

Etat des connaissances sur les bioindicateurs fongiques : approche stratifiée par guildes écologiques et opérationnalité pour la gestion des écosystèmes forestiers méditerranéens

MASTER 1 BIOGET



**UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER**



Réalisé par

Chloé Barthalon

22 mars – 30 juin 2022

**Enseignant
référent**

Eric Marcon



**UMR 5175
CENTRE D'ÉCOLOGIE
FONCTIONNELLE
& ÉVOLUTIVE**

Tuteur de stage

Franck Richard

Centre d'écologie
Fonctionnelle et
Evolutive,

1919 route de Mende,
34090 Montpellier

Co-tuteur et employeur

Sébastien Diette

Alcina,
162 Rue du Caducée,
34790 Grabels



Table des matières

I.	INTRODUCTION	1
II.	MATERIEL ET METHODES.....	4
1.	Etude de l'état de l'art	4
1.1	Requêtes.....	4
1.2	Analyse du corpus et filtres appliqués aux résultats	5
2.	Entretiens.....	6
III.	RESULTATS.....	9
1.	La bio indication fongique dans la bibliographie	9
2.	Des espèces fongiques candidates à la bio indication.....	12
3.	Analyse qualitative	15
3.1	La bioindication fongique et ses enjeux	15
3.2	Limites et perspectives pour la réalisation d'un outil	16
3.3	Potentiel protocole à respecter pour l'utilisation de l'outil.....	19
IV.	DISCUSSION.....	19
1.	Les limites de l'étude	20
1.1	Des limites dans un corpus a priori assez riche	20
1.2	De nombreux verrous à la réalisation de l'outil de diagnostic	20
1.3	L'hétérogénéité des points de vue.....	21
2.	Des perspectives concrètes pour un futur protocole de diagnostic	22
2.1	Pour une utilisation d'information taxonomique dégradée et de proxis à court terme 22	
2.2	A moyen ou long terme : les suivis et l'outil moléculaire	22
2.3	Instauration d'un dialogue entre mycologues et forestiers	23
V.	CONCLUSION	23

I. INTRODUCTION

Depuis des siècles, les forêts sont exploitées pour la production de bois, que ce soit pour la construction, l'ameublement ou l'énergie. Ces dernières années ont été marquées par l'augmentation de la pression sur les forêts pour des raisons démographiques, économiques et environnementales. La sylviculture représente 378 000 emplois et ce pour 7 millions d'hectares en France (agriculture.gouv). Ainsi, aujourd'hui la filière bois constitue un enjeu économique important à l'échelle du pays.

Les formations de gestionnaires forestiers en France reposent essentiellement sur une approche réglementaire, dendrométrique et environnementale de la forêt, dans laquelle la connaissance des organismes du sol, notamment fongiques, est peu abordée. Il en découle un certain nombre de pratiques de gestion qui peuvent être diverses selon la façon dont est utilisée la forêt. En général, dans les plantations ou les forêts à visée productive, la pratique la plus courante est de réaliser quelques éclaircies, des coupes de 30 à 70% des arbres, pour favoriser la pousse des arbres restants et ce, à intervalles de temps réguliers. Puis, une coupe à blanc est réalisée (tous les arbres sont prélevés) avant de replanter ou d'attendre une régénération naturelle. Ces actions agissent sur trois traits de la forêt : la structure, la composition et le capital, ou volume sur pied. La modification de ces traits impacte directement la naturalité de l'écosystème.

La naturalité est définie par deux grands critères : l'ancienneté et la maturité du peuplement (Cateau *et al.*, 2015). L'ancienneté de la forêt est définie comme la durée sans interruption de l'état boisé. Elle est indépendante des interventions de gestion forestière ayant modifié la structure et/ou le capital du peuplement.

La maturité quant à elle, « traduit l'avancement du développement biologique du peuplement d'arbres qui composent la strate arborescente dominante » (Cateau *et al.*, 2015). Des témoins de la maturité sont : un grand nombre d'arbres vivants de taille conséquente ou/et âgés, un grand volume de débris ligneux dans différents états de décomposition et de différentes tailles ainsi que de nombreux types de micro-habitats sur des arbres vivants (Oldeman, 2012 ; Cateau *et al.*, 2015). On retrouve ces caractéristiques dans les peuplements forestiers ayant dépassé la première moitié de leur cycle de vie naturel. Dans les forêts régulièrement aménagées, qui sont généralement récoltées au plus tard après le premier tiers du cycle naturel, ces caractéristiques sont souvent très rares

(Cateau *et al.*, 2015). La naturalité se traduit également par la présence de micro habitats sur les arbres et l'indigénat (Cateau *et al.*, 2015).

Enfin, la continuité dans l'espace à travers la connectivité des forêts mais aussi la continuité dans la présence et la diversité de bois morts permettent de caractériser la naturalité. On considère que la forêt est fragmentée lorsqu'une zone est déboisée sur plus de 100 m (discontinuité naturelle incluse) et peut être mesurée de l'hectare aux 100 000 hectares (Rossi et Vallauri, 2013).

La sylviculture affecte profondément les caractéristiques de l'écosystème forestier. En particulier, l'exploitation forestière, et la réduction du couvert qui l'accompagne, induisent des variations des conditions environnementales, chimiques et physiques des compartiments aérien et souterrain de l'écosystème forestier. Elle induit la fluctuation de paramètres édaphiques : température, pH, humidité (Ballard, 2000), mais aussi une diminution de la porosité en raison du recours aux engins de débardage de plus en plus lourds. Ces modifications ont des répercussions sur la composante biotique de l'écosystème forestier avec des changements dans les populations de la microflore et de la faune du sol, et par conséquent des processus auxquels ils participent, tels que le cycle de l'azote et la décomposition (Pilz et Perry, 1984 ; Forge et Simard, 2000 ; Prescott, 2002 ; Bradley *et al.*, 2001).

Les champignons sylvestres constituent un groupe clé de l'écosystème forestier par leur rôle central dans de nombreux processus dont ils maintiennent l'intégrité (Heilmann-Clausen *et al.*, 2014 ; Sterkenburg *et al.*, 2015). Cette diversité se décline en trois principales guildes écologiques : les espèces parasites, saprophytes et mutualistes (mycorhiziennes). Les espèces saproxyliques assurent un rôle de décomposition central : elles assurent en effet le bouclage des cycles biogéochimiques en hydrolysant les macromolécules constitutives de la nécromasse ligneuse (Hobbie *et al.*, 1999). Les espèces mycorhiziennes (ecto et endo) quant à elles, jouent un rôle important dans la nutrition des végétaux, dans le cycle des nutriments, (Cairney et Meharg, 2002 ; Braghieri *et al.*, 2021) mais aussi dans les réseaux d'interaction entre arbres (Simard, 2009). Cette grande diversité fonctionnelle de l'ensemble des champignons sylvicoles s'appuie sur une diversité taxonomique particulièrement élevée.

De plus, ces organismes témoignent d'une saisonnalité très marquée avec en automne notamment, mais aussi au printemps selon les espèces, la formation de fructifications visibles à l'œil nu, appelées macromycètes. En plus de la saisonnalité, de nombreuses espèces présentent des rendements en fructification variant énormément d'une année à l'autre ; la quantité, la durée et la fréquence de la

fructification étant influencées par de nombreux facteurs (Boddy *et al.*, 2014). Ces structures sont celles utilisées pour réaliser les inventaires, les suivis et les listes d'espèces menacées ou bioindicatrices.

Le fonctionnement et la dynamique des communautés fongiques répondent aux pratiques de gestion forestière, en particulier aux interventions sylvicoles (Simard *et al.*, 2003 ; Tomao *et al.*, 2020). Ces pratiques, modifiant principalement la composition des communautés fongiques (Tomao *et al.*, 2020), induisent une diminution de la qualité de l'écosystème et de sa naturalité. C'est pourquoi des espèces le plus sensibles à certaines caractéristiques de l'écosystème, si elles ne sont pas trop rarement observables, peuvent être identifiées et considérées comme étant bioindicatrices. La question de l'utilisation des champignons comme bio indicateurs de la continuité écologique de la forêt s'était déjà posée (Nordén et Appelqvist, 2001). De nombreux bioindicateurs des caractéristiques de l'écosystème forestier ont été produits. Pour certaines espèces qui ont des capacités de recolonisation faible ou ont besoin de condition de sol durables, l'ancienneté de la forêt leur procure une niche unique (Dupouey *et al.*, 2002). Certaines espèces occupent uniquement des habitats spécifiques comme le bois mort dans un état de décomposition avancé et de taille conséquente. La rupture dans la disponibilité de ce type de bois, du au ramassage de l'emble du gros bois dans une forêt, pourrait entraîner la disparition de l'espèce dans le lieu considéré (Bader *et al.*, 1995 ; Sippola et Renvall, 1999 ; Nordén *et al.*, 2004). Ainsi, la présence de cette espèce dans une forêt pourrait être un bon indicateur de continuité et donc des itinéraires sylvicoles ayant été pratiqués.

En France, seules 29% des forêt présentent une ancienneté supérieure à 150 ans (Vallauri *et al.*, 2012). Ainsi les gestionnaires aménagent essentiellement des forêts récentes, dont une part importante des forêts publiques est gérée pour la production de bois, et présente une faible proportion des stades de maturité avancés (Rossi et Vallauri, 2013).

Dans ce travail, nous questionnons les potentialités d'utilisation des champignons pour la bio indication des régimes sylvicoles (intensité et fréquence des interventions) appliqués dans la gestion forestière. Nous proposons d'interroger le potentiel des champignons pour indiquer aussi des bien des conditions favorables, que des contextes dégradés par la sylviculture (que nous proposons d'appeler bio indication en miroir).

La réalisation de ce stage est partie d'une initiative de Sébastien Diette, dirigeant de l'entreprise de gestion forestière Alcina, dont la composante fongique de l'écosystème forestier attire l'attention dans le cadre de son activité de gestionnaire de forêts méditerranéennes. L'objectif poursuivi par sa démarche est d'évaluer la possibilité de développer un outil de diagnostic reposant sur les champignons sylvestres, qui soit applicable en région méditerranéenne et accessible aux gestionnaires forestiers.

Pour atteindre cet objectif, la première phase de ce travail a consisté à identifier, sur la base d'une analyse du corpus publié, les espèces fongiques à valeur de bio indication. Dans un second temps, à partir d'entretiens réalisés auprès d'experts mycologues, la transférabilité de ce corpus dans les forêts Méditerranéennes a été questionnée.

In fine, l'objectif de ce travail a été d'évaluer la possibilité de produire un outil de diagnostic reposant sur les caractéristiques bioindicatrices des champignons sylvicoles pour un usage en gestion forestière méditerranéenne

II. MATERIEL ET METHODES

1. Etude de l'état de l'art

1.1 Requêtes

Une analyse de la bibliographie a consisté à extraire du corpus publié la littérature scientifique traitant de bio indication de la naturalité de la forêt basée sur les champignons. A partir de ce matériau, une analyse qualitative a été réalisée afin de réaliser un focus sur :

- 1) les articles relatifs à la sylviculture et ses effets sur les champignons,
- 2) les articles issus de travaux réalisés en forêt Méditerranéenne et
- 3) les espèces fongiques déterminantes de la gestion sylvicole appliquée.

L'ensemble des requêtes (combinaisons de mots clés) présentées dans le tableau 1.1 ont été réalisées.

Tableau 1.1 : Liste des entrées utilisées pour la recherche bibliographique

1. Macromycetes + "forest management"
2. Bioindicator + macromycetes + forest
3. "Fungal diversity" + "forest management"
4. Macromycetes + rarity + forest
5. Fungal conservation + « forest management »
5.1. Fungal conservation + « forest management » + polypores
5.2 Fungal conservation + « forest management » + agaric*
5.3 Fungal conservation + « forest management » + cortic*
5.4 Fungal conservation + « forest management » + aphylophor*
7. heilmann clausen + macromycete
8. Kranabetter + fungi
9. Thomas Læssøe
10. Bibliographie recommandée

Les requêtes ont été conduites avec l'outil BIU de l'université de Montpellier. Le moteur de recherche google scholar a été utilisé en complément.

A l'issue des premières recherches (1 à 5) et des premières sorties obtenues, les recherches ont été enrichies par addition de mots clés tels que « macromycetes », des noms d'auteurs connus pour leur engagement dans les questions de bio indication, mais aussi des guillemets (« ») pour chercher des expressions complètes comme « forest management » et des étoiles (*) pour couvrir tous les mots possédant la même racine (Tableau 1.1).

1.2 Analyse du corpus et filtres appliqués aux résultats

Pour la sélection des articles deux principales étapes de filtrage ont été réalisées. Le premier filtre reposait sur une première sélection par le titre, écartant les articles hors sujet, retenant ainsi les articles classés en prioritaires et non prioritaires. Le second filtre a été appliqué par analyse du contenu des résumés. S'il semblait présager la proposition d'espèces candidates à la bio indication, alors le texte était inspecté, sinon, l'article était écarté. Un accent a été mis sur la sélection d'articles traitant d'écosystèmes forestiers les plus similaires possibles aux écosystèmes Méditerranéen (attention portée plus sur les articles espagnols, italiens, ...) et les quelques articles portant sur les écosystèmes tropicaux ont été écartés car jugés trop différents.

A partir de ces données un premier tableau (Tableau 1 dans les résultats) est réalisé pour rendre compte de la proportion d'articles retenus.

Une matrice rassemblant les informations issues des articles a alors été assemblée (matrice présentant 299 lignes et donc trop volumineuse pour être incluse à ce rapport). On y trouve la référence de l'article, le pays dans lequel l'étude a été réalisée afin de renseigner sur la zone géographique étudiée, la méthode employée (descriptive ou expérimentale), le type de relevé (par les carpophores ou moléculaires), le type de données exploitées (sur la communauté ou sur les espèces), les essences présentes sur le site d'étude, les noms d'espèce, leur habitat (essence sur laquelle elles sont retrouvées). A ces informations issues des articles a été ajoutée la catégorie liste rouge IUCN trouvée sur le site INPN (inpn.mnhn.fr).

Une analyse qualitative, ainsi que quelques métriques quantitatives ont été utilisées afin de rendre compte de la proportion d'articles que chaque catégorie contient et de l'hétérogénéité du corpus. Une troisième analyse est réalisée sur les données taxonomiques pour rendre compte de l'étendue de la liste d'espèces fongiques candidates à la bio-indication forestière, et à son éventuelle transférabilité dans les écosystèmes forestiers méditerranéens.

Enfin, les guildes ont été renseignées grâce à l'outil FUNguilds et à dire d'expert pour les rares absentes de la base de données.

2. Entretiens

Des entretiens semi-directifs ont été réalisées afin de recueillir des « dire d'experts ». En effet, les dire d'experts sont importants dans les démarches de compréhension du vivant (Taschen *et al.*, 2020). Ces entretiens avaient pour objectifs de demander des candidats à la bio indication, mais aussi d'échanger autour du sujet afin de rendre compte du cadre dans lequel s'inscrit la production d'un tel outil de diagnostic.

Le guide d'entretien a été coconstruit avec les encadrants lors de plusieurs réunions d'assemblage des attentes de l'entreprise et des informations issues de la littérature.

Dans un premier temps, les principaux thèmes qui semblaient devoir être abordés ont été identifiés dans l'optique de la création du guide d'entretiens. Au fil de l'avancée du travail bibliographique et des sessions de terrain réalisées auprès des gestionnaires forestiers d'Alcina, de nouveaux et thèmes

et questions se sont dégagées. Deux grand types de forêts ont été visitées. Une première était une plantation de Douglas qui avait été récemment éclaircie notamment en bord de rivière afin de permettre à la ripisilve naturelle de se régénérer. La seconde forêt était une forêt de chênes verts sans visée productive et donc dans laquelle les interventions sont plus limitées. Les questions ont ainsi été rédigées en détail au fur et à mesure de l'avancée du stage.

On aborde au cours des entretiens des questions d'ordre général sur la bio indication fongique, l'intérêt de définir des bioindicateurs, la manière dont cela peut être fait, l'importance du bois mort et d'autres indicateurs (guide d'entretien complet en annexe 1). Le premier entretien a permis de tester le premier guide rédigé. A la suite du test il a été retravaillé pour mieux correspondre au format d'entretien désiré. Notamment des questions ont été ajoutés, certaines reformulées et le tout a été synthétisé pour réduire la longueur des entretiens.

Les personnes à interroger ont été sélectionnées en collaboration avec Franck Richard et Sébastien Diette, sur la base des critères de sélection suivants :

- connaissances en taxonomie fongique (référénts nationaux/internationaux),
- connaissance du terrain et des écosystèmes forestiers, notamment Méditerranéens,
- expérience en conservation/ gestion.

Il était important d'avoir des points de vue variés afin d'obtenir un état des lieux le plus exhaustif possible.

Sept profils ont été retenus. Ils ont été contactés par mail dans lequel ont été présenté mon profil, le projet et les objectifs de l'entretien. Tous ont répondu favorablement à la demande.

Profils des interviewés:

Jean-Claude Malaval (9 mai 2022, en présentiel)

Ancien professeur d'EPS, naturaliste généraliste d'envergure nationale, il réalise des inventaires à titre professionnel pour des structures telles que les conservatoires botaniques. Spécialiste et référent pour la fonge méditerranéenne, ses contributions comprennent notamment la description de nouvelles espèces pour la France, l'Europe et le monde. Son activité d'inventaire lui a permis de constituer une base de données de plus de 60000 données, collectées en vingt-huit ans.

Gilles Corriol (11 mai 2022 en visioconférence)

Au conservatoire botanique national des Pyrénées depuis vingt ans, il est responsable du pôle mycologique dans lequel il exerce une fonction de mycologue à temps plein. Concernant le thème de la bio indication, il a travaillé avec le CRPF (projet dynaphore) dans le cadre d'études en lien avec la gestion forestière. Il a également développé un outil d'évaluation de la naturalité de la forêt pyrénéenne reposant sur les champignons saproxyliques.

Gerald Gruhn (19 mai 2022 en visioconférence)

A la tête du réseau mycologique de l'ONF depuis 2006, il a concentré son expertise sur les espèces corticiées (champignons formant des croûtes). Ce groupe a l'avantage d'être indépendant de la saisonnalité et du phénomène assez aléatoire de fructification. Il anime le groupe des mycologues de l'ONF depuis 2017. Dans le cadre de son activité professionnelle, vingt-cinq à trente jours par an sont consacrés à la mycologie (expertise, définition de forêts d'exception, etc.).

Jean-Michel Bellanger (24 mai 2022 en présentiel)

Passionné de mycologie depuis ses vingt ans il a réorienté sa carrière à l'origine en recherche médicale vers la taxonomie fongique au sein de l'équipe TBI du CEFÉ. Son travail consiste, d'une part en l'identification de molécules fongiques présentant des intérêts médicaux (lutte antimicrobienne, en partenariat avec Mycea sur le développement de biopesticides), et d'autre part, au développement des connaissances sur la taxonomie fongique par approche moléculaire.

Pierre Arthur Moreau (25 mai 2022 en visioconférence)

Mycologue référent sur le territoire national, maître de conférence à la faculté de pharmacie de l'université de Lille depuis dix-huit ans, il conduit une recherche d'envergure internationale sur la taxonomie des macromycètes.

Bernard Rivoire : /

L'entretien n'a pas pu avoir lieu suffisamment tôt pour être intégré à cette analyse mais devrait se dérouler fin juin.

Hubert Voiry (31 mai appel téléphonique)

Retraité de l'ONF, son intérêt pour la mycologie est né d'un stage à l'INRA Nancy sur les champignons mycorrhiziens. Dans les années 2000, l'ONF crée les réseaux naturalistes et Hubert Voiry profite de cet élan pour prendre la tête du réseau mycologique. Il consacre ainsi 10 à 20% de

son temps à la mycologie par la réalisation d'inventaires comme au cours du projet GNB (projet autour d'indices dendrométriques permettant de décrire la structure forestière et de comparer leur pertinence à décrire la biodiversité de plusieurs taxons) dans lequel il compare la diversité en forêt naturelle et exploitée.

Une part des entretiens consistait en l'obtention de résultats quantitatifs. Une liste (free-list) de candidats à la bio indication a été demandée aux intervenants mais également les propositions étant faites au fil du discours ont été retenues. Ces résultats sont collectés dans des tableaux. Pour l'analyse qualitative, des notes ont été prises et les entretiens enregistrés lorsque c'était possible. Par contrainte de temps, les entretiens n'ont pas été retranscrits dans leur intégralité mais utilisés de manière ciblée.

Les entretiens ont été réécoutés (et/ou relus) pour dégager les principales informations et les classer par thèmes. Chaque idée est ensuite discriminée en fonction de ses ressemblances/différences avec les autres propos tenus.

III. RESULTATS

1. La bio indication fongique dans la bibliographie

Les recherches bibliographiques consistaient en un balayage le plus exhaustif possible du corpus publié et indexé, et traitant de gestion forestière et du modèle fongique, afin d'en dégager des espèces candidates à la bio indication. L'ensemble retenu à partir des mots clés sélectionnés est constitué d'environ 4500 articles (certains peuvent revenir dans plusieurs requêtes différentes) (Tableau 1.2 page suivante).

Sur l'ensemble des articles retenus après le premier filtre (réalisé sur le titre), on remarque que seuls 24% nomment des espèces bio indicatrices (Tableau 1.2).

	Nombre total de sorties par recherche	Articles retenus pour lecture		Retenus
		Non prioritaires	Prioritaires	
1. Macromycetes + “forest management”	93	7	8	4
2. Bioindicator + macromycetes + forest	49	2	7	4
3. “Fungal diversity” + “forest management”	485	2	5	0
4. Macromycetes + rarity + forest	40	3	3	1
5. Fungal conservation + « forest management »	2417	1	1	1
5. Fungal conservation + « forest management » + polypores	166	0	2	0
5. Fungal conservation + « forest management » + agaric*	67	0	0	0
5. Fungal conservation + « forest management » + cortic*	51	0	1	0
5. Fungal conservation + « forest management » + aphylophor*	67	0	0	0
7. Heilmann clausen + macromycete	563	7	6	4
8. Kranabetter + fungi	500	2	3	1
9. Thomas Læssøe	80	0	1	0
10. Bibliographie recommandée	17	0	17	4
TOTAUX	4595	24	54	19

Tableau 1.2 : Distribution des articles selon les mots clés de la recherche au cours des différentes étapes de filtre.

Parmi les requêtes principales réalisées (1 à 5 dans le tableau 1.2 page précédente), celle présentant le plus grand nombre d'articles est la 5 : Fungal conservation + « forest management » (2417 sorties sur 485 000 sorties sur Google Scholar) suivie de la 3 : “Fungal diversity” + “forest management”. Ceci souligne l'importante activité scientifique dédiée à la conservation fongique, que ce soit pour des enjeux économiques ou de conservation (annexe 2a.).

A partir des 19 articles retenus proposant des espèces avec un potentiel de bio indication, une matrice a été réalisée (trop volumineuse pour être intégrée). Elle a servi de base à l'analyse quantitative du corpus qui suit.

		Nombre articles	Proportion
Zone géographique	Europe : tempéré/boréal	11	58%
	Méditerranéen	5	26%
	Amérique : tempéré/boréal	2	11%
	Etude globale	1	5%
Approche	Descriptive	15	79%
	Expérimentale	4	21%
Relevés	Fructifications	17	89%
	Mycéliums	2	11%
Type de données	Communauté	4	21%
	Liste espèces	9	47%
	Les deux	6	32%

Tableau 2 : Synthèse quantitatives issue de la matrice de données assemblée à partir de (Taudiere *et al.*, 2017 ; Olsson *et al.*, 2011 ; Teste *et al.*, 2012 ; Ouali *et al.*, 2021 ; Azul *et al.*, 2009 ; García Jiménez *et al.*, 2020 ; Salerni et Perini, 2007 ; Azul *et al.*, 2011 ; Rudolf *et al.*, 2013 ; Goldmann *et al.*, 2015 ; Heilmann-Clausen et Boddy, 2008 ; Heilmann-Clausen et Christensen, 2003 ; Kranabetter *et al.*, 2005 ; Atrena *et al.*, 2020 ; Christensen *et al.*, 2005 ; Anon, 2007 ; Ainsworth, 2004 ; Dahlberg et Croneborg, 2003 ; Edman *et al.*, 2004)

L'analyse de la répartition des articles selon les critères retenus permet de dégager les deux tendances suivantes :

- Le premier point, qui était attendu, est le suivant : la majorité des études publiées sont réalisées en zone boréale et tempérée, essentiellement dans les pays de l'Europe du nord (Olsson *et al.*, 2011 ; Goldmann *et al.*, 2015 ; Heilmann-Clausen et Christensen, 2003 ; Atrena *et al.*, 2020 ; Christensen *et al.*, 2005 ; Anon, 2007 ; Ainsworth, 2004 ; Dahlberg et Croneborg, 2003 ; Edman *et al.*, 2004 ; Rudolf *et al.*, 2013) (annexe 2b.). Elles représentent ici 58% du corpus, malgré l'attention extrême, portées sur les études réalisées en milieux méditerranéens (Espagne, Italie, etc.) lors des recherches et de la sélection des articles.
- La majorité des articles sont des études descriptives. Elles ne permettent pas de tester la valeur de bio indication des espèces qui sont identifiées comme à valeur potentielle de bio indication (annexe 2c.).

2. Des espèces fongiques candidates à la bio indication

Les occurrences des espèces ont été relevées et classées dans l'ordre d'importance de l'occurrence. Leur valeur de bio indication, positive si elle sont le témoin de naturalité ou de bonnes pratiques de gestion, négative au contraire, d'après les articles, est décrite (annexe 2).

Sur une liste d'environ 250 espèces fongiques citées dans les travaux analysés, seules 15 espèces ont été citées deux fois et seules 3 ont été citées plus de deux fois : *Ischnoderma resinosum*, *Fomitopsis rosea* et *Hericium erinaceum*, cette dernière l'ayant été 4 fois. Ce tableau est constitué d'espèces à valeur de bio indication positive, douteuse (on ne peut pas conclure) ou négative. La majorité des espèces sélectionnées ont des valeurs de bio indication positive. En effet, dans certains articles, une liste d'espèces étaient proposées dont certaines avaient une valeur de bio indication plutôt négative ou pas clairement définie.

Ces espèces, issues de la bibliographie, ont été soumises à l'expertise des mycologues et leur avis sont recueillis dans le tableau 3 (page suivante).

Espèce	Occurrence bibliographique	Bioindicateur : selon les experts	Avis des experts	Occurrence dans le discours d'experts	Guildes écologiques
<i>Ischnoderma resinosum</i>	4	mitigé	assez rare	1	Saprotrophe
<i>Fomitopsis rosea</i>	3	non	rare		Parasite/saprotrophe
<i>Hericium erinaceus</i>	3	mitigé	assez rare	2	Saprotrophe
<i>Russula decolorans</i>	2	non	rare		Ectomycorhizien
<i>Cortinarius alboviolaceus</i>	2	non	pas indicateur		Ectomycorhizien
<i>Cortinarius trivialis</i>	2	non	mal connu		Ectomycorhizien
<i>Dentipellis fragilis</i>	2	oui	observable	1	Saprotrophe
<i>Flammulaster muricatus</i>	2	oui	observable	2	Saprotrophe
<i>Hericium coralloides</i>	2	non	rare		Saprotrophe
<i>Heterobasidion annosum</i>	2	miroir	déterminable		Saprotrophe
<i>Ischnoderma benzoinum</i>	2	oui	assez rare en Méditerranée	1	Saprotrophe
<i>Junghuhnia collabens</i>	2	?	inconnu		Saprotrophe
<i>Laccaria laccata</i>	2	non	banal, confondable		Ectomycorhizien
<i>Ossicaulis lignatilis</i>	2	non	rare, confondable		Saprotrophe
<i>Phellinus nigrolimitatus</i>	2	oui	observable	1	Parasite / saprotrophe
<i>Piloderma fallax</i>	2	oui	pas trop rare	2	Ectomycorhizien
<i>Spongipellis delectans</i>	2	oui	rare	1	Saprotrophe
<i>Torrendia pulchella</i>	2	non	rare, dur à voir, vu en corse		Ectomycorhizien

Tableau 3 : liste des espèces établie à partir de l'analyse de la bibliographie (source) et avis des experts pour chacune. En bleu : espèces candidates à la bio indication en région Méditerranéenne à dire d'experts.

On constate que peu d'espèces sont retenues, le plus souvent pour une problématique d'observabilité ou de difficulté de détermination. De plus, toutes les espèces validées ne le sont pas de manière consensuelle par tous les experts. On constate notamment que pour certaines espèces les avis sont partagés quant à la possibilité de les utiliser en tant que bioindicateurs en Méditerranée. Enfin, pour la plupart, les espèces retenues sont des décomposeurs du bois et la guildes des mycorhiziens est peu représentée.

Il est à noter que la plupart des référents ont souligné qu'il est important de faire vérifier leurs propos par des études scientifiques complémentaires dans la zone géographique.

De plus, il a été demandé aux mycologues de proposer des candidats à la bioindication en zone Méditerranéenne.

Occurrence	Propositions	Guilde écologique
4	<i>Fomes</i>	Saprotrophe
dont 2	<i>Fomes fomentarius</i>	Saprotrophe
4	<i>Phellinus</i>	Parasite / saprotrophe
2	<i>Xylobolus</i>	Saprotrophe
dont 1	<i>Xylobolus frustulatus</i>	Saprotrophe
2	<i>Ramaria</i>	Ectomycorhizien
dont 1	<i>Ramaria stricta</i>	Ectomycorhizien
2	<i>Bankeraceae</i>	Ectomycorhizien
dont 1	<i>Bankera</i>	Ectomycorhizien
2	<i>Crustoderma dryinum</i>	Saprotrophe
1	<i>Tricholomataceae</i>	Ectomycorhizien / parasite
1	<i>Hericium</i>	Saprotrophe
1	<i>Hapalopilus</i>	Saprotrophe
1	<i>Lentinellus</i>	Saprotrophe
1	<i>Trametes</i>	Saprotrophe
1	<i>Amanita</i>	Ectomycorhizien / saprotrophe
1	<i>Russula</i>	Ectomycorhizien
1	<i>Tomentella</i>	Ectomycorhizien
1	<i>Pycnoporellus fulgens</i>	Saprotrophe
1	<i>Scytinostroma hemidichophyticum</i>	Saprotrophe
1	<i>Gymnopus fusipes</i>	Parasite / saprotrophe
1	<i>Punctularia strigosozonata</i>	Saprotrophe
1	<i>Boletus regius</i>	Ectomycorhizien / parasite
1	<i>Inonotus dryophilus</i>	Saprotrophe
1	<i>Ganoderma lucidum</i>	Parasite / saprotrophe

Tableau 4 : liste des espèces/genres/familles fongiques proposées par les experts mycologues et leur occurrence dans les discours. En vert : proposition dont l'occurrence est supérieure à 1.

Un bon nombre des propositions ont été faites (25) et en recoupant les discours, 10 ont été citées plusieurs fois. Trois genres de saprotrophes et deux genres d'ectomycorhiziens ont été cités plusieurs fois. Dans l'ensemble peu d'espèces ectomycorhiziennes sont citées (2/11), reste étant des décomposeurs.

3. Analyse qualitative

Les grands thèmes abordés ont été identifiés et organisés de manière à recueillir l'avis général de chaque personne sur chaque thème (annexe 4). Les avis sont très contrastés ou au contraire se rejoignent sur différents points.

3.1 La bioindication fongique et ses enjeux

La bioindication est un sujet vaste qui a pu déstabiliser lors des entretiens. En effet, comme nous l'avons vu en introduction, elle englobe de nombreuses notions et peu s'étendre sur une gamme importante pour chacune. Elle peut être liée à la naturalité qui elle-même comprend la maturité et l'ancienneté, mais aussi des critères tels que la continuité écologique dans l'espace ou dans le temps. Elle est généralement associée à une valeur positive, en faveur de la préservation de l'écosystème, comme en témoignent les termes précédents.

Pour Pierre-Arthur Moreau, ce type d'outil permettrait d'évaluer la fonctionnalité de la forêt si elle manque d'autres indicateurs comme de plantes, ou si l'histoire forestière est incomplète, ou encore s'il n'y a pas d'analyses de sol ou si elles sont inexploitable.

D'après Gérald Gruhn, les champignons permettent de renseigner sur le "flux" de bois mort et donc sur la continuité de l'activité d'exploitation. En effet, en France la sylviculture conventionnelle vise à enlever le bois mort de la forêt, réduisant le nombre de niches disponibles pour toute la diversité saproxylique, comme le souligne Pierre Arthur Moreau, « plus il y a de nécrosasse, plus il y a d'espèces, et Fontainebleau en est un bel exemple » PAM).

Pour les interviewés, la démarche de bio indication permet une analyse approfondie de la forêt, allant au-delà de l'analyse du bois mort, comme le décrit le discours de Jean-Michel Bellanger

« Les sapins étaient aussi vieux par contre, d'un site à l'autre, on n'avait pas du tout la même diversité. On avait interprété ça comme étant le produit de l'exploitation forestière parce que si une forêt est complètement exploitée, (...), qu'il n'y a plus une certaine catégorie d'arbres qui normalement vont abriter une certaine catégorie de champignons et ces champignons-là vont s'éteindre. On était sur deux forêts qui étaient a priori des forêts anciennes de sapin et c'est l'observation de la diversité mycologique qui nous a permis de comprendre comment la forêt avait été exploitée par le passé. » (JMB)

Au niveau des guildes écologiques, d'après Gilles Corriol, les champignons mycorhiziens pourraient être de bon bioindicateurs de continuité, tandis que les saproxyliques permettraient d'indiquer le degré de maturité de la forêt. Cependant, les propos sont nuancés quant à la mise en œuvre de l'approche, notamment sur l'investissement conséquent nécessaire, en termes d'échantillonnage, pour qualifier l'espace forestier au regard de sa diversité fongique,.

« Les indicateurs en forêt sont le suivi des arbres, s'ils sont vieux s'ils sont parasités, le suivi du sol. Il faut se demander qu'est-ce qui vaut vraiment la peine d'être fait pour produire ce bioindicateur, de façon à faire quelque chose qui soit réaliste, intéressant mais qui ne soit pas non plus de la survente. Est-ce qu'il y a un enjeu suffisant et sur quelle zone, quels milieux ? »

(PAM)

D'autres entrées, alternatives à l'entrée fongique, comme *« la mixité des essences et leur bonne santé »* ont été suggérées comme de bon bioindicateurs. Enfin, un point consensuel a émergé, à savoir l'importance de certaines espèces bioindicatrices comme indicatrices de l'importance du milieu, et la détection de *« zones à enjeux »* (termes exacts prononcés par deux interviewés).

En revanche, le travail du gestionnaire se concentre généralement sur des espaces anthropisés présentant moins d'enjeux que des réserves par exemple. Pour rappel, le terme de bioindication miroir a été défini en réponse au fait que les écosystèmes forestiers gérés sont plus ordinaires que les lieux sur lesquels on a définis usuellement des bioindicateurs fongiques.

La question de la bio indication miroir divise les experts consultés. Ainsi, Gilles Corriol, s'est montré plutôt intéressé par cette démarche. Il pense que *« ça pourrait être pertinent étant donné que dans le cadre de la gestion on s'intéresse à des forêts qui ont souvent déjà été gérées »*. Après réflexion il évoque la possibilité de s'intéresser dans ce cas à des espèces rudérales, dont la reproduction sexuée est importante.

En revanche, pour Pierre Arthur Moreau, la seule chose que l'on pourrait observer est une *« sur dominance d'espèces banales »* et ce sur une durée de 40 à 50 ans.

3.2 Limites et perspectives pour la réalisation d'un outil

Le travail bibliographique a mis en évidence la faiblesse des travaux réalisés en Méditerranée. Pour pallier à ce déficit, Gerald Gruhn a suggéré de croiser les données ADONIF (base de données nationale contenant un million d'observations) sur la répartition des espèces avec les documents cartographiques disponibles, notamment avec la distribution des forêts anciennes. Pour Montan

Gauthier, qui analyse les données ADONIF (FongiBase), la base de donnée actuelle pourrait s'avérer encore insuffisante pour la région Méditerranéenne.

« Il n'y a pas suffisamment de données d'inventaires. Une monographie de tout ce qui pourrait pousser en Méditerranée devrait être réalisée puis l'écologie devrait être prise en compte et décrite minutieusement. » (GC)

D'après Gilles Corriol, pour produire un tel outil sur l'intégralité de la Méditerranée, il faudrait réaliser un travail d'inventaire dans des forêts dont on connaît l'histoire, afin de pouvoir déterminer précisément quelles espèces présentent quelle valeur de bio indication dans ces écosystèmes.

Le problème selon Pierre-Arthur Moreau est la différence trop importante entre les écosystèmes forestiers du Nord et ceux de Méditerranée : la gestion est très différente, notamment sur le bois mort qui constitue des niches privilégiées pour un bon nombre des espèces potentiellement bioindicatrices.

Cette question fait consensus parmi les mycologues interrogés. Ainsi, Hubert Voiry suggère que la transférabilité pourrait être réalisée en sapinière, et Gerald Gruhn, bien qu'en dehors du champ d'application initial (données provenant principalement de forêts boréales d'Europe du Nord). Il témoigne qu'il a lui-même observé de nombreuses espèces citées dans la littérature et ce dans des contextes similaires à ceux décrits.

La meilleure solution à court terme, selon Jean-Michel Bellanger et Gilles Corriol, est de tester ce qui a été décrit en forêt boréale dans la région d'intérêt.

Cependant, et bien que certains experts comme Hubert Voiry envisagent que certaines espèces puissent être de bon bioindicateurs, la transférabilité ne semble pas envisageable directement, mais nécessite des analyses complémentaires.

Gilles Corriol a réalisé un outil de diagnostic qui permet d'évaluer la valeur écologique d'une forêt sur la base de la composition des communautés de champignons saprophytes présentes.

« Il m'a fallu 15 ans de test et des modifications de l'outil avant de pouvoir produire quelque chose de satisfaisant et publiable. » (GC)

Pour Pierre Arthur Moreau, la transférabilité doit passer par un travail sur le long terme, qui serait plus susceptible d'être mené par des universitaires que par les gestionnaires d'espaces naturels, pour des raisons de retour sur investissement (le temps investi serait bien supérieur au bénéfice économique pouvant en découler). Il invite notamment à définir et hiérarchiser les enjeux de

conservation dans la grande diversité de forêts méditerranéennes avant de s'engager dans des études d'une telle ampleur.

Ces contraintes ont ainsi mené les interviewés à proposer certains « proxis » ou indicateurs indirects, immédiatement pertinents pour la bio indication, comme par exemple le volume et la qualité du bois mort, ou encore les caractéristiques pédologiques de la forêt.

Une limite considérable pour Pierre Arthur Moreau est la capacité des forestiers à nommer les espèces. Or, pour lui, il s'agit de la première condition pour utiliser la bio indication car *« un genre ne bio indique pas »*. En revanche, pour Gérald Gruhn, *« une approche par genre semble possible si on peut exclure certaines espèces qui ne bio indiquent pas »* à condition que ces espèces ne bio indiquant pas soient identifiables facilement. Il ajoute que *« des genres pourraient être de bons candidats, comme Heterobasidion, qui s'installe sur les arbres blessés »*. Pour Gilles Corriol, cette approche pourrait s'avérer pertinente pour les champignons mycorhiziens, car *« les mycorhiziens peuvent indiquer sur la continuité de l'état boisé, certains genres n'étant retrouvés que dans des forêts où il n'y a pas eu de rupture de cette continuité »*.

Un point qui a souvent été évoqué est l'approche par évaluation de l'abondance des espèces. Ainsi si des espèces parmi les candidats à la bio indication étaient trouvées dans une forêt, il serait important de les compter. En effet, pour Gérald Gruhn :

« cette espèce si je la retrouve 3, 4, 5 fois dans la forêt, là je commencerais à réellement me dire, là il y a quelque chose » (GG)

Pour finir, pour les mycologues, le bois mort est un indicateur particulièrement puissant et cela fait consensus. Gérald Gruhn, forestier à l'ONF, le premier indicateur sur les méthodes de sylviculture est le bois mort :

« je casse ma propre baraque hein, mais pour moi, la première entrée c'est le bois mort » (GG)

Selon lui, la quantité et la diversité des dimensions et des stades de décomposition est le meilleur indicateur. Pour Gilles Corriol cette entrée est intéressante et mérite d'être adaptée au milieu Méditerranéen. Elle pourrait être utilisée afin de connaître les catégories de bois mort et leurs différences d'intérêt pour la fonge méditerranéenne.

De plus, pour Pierre-Arthur Moreau, historiquement et encore dans de nombreuses exploitations le gros bois mort étant retiré, sa présence est déjà « *un important indicateur* » pour le forestier. Néanmoins, selon lui, bien que les champignons puissent indiquer une discontinuité de la présence de bois mort, une étude de sol pourrait être « *bien plus rapide* ». De surcroît, le compartiment sol apporte des informations sur le passé mais également « *le futur de la forêt* » avec sa capacité de rétention d'eau, indispensable pour la résilience des écosystèmes Méditerranéens.

3.3 Potentiel protocole à respecter pour l'utilisation de l'outil

Selon les experts consultés, si un outil de terrain était formalisé, il devrait être accompagné d'un protocole précis de mise en œuvre. Les avis quant à l'opérationnalité d'un protocole concordent assez bien, mais à la condition de s'appuyer sur des passages à la fréquence minimale de deux fois par an pendant deux ans. Dans le cas où l'on ne s'intéresserait qu'aux espèces pérennes, un passage d'une personne pour cent hectares en une journée pourrait être envisageable mais nécessite d'être documenté selon Gilles Corriol.

Les experts consultés s'accordent sur la nécessité d'une formation d'une demi-journée à une journée, qui serait « *un bon début et permettrait de voir déjà un bon nombre d'espèces* » (GC, JMB). Gilles Corriol a ajouté l'importance de « *régulièrement devoir faire quelques mises au point* ».

IV. DISCUSSION

Les champignons constituent de bons bioindicateurs de forêt ancienne, de maturité, de naturalité et de continuité écologique (Dupouey *et al.*, 2002). Leur utilisation comme base pour un outil de diagnostic de la forêt à destination des gestionnaires forestiers est en revanche un sujet de recherche appliquée peu exploré à ce jour. Pourtant, les gestionnaires étant confrontés à des forêts anthropisées (faible naturalité, ancienneté, maturité, ...) , il existe une demande naturelle d'utilisation des champignons sylvicoles comme bioindicateurs des modalités des parcours sylvicoles appliqués aux espaces forestiers.

Le but initial du stage était donc de produire un outil de diagnostic des modalités de gestion forestière à destination des gestionnaires forestiers de Méditerranée et qui repose sur les champignons.

1. Les limites de l'étude

1.1 Des limites dans un corpus a priori assez riche

La littérature traitant de conservation fongique est riche, comme l'a montré la requête n°5 : Fungal conservation + « forest management », donnant plusieurs milliers de réponses. Un bon nombre d'articles traite de bioindication dans des milieux d'exception comme des forêts anciennes et matures (Christensen *et al.*, 2005 ; García Jiménez *et al.*, 2020 ; Salerni et Perini, 2007 ; Taudiere *et al.*, 2017 ; Tortic, 1998). Ceci souligne l'intérêt de la communauté scientifique concernant la conservation fongique. Cependant, le forestier n'est en général pas confronté à ce genre de milieu et les recherches ont donc visé à identifier des espèces plutôt bioindicatrices des modalités de gestion forestière. Dans le corpus, assez peu d'études traitent de ce type de bio indication (Goldmann *et al.*, 2015), et peu d'entre elles proposent des espèces candidates, le prisme d'analyse privilégié étant celui des communautés, caractérisés par des métriques globales (alpha diversité, composition, (Goldmann *et al.*, 2015 ; Atrena *et al.*, 2020)). Ceci peut notamment s'expliquer par l'importance de l'écologie des communautés dans les revues scientifiques d'écologie, et par la place plus timide de la taxonomie dans les questions de conservation.

Un nombre important de bioindicateurs ont été mis en évidence dans la littérature, mais principalement hors région méditerranéenne (Tableau 2), et seules de rares études expérimentales ont été réalisées afin de tester leur opérationnalité. Ceci pose le problème de la transférabilité mais également des facteurs confondants étant donné la sensibilité des champignons sylvicoles aux variations environnementales même faibles.

1.2 De nombreux verrous à la réalisation de l'outil de diagnostic

Les résultats des données extraites de la bibliographie montrent que la transférabilité des espèces candidates dans les forêts de Méditerranée reste limitée, avec presque les deux tiers des espèces proposées éliminées par les experts mycologues, car pas observables en Méditerranée, rares, ou trop difficiles à déterminer. Pour extraire précisément des espèces candidates pertinentes, il faudrait confronter des données d'inventaires de Méditerranée à celles des articles. Cependant, concernant

ADONIF (qui renseigne sur la répartition des espèces) les données rassemblées sont encore pauvres en méditerranée et sans doute insuffisantes, à court terme, pour élaborer une grille de lecture de la diversité fongique et de sa distribution.

A dire d'experts, la question de la transférabilité reste immature, et mériterait des études plus approfondies, en particulier dans des milieux désignés comme dignes d'intérêt, que ce soit pour la gestion forestière ou la conservation. Ainsi, d'après Pierre-Arthur Moreau, il faudrait mener des études comparatives entre zones gérées et non gérées/forêts anciennes afin de produire une gamme étalon. Idéalement, il faudrait également conduire des études expérimentales permettant de valider le potentiel de bio indication des espèces/genres/familles fongiques identifiés. Par conséquent, l'un des résultats marquants de ce travail, et la faiblesse de la liste des espèces dégagées par les filtres successifs, tant en diversité au rang spécifique qu'en opérationnalité de terrain.

1.3 L'hétérogénéité des points de vue

Au cours des entretiens une perception différente des problématiques a été perçue. Tout d'abord les mycologues taxonomistes ont évoqué des verrous théoriques. Par exemple, Pierre-Arthur Moreau explique qu'au sein d'un genre la spéciation est causée par l'adaptation à un milieu différent de celui d'origine d'où le problème du genre qui « *ne bio indique pas* » (PAM). Cependant avec les gestionnaires forestiers mycologues, les avis étaient plus nuancés car plus détachés du théorique, ce qui a amené à proposer que l'on puisse considérer un genre si parmi les espèces qui le constituent, celles qui ne possèdent pas de qualités de bio indicateur être exclues.

Selon leur domaine d'expertise, les experts ont pu insister sur différents points. Par exemple, les mycologues du domaine plutôt universitaire semblaient plus attachés à l'importance de mobiliser les acteurs de la recherche pour tester in situ la valeur de bio indication des espèces candidates. Pour leur part, les forestiers témoignent de la possibilité de transférer les travaux de forêt boréales aux écosystèmes méditerranéens grâce à leur expérience personnelle et de leur appréciation de la forêt. De la même manière certains étaient plus rigoureux et exigeant sur les passages qui devaient être réalisés pour avoir une idée précise de l'état écologique ou de naturalité de la forêt.

2. Des perspectives concrètes pour un futur protocole de diagnostic

2.1 Pour une utilisation d'information taxonomique dégradée et de proxis à court terme

Il ressort de la bibliographie et des entretiens que certains genres ou familles pourraient présenter des qualités de bioindicateurs qui pourraient être valorisées dans une première version d'un outil opérationnel.

En effet, l'approche par genre sur quelques taxons semble envisageable par les experts consultés, car mobilisable par les gestionnaires, s'il bénéficiaient que d'une courte formation. Cela pourrait s'envisager en particulier pour certains gestionnaires de l'entreprise qui portent déjà un grand intérêt à la mycologie. Pour les mycologues, cette première entrée par une prise en compte de l'information taxonomique dégradée constituerait une appréciation grossière de la diversité fongique de la forêt, qui appellerait un complément d'expertise afin de qualifier plus précisément les taxons présents.

Dans le cas où l'approche par la taxonomie s'avère impossible ou incomplète, les forestiers s'appuient déjà sur ce qui est désigné par tous les mycologues comme un indicateur puissant : le bois mort. En particulier, l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP (Larrieu et Gonin, 2008 ; Larrieu *et al.*, 2012)) intègre déjà cette dimension. Cependant l'IBP est un diagnostic supplémentaire, coûteux pour le propriétaire, et qui n'est pas systématiquement réalisé. Enfin, comme suggéré, la qualité du sol, notamment sa profondeur, pourrait également être pris en compte après une phase de test..

Finalement, du point de vue du forestier, ces entrées (taxonomique et proxis) pourraient être des approches complémentaires au diagnostic d'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP).

2.2 A moyen ou long terme : les suivis et l'outil moléculaire

L'outil moléculaire tend à se démocratiser avec une réduction importante de son coût permettant des analyses de communautés puissantes, toutes guildes fongiques confondues. Il comporte encore un certain nombre de limites comme certaines espèces ou genre qui sont encore mal détectés par cette technique (Frøslev *et al.*, 2019) ou encore une faiblesse des bases de données de référence (UNITE, GENBANK). En revache, il excelle à détecter des espèces qui parfois ne fructifient pas pendant plusieurs années (éclipses qui semblent s'intensifier avec les changements globaux dans

des écosystèmes déjà soumis à la sécheresse (Boddy *et al.*, 2014)) et constitue un complément aux relevés de carpophores avec une information taxonomique dégradée (Frøsløv *et al.*, 2019). On peut penser qu'il puisse permettre, à moyen terme, l'obtention rapide d'un grand nombre de données qui puissent être utilisables pour les gestionnaires pour évaluer la diversité sur une parcelle et/ou comparer des parcelles mais aussi qui soit accessibles aux mycologues. Il est à noter à ce sujet que les experts forestiers interrogés considèrent cet outil comme particulièrement prometteur, notamment dans les réseaux de réserves biologiques forestières.

2.3 Instauration d'un dialogue entre mycologues et forestiers

À l'issue des entretiens une table ronde a été organisée rassemblant différents acteurs qui avaient participé au projet. Les conclusions et les perspectives ont été présentées et le dialogue a été instauré. Nous avons pu ainsi dégager des perspectives mêlant les approches forestières et mycologique dans une entente générale. En effet, en conclusion, les perspectives dégagées et les projets imaginés intéressaient tout aussi bien les mycologues que les gestionnaires. Ceci permet de penser que la mise en contact entre les mycologues et forestier est le point de départ à la mise en place d'une dynamique d'échange plus importante qu'auparavant. On peut penser que ceci facilitera le partage de connaissances et le développement d'outils tels que celui que nous imaginions au départ.

V. CONCLUSION

L'objectif de créer un outil de diagnostic était ambitieux mais a permis d'explorer en profondeur les possibilités.

Le travail bibliographique réalisé n'est pas totalement exhaustif mais des espèces candidates qui ont été partiellement validées par les experts ont été dégagées. Cependant ces espèces représentent moins d'un tiers de ce qui a été retenu de la bibliographie. Ceci montre une faible transposabilité des espèces tempérées au contexte particulier de la méditerranée, dont la typicité des végétations, mais aussi de la fonge, s'avère un obstacle temporaire.

Les entretiens ont permis de proposer des candidats qui soient plus pertinents pour la région et de mieux cerner les verrous à la réalisation de l'outil. Les résultats mettent en valeur certains genres tels que *Fomes* avec le *Fomes fomentarius*, mais aussi *Phellinus*, *Xylobolus* ou encore *Ramaria*. *Fomes*

fomentarius fut longtemps considéré comme un parasite dangereux, c'est pourquoi lorsqu'il était repéré, l'arbre hôte était coupé. Dorénavant on sait que ce n'est pas le cas et qu'il ne nécessite pas l'abattement systématique de l'arbre sur lequel on le trouve, ainsi c'est un témoin d'un changement dans la pensée des gestionnaires.

La détermination jusqu'à l'espèce étant une limite importante pour tout non mycologue, l'émergence de genres offre une piste abordable pour la formation à leur reconnaissance. Cependant, ces quelques genres sont insuffisants pour produire un outil de diagnostic à part entière. On peut imaginer qu'ils constituent à l'avenir un complément à la prise en compte du bois mort comme cela est fait dans l'IBP. Certaines des pratiques de L'Indice de Biodiversité Potentielle (étude supplémentaire proposée au propriétaire lors du plan de gestion) sont ainsi des pratiques validées par les experts mycologues qui sont bon départ avant la mise en place de suivis de biodiversité fongique.

Enfin, quelques perspectives ont été dégagées pour l'amélioration du diagnostic écologique en faveur de la fonge. Par exemple la prise en compte du sol dans l'expertise pourrait constituer une entrée, méritant d'être exploitée plus en profondeur. Sur le plus long terme, avec la démocratisation de l'outil moléculaire, on peut imaginer que le séquençage du sol, des racines, des feuilles puissent apporter une très importante quantité de données. Cet outil permettrait de s'affranchir notamment des épisodes de poussées aléatoires et produire de la donnée utilisable par les forestiers mais aussi les mycologues et des universitaires en général.

BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

Bibliographie :

Ainsworth A. 2004. Developing tools for assessing fungal interest in habitats 1: beech woodland saprotrophs. English Nature Research Reports No 597.

Anon. [s d]. FUNGuild: An open annotation tool for parsing fungal community datasets by ecological guild - ScienceDirect. Disponible sur : https://www.sciencedirect.com.ezpum.scdi-montpellier.fr/science/article/pii/S1754504815000847?casa_token=LKhY8qTkUbUAAAAA:RDXPDeitexHshWr1PAZOJWXh3akD6MVMoUo5NqzQoHdwrXMP51Kctkti0znokUpvXkBQ3ps (Consulté le 17 juin 2022).

Anon. 2007. Liste rouge des espèces menacées en Suisse.

Atrena A., Banelytė G.G., Læssøe T., Riis-Hansen R., Bruun H.H., Rahbek C., et Heilmann-Clausen J. 2020. Quality of substrate and forest structure determine macrofungal richness along a gradient of management intensity in beech forests. *Forest Ecology and Management*, 478, p. 118512. DOI : 10.1016/j.foreco.2020.118512

Azul A.M., Castro P., Sousa J.P., et Freitas H. 2009. Diversity and fruiting patterns of ectomycorrhizal and saprobic fungi as indicators of land-use severity in managed woodlands dominated by *Quercus suber* — a case study from southern Portugal. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(12), p. 2404-2417. DOI : 10.1139/X09-148

Azul A.M., Mendes S.M., Sousa J.P., et Freitas H. 2011. Fungal fruitbodies and soil macrofauna as indicators of land use practices on soil biodiversity in Montado. *Agroforestry Systems*, 82(2), p. 121-138. DOI : 10.1007/s10457-010-9359-y

Bader P., Jansson S., et Jonsson B.G. 1995. Wood-inhabiting fungi and substratum decline in selectively logged boreal spruce forests. *Biological Conservation*, 72(3), p. 355-362. DOI : 10.1016/0006-3207(94)00029-P

Ballard T.M. 2000. Impacts of forest management on northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 133(1), p. 37-42. DOI : 10.1016/S0378-1127(99)00296-0

Boddy L., Büntgen U., Egli S., Gange A.C., Heegaard E., Kirk P.M., Mohammad A., et Kauserud H. 2014. Climate variation effects on fungal fruiting. *Fungal Ecology*, 10, p. 20-33. DOI : 10.1016/j.funeco.2013.10.006

Bradley R.L., Titus B.D., et Hogg K. 2001. Does shelterwood harvesting have less impact on forest floor nutrient availability and microbial properties than clearcutting? *Biology and Fertility of Soils*, 34(3), p. 162-169. DOI : 10.1007/s003740100389

Braghiere R.K., Fisher J.B., Fisher R.A., Shi M., Steidinger B.S., Sulman B.N., Soudzilovskaia N.A., Yang X., Liang J., Peay K.G., Crowther T.W., et Phillips R.P. 2021. Mycorrhizal Distributions Impact Global Patterns of Carbon and Nutrient Cycling. *Geophysical Research Letters*, 48(19), p. e2021GL094514. DOI : 10.1029/2021GL094514

Cairney J.W. et Meharg A.A. 2002. Interactions between ectomycorrhizal fungi and soil saprotrophs: implications for decomposition of organic matter in soils and degradation of organic

pollutants in the rhizosphere. *Canadian Journal of Botany*, 80(8), p. 803-809. DOI : 10.1139/b02-072

Cateau E., Larrieu L., Vallauri D., Savoie J.-M., Touroult J., et Brustel H. 2015. Ancienneté et maturité : deux qualités complémentaires d'un écosystème forestier. *Comptes Rendus Biologies*, 338(1), p. 58-73. DOI : 10.1016/j.crvi.2014.10.004

Christensen M., Emborg J., Hahn K., Mountford E.P., Ódor P., Standovár T., Rozenbergar D., Diaci J., Wijdeven P., Meyer P., Winter S., Vrška T., Heilmann-Clausen J., Walley R., et Adamcik S. 2005. Wood-inhabiting fungi as indicators of nature value in European beech forests. *Monitoring and Indicators of Forest Biodiversity in Europe-from Ideas to Operationality*. *EFI Proceedings* 51, 51, p. 229-237.

Dahlberg A. et Croneborg H. 2003. 33 Threatened Fungi in Europe, Complementary and revised information on candidates for listing in Appendix I of the Bern Convention. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/248581348_33_Threatened_Fungi_in_Europe (Consulté le 4 mai 2022).

Dupouey J.-L., (Delphine S., Dambrine E., (Jean-Claude R., et (Waltraud K. 2002. La Végétation des forêts anciennes. *Revue Forestière Française*, p. 521. DOI : 10.4267/2042/4940

Edman M., Krusys N., et Jonsson B.G. 2004. Local Dispersal Sources Strongly Affect Colonization Patterns of Wood-Decaying Fungi on Spruce Logs. *Ecological Applications*, 14(3), p. 893-901. DOI : 10.1890/03-5103

Forge T.A. et Simard S.W. 2000. Trophic structure of nematode communities, microbial biomass, and nitrogen mineralization in soils of forests and clearcuts in the southern interior of British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(3), p. 401-410. DOI : 10.4141/S99-112

Frøslev T.G., Kjoller R., Bruun H.H., Ejrnæs R., Hansen A.J., Læssøe T., et Heilmann-Clausen J. 2019. Man against machine: Do fungal fruitbodies and eDNA give similar biodiversity assessments across broad environmental gradients? *Biological Conservation*, 233, p. 201-212. DOI : 10.1016/j.biocon.2019.02.038

García Jiménez P., Fernández Ruiz A., Sánchez Sánchez J., et Rodríguez de la Cruz D. 2020. Mycological Indicators in Evaluating Conservation Status: The Case of *Quercus* spp. Dehesas in the Middle-West of the Iberian Peninsula (Spain). *Sustainability*, 12(24), p. 10442. DOI : 10.3390/su122410442

Goldmann K., Schöning I., Buscot F., et Wubet T. 2015. Forest Management Type Influences Diversity and Community Composition of Soil Fungi across Temperate Forest Ecosystems. *Frontiers in Microbiology*, 6. Disponible sur : <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2015.01300> (Consulté le 12 avril 2022).

Heilmann-Clausen J., Aude E., van Dort K., Christensen M., Piltaver A., Veerkamp M., Walley R., Siller I., Standovár T., et Ódor P. 2014. Communities of wood-inhabiting bryophytes and fungi on dead beech logs in Europe – reflecting substrate quality or shaped by climate and forest conditions? *Journal of Biogeography*, 41(12), p. 2269-2282. DOI : 10.1111/jbi.12388

Heilmann-Clausen J. et Boddy L. 2008. Distribution patterns of wood-decay basidiomycetes at the landscape to global scale (Chapter 14). Dans : *British Mycological Society Symposia Series*. Elsevier,

p. 263-275. Disponible sur : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0275028708800161> (Consulté le 14 avril 2022).

Heilmann-Clausen J. et Christensen M. 2003. Fungal diversity on decaying beech logs – implications for sustainable forestry. *Biodiversity & Conservation*, 12(5), p. 953-973. DOI : 10.1023/A:1022825809503

Hobbie E.A., Macko S.A., et Shugart H.H. 1999. Insights into nitrogen and carbon dynamics of ectomycorrhizal and saprotrophic fungi from isotopic evidence. *Oecologia*, 118(3), p. 353. DOI : 10.1007/s004420050736

Kranabetter J.M., Friesen J., Gamiet S., et Kroeger P. 2005. Ectomycorrhizal mushroom distribution by stand age in western hemlock – lodgepole pine forests of northwestern British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(7), p. 1527-1539. DOI : 10.1139/X05-095

Larrieu L. et Gonin P. 2008. L'indice de biodiversité potentielle (IBP) : une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers. *Revue forestière française*, 60(6), p. 727-748. DOI : 10.4267/2042/28373

Larrieu L., Gonin P., et Deconchat M. 2012. Le domaine d'application de l'indice de biodiversité potentielle (IBP). *Revue Forestière Française*, (5). Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02642291> (Consulté le 17 juin 2022).

Nordén B. et Appelqvist T. 2001. Conceptual problems of Ecological Continuity and its bioindicators. *Biodiversity & Conservation*, 10(5), p. 779-791. DOI : 10.1023/A:1016675103935

Nordén B., Ryberg M., Götmark F., et Olausson B. 2004. Relative importance of coarse and fine woody debris for the diversity of wood-inhabiting fungi in temperate broadleaf forests. *Biological Conservation*, 117(1), p. 1-10. DOI : 10.1016/S0006-3207(03)00235-0

Oldeman R.A.A. 2012. *Forests: Elements of Silvology*. Springer Science & Business Media, 639 p.
Olsson J., Jonsson B.G., Hjältén J., et Ericson L. 2011. Addition of coarse woody debris – The early fungal succession on *Picea abies* logs in managed forests and reserves. *Biological Conservation*, 144(3), p. 1100-1110. DOI : 10.1016/j.biocon.2010.12.029

Ouali Z., Boudagga S., Sbissi I., Calvo R., Venturella G., Jaouani A., et Gargano M.L. 2021. Updated checklist of macromycetes of Tunisia. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 155(4), p. 691-699. DOI : 10.1080/11263504.2020.1779838

Pilz D.P. et Perry D.A. 1984. Impact of clearcutting and slash burning on ectomycorrhizal associations of Douglas-fir seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 14(1), p. 94-100. DOI : 10.1139/x84-018

Prescott C.E. 2002. The influence of the forest canopy on nutrient cycling. *Tree Physiology*, 22(15-16), p. 1193-1200. DOI : 10.1093/treephys/22.15-16.1193

Rossi M. et Vallauri D. 2013. Évaluer la naturalité. Dans : *Guide pratique version.* , p. 154.

Rudolf K., Morschhauser T., Pál-Fám F., et Botta-Dukát Z. 2013. Exploring the relationship between macrofungi diversity, abundance, and vascular plant diversity in semi-natural and managed

forests in north-east Hungary. *Ecological Research*, 28(4), p. 543-552. DOI : 10.1007/s11284-013-1044-y

Salerni E. et Perini C. 2007. Mycodiversity of Nature Reserves in Central Italy. *Acta Mycologica*, 42(1), p. 5-19. DOI : 10.5586/am.2007.001

Simard S.W. 2009. The foundational role of mycorrhizal networks in self-organization of interior Douglas-fir forests. *Forest Ecology and Management*, 258, p. S95-S107. DOI : 10.1016/j.foreco.2009.05.001

Simard S.W., Jones M.D., Durall D.M., Hope G.D., Stathers R.J., Sorensen N.S., et Zimonick B.J. 2003. Chemical and mechanical site preparation: effects on *Pinus contorta* growth, physiology, and microsite quality on grassy, steep forest sites in British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(8), p. 1495-1515. DOI : 10.1139/x03-072

Sippola A.-L. et Renvall P. 1999. Wood-decomposing fungi and seed-tree cutting: A 40-year perspective. *Forest Ecology and Management*, 115(2-3), p. 183-201. DOI : 10.1016/S0378-1127(98)00398-3

Sterkenburg E., Bahr A., Brandström Durling M., Clemmensen K.E., et Lindahl B.D. 2015. Changes in fungal communities along a boreal forest soil fertility gradient. *New Phytologist*, 207(4), p. 1145-1158. DOI : 10.1111/nph.13426

Taschen E., Sauve M., Vincent B., Parladé J., van Tuinen D., Aumeeruddy-Thomas Y., Assenat B., Selosse M.-A., et Richard F. 2020. Insight into the truffle brûlé: tripartite interactions between the black truffle (*Tuber melanosporum*), holm oak (*Quercus ilex*) and arbuscular mycorrhizal plants. *Plant and Soil*, 446(1), p. 577-594. DOI : 10.1007/s11104-019-04340-2

Taudiere A., Bellanger J.-M., Moreau P.-A., Carcaillet C., Christophe A., Læssøe T., Panaïotis C., et Richard F. 2017. *Xylobolus subpileatus*, a specialized basidiomycete functionally linked to old canopy gaps. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(7), p. 965-973. DOI : 10.1139/cjfr-2016-0521

Teste F.P., Lieffers V.J., et Strelkov S.E. 2012. Ectomycorrhizal community responses to intensive forest management: thinning alters impacts of fertilization. *Plant and Soil*, 360(1-2), p. 333-347. DOI : 10.1007/s11104-012-1231-6

Tomao A., Antonio Bonet J., Castaño C., et de-Miguel S. 2020. How does forest management affect fungal diversity and community composition? Current knowledge and future perspectives for the conservation of forest fungi. *Forest Ecology and Management*, 457, p. 117678. DOI : 10.1016/j.foreco.2019.117678

Tortic M. 1998. An attempt to a list of indicator fungi (Aphylophorales) for old forests of beech and fir in former Yugoslavia. *Folia Cryptog. Estonica*, 33, p. 8.

Vallauri D., Grel A., Granier E., et Dupouey J.-L. 2012. Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles. WWF, 65 p. p. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01267936> (Consulté le 15 juin 2022).

Webographie :

Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire.

INFOGRAPHIE FORÊT FILIÈRE BOIS [16/12/2020]

<https://agriculture.gouv.fr/infographie-la-filiere-foret-bois-en-france>

Inventaire national du patrimoine naturel (INPN) par le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN)

<https://inpn.mnhn.fr/>

FUNguilds (Anon, [s d])

<http://www.funguild.org/>

ANNEXES

Annexe 1 : Guide d'entretiens

Présentation personnelle

Présentation sujet de stage

Pourriez-vous vous présenter s'il vous plait? Est-ce que je peux enregistrer l'échange ?

Dans quel organisme travaillez-vous ?

Quel est votre domaine d'expertise mycologique ?

En relation avec qui travaillez-vous?

Qu'est-ce que "bioindication" vous évoque ?

Vous êtes-vous déjà intéressé à la bioindication fongique ? Dans quel contexte ?

Dans quelle mesure pensez-vous que la bio indication fongique est intéressante ? Pour la gestion forestière ? Concept opérationnel ?

Free List : est-ce vous pourriez me lister les espèces bioindicatrices qui vous viennent à l'esprit ?

Présentation du tableau par groupe (T1)

Présentation des données issues de la bibliographie espèce par espèce

Avis sur la répartition

Avis sur valeur bio indication des modalités de gestion forestière

Avis sur la phénologie, observabilité

Zoom sur les saproxyliques : on a vu qu'ils pourraient représenter une part importante de l'outil car sont observables tout au long de l'année.

Est-ce qu'une catégorie de bois mort pourrait-être plus intéressante que les autres et dans quelle mesure ? Est-ce qu'il faut se concentrer sur une certaine taille de bois mort, un stade de décomposition en particulier ?

Pourrait-il y avoir un intérêt à définir des seuils pour savoir si on retrouvera des espèces intéressantes passé ce seuil ?

Le bois debout et le bois couché présentent-ils différents intérêts ?

Aspect pratique de l'outil

Pourrait-il être intéressant de classer les espèces selon leur valeur de bio indication ?

Pourrait-on identifier des groupes pour lesquels identifier que jusqu'au genre ou la famille suffirait à renseigner sur la gestion forestière ?

Dans quelle mesure on peut dégrader l'information (à quel niveau taxo) pour la bio indication ?

Un morphogroupe pourrait-il avoir une certaine valeur de bio-indication ? Si on prend en compte l'abondance, le nombre de carpophores observés ?

L'abondance relative peut-elle être une donnée intéressante ?

Dans quelle mesure l'abondance pourrait-elle être prise en compte ? Sur quelles espèces/genre ?

Quels sont les pièges de la mesure de l'abondance ?

Durée idéale du travail de terrain ? Nombre d'années ? Pour quels groupes ? (éclipses de poussée)

Bio indication miroir : est-elle envisageable ? Quels seraient les champignons concernés ?

Quels pourraient être les principaux inconvénients à la réalisation/utilisation de l'outil ? Auriez-vous une idée de comment s'en détacher ?

Que pensez-vous des formations ? Pensez-vous que des gestionnaires forestiers puissent être formés à la mycologie ? Dans quelle mesure ? Pourrait-il y avoir une dynamique instaurée entre mycologues et forestiers ? Quels verrous pouvez-vous identifier ?

Quelle part représentent les données non publiées traitant de la bio indication fongique quant aux modalités de gestion forestière ? Y a-t-il de la connaissance ? Est-elle non publiée, publiée dans des rapports mais pas dans des articles ?

Auriez-vous d'autres espèces/groupes à proposer que l'on aurait pu oublier ?

Auriez-vous des articles de bibliographie que je n'aurais pas exploités et qui vous semblent important d'explorer ?

Est-ce que vous pensez à d'autres sujets qui vous semblent intéressant d'aborder ?

On vous fera parvenir la synthèse du travail et l'ensemble des informations...

Est-ce qu'il vous reste des questions à poser ?

En supplément

en quoi consiste le réseau mycologie à l'ONF, qu'est-ce qu'ils y font, quels moyens ils ont, quel est leur but ?

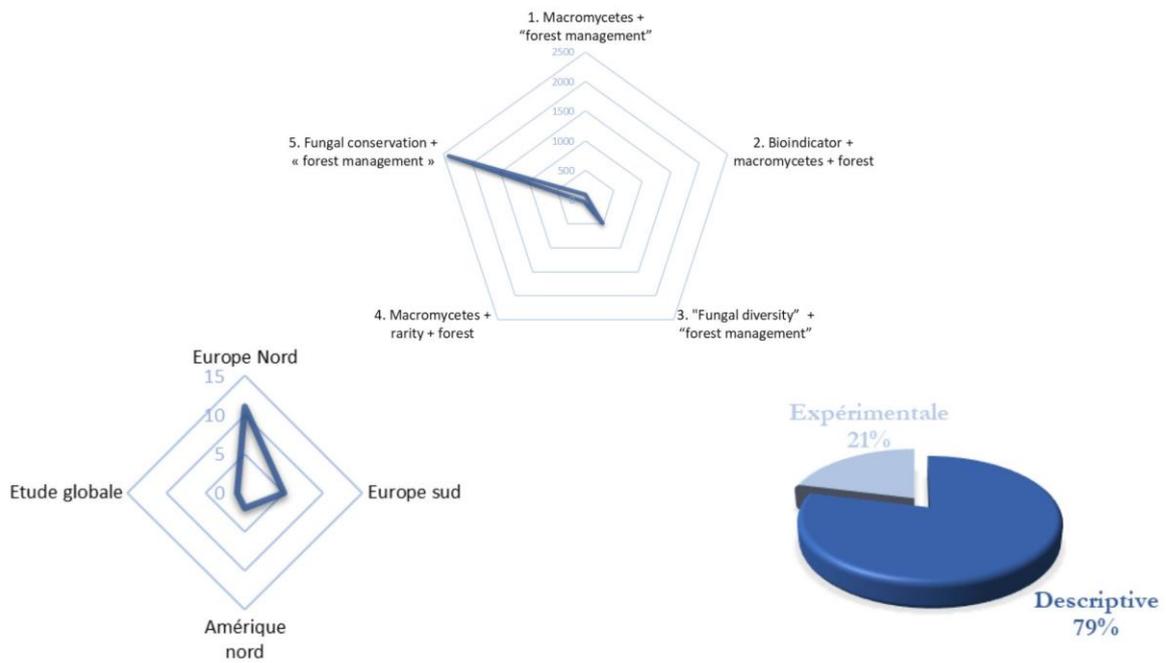
comment ils expliquent que l'outil n'ait pas été créé à l'ONF ?

Est-ce que vous pensez que les gestionnaires forestiers peuvent être sensibilisés à l'expertise par les champignons ? Ont-ils le temps ? Sont-ils sensibles à l'écologie de la forêt dans son ensemble ?

D'après la littérature on observerait une distribution différente des espèces selon l'âge et la naturalité de la forêt.

Avez-vous déjà remarqué sur le terrain des différences dans la diversité fongique entre les forêts gérées et non gérées, types réserves ?

Est-ce que vous avez déjà observé une diversité différente en fonction du stade de décomposition, taille des grumes ?



Annexe 2 : a. (en haut) Part relative des principales requêtes dans le corpus, b. (à gauche) Part relative d'études réalisées dans les 4 principales zones géographiques définies, c. (à droite) Répartition des études en fonction de l'approche utilisée.

espèce	occurrence	indication
<i>Ischnoderma resinosum</i>	4	+
<i>Fomitopsis rosea</i>	3	+
<i>Hericiium erinaceum</i>	3	+
<i>Russula decolorans</i>	2	?
<i>Cortinarius alboviolaceus</i>	2	+
<i>Cortinarius trivialis</i>	2	+
<i>Dentipellis fragilis</i>	2	+
<i>Flammulaster muricatus</i>	2	+
<i>Hericiium coralloides</i>	2	+
<i>Heterobasidion annosum</i>	2	-
<i>Ischnoderma benzoinum</i>	2	+
<i>Junghubnia collabens</i>	2	+
<i>Laccaria laccata</i>	2	?
<i>Ossicaulis lignatilis</i>	2	+
<i>Pbellinus nigrolimitatus</i>	2	+
<i>Piloderma fallax</i>	2	+
<i>Spongipellis delectans</i>	2	+
<i>Torrendia pulchella</i>	2	+

Annexe 3 : Occurrence des espèces ayant été citées plus d'une fois dans les 19 articles, valeur de bio indication (+ : bio indique sur le bon état écologique de la forêt, - : indique une quelconque valeur négative pour la forêt, ? : l'issue n'est pas claire.

Tables par thèmes		Grands thèmes					
		Bio indication	Transférabilité	Outil	Formation	Protocole	Bio indication miroir
Intervenants	JCM	La mixité et "bonne santé" induit une plus grande diversité fongique	A éliminé la majorité de espèces candidates trouvées dans la bibliographie		Enthousiaste		Positif : Logique car s'occupent de forêts gérées
	GC	Saprophytiques : maturité du peuplement, Mycorhiziens : continuité du peuplement	Manque de données, doit être testée	Temps pour acquérir des données	Possible 1j, puis régulièrement	Définir le format des données collectées, bois mort, 2x 2x1an	Positif : enthousiaste, à tester
	GG	Dépend : naturalité, maturité, ancienneté. Manque de bois mort, meilleur indicateur de naturalité. Pas suffisant car important le flux, continuité	Gros manque de données dans la zone d'étude. Expérience : a observé des bioindicateurs	Voulait recouper les données ADDNIF INPN - cartes ONF forêts anciennes	112j	Pour les espèces pérennes 1 passage d'une personne pour 100 hectares en 1j. A monter, tester et documenter.	
	JMB	Permet une analyse approfondie au-delà de juste	Faire des études et des suivis, en méditerranée fructification		1j	études	
	PAM	Peu de bois mort en France, bio indication fongique : peu d'apport par rapport à l'investissement demandé.	Trop grandes différence entre écosystèmes nordiques et méditerranéens	Importance du sol. Chercher des bio indicateurs qui peuvent apporter plus que l'étude du bois mort et du sol	intervention d'un pro tous les 3 à 10 ans	bois mort : 2 sorties par an, 12 sorties sur 4ans	Négatif : Indicateurs de discontinuité écologique ca n'existe pas, sur dominance d'espèces banales peut être. 40 - 50 dernières années
	HV	bien pour une meilleure prise en compte de la biodiversité	Semble réalisable pour les sapinières	Voit qu'il y aurait des espèces candidates intéressantes		3*1 passage par an sur 150 à 200 hectares	

Annexe 4 : Principaux avis par thèmes. Entre guillemets les mots prononcés par les interviewés. Tous n'ont pas su/pu donner leur avis sur tous les points, c'est pourquoi certains interviewés n'apparaîtront pas dans toutes les catégorie.

Structures d'accueil

Ce stage est une commande d'Alcina, entreprise de gestion forestière dont le dirigeant, Sébastien Diette, est très sensible à l'écologie de la forêt. L'entreprise s'intéresse à l'écosystème forestier dans son entièreté mais porte un intérêt tout particulier aux champignons qu'il abrite. En effet, elle a développé une nouvelles filiale, Mycea, au format start-up, qui cherche à utiliser les mycorhiziens et/ou leurs métabolites afin de tenter de réduire la quantité d'intrants dans les champs et vignobles par exemple.

De son côté Alcina a continué son activité de gestion forestière et de l'intérêt pour les champignons est nait le souhait d'explorer la piste de la bio indication fongique pour la gestion forestière.

Des réunions ont eu lieu avec Sébastien Diette et certains collaborateurs dans leurs locaux afin d'exposer régulièrement l'avancée du stage. En revanche, la majorité du temps le travail été effectué au CEFÉ (Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive) à Montpellier. J'ai été accueillie dans l'équipe TBI (Taxonomie et biogéographie des interactions), et ait travaillé après de Franck Richard. Il travaille principalement sur la diversité fongique en Méditerranée et sa distribution. L'équipe a pour objectif de décrire les réseaux d'interaction biotiques en lien avec la diversité du sol et de comprendre les processus évolutifs impliqués dans les patrons spatiaux multi-échelles ainsi que la dynamique temporelle de ces communautés. Le CEFÉ et une UMR (Unité Mixte de Recherche) dont les principales tutelles sont CNRS, UM, IRD, EPHE et les secondaires sont INRAE, Institut Agro, UPVM. Les principaux objectifs du CEFÉ sont de comprendre le monde vivant par l'étude la dynamique, le fonctionnement et l'évolution du vivant pour pouvoir anticiper l'avenir, de pratiquer une science « rassembleuse » dans ses approches disciplinaires autour de la biologie, de l'écologie, de l'évolution, de l'environnement et des sciences de la terre et de l'eau. Dirigé par Marie-Laure Navas depuis 2019, il est divisé en quatre départements : « Ecologie Evolutive et Comportementale », « Dynamique et Conservation de la Biodiversité », « Ecologie Fonctionnelle » et « Interactions, Ecologie et Sociétés » dont l'équipe TBI fait partie.

Résumé

Les forêts françaises sont en majeure partie exploitées pour leurs ressources, en faisant un enjeu économique mais aussi pour la conservation des organismes. Les champignons du saproxyliques et les champignons ectomycorhiziens répondent aux pratiques de gestion forestière comme la diminution du couvert ou les coupes rases. L'étude a consisté en un état des connaissances sur les bioindicateurs fongiques et leur utilisation quant aux modalités de gestion forestière en Méditerranée. Il repose sur un état des lieux de la bibliographie proposant des candidats à la bioindication et des entretiens avec des experts mycologues tels que des taxonomistes et des mycologues héraultais connaissant bien la fonge méditerranéenne. Les résultats mettent en valeur certains genres tels que *Fomes* avec le *Fomes fomentarius*, témoin d'un changement dans la pensée des gestionnaires, mais aussi *Pbellinus* et *Xylobolus*. Ils offrent une piste abordable pour former les forestiers à la reconnaissance mais sont insuffisants pour produire un outil de diagnostic à part entière. L'entrée bois mort reste la principale caractéristique à prendre en compte bien qu'elle ne renseigne pas sur la continuité écologique. Finalement avec la démocratisation de l'outil moléculaire de nouvelles perspectives de diagnostic s'offrent pour la gestion de l'écosystème forestier.

Mots clés : gestion forestière, bio-indication, macromycètes, forêts méditerranéennes, guildes fongiques, communautés saproxyliques, carpophores

Abstract

French forests are mostly exploited for their resources, making them an economic issue but also a conservation issue. Saproxylic and ectomycorrhizal fungus respond to forest management practices such as canopy reduction or clear cutting. The study consisted of a state of knowledge on fungal bioindicators and their use in forest management in the Mediterranean. The results are based on an inventory of the bibliography that propose candidates for bioindication and interviews with mycological experts such as taxonomists and mycologists from Hérault, who are familiar with the Mediterranean fungus. The results highlight certain genera such as *Fomes* with the *Fomes fomentarius*, witnessing of a change in the thinking of managers, but also *Pbellinus* and *Xylobolus*. They offer an approachable way to train foresters in recognition but are insufficient to produce a full-fledged diagnostic tool. The entrance to dead wood remains the main characteristic to be taken into account, although it does not provide information on ecological continuity. Finally, with the democratization of the molecular tool, new diagnostic perspectives are offered for the management of the forest ecosystem.

Keywords : forest management, bio-indication, macromycetes, Mediterranean forests, fungal guilds, saproxylic communities, carpophores
