillus* (-0,76) pourrait indiquer une forte compétition entre ces deux genres pour les ressources ou l'espace dans la phyllosphère de *P. oceanica*. Cette compétition pourrait être expliquée par la production de métabolites secondaires antagonistes ou par une exploitation plus efficace des ressources par *Penicillium* dans les conditions prévalentes (Gnaviet *al.*, 2017).

Les corrélations négatives moins prononcées entre *Cladosporium* et les deux autres genres suggèrent une coexistence plus équilibrée, possiblement facilitée par une différenciation de niche ou une complémentarité fonctionnelle au sein de la communauté fongique épiphyte (Raghukumar, 2017).

Cette structure complexe de la communauté fongique épiphyte, révélée par l'ACP souligne l'importance des interactions multiples entre les champignons, leur hôte (*P. oceanica*) et les conditions environnementales locales dans la détermination de la composition et de la dynamique de ces communautés (Torta *et al.*, 2015). Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'études plus approfondies pour élucider les mécanismes écologiques sous-jacents et les implications fonctionnelles de ces associations fongiques dans l'écosystème des herbiers de posidonie.

4.4 Comparaison entre les cortèges fongiques épiphytes de Tigzirt/Tipaza/Ain Tagourait/Béni Ksila

Afin d'évaluer la diversité des champignons épiphytes recensés sur les feuilles de la posidonie, des analyses statistiques ont été établies en comparant les résultats des différentes régions étudiées dans les années précédentes. Toutes ces recherches ont été menées au laboratoire Ressources Naturelles de l'UMMTO. Nous citons : Bouguessir (2022) à Tigzirt, Khalef (2023) à Tipaza et Khemici (2024) à Ain Tagourait.

4.4.1 Analyses de variance comparatives du cortège épiphyte entre les différentes régions étudiées

Le tableau suivant représente les résultats du test ANOVA réalisé afin de comparer entre les champignons épiphytes des différents sites étudiés

Tableau 8. Analyses de variance comparatives du cortège épiphyte entre les différentes régions étudiées.

Genres	Prob (p)	Comparaison	Conclusion
<i>Aspergillus</i>	0,34	0,34>0,05	Non significative
<i>Cladosporium</i>	0,05	0,05=0,05	Significative
<i>Penicillium</i>	0,00	0,00 < 0,05	Significative
<i>Acremonium</i>	0,40	0,40 > 0,05	Non significative
<i>Alternaria</i>	0,05	0,05=0,05	Significative
<i>Aureobasidium</i>	0,45	0,45 > 0,05	Non significative
<i>Gymnoascus</i>	0,01	0,01<0,05	Significative
<i>Neoscytalidium</i>	0,4	0,4 > 0,05	Non significative
<i>Candida</i>	0,02	0,02<0,05	Significative
<i>Botryotrichum</i>	0,1	0,1 > 0,05	Non significative
<i>Torula</i>	0,4	0,4 > 0,05	Non significative
<i>Phialophora</i>	0,01	0,01 < 0,05	Significative
<i>Rhizopus</i>	0,4	0,4>0,05	Non significative
<i>Trichoderma</i>	0,4	0,4 >0,05	Non significative
SNI	0,4	0,4 > 0,05	Non significative
<i>Rhodotorula</i>	0,4	0,4 > 0,05	Non significative
<i>Strachybotrys</i>	0,4	0,4 > 0,05	Non significative
<i>Trichocladium</i>	0,4	0,4 > 0,05	Non significative

Les ANOVA révèlent l'existence de six genres montrant des différences significatives entre les différents sites étudiés (Tab. 8). Nous avons *Alternaria* (p= 0,05), *Cladosporium* (p=0,05), *Candida* (p= 0,02), *Gymnoascus* (p= 0,01), *Penicillium* (p= 0,00) et *Phialophora* (p= 0,01). Une analyse de comparaison multiple a été réalisée afin de mieux comprendre ces différences (Tab. 9, 10, 11, 12, 13 et 14).

Tableau 9. Comparaison multiple du genre *Alternaria*.

Station	Groupe	Moyenne
Béni Ksila	A	0,00
Ain Tagourait	A	0,00
Tigzirt	A	0,00
Tipaza	A	6,11

Tableau 10. Comparaison multiple du genre *Candida*.

Station	Groupe	Moyenne
Béni Ksila	A	0,00
Ain Tagourait	A	0,00
Tigzirt	A	0,00
Tipaza	A	6,00

Tableau 11. Comparaison multiple du genre *Cladosporium*.

Station	Groupe	Moyenne
Béni Ksila	A	7,67
Ain Tagourait	A	8,92
Tigzirt	A	20,71
Tipaza	A	21,69

Tableau 12. Comparaison multiple du genre *Gymnoascus*.

Station	Groupe	Moyenne
Béni Ksila	A	0,00
Ain Tagourait	A	0,00
Tigzirt	A	0,00
Tipaza	B	17,33

Tableau 13. Comparaison multiple du genre *Penicillium*.

Station	Groupe	Moyenne
Tipaza	A	21,94
Ain Tagourait	B	67,58
Tigzirt	B	75,25
Béni Ksila	B	87,33

Tableau 14. Comparaison multiple du genre *Phialophora*.

Station	Groupe	Moyenne
Béni Ksila	A	0,00
Ain Tagourait	A	0,00
Tipaza	A	0,00
Tigzirt	B	1,21

L'analyse comparative des cortèges fongiques épiphytes associés aux feuilles de *Posidonia oceanica* dans les zones d'étude en Algérie révèle des patterns de distribution complexes et hétérogènes, soulignant l'importance des variations spatiales dans la structuration des communautés fongiques marines.

La distribution des genres fongiques présente une variabilité significative entre les sites étudiés, comme le montre les tableaux de comparaisons multiples (Tab. 6, 7, 8, 9, 10 et 11).

Les genres *Alternaria* et *Candida* montrent une présence exclusive à Tipaza (Tableaux 6 et 7), avec des moyennes respectives de 6,11% et 6%, tandis qu'ils sont absents des autres sites, y compris Béni Ksila. Cette distribution localisée suggère une possible spécialisation écologique ou une adaptation aux conditions environnementales spécifiques de Tipaza. Cette observation corrobore les travaux récents d'Ettinger et Eisen (2020), qui ont mis en évidence l'importance des facteurs locaux dans la détermination de la composition des communautés fongiques marines.

Le genre *Cladosporium*, présent dans toutes les régions étudiées mais avec des abondances variables (Tab.8), semble démontrer une plus grande plasticité écologique. À Béni Ksila, *Cladosporium* présente une moyenne de 7,67%, la plus faible parmi les sites étudiés, ce qui pourrait indiquer des conditions moins favorables pour ce genre dans cette région. Cette distribution ubiquiste, bien qu'avec des variations d'abondance, est cohérente avec les observations d'Amend *et al.* (2019), qui ont souligné la capacité adaptative de

certaines genres fongiques marins à coloniser divers microenvironnements au sein des écosystèmes côtiers.

La présence marquée de *Penicillium* dans l'ensemble des sites est particulièrement notable, avec des abondances significativement plus élevées à Béni Ksila (87,33%), Tizirt (75,25%) et Ain Tagourait (67,58%), comme le montre le tableau 10. Cette prédominance suggère une adaptation efficace de ce genre aux conditions marines méditerranéennes, notamment à Béni Ksila. La forte présence de *Penicillium* dans les communautés fongiques épiphytes des herbiers marins a également été rapportée par Vohník *et al.* (2019) dans leur étude sur les champignons associés à *P. oceanica* en Méditerranée occidentale.

En ce qui concerne l'absence ou la faible présence de certains genres fongiques à Béni Ksila, notamment *Gymnoascus* (Tab. 9) et *Phialophora* (Tab.11), cela mérite une attention particulière dans le contexte de la distribution spatiale des communautés fongiques marines.

Cette hétérogénéité dans la composition mycologique peut être attribuée à plusieurs facteurs écologiques et environnementaux.

4.4.2 Matrice de corrélation comparative entre le cortège épiphyte des différentes régions étudiées

Le tableau 15 représente les principales corrélations significatives obtenues par la matrice de corrélation de Pearson entre les différents sites étudiés. L'analyse révèle des interactions complexes et significatives entre les différents genres fongiques épiphytes associés à *Posidonia oceanica*, fournissant des insights précieux sur la structure et la dynamique de ces communautés microbiennes marines.

Les fortes corrélations négatives observées entre *Penicillium* et plusieurs autres genres *Acremonium*, *Alternaria*, *Candida*, *Botryotrichum*, *Torula* et *Gymnoascus* suggèrent l'existence de mécanismes d'exclusion compétitive ou d'antagonisme, au sein de la communauté fongique. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la production de composés antifongiques par *Penicillium*, une caractéristique bien documentée chez ce genre dans divers environnements, y compris marins (Nicoletti et Andolfi, 2018).

À l'inverse, les corrélations positives fortes entre certains genres, notamment *Aureobasidium* avec *Rhodotorula* et *Strachybotrys* ; *Acremonium* avec *Alternaria*, *Gymnoascus*, *Candida*, *Botryotrichum* et *Torula*, suggèrent des associations symbiotiques potentielles ou des préférences écologiques partagées. Ces associations positives pourraient résulter de complémentarités fonctionnelles ou de synergies métaboliques entre ces genres, comme l'ont suggéré récemment Grossart *et al.* (2019), dans leur revue sur les champignons en milieu aquatique.

Tableau 15. Corrélations entre les genres du cortège épiphyte des différentes régions étudiées.

Genres	Valeurs	Corrélations
<i>Penicillium-Acremonium</i>	-0,96	Fortement négative
<i>Penicillium-Alternaria</i>	-0,96	Fortement négative
<i>Penicillium-Candida</i>	-0,96	Fortement négative
<i>Penicillium-Botryotrichum</i>	-0,96	Fortement négative
<i>Penicillium-Torula</i>	-0,96	Fortement négative
<i>Penicillium-Gymnoascus</i>	-0,96	Fortement négative
<i>Aureobasidium-Rhodotorula</i>	0,99	Fortement positive
<i>Aureobasidium-Strachybotrys</i>	0,99	Fortement positive
<i>Aureobasidium-Trichocladium</i>	0,99	Fortement positive
<i>Acremonium-Alternaria</i>	1	Fortement positive
<i>Acremonium-Gymnoascus</i>	1	Fortement positive
<i>Acremonium-Candida</i>	1	Fortement positive
<i>Acremonium-Botryotrichum</i>	1	Fortement positive
<i>Acremonium-Torula</i>	1	Fortement positive
<i>Gymnoascus-Candida</i>	1	Fortement positive
<i>Gymnoascus-Botryotrichum</i>	1	Fortement positive
<i>Gymnoascus-Torula</i>	1	Fortement positive
<i>Alternaria-Candida</i>	1	Fortement positive
<i>Alternaria-Botryotrichum</i>	1	Fortement positive
<i>Alternaria-Torula</i>	1	Fortement positive
<i>Candida-Botryotrichum</i>	1	Fortement positive
<i>Candida-Torula</i>	1	Fortement positive
<i>Botryotrichum-Torula</i>	1	Fortement positive
<i>Phialophora-Rhizopus</i>	1	Fortement positive
<i>Phialophora-Trichoderma</i>	1	Fortement positive
<i>Phialophora-SNI</i>	1	Fortement positive
<i>Rhizopus-Trichoderma</i>	1	Fortement positive

<i>Rhizopus-SNI</i>	1	Fortement positive
<i>Trichoderma-Trichoderma</i>	1	Fortement positive
<i>Rhodotorula-Strachybotrys</i>	1	Fortement positive
<i>Rhodotorula-Trichocladium</i>	1	Fortement positive
<i>Strachybotrys-Trichocladium</i>	1	Fortement positive

La corrélation positive parfaite (1.0) observée entre plusieurs genres, telles que *Phialophora-Rhizopus*, *Phialophora-Trichoderma*, et *Rhodotorula-Strachybotrys*, pourrait indiquer une co-occurrence stricte de ces genres, possiblement due à des exigences écologiques similaires ou à des interactions mutualistes. Toutefois, Devarajan *et al.* (2022) soulignent que de telles corrélations parfaites dans les écosystèmes naturels doivent être interprétées avec prudence et pourraient nécessiter des investigations plus approfondies pour confirmer leur signification biologique.

La structure complexe des corrélations observées souligne l'importance des interactions interspécifiques dans la formation et le maintien des communautés fongiques marines. Ces interactions peuvent jouer un rôle crucial dans la régulation de la diversité et de la fonction écologique de ces communautés (Kaczmarek *et al.*, 2023).

Il est important de noter que ces corrélations, bien qu'informatives, ne permettent pas d'inférer directement des relations causales. Des études expérimentales complémentaires telles que celles suggérées par Amend *et al.* (2019), seraient nécessaires pour élucider les mécanismes sous-jacents à ces associations.

La prédominance de *Penicillium* et ses fortes corrélations négatives avec d'autres genres pourraient avoir des implications significatives pour la structure globale de la communauté fongique. Ce genre pourrait jouer un rôle de d'une espèce clé dans l'écosystème des herbiers de *P. oceanica*, influençant la composition et la diversité de la communauté fongique associée, une hypothèse soutenue par les travaux récents de Vohník *et al.* (2019) sur les communautés fongiques des racines de *P. oceanica*.

En conclusion, ces corrélations révèlent une structure communautaire complexe et interconnectée des champignons épiphytes associés à *P. oceanica*. Elle met en évidence l'importance des interactions interspécifiques dans la formation et le maintien de ces communautés fongiques marines, soulignant la nécessité d'une approche écosystémique intégrée pour comprendre pleinement leur dynamique et leur fonction écologique (Gladfelter *et al.*, 2019).

4.4.3 Analyse en composantes principales comparative entre les cortèges fongiques épiphytes de Tizirt/Tipaza/Ain Tagourait/Béni Ksila

Dans cette ACP (Fig. 30), les axes F1 et F2 expliquant respectivement 53% et 34% de la variance totale, soit un cumul de 87%. Ce niveau élevé d'explication de la variance indique que l'ACP capture efficacement la majorité des variations dans les données de communautés fongiques épiphytes.

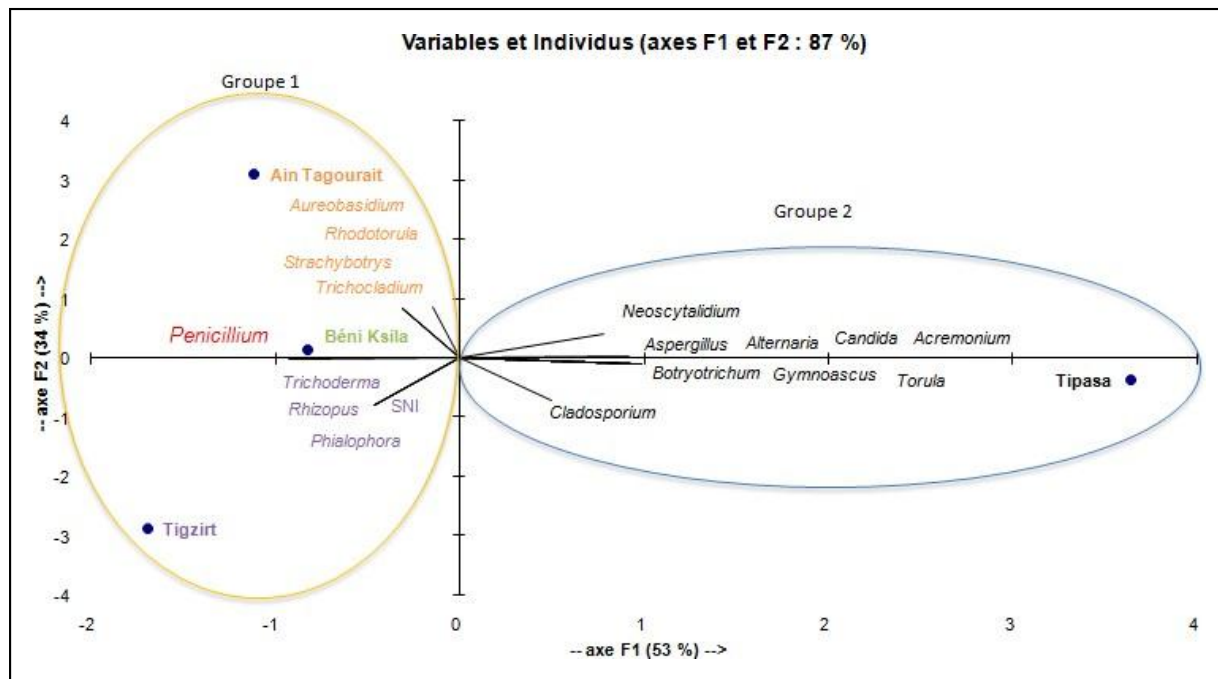


Figure 30. Analyse en composantes principales entre les cortèges fongiques épiphytes de Tizirt/Tipaza/Ain Tagourait/Béni Ksila

Selon l'axe F1, nous visualisons deux groupes : le groupe 1, englobant Tizirt, Ain Tagourait et Béni Ksila, se caractérise par la présence de genres fongiques tels que *Penicillium*, qui est prédominant dans toutes ses zones d'étude. *Aureobasidium*, *Rhodotorula* et *Trichocladium* sont associés à Ain Tagourait, tandis que *Trichoderma*, *Rhizopus* et *Philophora* ne sont recensés que dans la région de Tizirt, ces champignons sont typiquement associés à des environnements riches en matière organique en décomposition, comme le démontre le travail de Kharwaret *al.* (2010).

Le groupe 2 représente la région de Tipaza, avec sa propre communauté fongique distinctive : *Alternaria*, *Acremonium*, *Aspergillus*, *Botryotrichum*, *Candida*, *Cladosporium*, *Gymnoascus*, *Neoscytalidium*, et *Torula*.

L'isolement de Tipaza dans le groupe 2 indique des conditions microclimatiques uniques, favorisant certains genres fongiques, illustrant l'importance des microhabitats dans la structuration de la diversité fongique côtière (Menolli *et al.*, 2010).

En effet, cette ACP révèle une nette ségrégation des communautés fongiques entre les sites d'étude, indiquant une forte influence des conditions environnementales locales sur la

composition mycologique. Cette différenciation spatiale des communautés fongiques épiphytes est en accord avec les résultats de Borovec et Vohník (2018), qui ont démontré l'existence de patterns biogéographiques distincts dans la distribution des champignons, également pour ceux associés aux Phanérogames marines.

De prime abord, les conditions physicochimiques spécifiques de l'eau pourraient jouer un rôle crucial dans la sélection des espèces fongiques. Les variations de salinité, de température et de concentration en nutriments sont connues pour influencer significativement la distribution des champignons marins (Kohlmeyer et Kohlmeyer, 1979; Panno *et al.*, 2013). Des études récentes ont montré que même de légères fluctuations de ces paramètres peuvent entraîner des changements substantiels dans la composition des communautés fongiques épiphytes (Kaczmarska *et al.*, 2023).

En second lieu, les interactions biotiques locales, telles que la compétition interspécifique ou les relations symbiotiques avec d'autres microorganismes ou avec la plante hôte, pourraient expliquer l'absence de certains genres fongiques. Les travaux de Devarajan *et al.* (2022) ont mis en évidence l'importance des interactions microbiennes dans la structuration des communautés fongiques associées aux Phanérogames marines. Dans le cas de Tizirt, Ain Tagourait et Béni Ksila, la prédominance marquée de *Penicillium* pourrait potentiellement inhiber la croissance d'autres genres fongiques par le biais de mécanismes de compétition ou d'allélopathie (Grossart *et al.*, 2019).

En dernier lieu, les caractéristiques spécifiques des herbiers de *Posidonia oceanica* à Béni Ksila, telles que leur densité, leur âge, ou leur état de santé, pourraient influencer la composition de la communauté fongique épiphyte. Des études antérieures ont démontré que la structure et la physiologie des feuilles de *P. oceanica* peuvent affecter significativement la colonisation et la diversité des champignons épiphytes (Cuomo *et al.*, 1985; Lugliè *et al.*, 2021).

Enfin, des facteurs abiotiques tels que l'hydrodynamisme local, la profondeur, ou la disponibilité en lumière pourraient également contribuer à la sélection des espèces fongiques. Les travaux récents de Borovec et Vohník (2018) ont souligné l'importance de ces facteurs dans la distribution des champignons marins associés aux Phanérogames marines.

Ces observations soulignent la complexité des facteurs régissant la distribution des champignons marins et mettent en évidence la nécessité d'études complémentaires intégrant une approche multifactorielle. Des analyses plus approfondies, combinant des techniques de séquençage à haut débit et des mesures précises des paramètres environnementaux, seraient nécessaires pour élucider pleinement les mécanismes sous-jacents à la distribution hétérogène des genres fongiques le long du littoral algérien.

4.5 Analyses statistiques des mycoendophytes recensés dans la région de Béni Ksila

4.5.1 Abondance des genres fongiques endophytes

Pour évaluer la diversité des endophytes fongiques, nous avons déterminé les abondances des différents genres identifiés (Tab.16 et Fig. 31).

Tableau 16. Abondances des genres fongiques endophytes (%) isolés à partir des feuilles de *Posidonia oceanica* de la région de Béni Ksila.

Genres	Abondances (%)
<i>Alternaria</i>	22,22 ±4.22
<i>Aspergillus</i>	5,55 ±1.05
<i>Cladosporium</i>	33,33± 6.32
<i>Penicillium</i>	38,88 ±7.38

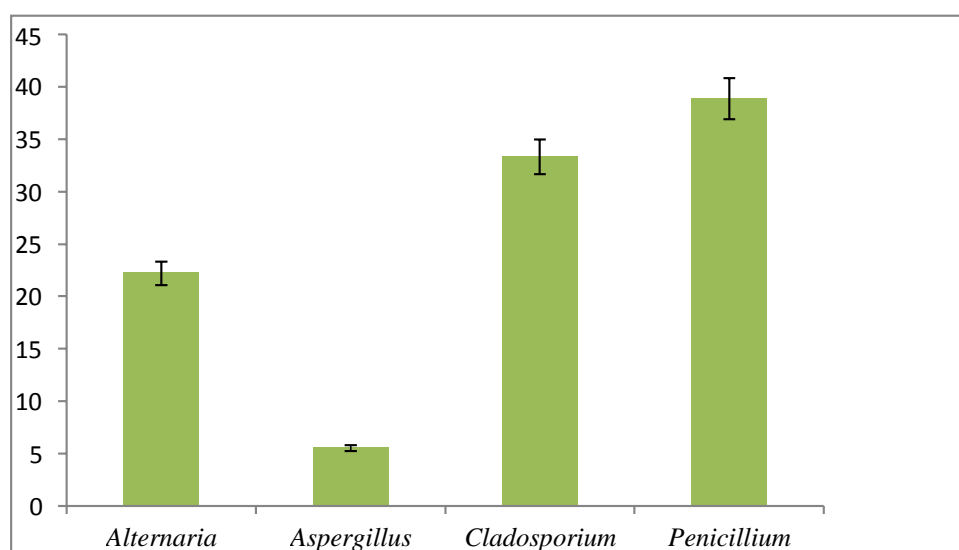


Figure 31. Abondances des genres fongiques endophytes(%) isolés à partir des feuilles de *Posidonia oceanica* de la région de Béni Ksila.

Le graphique de la figure 31 illustre les abondances relatives des différents genres fongiques endophytes identifiés dans l'échantillon de Béni Ksila. *Aspergillus* est le genre le moins abondant, avec environ 5,55 %. *Alternaria* présente une abondance relativement élevée, proche de 22,22 %. *Cladosporium*, avec une abondance d'environ 33,33 %, est l'un des genres les plus dominants. Enfin, *Penicillium* est le genre le plus abondant, avec près de 38,88 %.

Les résultats de Taourirt (2022) dans la région de Tizirt ont révélé la présence de 22 genres ; le genre *Penicillium* est le plus abondant avec 63,84 %. Le genre *Cladosporium* vient en deuxième place après *Penicillium* en matière d'abondance, avec un pourcentage de 14,91%. *Alternaria* présente un pourcentage faible de 0,62%. *Aspergillus* par contre n'a pas été recensé pour cette étude.

D'après les travaux de Panno *et al.* (2013) et Poli *et al.* (2020), une prédominance du genre *Penicillium* a été observée dans les feuilles de *Posidonia oceanica*. Ces études ont également mis en évidence une abondance de champignons du genre *Cladosporium*, en plus de *Penicillium*, constatation qui se retrouve dans nos prélèvements. Selon Poli *et al.* (2020), les espèces des genres *Penicillium* et *Cladosporium* sont fréquemment signalées dans les environnements marins à travers le monde, ce qui s'explique par leur grande capacité d'adaptation aux conditions physicochimiques spécifiques. Cependant, la forte dominance du genre *Penicillium* pourrait être liée aux exigences de la plante hôte en fonction de la saison et du stade phénologique qui peuvent influencer les diverses activités du champignon symbiotique (Zhou & Hyde, 2001).

L'affinité de la plante hôte avec un mycoendophyte est un des éléments majeurs qui définissent leur relation. Cette interaction révèle la dominance ou la prédominance d'un champignon particulier sur un hôte spécifique (Suryanarayanan et Kumaresan, 2000 ; Bettucci *et al.*, 2004).

Les espèces du genre *Penicillium* figurent parmi les champignons les plus répandus, occupant une vaste gamme d'habitats, y compris des environnements extrêmes caractérisés par une forte salinité (Gonçalves *et al.*, 2019). Leur présence est particulièrement marquée dans les écosystèmes marins, où elles jouent un rôle prédominant (Le *et al.*, 2021). En tant qu'endosymbiontes de diverses algues. Les espèces de *Penicillium* se distinguent par leurs activités biologiques notables, notamment des propriétés cytotoxiques et des capacités à inhiber des pathogènes fongiques (Gonçalves *et al.*, 2019).

L'environnement marin, avec ses conditions extrêmes de température, pression et salinité, constitue un contexte écologique unique. Ces contraintes physiologiques poussent les espèces marines de *Penicillium* à produire des composés bioactifs spécifiques, souvent inédits, qui leur confèrent un avantage adaptatif (Grovel *et al.*, 2008). Cette capacité à s'adapter à des environnements stressants pourrait expliquer leur forte présence dans les interactions avec *Posidonia oceanica*, notamment en influençant les dynamiques biotiques et abiotiques.

Selon Toghueo et Boyom (2020), la prédominance de *Penicillium* dans de tels contextes pourrait également être liée à ses nombreuses activités biologiques, notamment son activité antioxydante, facilitée par la synthèse de composés phénoliques. Cette polyvalence écologique et biochimique en fait un acteur clé dans les environnements marins et une source prometteuse de molécules bioactives. Il est probable que les champignons du genre *Penicillium*, abondamment présents dans les feuilles de cette plante, soient impliqués dans la synthèse de composés phénoliques. De nombreuses études, notamment celles d'Ouzid *et al.* (2018) sur les mycoendophytes de *Peganum harmala*, ont démontré la capacité des espèces de

Penicillium à produire des phénols. Ces composés, issus du métabolisme secondaire, sont fréquemment associés à des propriétés antioxydantes, jouant un rôle crucial dans la protection contre le stress oxydatif et contribuant ainsi à la résilience de la plante dans son environnement. Des études antérieures, telle que celle de Boudjela (2015), a révélé des concentrations très élevées de composés phénoliques totaux dans les feuilles de *Posidonia oceanica* de la région d'Oran, principalement des tannins, qui sont visibles au microscope optique dans les coupes de ces feuilles.

Le genre *Cladosporium* est reconnu pour ses propriétés antimicrobiennes efficaces contre les bactéries et les champignons. De plus, il joue un rôle bénéfique dans la croissance des plantes par divers mécanismes. Les métabolites produits par ces champignons contribuent à renforcer la résistance des plantes face aux stress biotiques et abiotiques, tout en favorisant leur développement optimal (Liu *et al.*, 2022).

En ce qui concerne les espèces fongiques présentes en faible proportion, Toofane et Dalymamode (2002) ont observé que certains taxons apparaissent de manière sporadique. Cela suggère que les conditions environnementales pourraient ne pas être idéales pour leur croissance, ou que des endophytes plus compétitifs ont déjà largement colonisé les tissus de l'hôte, limitant ainsi l'opportunité pour ces espèces minoritaires de se développer.

4.5.2 Analyse de variance (ANOVA)

Pour évaluer l'existence d'une différence significative entre les divers composants du cortège mycoendophytique des feuilles de posidonie dans la région de Béni Ksila, un test ANOVA a été réalisé pour chaque genre (Tab. 17).

Tableau 17. Test ANOVA des mycoendophytes foliaires de *Posidonia oceanica* de la région de Béni Ksila.

Genres	Prob (p)	Comparaison	Conclusion
<i>Alternaria</i>	0.54	0.54>0.05	Non significative
<i>Cladosporium</i>	0.54	0.54>0.05	Non significative
<i>Penicillium</i>	0.64	0.64>0.05	Non significative
<i>Aspergillus</i>	0.46	0.46>0.05	Non significative

Aucune valeur significative n'a été obtenue entre les divers composants du cortège mycoendophytique des feuilles de posidonie dans la région de Béni Ksila. Comme pour les épiphytes, cela pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment des conditions environnementales similaires sur le site d'étude. La reproduction asexuée de la posidonie entraîne une uniformité génétique, avec des individus identiques sur le plan génétique. Cela peut conduire à un microbiome similaire, y compris pour les champignons endophytes, ce qui

réduit la diversité fongique. De plus, les clones de *Posidonia* se trouvent souvent dans des habitats écologiquement homogènes, limitant ainsi la variation des espèces fongiques entre les échantillons. Cela pourrait expliquer l'absence de différences significatives relevées par l'ANOVA, un échantillonnage insuffisant ou une faible variabilité des données entre les genres fongiques. Ainsi, les différences entre ces genres pourraient être trop faibles pour être détectées.

4.4.3 Matrice de corrélation

Des interactions significatives ont été mises en évidence entre les différents taxons fongiques présents dans la phyllosphère de la posidonie de la région de Béni Ksila. Ces interactions peuvent être de nature positive ou négative. Pour analyser et comprendre ces relations, une matrice de corrélation a été réalisée afin de les identifier et décrire leurs natures (Tab. 18).

Tableau 18. Matrice de corrélations de la région de Béni Ksila.

	<i>Alternaria</i>	<i>Aspergillus</i>	<i>Cladosporium</i>	<i>Penicillium</i>
<i>Alternaria</i>	1			
<i>Aspergillus</i>	0.22	1		
<i>Cladosporium</i>	-0.22	-0.17	1	
<i>Penicillium</i>	-0.17	0.08	-0.29	1

La matrice de corrélation présentée met en évidence des interactions faibles entre les genres fongiques. La corrélation négative entre *Penicillium* et *Cladosporium* (-0.29) suggère qu'une augmentation de l'abondance de *Penicillium* est associée à une diminution de celle de *Cladosporium*, indiquant une possible compétition pour les mêmes ressources dans cet environnement. De même, la corrélation négative entre *Cladosporium* et *Alternaria* (-0.22), ainsi qu'entre *Cladosporium* et *Aspergillus* (-0.17), indique des interactions concurrentielles, bien que ces corrélations faibles traduisent un effet limité. En revanche, une faible corrélation positive entre *Alternaria* et *Aspergillus* (0.22) pourrait refléter un potentiel de coexistence ou de mutualisme, où les deux champignons pourraient s'entraider dans la phyllosphère. Globalement, la matrice révèle des corrélations négatives prédominantes entre les genres, suggérant une compétition pour les ressources, notamment entre *Cladosporium* et *Penicillium*. Les corrélations plus faibles entre les autres paires indiquent que, bien que des interactions existent, elles restent relativement limitées.

4.4.4 Analyse en composantes principales des mycoendophytes de Béni Ksila

Le plan 1/2 de l'ACP explique 66% du phénomène, l'axe F1 qui explique 36% de l'inertie (Fig. 32).

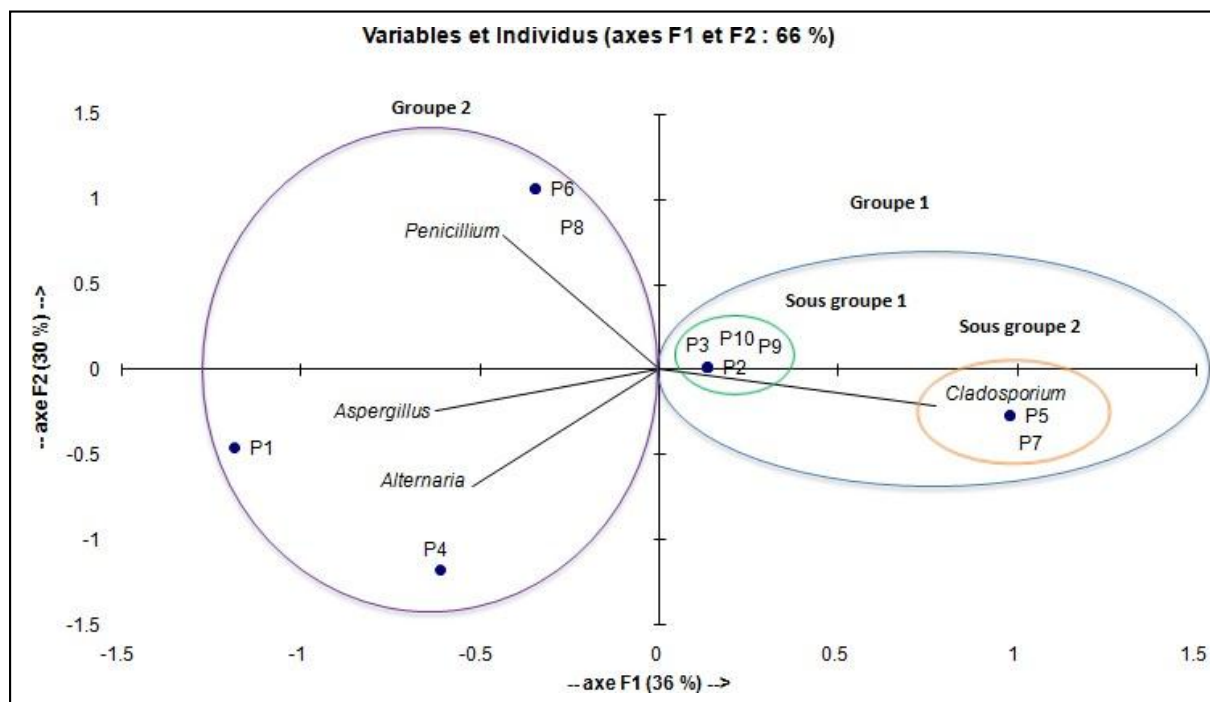


Figure 32. Analyse en composantes principales des mycoendophytes de la région de Béni Ksila.

Selon l'axe F1, nous pouvons distinguer deux groupes. Le premier englobe deux sous groupes, le premier sous groupe qui comporte le P2, P3, P9, P10 n'ont aucun champignon, le deuxième sous groupe est celui du genre *Cladosporium* qui est recensé dans le P5 et le P7. Le deuxième groupe regroupe les prélèvements P1, P6, P8 où le genre *Penicillium* est le plus abondant, *Aspergillus* et *Alternaria* l'accompagnent; ils sont moins abondants et recensés dans les prélèvements P1 et P4 respectivement.

Dans cette étude, *Penicillium* est le genre le plus abondant, suivi par *Cladosporium*. Ces genres sont reconnus comme des sources prolifiques de substances bioactives issues du métabolisme secondaire (Imhoff, 2011). *Penicillium*, en particulier, inclut des espèces capables de produire des hormones végétales influençant la croissance et le développement des plantes (Leitão *et al.*, 2016), tandis que *Cladosporium* est réputé pour ses activités antibactériennes et antifongiques (Benschet *et al.*, 2012). De plus, *Penicillium* possède des propriétés cytotoxiques et inhibitrices contre des pathogènes fongiques (Gonçalves *et al.*, 2019). La matrice de corrélation révèle une interaction antagoniste entre ces deux genres.

L'abondance relative de *Penicillium* et *Cladosporium*, ainsi que leur antagonisme potentiel, reflètent des interactions écologiques complexes, illustrant leur rôle crucial dans la structuration des communautés endophytes fongiques de *Posidoniaoceanica*. Les caractéristiques biologiques spécifiques de ces genres pourraient expliquer leur dominance par rapport à d'autres genres fongiques, soulignant l'importance de ces interactions dans l'écosystème de la phyllosphère de *P. oceanica*.

L'hôte, *Posidonia oceanica*, joue un rôle déterminant dans la structuration de ces communautés endophytes. Des études suggèrent que les pressions sélectives influencent non seulement le génome de la plante, mais aussi la communauté microbienne associée (Jia *et al.*, 2016). En outre, les variations dans la composition chimique de la plante peuvent affecter la diversité des endophytes fongiques, car les caractéristiques chimiques et physiologiques de l'hôte influencent directement la composition des communautés fongiques (Jia *et al.*, 2016). Cette spécificité de l'hôte vis-à-vis des champignons endophytes a déjà été démontrée dans diverses études (Bettucci *et al.*, 2004). De plus, les conditions environnementales au moment du prélèvement, telles que les précipitations, la température et l'humidité, peuvent avoir un impact significatif sur la répartition des endophytes au sein de la plante hôte (Rather *et al.*, 2018). Ces facteurs, combinés aux propriétés spécifiques de *Penicillium* et *Cladosporium*, contribuent à la dynamique complexe des communautés fongiques dans cet écosystème.

4.6 Comparaison entre les cortèges fongiques endophyte de Tigzirt et de Béni Ksila

Afin d'évaluer la diversité des champignons endophytes des feuilles de la posidonie recensés, des analyses statistiques ont été établies en comparant les résultats de Taourirt (2022) à Tigzirt menée au laboratoire Ressources Naturelles de l'UMMTO et notre étude à Béni Ksila.

4.6.1 Analyse de variance comparative des mycoendophytes entre Béni Ksila et Tigzirt

Le tableau suivant représente les résultats du test ANOVA de comparaison entre les deux zones étudiées (Tab. 19).

Tableau 19. Analyse de variance des genres de mycoendophytes de Béni Ksila et Tizirt.

Genres	Prob (p)	Comparaison	Conclusion
<i>Alternaria</i>	0.24	0,24>0,05	Non significative
<i>Aspergillus</i>	0.33	0,33>0,05	Non significative
<i>Cladosporium</i>	0.76	0,76 > 0,05	Non significative
<i>Penicillium</i>	0.02	0,02 < 0,05	Significative
<i>Chaetomium</i>	0.15	0,15>0,05	Non significative
<i>Meria</i>	0.33	0,33>0,05	Non significative
<i>Nigrospora</i>	0.33	0,33>0,05	Non significative
<i>Rhizoctonia</i>	0.17	0,17 > 0,05	Non significative
<i>Trichoderma</i>	0.33	0,33>0,05	Non significative
<i>Trichophyton</i>	0.04	0,04 < 0,05	Significative
<i>SNI 1</i>	0.18	0,18 > 0,05	Non significative
<i>SNI 2</i>	0.18	0,18 > 0,05	Non significative
<i>Neoscytalidium</i>	0.09	0,09 > 0,05	Non significative

D'après les résultats présentés dans le tableau 19, seules genres *Penicillium* ($p= 0,02$) et *Trichophyton* ($p= 0,04$) présentent des différences significatives d'abondance entre les sites étudiés.

Les résultats du test de comparaison multiple de Newman et Keuls pour le genre *Penicillium* révèlent des différences notables entre les deux régions étudiées (Tab. 20). La région de Béni Ksila affiche une abondance de 23.33%, une moyenne statistiquement plus faible que celle de la région de Tizirt (63.84%), où *Penicillium* était plus abondant.

Pour le genre *Trichophyton*, contrairement au genre *Penicillium*, il n'a pas été recensé dans la région de Béni Ksila, mais il est présent dans la région de Tizirt avec une moyenne de 5.21% (Tab. 21).

Ces résultats reflètent la variabilité des genres fongiques et de leur abondance selon la région d'étude, influencés par les facteurs biotiques et abiotiques.

Tableau 20. Comparaison multiple pour le genre *Penicillium*.

Station	Groupe	Moyenne
Béni Ksila	A	23,33
Tigzirt	B	63,84

Tableau 21. Comparaison multiple pour le genre *Trichophyton*.

Station	Groupe	Moyenne
Béni Ksila	A	0,00
Tigzirt	B	5,21

4.6.2 Matrice de corrélation entre les régions de Tigzirt et Béni Ksila

La matrice de corrélation constitue un outil statistique clé pour déceler et quantifier les relations entre plusieurs variables écologiques. Dans le cadre de cette étude, elle est déployée pour examiner les interactions et associations entre les genres fongiques présents dans les zones de Béni Ksila et de Tigzirt (Tab. 22). L'analyse approfondie des modèles de coexistence et d'interactions de ces genres fongiques au sein de ces écosystèmes variés offre une perspective précieuse sur leur distribution spatiale, leurs dynamiques écologiques, ainsi que sur leur rôle fonctionnel et potentiel influence dans la structuration et la résilience de ces habitats.

Tableau 22. Matrice de corrélation entre les genres de mycondophytes des régions de Tigzirt et Béni Ksila.

Genres	Valeurs	Corrélation
<i>Cladosporium-Penicillium</i>	-0,45	Corrélation négative
<i>Chaetomium-SNI 1</i>	0,59	Corrélation positive
<i>Rhizoctonia-Trichophyton</i>	0,47	Corrélation positive

Les genres recensés montrent des corrélation positives entres eux ; ce qui indique les relations étroites présentes entre eux. Le genre *Chaetomium* a une corrélation positive avec un genre non identifié SNI 1 (0,59) ; le genre *Rhizoctonia* a une autre corrélation positive avec le genre *Trichophyton*. Par contre, le genre *Penicillium* a une faible corrélation négative avec le genre *Cladosporium* (-0,45).

4.6.3 Analyse en composantes principales comparative entre les mycoendophytes de Tizirt et Béni Ksila

Nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP) afin d'explorer et de mieux comprendre les relations entre les différents prélèvements ainsi que les genres de mycoendophytes observés dans les deux régions : Béni Ksila et Tizirt. Cette approche permet d'évaluer la nature, l'intensité et la pertinence des liens entre ces éléments (Fig. 33). Les deux premières composantes principales (axes 1 et 2) expliquent 35% de la variance totale des données, dont 21 % pour l'axe 1 et 14 % pour l'axe 2.

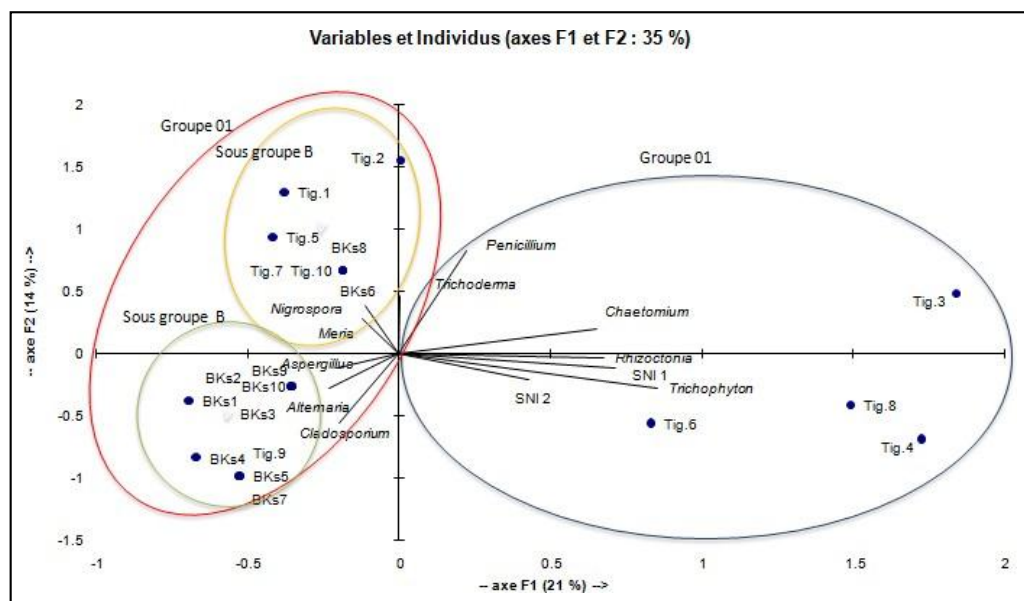


Figure 33. Analyse en composantes principales comparative entre Tizirt et Béni Ksila.

L'axe F1, comportant la majeure partie de la variance. Il sépare les sites en fonction des différences les plus marquées. Le groupe 1 rassemble les genres : *Trichoderma*, *Chaetomium*, *Rhizoctonia*, *Penicillium*, SNI1, *Trichophyton* et SNI2, présents dans les prélèvements de la région de Tizirt (P3, P4, P6 et P8) et dans lesquels *Penicillium* est le genre prédominant.

A l'opposé, le groupe 2 est composé de deux sous-groupes A et B. Il y'a eu lieu de noter la présence des genres *Alternaria*(P1), *Aspergillus*(P4) et *Cladosporium* (P5 et P7) de la région de Béni Ksila formant le sous-groupe A. Pour les prélèvements correspondant au site de Tizirt dans ce groupe, nous trouvons *Nigrospora* et *Meria* qui ne sont répertoriés que dans les prélèvements P1 et P5, respectivement.

Les résultats obtenus mettent en évidence la diversité régionale des genres fongiques des mycoendophytes présents dans la phyllosphère de *Posidonia oceanica*, à travers différentes régions étudiées. Les variations constatées dans la composition fongique des sites étudiés semblent liées aux conditions environnementales spécifiques à chaque localité, notamment les écarts de température, d'humidité et de salinité de l'eau. Ces facteurs climatiques exercent une influence déterminante sur la structuration des communautés

fongiques locales, en modulant la survie, la croissance et la prévalence de certains genres fongiques (Baldrian *et al.*, 2012). La diversité des genres fongiques observée dans certains sites peut également être le reflet d'interactions écologiques complexes avec la flore locale, en particulier *Posidonia oceanica*. Ces interactions peuvent être de nature symbiotique, où les champignons tirent profit des ressources offertes par l'hôte, ou bien compétitive, avec des genres fongiques se disputant les ressources limitées de l'écosystème (Jones *et al.*, 2013).

La corrélation positive démontrée entre certains genres, tels que *Rhizoctonia* et *Trichophyton* indiquent une coexistence régulière et une éventuelle facilitation réciproque. Ces genres peuvent occuper des niches environnementales similaires ou tirer avantage de leur co-présence, favorisant ainsi la formation de communautés fongiques stables et interconnectées (Porrás-Alfaro *et al.*, 2007).

La corrélation négative observée entre les genres *Penicillium* et *Cladosporium* à l'inverse indique une exclusion compétitive, cela peut être dû à des besoins spécifiques en termes de ressources ou à des tolérances différentes aux facteurs environnementaux, menant à une partition écologique, où chaque genre occupe une niche unique pour minimiser la compétition directe (Gao *et al.*, 2020).

4.7. Analyse en composantes principales entre les épiphytes et les endophytes de la région de Béni Ksila.

Pour approfondir la compréhension des dynamiques du cortège fongique, en mettant en lumière la sélectivité fongique au sein des différents compartiments végétaux et identifier les principaux facteurs qui influencent les épiphytes et endophytes associés à *Posidonia oceanica* dans la région de Béni Ksila, une analyse en composantes principales a été réalisée entre les champignons épiphytes et endophytes.

Nous avons considéré le plan $\frac{1}{2}$ de l'analyse en composantes principales (ACP), qui explique 67% du phénomène, avec pour l'axe 1 : 35% et pour l'axe 2 : 31% de l'inertie totale (Fig. 34)

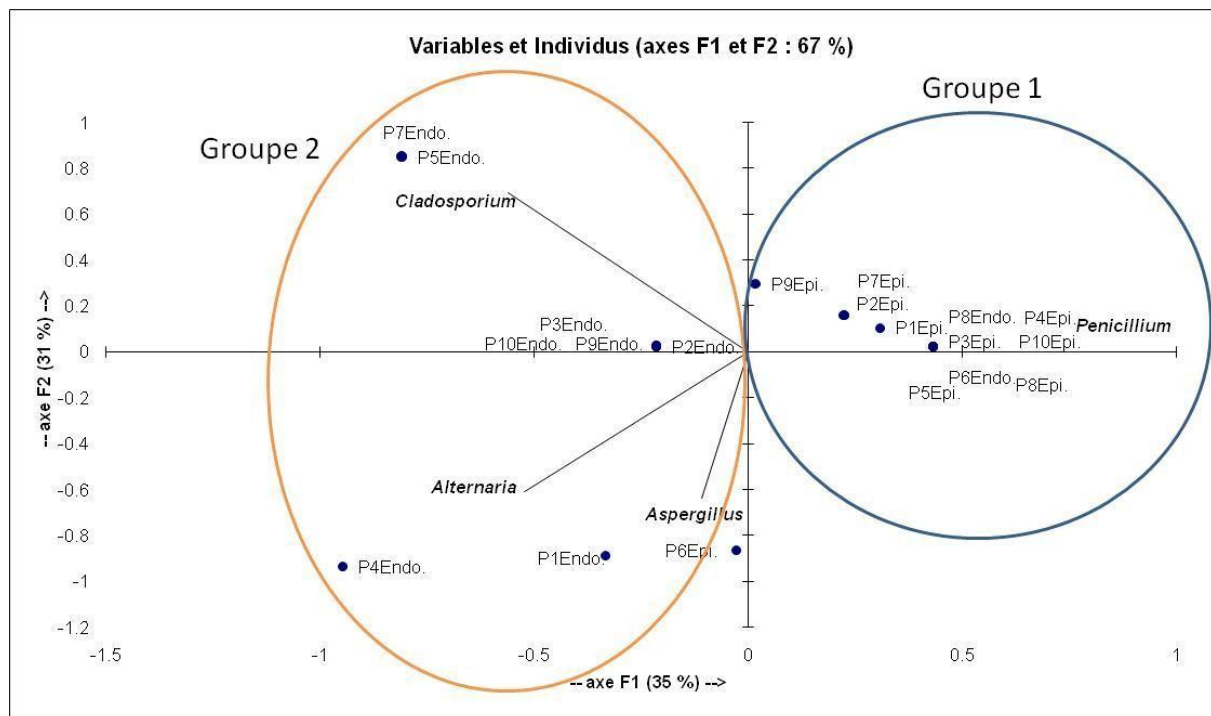


Figure 34. Analyse en composantes principales comparative entre les champignons épiphytes et endophytes de Béni Ksila.

Nous avons subdivisé dans cette ACP nos prélèvements en 2 groupes selon l'axe 1. Le premier concerne le genre *Penicillium* qui est un genre endophyte et épiphyte dominant dans les 2 groupes. Il est retrouvé dans les prélèvements : P9 Epi , P7 Epi, P2Epi, P1Epi, P8Endo, P3Epi, P4Epi, P5Epi et P8Epi.

Le deuxième groupe comporte les genres *Cladosporium*, *Alternaria* et *Aspergillus*, présents dans les prélèvements P7Endo, P5Endo, P3Endo, P10Endo, P9Endo, P2Endo, P4Endo, P1Endo et P6Epi.

Les résultats de l'analyse en composantes principales des champignons internes et externes de la phyllosphère de *Posidonia oceanica* révèlent une similitude marquée entre les communautés fongiques épiphytes et endophytes. Cette convergence est attribuée aux interactions étroites entre les deux communautés. Cela pourrait être expliqué par les relations qui existent entre les épiphytes et les endophytes (Ouzid, 2018). Des études suggèrent qu'il existe un chevauchement entre les communautés fongiques épiphytes et endophytes (Kembel et Mueller, 2014). Malgré la similarité de quelques genres entre les champignons endophytes et épiphytes, on note aussi une différence dans cette composition fongique phyllosphérique. En effet, ces derniers sont à la fois des populations qui ne poussent qu'à quelques millimètres d'intervalle, mais diffèrent grandement dans leur composition (Kharwar *et al.*, 2010). En effet, nous ne comprenons pas encore dans quelle mesure les plantes exercent un contrôle sur les champignons capables de pénétrer dans les feuilles, ainsi que l'influence potentielle des épiphytes sur ce processus (Lebron *et al.*, 2001). Certaines recherches ont montré que l'identité des plantes exerce une influence significative sur la richesse des champignons endophytes, mais n'affecte pas celle des champignons épiphytes.

Cela s'explique par les environnements distincts occupés par ces deux groupes de champignons. Les champignons endophytes, pénétrant dans les tissus foliaires, sont sélectionnés par la plante et sont donc influencés par les caractéristiques physiques des feuilles. En revanche, les champignons épiphytes, qui vivent entièrement à l'extérieur de l'hôte, sont exposés à des conditions abiotiques plus extrêmes. Ces différences dans leurs modes de vie déterminent ainsi leur composition et leur abondance (Yao *et al.*, 2019).

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Les interactions entre les communautés fongiques, épiphytes et endophytes, et leurs plantes hôtes sont essentielles pour comprendre les mécanismes qui sous-tendent la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes. Ce travail a pour objectif d'étudier la diversité des champignons mycoendophytes et épiphytes présents sur les feuilles de *Posidonia oceanica* dans la région de Beni Ksila (Wilaya de Béjaïa), dans le cadre des recherches menées par le laboratoire « Ressources naturelles » de l'université Mouloud Mammeri de TiziOuzou.

L'analyse en composantes principales (ACP) des épiphytes ainsi que celle des endophytes a illustré la dominance relative de *Penicillium* et son rôle possible dans la structuration des communautés fongiques. Ce genre semble jouer un rôle clé dans la protection des plantes en produisant des métabolites secondaires, ce qui contribue à leur résilience et à leur persistance, et des molécules inhibitrices qui empêchent les autres genres de s'installer.

Les résultats de cette étude ont été comparés à ceux de travaux précédents réalisés dans d'autres sites en Algérie (Tigzirt, Tipaza, et Ain Tagourait). Une variabilité interannuelle et entre les sites du cortège fongique a été observée pour les épiphytes et les endophytes, avec des genres spécifiques pour chaque région. Ces résultats soulignent l'influence des conditions environnementales locales sur la composition des communautés fongiques associées à *Posidonia oceanica*.

L'analyse des relations entre les communautés fongiques épiphytiques et endophytiques a révélé des similitudes et des divergences. Bien qu'il existe un certain chevauchement, ces deux communautés semblent adopter des stratégies écologiques distinctes, influençant leur répartition et leur rôle dans l'écosystème. Les champignons fongiques jouent un rôle déterminant dans la protection des plantes contre les stress biotiques et abiotiques, renforçant ainsi leur résilience.

Cette étude offre de nouvelles perspectives sur la diversité des communautés fongiques épiphytes et endophytes de *Posidonia oceanica*, ouvrant la voie à des recherches futures sur leurs interactions complexes avec l'hôte marin. Parmi les perspectives proposées :

- Investiguer plus en détail les interactions entre les genres fongiques, notamment les mécanismes de compétition et d'antagonisme, pour mieux comprendre les dynamiques de colonisation des épiphytes et endophytes.

Conclusion générale et perspectives

- Exploiter le potentiel des métabolites secondaires produits par les champignons associés à *Posidonia oceanica* pour des applications pharmaceutiques ou agricoles, notamment dans la lutte contre les agents pathogènes.
- Étendre les recherches à d'autres régions et évaluer l'impact des perturbations anthropiques sur la diversité fongique des écosystèmes marins, afin de proposer des mesures de gestion pour la conservation de *Posidonia oceanica* et des micro-communautés associées.
- Comparer plus systématiquement la diversité fongique de différents sites méditerranéens pour mieux comprendre l'influence des conditions environnementales locales sur la structuration des communautés fongiques.
- Examiner l'influence potentielle de la polyploïdie de *Posidonia oceanica* sur la diversité et la structure des communautés fongiques associées. La polyploïdie, fréquente chez les plantes marines, pourrait avoir des implications significatives sur les interactions hôte-champignon. Il serait pertinent d'étudier si les différents niveaux de ploïdie observés chez *P. oceanica* (diploïde, triploïde, tétraploïde) affectent la composition et la fonction des communautés fongiques épiphytes et endophytes. Cette recherche pourrait révéler des mécanismes adaptatifs liés à la polyploïdie dans les écosystèmes marins et offrir de nouvelles perspectives sur l'évolution des interactions plante-champignon dans ce milieu .

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Adnan, M., Islam, W., & Gang, L. (2022). Advanced research tools for fungal diversity and its impact on forest ecosystem. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20317-8>
- Alcoverro, T., Cerbasi, E., & Ballesteros, E. (2001). The photosynthetic capacity of the seagrass *Posidonia oceanica* : Influence of nitrogen and light. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 261(1), 107-120. [https://doi.org/10.1016/s0022-0981\(01\)00267-2](https://doi.org/10.1016/s0022-0981(01)00267-2)
- Alexopoulos, C. J., Mims, C. W., & Blackwell, M. M. (1996). *Introductory Mycology*. Wiley.
- Amend, A., Burgaud, G., Cunliffe, M., Edgcomb, V. P., Ettinger, C. L., Gutiérrez, M. H., Heitman, J., Hom, E. F. Y., Ianiri, G., Jones, A. C., Kagami, M., Picard, K. T., Quandt, C. A., Raghukumar, S., Riquelme, M., Stajich, J., Vargas-Muñiz, J., Walker, A. K., Yarden, O., & Gladfelter, A. S. (2019). Fungi in the Marine Environment: Open Questions and Unsolved Problems. *mBio*. <https://doi.org/10.1128/mBio.01189-18>
- Anand, U., Pal, T., Yadav, N., Singh, V. K., Tripathi, V., Choudhary, K. K., Shukla, A. K., Sunita, K., Kumar, A., Bontempi, E., Ma, Y., Kolton, M., & Singh, A. K. (2023). Current Scenario and Future Prospects of Endophytic Microbes : Promising Candidates for Abiotic and Biotic Stress Management for Agricultural and Environmental Sustainability. *Microbial Ecology*, 86(3), 1455-1486. <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02190-1>
- Arnaud, F., Lignier, V., Revel, M., Desmet, M., Beck, C., Pourchet, M., Charlet, F., Trentesaux, A., & Tribouvillard, N. (2002). Flood and earthquake disturbance of ²¹⁰Pb geochronology (Lake Anterne, NW Alps). *Terra Nova*, 14(4), 225-232. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00413.x>
- Arnold, A. (2007). Understanding the diversity of foliar endophytic fungi : Progress, challenges, and frontiers. *Fungal Biology Reviews*, 21, 51-66. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2007.05.003>

Références bibliographiques

- Balestri, E., Piazzini, L., & Cinelli, F. (1998). Survival and growth of transplanted and natural seedlings of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in a damaged coastal area. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 228(2), 209-225. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(98\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(98)00027-6)
- Barghoorn, E. S., Barghoorn, E. S., & Linder, D. H. (1944). Marine Fungi : Their Taxonomy and Biology. *Farlowia : a journal of cryptogamic botany*, 1(3), 395-467. <https://doi.org/10.5962/p.315987>
- Beer, S., & Koch, E. (1996). Photosynthesis of marine macroalgae and seagrasses in globally changing CO₂ environments. *Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER*, 141. <https://doi.org/10.3354/meps141199>
- Benny, G. L., Humber, R. A., & Morton, J. B. (2001). Zygomycota : Zygomycetes. In D. J. McLaughlin, E. G. McLaughlin, & P. A. Lemke (Éds.), *Systematics and Evolution : Part A* (p. 113-146). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-10376-0_6
- Bensch, K., Braun, U., Groenewald, J. Z., & Crous, P. W. (2012). The genus *Cladosporium*. *Studies in Mycology*, 72(1), 1-401. <https://doi.org/10.3114/sim0003>
- Bindschedler, S., Cailleau, G., & Verrecchia, E. (2016). Role of Fungi in the Biomineralization of Calcite. *Minerals*, 6, 1-19. <https://doi.org/10.3390/min6020041>
- Blackwell, M. (2011). The fungi : 1, 2, 3 5.1 million species? *American Journal of Botany*, 98(3), 426-438. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000298>
- Boddy, L. (2001). Fungal Community Ecology and Wood Decomposition Processes in Angiosperms : From Standing Tree to Complete Decay of Coarse Woody Debris. *Ecological Bulletins*, 49, 43-56.
- Bouchet, P., J.P., R., Fryda, J., Hausdorf, B., Ponder, W., Valdes, A., & Warén, A. (2005). Classification and Nomenclator of Gastropod Families. *Malacologia*, 47, 1-368.

Références bibliographiques

- Boudouresque, C. F., Bernard, G., Bonhomme, P., & Groupement d'intérêt scientifique Posidonie (Marseille). (2006). *Préservation et conservation des herbiers de Posidonia Oceanica*. Ramoge pub.
- Boudouresque, C. F., Bernard, G., Pergent, G., Shili, A., & Verlaque, M. (2009). *Regression of Mediterranean seagrasses caused by natural processes and anthropogenic disturbances and stress : A critical review*. 52(5), 395-418. <https://doi.org/10.1515/BOT.2009.057>
- Boudouresque, C., G. B., Bonhomme, P., Charbonnel, E., G. D., A. M., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Ruitton, S., & Tunesi, L. (2006). *Préservation et Conservation Des Herbiers à Posidonia oceanica*.
- Bouguesir, R. (2022). Approche de la diversité des champignons épiphytes de la posidonie *Posidonia oceanica* de la région de Tizirt (Wilaya de TiziOuzou) (Mémoire de Master 2, Université d'Alger 1).
- Brock, M., Nielsen, D., Shiel, R., Green, J., & Langley, J. (2003). Drought and aquatic community resilience : The role of eggs and seeds in sediments of temporary wetlands. *Freshwater Biology*, 48, 1207-1218. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01083.x>
- Brumpt, É. (1913). *Précis de parasitologie* (2d ed., entièrement remaniée). Masson.
- Bueno, D. J., & Silva, J. O. (2014). FUNGI | The Fungal Hypha. In C. A. Batt & M. L. Tortorello (Éds.), *Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition)* (p. 11-19). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00132-4>
- Burgaud, G., Edgcomb, V., Hassett, B., Kumar, A., Li, W., Mara, P., Peng, X. (Nick), Philippe, A., Phule, P., Prado, S., Quémener, M., & Roullier, C. (2022). *Marine Fungi* (p. 243-295). https://doi.org/10.1007/978-3-030-90383-1_5
- Carlile, M. J., Watkinson, S. C., & Gooday, G. W. (2001). *The Fungi*. Gulf Professional Publishing.

Références bibliographiques

- Carroll, G. (1988). Fungal Endophytes in Stems and Leaves : From Latent Pathogen to Mutualistic Symbiont. *Ecology*, 69(1), 2-9. <https://doi.org/10.2307/1943154>
- Cavallaro, L., Lo Re, C., Paratore, G., Viviano, A., & Foti, E. (2011). Response of Posidonia Oceanica plants to wave motion in shallow-waters—Preliminary experimental results. In *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering; No 32 (2010) : Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering, Shanghai, China, 2010.; waves.49* (Vol. 1). <https://doi.org/10.9753/icce.v32.waves.49>
- Chávez, R., Fierro, F., García-Rico, R. O., & Vaca, I. (2015). Filamentous fungi from extreme environments as a promising source of novel bioactive secondary metabolites. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00903>
- Collado, J., Platas, G., González, I., & Peláez, F. (1999). Geographical and seasonal influences on the distribution of fungal endophytes in Quercus ilex. *The New Phytologist*, 144(3), 525-532. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00533.x>
- Cook, K., Sharma, J., Taylor, A. D., Herriott, I., & Taylor, D. L. (2022). Epiphytic fungal communities vary by substrate type and at submetre spatial scales. *Molecular Ecology*, 31(6), 1879-1891. <https://doi.org/10.1111/mec.16358>
- Deacon, J. (2005). Fungal Nutrition. In *Fungal Biology* (p. 110-121). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118685068.ch6>
- Deutsch, Y., Gur, L., Berman Frank, I., & Ezra, D. (2021). Endophytes From Algae, a Potential Source for New Biologically Active Metabolites for Disease Management in Aquaculture. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.636636>
- Duarte, C., Benavent, E., Del, M., & Sanchez, C. (1999). The microcosm of particles within seagrass Posidonia oceanica canopies. *Marine Ecology Progress Series*, 181, 289-295. <https://doi.org/10.3354/meps181289>

Références bibliographiques

- Duarte, C., & Sand-Jensen, K. (1990). Seagrass colonization : Biomass development and shoot demography in *Cymodocea nodosa* patches. *Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER*, 67, 97-103. <https://doi.org/10.3354/meps067097>
- Dufresne, P. (2021). *Identification des champignons d'importance médicale*. 64.
- Ferguson, H. (2023, novembre 21). *Saprolegnia Infection in Fish—Gross Pathology and Histopathology—Fish Pathology*. <https://fishhistopathology.com/?p=2714>
- Fourqurean, J., Duarte, C., Kennedy, H., Marba, N., Holmer, M., Mateo, M., Apostolaki, E., Kendrick, G., Krause-Jensen, D., McGlathery, K., & Serrano, O. (2012). Seagrass ecosystems as a significant global carbon stock. *Nature Geoscience*, 5, 505-509. <https://doi.org/10.1038/ngeo1477>
- Frank, A. C., Saldierna Guzmán, J. P., & Shay, J. E. (2017). Transmission of Bacterial Endophytes. *Microorganisms*, 5(4), 70. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5040070>
- Gessner, M. O., & Chauvet, E. (1994). Importance of Stream Microfungi in Controlling Breakdown Rates of Leaf Litter. *Ecology*, 75(6), 1807-1817. <https://doi.org/10.2307/1939639>
- Ghasemnezhad, A., Frouzy, A., Ghorbanpour, M., & Sohrabi, O. (2021). Microbial Endophytes : New Direction to Natural Sources. In D. K. Maheshwari & S. Dheeman (Éds.), *Endophytes : Mineral Nutrient Management, Volume 3* (p. 123-155). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65447-4_6
- Gomes, T., Pereira, J. A., Benhadi, J., Lino-Neto, T., & Baptista, P. (2018). Endophytic and Epiphytic Phyllosphere Fungal Communities Are Shaped by Different Environmental Factors in a Mediterranean Ecosystem. *Microbial Ecology*, 76(3), 668-679. <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1161-9>
- Hartog, C., Kuo, J., Larkum, A., Orth, R., & Duarte, C. (2007). *Taxonomy and Biogeography of Seagrasses* (p. 1-23). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2983-7_1

Références bibliographiques

- Hawksworth, D. L. (2001). The magnitude of fungal diversity : The 1.5 million species estimate revisited* *Paper presented at the Asian Mycological Congress 2000 (AMC 2000), incorporating the 2nd Asia-Pacific Mycological Congress on Biodiversity and Biotechnology, and held at the University of Hong Kong on 9-13 July 2000. *Mycological Research*, 105(12), 1422-1432. <https://doi.org/10.1017/S0953756201004725>
- Hibbett, D. S., Binder, M., Bischoff, J. F., Blackwell, M., Cannon, P. F., Eriksson, O. E., Huhndorf, S., James, T., Kirk, P. M., Lücking, R., Thorsten Lumbsch, H., Lutzoni, F., Matheny, P. B., McLaughlin, D. J., Powell, M. J., Redhead, S., Schoch, C. L., Spatafora, J. W., Stalpers, J. A., ... Zhang, N. (2007). A higher-level phylogenetic classification of the Fungi. *Mycological Research*, 111(5), 509-547. <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2007.03.004>
- Hibbett, D. S., & Donoghue, M. J. (2001). Analysis of Character Correlations among Wood Decay Mechanisms, Mating Systems, and Substrate Ranges in Homobasidiomycetes. *Systematic Biology*, 50(2), 215-242.
- Honegger, R. (1991). Functional Aspects of the Lichen Symbiosis. *Annual Review of Plant Biology*, 42(Volume 42, 1991), 553-578. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.42.060191.003005>
- Hongsanan, S., Sanchez-Ramirez, S., Crous, P., Ariyawansa, H., Zhao, R.-L., & Hyde, K. (2016). The evolution of fungal epiphytes. *Mycosphere*, 7, 1690-1712. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/7/11/6>
- Houngnandan, F., Kéfi, S., & Deter, J. (2020). Identifying key-conservation areas for *Posidonia oceanica* seagrass beds. *Biological Conservation*, 247, 108546. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108546>
- Huang, Y., Wang, J., Li, G., Zheng, Z., & Su, W. (2001). Antitumor and antifungal activities in endophytic fungi isolated from pharmaceutical plants *Taxus mairei*, *Cephalataxus fortunei* and *Torreya grandis*. *FEMS Immunology & Medical Microbiology*, 31(2), 163-167. <https://doi.org/10.1111/j.1574-695X.2001.tb00513.x>

Références bibliographiques

- Hyde, K. D., Sarma, V. V., & Jones, E. B. G. (2000). Morphology and taxonomy of higher marine fungi. *Fungal Diversity Research Series, 1*, 172-204.
- James, T. Y., Kauff, F., Schoch, C. L., Matheny, P. B., Hofstetter, V., Cox, C. J., Celio, G., Gueidan, C., Fraker, E., Miadlikowska, J., Lumbsch, H. T., Rauhut, A., Reeb, V., Arnold, A. E., Amtoft, A., Stajich, J. E., Hosaka, K., Sung, G.-H., Johnson, D., ... Vilgalys, R. (2006). Reconstructing the early evolution of Fungi using a six-gene phylogeny. *Nature, 443*(7113), 818-822. <https://doi.org/10.1038/nature05110>
- Jennings, D. H., & Lysek, G. (1999). *Fungal Biology*. BIOS Scientific Publishers.
- Jones, E. B. G. (2011). *Are there more marine fungi to be described?* *54*(4), 343-354. <https://doi.org/10.1515/bot.2011.043>
- Jones, E. B. G., & Pang, K.-L. (2012). 1 Introduction Marine fungi. In E. B. G. Jones & K.-L. Pang (Éds.), *Marine Fungi and Fungal-like Organisms* (p. 1-14). DE GRUYTER. <https://doi.org/10.1515/9783110264067.1>
- Kendrick, B. (2000). *The Fifth Kingdom*. Focus Pub.
- Khalef, W. (2023). Approche de la diversité des champignons épiphytes de la posidonie *Posidonia oceanica* de la région de Tipaza (Wilaya de Tipaza) (Mémoire de Master 2, Université d'Alger 1).
- Khemici, M. (2024). Contribution à l'étude de champignons épiphytes foliaires de *Posidonia oceanica* de la région d'Aïn Tagourait, wilaya de Tipaza, Algérie (Mémoire de Master 2, Université de Tizi Ouzou).
- Kohlmeyer, J., & Kohlmeyer, E. (1979). *Marine mycology; the higher fungi*. New York, N.Y. (USA) Academic Press. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Marine+mycology%3B+the+higher+fungi&author=Kohlmeyer%2C+J.&publication_year=1979
- Kuo, J., & Hartog, C. den. (2006). Seagrass Morphology, Anatomy, and Ultrastructure. In A. W. D. LARKUM, R. J. ORTH, & C. M. DUARTE (Éds.), *SEAGRASSES: BIOLOGY*,

Références bibliographiques

- ECOLOGY AND CONSERVATION* (p. 51-87). Springer Netherlands.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2983-7_3
- Kusari, S., Hertweck, C., & Spiteller, M. (2012). Chemical Ecology of Endophytic Fungi : Origins of Secondary Metabolites. *Chemistry & Biology*, 19(7), 792-798.
<https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2012.06.004>
- Lenardon, M. D., Munro, C. A., & Gow, N. A. (2010). Chitin synthesis and fungal pathogenesis. *Current Opinion in Microbiology*, 13(4), 416-423.
<https://doi.org/10.1016/j.mib.2010.05.002>
- Les, D. H., Cleland, M. A., & Waycott, M. (1997). Phylogenetic Studies in Alismatidae, II : Evolution of Marine Angiosperms (Seagrasses) and Hydrophily. *Systematic Botany*, 22(3), 443-463. <https://doi.org/10.2307/2419820>
- Leuckart, R. (1879). *Die Parasiten des Menschen und die von ihnen herrührenden Krankheiten* (2. Aufl). C.F. Winter'sche.
- Lindow, S. E., & Brandl, M. T. (2003). Microbiology of the phyllosphere. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(4), 1875-1883.
<https://doi.org/10.1128/AEM.69.4.1875-1883.2003>
- Lutzoni, F., Kauff, F., Cox, C. J., McLaughlin, D., Celio, G., Dentinger, B., Padamsee, M., Hibbett, D., James, T. Y., Baloch, E., Grube, M., Reeb, V., Hofstetter, V., Schoch, C., Arnold, A. E., Miadlikowska, J., Spatafora, J., Johnson, D., Hambleton, S., ... Vilgalys, R. (2004). Assembling the fungal tree of life : Progress, classification, and evolution of subcellular traits. *American Journal of Botany*, 91(10), 1446-1480.
<https://doi.org/10.3732/ajb.91.10.1446>
- Mancuso, F. P., Bernardeau-Esteller, J., Spinelli, M., Sarà, G., Ruiz, J. M., Calvo, S., & Tomasello, A. (2023). Life on the edge : Adaptations of *Posidonia oceanica* to hypersaline conditions in a Mediterranean lagoon system. *Environmental and Experimental Botany*, 210, 105320. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105320>

Références bibliographiques

- Manoharachary, C., & D Dr, N. (2016). *Endophytic hyphomycetous fungi associated with some medicinal plants from Telangana state, India*. 69, 169-172.
- Marbà, N., & Duarte, C. M. (2010). Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality. *Global Change Biology*, 16(8), 2366-2375. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02130.x>
- Mateo, M., & Romero, J. (1997). Detritus dynamics in the seagrass *Posidonia oceanica*: Elements for an ecosystem carbon and nutrient budget. *Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER*, 151, 43-53. <https://doi.org/10.3354/meps151043>
- Mazzella, L., Scipione, M., Gambi, M. C., Buia, M., Lorenti, M., Zupo, V., & Cancemi, G. (1993, janvier 2). *The Mediterranean seagrass Posidonia oceanica and Cymodocea nodosa*.
- Mechiah, F. (2015). *Approche des symbioses racinaires de pistacia atlantica desf. De dayate el gouffa (laghouat, Algerie)*. [PhD Thesis, Tizi ouzou]. <https://www.ccdz.cerist.dz/admin/notice.php?id=00000000000000787347000632>
- Moore, D., Robson, G., & Trinci, A. (2000). *21st Century Guidebook to Fungi*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511977022>
- Morton, J., & Benny, G. (1990). Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (*Zygomycetes*): A new order, Glomales, two new suborders, Glomineae and Gigasporineae, and two new families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with an emendation of Glomaceae. *Mycotaxon*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Revised-classification-of-arbuscular-mycorrhizal-a-Morton-Benny/544e9da9547ccfbbb9a0a0ebf17ecaf306bb920>
- Moulinier, C. (2002). *Parasitologie et mycologie médicales : Éléments de morphologie et de biologie / Claude Moulinier,...* Editions médicales internationales Lavoisier.
- Nakaoka, M. (2005). Plant–animal interactions in seagrass beds: Ongoing and future challenges for understanding population and community dynamics. *Population Ecology*, 47(3), 167-177. <https://doi.org/10.1007/s10144-005-0226-z>

Références bibliographiques

- Olsen, J. L., Rouzé, P., Verhelst, B., Lin, Y.-C., Bayer, T., Collen, J., Dattolo, E., De Paoli, E., Dittami, S., Maumus, F., Michel, G., Kersting, A., Lauritano, C., Lohaus, R., Töpel, M., Tonon, T., Vanneste, K., Amirebrahimi, M., Brakel, J., ... Van de Peer, Y. (2016). The genome of the seagrass *Zostera marina* reveals angiosperm adaptation to the sea. *Nature*, 530(7590), 331-335. <https://doi.org/10.1038/nature16548>
- Orth, R., Carruthers, T., Dennison, W., Duarte, C., Fourqurean, J., JR, K., Hughes, A., Kendrick, G., Kenworthy, W., Olyarnik, S., Short, F., Waycott, M., & Williams, S. (2006). A Global Crisis for Seagrass Ecosystems. *BioScience*, 56, 987-996. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56\[987:AGCFSE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56[987:AGCFSE]2.0.CO;2)
- Ott, J. (2008). Growth and Production in *Posidonia Oceanica* (L.) Delile. *Marine Ecology*, 1, 47-64. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.1980.tb00221.x>
- Oulhen, N., Schulz, B. J., & Carrier, T. J. (2016). English translation of Heinrich Anton de Bary's 1878 speech, 'Die Erscheinung der Symbiose' ('De la symbiose'). *Symbiosis*, 69(3), 131-139. <https://doi.org/10.1007/s13199-016-0409-8>
- Pang, K.-L., Overy, D. P., Jones, E. B. G., Calado, M. da L., Burgaud, G., Walker, A. K., Johnson, J. A., Kerr, R. G., Cha, H.-J., & Bills, G. F. (2016). 'Marine fungi' and 'marine-derived fungi' in natural product chemistry research: Toward a new consensual definition. *Fungal Biology Reviews*, 30(4), 163-175. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2016.08.001>
- Panno, L., Bruno, M., Voyron, S., Anastasi, A., Gnani, G., Miserere, L., & Varese, G. C. (2013). Diversity, ecological role and potential biotechnological applications of marine fungi associated to the seagrass *Posidonia oceanica*. *New Biotechnology*, 30(6), 685-694. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.01.010>
- Pardow, A., Gehrig-Downie, C., Gradstein, S., & Lakatos, M. (2012). Functional diversity of epiphytes in two tropical lowland rainforests, French Guiana: Using bryophyte life-forms to detect areas of high biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, 21, 3637-3655. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0386-z>

Références bibliographiques

- Patil, R. H., Patil, M. P., & Maheshwari, V. L. (2023). Endophytes in Apocynaceae Plants. In R. H. Patil, M. P. Patil, & V. L. Maheshwari (Éds.), *Apocynaceae Plants : Ethnobotany, Phytochemistry, Bioactivity and Biotechnological Advances* (p. 173-190). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5406-3_12
- Pergent-Martini, C., Leoni, V., Pasqualini, V., Ardizzone, G., Balestri, E., Bedini, R., Belluscio, A., T. B., Borg, J. A., Boudouresque, C., Boumaza, S., M. B., Buia, M., S. C., Cebrian, J., Charbonnel, E., Cinelli, F., Cossu, A., Di Maida, G., & Velimirov, B. (2005). Descriptors of *Posidonia oceanica* meadows : Use and application. *Ecological Indicators*, 5, 213-230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.02.004>
- Petrini, O. (1991). Fungal Endophytes of Tree Leaves. In J. H. Andrews & S. S. Hirano (Éds.), *Microbial Ecology of Leaves* (p. 179-197). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3168-4_9
- Pie, M. R., Caron, F. S., Dallimore, T., Einzmann, H., Hietz, P., Kessler, M., Ramos, F. N., Elias, J. P. C., Kreft, H., Krömer, T., Higuira, M. J. C., Zuleta, D., Machado, G., de Gasper, A. L., Zotz, G., Mendieta Leiva, G., Jimenez-Lopez, D. A., Mendes, A. F., Brancalion, P., ... Batke, S. (2023). Phylogenetic diversity and the structure of host-epiphyte interactions across the Neotropics. *PeerJ*, 11, e15500. <https://doi.org/10.7717/peerj.15500>
- Poli, A., Bovio, E., Ranieri, L., Varese, G. C., & Prigione, V. (2020). Fungal Diversity in the Neptune Forest : Comparison of the Mycobiota of *Posidonia oceanica*, *Flabellia petiolata*, and *Padina pavonica*. *Frontiers in Microbiology*, 11, 933. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00933>
- Poli, A., Varese, G. C., Garzoli, L., & Prigione, V. (2022). Seagrasses, seaweeds and plant debris : An extraordinary reservoir of fungal diversity in the Mediterranean Sea. *Fungal Ecology*, 60, 101156. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2022.101156>
- Procaccini, G., Orsini, L., Ruggiero, M. V., & Scardi, M. (2001). Spatial patterns of genetic diversity in *Posidonia oceanica*, an endemic Mediterranean seagrass. *Molecular Ecology*, 10(6), 1413-1421. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2001.01290.x>

Références bibliographiques

- Raghukumar, S. (2017). Fungi : Characteristics and Classification. In S. Raghukumar (Éd.), *Fungi in Coastal and Oceanic Marine Ecosystems : Marine Fungi* (p. 1-15). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54304-8_1
- Reboux, G., Bellanger, A.-P., Roussel, S., Grenouillet, F., & Millon, L. (2010). Moisissures et habitat : Risques pour la santé et espèces impliquées. *Revue des Maladies Respiratoires*, 27(2), 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.rmr.2009.09.003>
- Richards, T., Jones, M., Leonard, G., & Bass, D. (2012). Marine Fungi : Their Ecology and Molecular Diversity. *Annual review of marine science*, 4, 495-522. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120710-100802>
- Rinaldi, A., Martinez, M., Badalamenti, F., D'Anna, G., Mirto, S., Marín-Guirao, L., Procaccini, G., & Montalto, V. (2023). The ontogeny-specific thermal sensitivity of the seagrass *Posidonia oceanica*. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1183728>
- Rodriguez, R. J., White Jr, J. F., Arnold, A. E., & Redman, R. S. (2009). Fungal endophytes : Diversity and functional roles. *New Phytologist*, 182(2), 314-330. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x>
- Saar, D., Polans, N., Sørensen, P., & Duvall, M. (2001). Angiosperm DNA Contamination by Endophytic Fungi : Detection and Methods of Avoidance. *Plant Molecular Biology Reporter*, 19, 249-260. <https://doi.org/10.1007/BF02772897>
- Schulz, B., & Boyle, C. (2005). The endophytic continuum. *Mycological Research*, 109(Pt 6), 661-686. <https://doi.org/10.1017/s095375620500273x>
- Schüßler, A., Schwarzott, D., & Walker, C. (2001). A new fungal phylum, the *Glomeromycota* : Phylogeny and evolution*. *Mycological Research*, 105(12), 1413-1421. <https://doi.org/10.1017/S0953756201005196>
- Schwartz, W. (1963). T. W. Johnson jr. U. F. K. Sparrow jr., Fungi in Oceans and Estuaries. XXII u. 668 S., 7 Abb., 19 Tab., 17 Taf., Weinheim 1961, J. Cramer. Preis DM 120,—;

Références bibliographiques

- \$ 30. *Zeitschrift Für Allgemeine Mikrobiologie*, 3(3), 228-228.
<https://doi.org/10.1002/jobm.19630030312>
- Sculthorpe, C. D. (1967). *The Biology of Aquatic Vascular Plants*. Edward Arnold.
- Selim, K., El-Beih, A., Abdel-Rahman, T., & El Diwany, A. (2012). Biology of Endophytic Fungi. *CREAM*, 2, 31-82. <https://doi.org/10.5943/cream/2/1/3>
- Sénéquier-Crozet, A., & Canard, B. (2016). *Les champignons endophytes : Impact sur les écosystèmes et production de molécules d'intérêt thérapeutique*. 102.
- Shearer, C. A., Descals, E., Kohlmeyer, B., Kohlmeyer, J., Marvanová, L., Padgett, D., Porter, D., Raja, H. A., Schmit, J. P., Thorton, H. A., & Voglymayr, H. (2007). Fungal biodiversity in aquatic habitats. *Biodiversity and Conservation*, 16(1), 49-67. <https://doi.org/10.1007/s10531-006-9120-z>
- Smith, S. E., & Read, D. (2008). INTRODUCTION. In S. E. Smith & D. Read (Éds.), *Mycorrhizal Symbiosis (Third Edition)* (p. 1-9). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012370526-6.50002-7>
- Spatafora, J. W., Chang, Y., Benny, G. L., Lazarus, K., Smith, M. E., Berbee, M. L., Bonito, G., Corradi, N., Grigoriev, I., Gryganskyi, A., James, T. Y., O'Donnell, K., Roberson, R. W., Taylor, T. N., Uehling, J., Vilgalys, R., White, M. M., & Stajich, J. E. (2016). A phylum-level phylogenetic classification of zygomycete fungi based on genome-scale data. *Mycologia*, 108(5), 1028-1046. <https://doi.org/10.3852/16-042>
- Stone, J. K., Bacon, C. W., White, and J. F., & Jr. (2000). An Overview of Endophytic Microbes : Endophytism Defined. In *Microbial Endophytes*. CRC Press.
- Tan, R. X., & Zou, W. X. (2001). Endophytes : A rich source of functional metabolites. *Natural Product Reports*, 18(4), 448-459. <https://doi.org/10.1039/b100918o>
- Taourirt, N. (2022). Approche de la diversité des champignons épiphytes de la posidonie *Posidonia oceanica* de la région de Tigzirt (Wilaya de TiziOuzou) (Mémoire de Master 2, Université d'Alger 1).

Références bibliographiques

- Taylor, J. W., Jacobson, D. J., Kroken, S., Kasuga, T., Geiser, D. M., Hibbett, D. S., & Fisher, M. C. (2000). Phylogenetic species recognition and species concepts in fungi. *Fungal Genetics and Biology: FG & B*, 31(1), 21-32. <https://doi.org/10.1006/fgbi.2000.1228>
- Telesca, L., Belluscio, A., Criscoli, A., Ardizzone, G., Apostolaki, E. T., Frascchetti, S., Gristina, M., Knittweis, L., Martin, C. S., Pergent, G., Alagna, A., Badalamenti, F., Garofalo, G., Gerakaris, V., Louise Pace, M., Pergent-Martini, C., & Salomidi, M. (2015). Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change. *Scientific Reports*, 5(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/srep12505>
- Tintjer, T., Leuchtman, A., & Clay, K. (2008). Variation in horizontal and vertical transmission of the endophyte *Epichloë elymi* infecting the grass *Elymus hystrix*. *The New Phytologist*, 179(1), 236-246. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02441.x>
- Tonielli, R., Innangi, S., Budillon, F., Di Martino, G., Felsani, M., Giardina, F., Innangi, M., & Filiciotto, F. (2016). Distribution of *Posidonia oceanica* (L.) Delile meadows around Lampedusa Island (Strait of Sicily, Italy). *Journal of Maps*, 12(sup1), 249-260. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1195298>
- Touchette, B. W. (2007). Seagrass-salinity interactions : Physiological mechanisms used by submersed marine angiosperms for a life at sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350(1), 194-215. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.05.037>
- Voigt, K., & Kirk, P. M. (2014). FUNGI | Classification of Zygomycetes : Reappraisal as Coherent Class Based on a Comparison between Traditional versus Molecular Systematics. In C. A. Batt & M. L. Tortorello (Éds.), *Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition)* (p. 54-67). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00136-1>
- Whipps, J. M., Hand, P., Pink, D., & Bending, G. D. (2008). Phyllosphere microbiology with special reference to diversity and plant genotype. *Journal of Applied Microbiology*, 105(6), 1744-1755. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2008.03906.x>

Références bibliographiques

- Xu, H., Zhu, M., Li, S., Ruan, W., & Xie, C. (2020). Epiphytic fungi induced pathogen resistance of invasive plant *Ipomoea cairica* against *Colletotrichum gloeosporioides*. *PeerJ*, 8, e8889. <https://doi.org/10.7717/peerj.8889>
- Yin, X., Zhang, W., Li, D., Wang, R., Cong, X., Pang, Z., Peng, Y., Ge, Y., Zhu, W., & Ding, C. (2024). Factors Influencing the Change of Phyllosphere Microbial Community of Three *Populus* spp. In the Same Habitat. *Forests*, 15(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/f15081453>
- Zhang, H. W., Song, Y. C., & Tan, R. X. (2006). Biology and chemistry of endophytes. *Natural Product Reports*, 23(5), 753-771. <https://doi.org/10.1039/B609472B>
- Zhou, D., & Hyde, K. D. (2001). Host-specificity, host-exclusivity, and host-recurrence in saprobic fungi*. *Mycological Research*, 105(12), 1449-1457. <https://doi.org/10.1017/S0953756201004713>

Abstract

Posidonia oceanica (L.) Delile is a key species in Mediterranean marine ecosystems, forming seagrass meadows that are essential for biodiversity. This study explores the diversity of epiphytic and endophytic fungi associated with *P. oceanica* in the region of Beni Ksila (Béjaïa). Three epiphytic genera and four endophytic genera, belonging to the *Ascomycota* phylum, were identified, with a marked predominance of *Penicillium*. This genus, by producing secondary metabolites, plays a crucial role in protecting *P. oceanica* from biotic and abiotic stresses. Other genera, such as *Aspergillus*, *Alternaria*, and *Cladosporium*, also contribute to the ecological dynamics of the seagrass meadows.

The results suggest that the specific microclimate and microhabitat of each study site strongly influence fungal composition, as evidenced by comparisons with previous studies conducted in the other studied regions. These regional variations reflect the impact of local environmental conditions on fungal communities associated with *P. oceanica*.

Keywords: *Posidonia oceanica*, marine fungi, microhabitat, phyllosphere, Beni Ksila.