

Complexité des forêts: vers une meilleure prise en compte du microbiote des arbres ?

*Marc Buée**, Directeur de Recherche INRAE
UMR 1136 IAM - INRA Grand Est, France
Equipe Ecogénomique des INteractions



Le microbiote = Ensemble des microbes (archées, bactéries, protistes, champignons et aussi virus) qui occupent durablement la surface et / ou l'intérieur d'un organisme (= microbiome)



Le microbiote intestinal humain...

C'est 1kg de bactéries actives et 150 fois plus de gènes que ce que possède le génome humain (environ 22 000 gènes), soit 3,3 millions de gènes composant ce que le nomme « l'hologénome »...

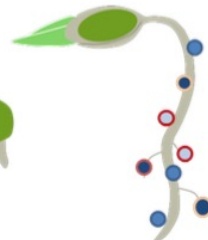
Dans les écosystèmes agricoles et forestiers, l'étude du **microbiote** est centrée sur la **plante** et son environnement proche, en particulier la **rhizosphère** et le **sol (en tant que réservoir microbien)**



Seed



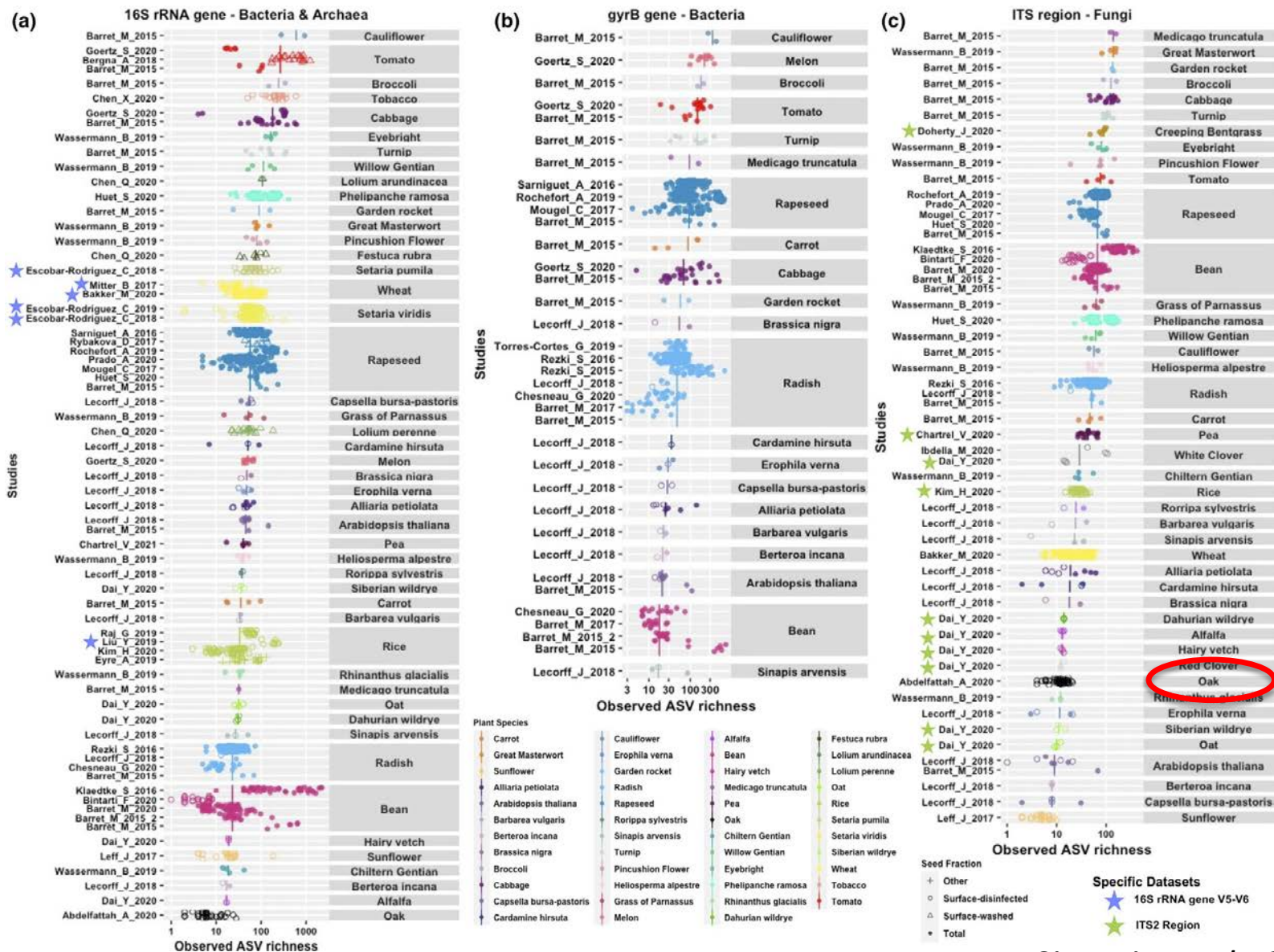
Germinating seed



Seedling



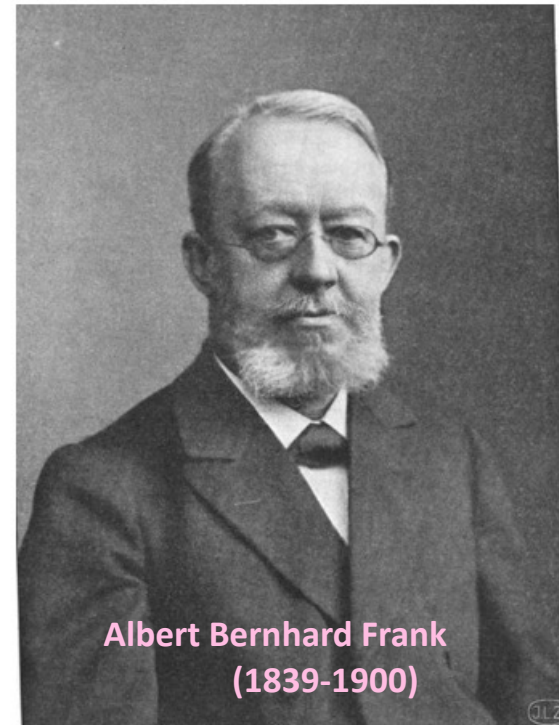
Meta-analyse du microbiote des graines



Albert Bernhard Frank

Premier expérimentateur du microbiote de l'arbre

Il utilise le principe de stérilisation
(utilisé en milieu hospitalier depuis la fin
du XIX^e siècle) pour désinfecter le sols



Albert Bernhard Frank
(1839-1900)

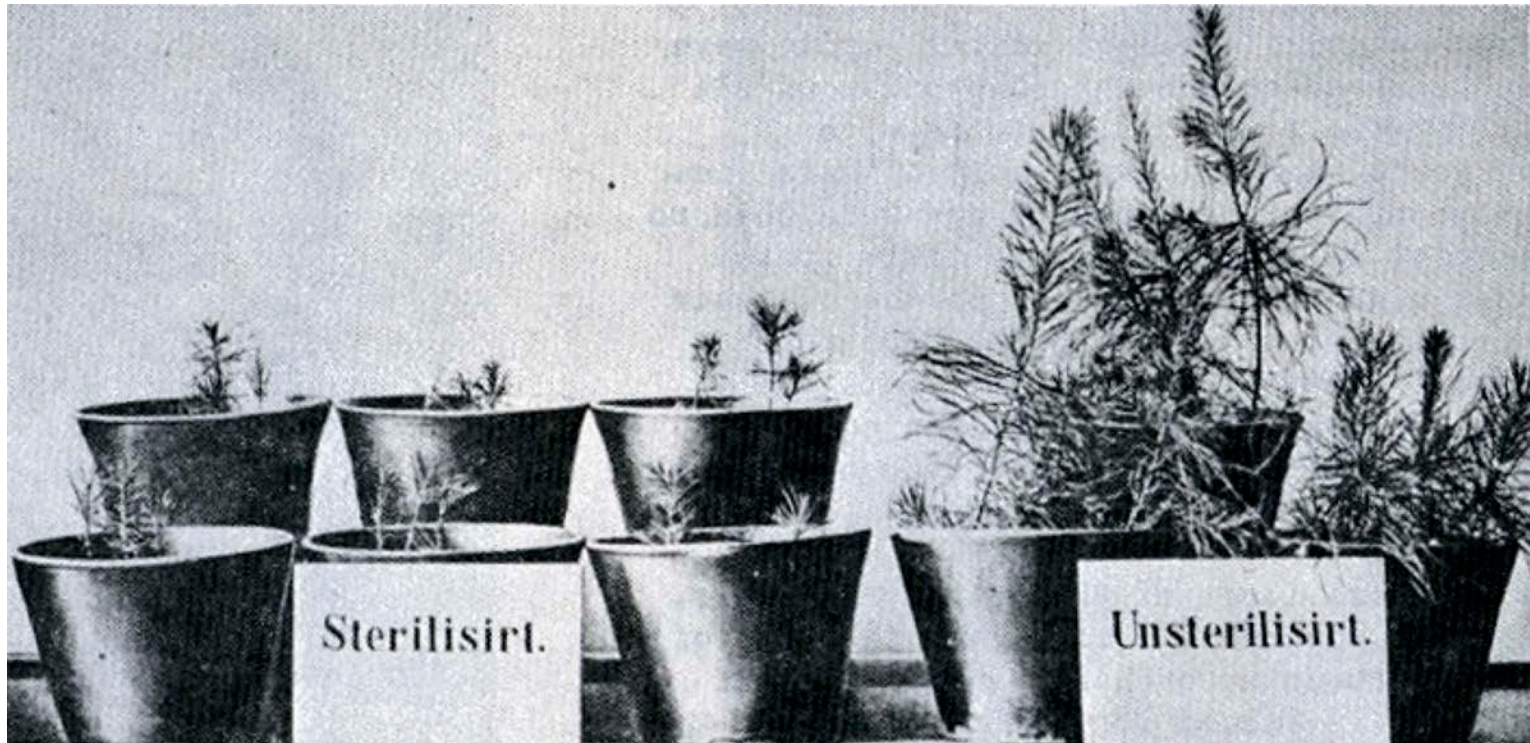
Albert Bernhard Frank,
geboren am 19. Januar 1839, gestorben am 27. September 1900.

Albert Bernhard Frank

Premier expérimentateur du microbiote de l'arbre

Sol stérilisé (chauffé)

Sol non stérilisé (témoin)

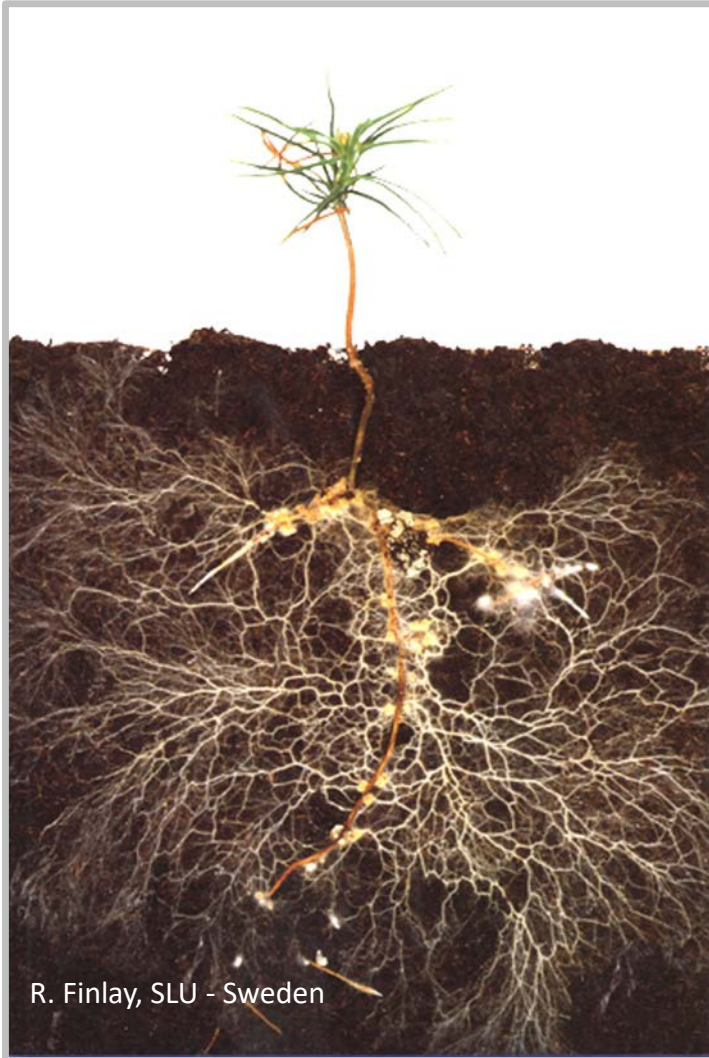


Frank AB (1892) Die Ernährung der Kiefer durch ihre Mykorrhizapilze
(La nutrition du pin grâce à ses champignons mycorhiziens).
Berichte der D Bot Gesel, Bd X, Heft 9, t XXX.

Il formule une théorie révolutionnaire : le système racinaire est le siège d'une symbiose mutualiste entre l'arbre et le champignon, et il invente le terme Mycorhize.



Immobilés, les arbres ont du créer des alliances, il y a plus de 100 à 300 millions d'années...



La symbiose ectomycorhizienne (ECM)

Pinacées (pins, sapins, épicéas, mélèzes, Douglas...)

Fagacées (chênes, hêtres, châtaigniers...)

Bétulacées (bouleaux, charmes, aulnes, noisetiers...)

Salicacées (saules, peupliers)

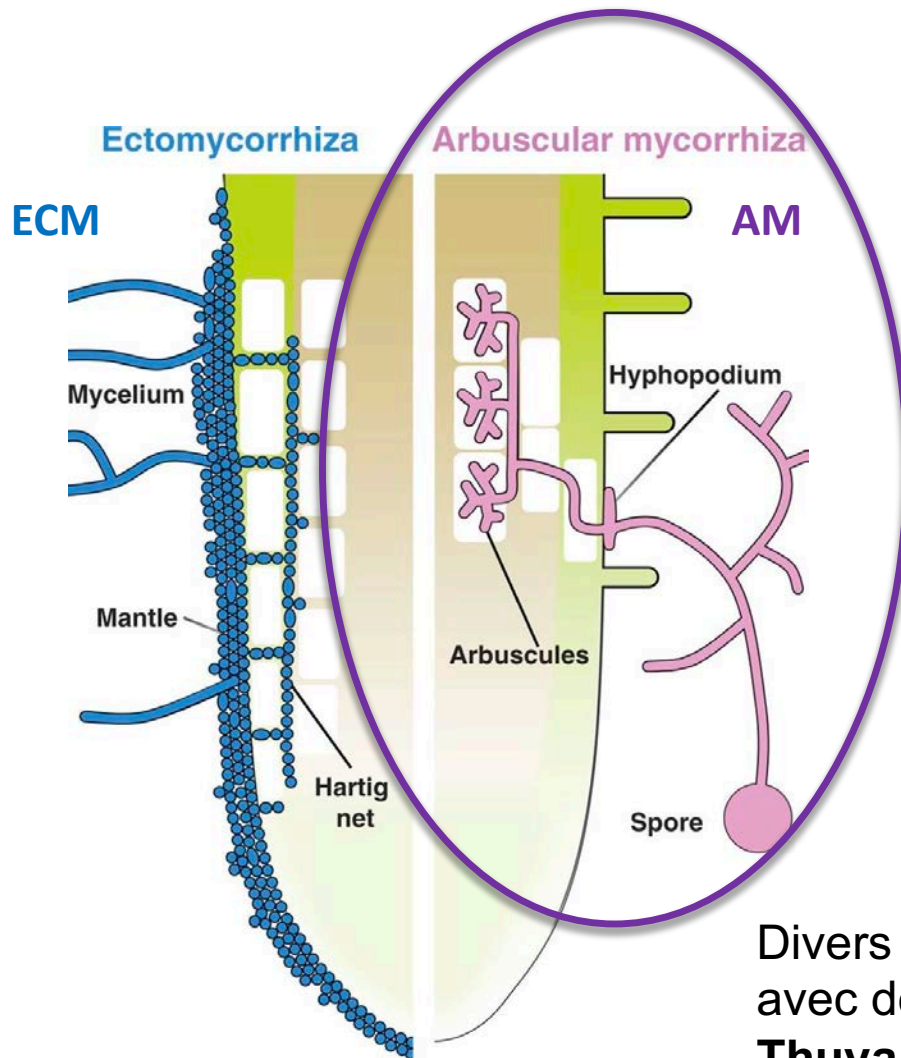
Tiliacées (tilleuls)

Myrtacées (eucalyptus)...



Une symbiose « relativement anecdotique » pour le règne végétal

La symbiose mycorhizienne à arbuscules (endomycorhizienne)



Alors que 5% des plantes sont concernées par la symbiose ectomycorhizienne, plus de 85% des plantes vasculaires terrestres forment une symbiose mycorhizienne autre que la symbiose ECM.

Divers ligneux tempérés formant une symbiose avec des champignons AM
Thuya, cyprès, frêne, érable, merisiers...

Etudier la complexité nécessite parfois des étapes de simplification...

« La mycorhization contrôlée »



La mycorhization contrôlée: stratégie de bio-fertilisation* en agriculture et foresterie



Association Pseudotsuga menziesii / Laccaria bicolor
Une licence de savoir-faire INRAE (depuis 1994)



Semis de Douglas 1+1 inoculés
Avec *Laccaria bicolor* S238N,
souche Nord-Américaine

Planche témoin :
semis 1+1 non inoculés

*Matières Fertilisantes et des Supports de Culture (MFSC)

Une licence de savoir-faire INRAE (depuis 1994)

Association Pseudotsuga menziesii / Laccaria bicolor

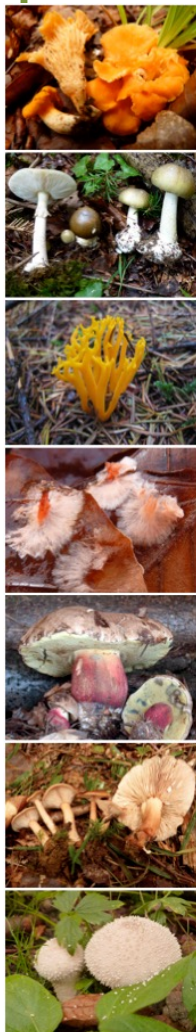
A l'heure actuelle 1 000 000 plants vendus

Quelques verrous important:

- i) La production de l'inoculum
- ii) La conservation des souches



Inoculum mycorhizien : conservation, production et efficacité



Association Pseudotsuga menziesii / Laccaria bicolor

Deux modes de conservations au laboratoire:

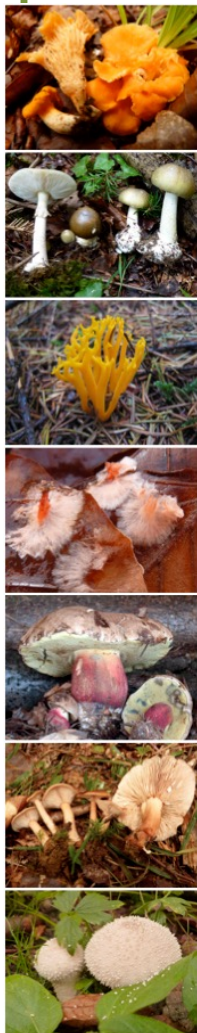
- Cryo-conservation (20 ans) dans l'azote liquide (« réserve minière »)
- Conservation à 4 ou 20 ° C (avec repiquages réguliers)

Vers 2010, observations de pertes de l'efficacité (promotion de la croissance) ou du pouvoir mycorhizogène de la souche fongique S238N après des sous-cultures (repiquages) successifs...

Comparaison de deux mode de conservation de la souche

Inoculum mycorhizien pour les systèmes de production: conservation, production et efficacité

Comparaison des modes de conservations :
cryo-conservée (20 ans) vs repiquages réguliers sur
milieu sucré pour maintenir la souche en croissance



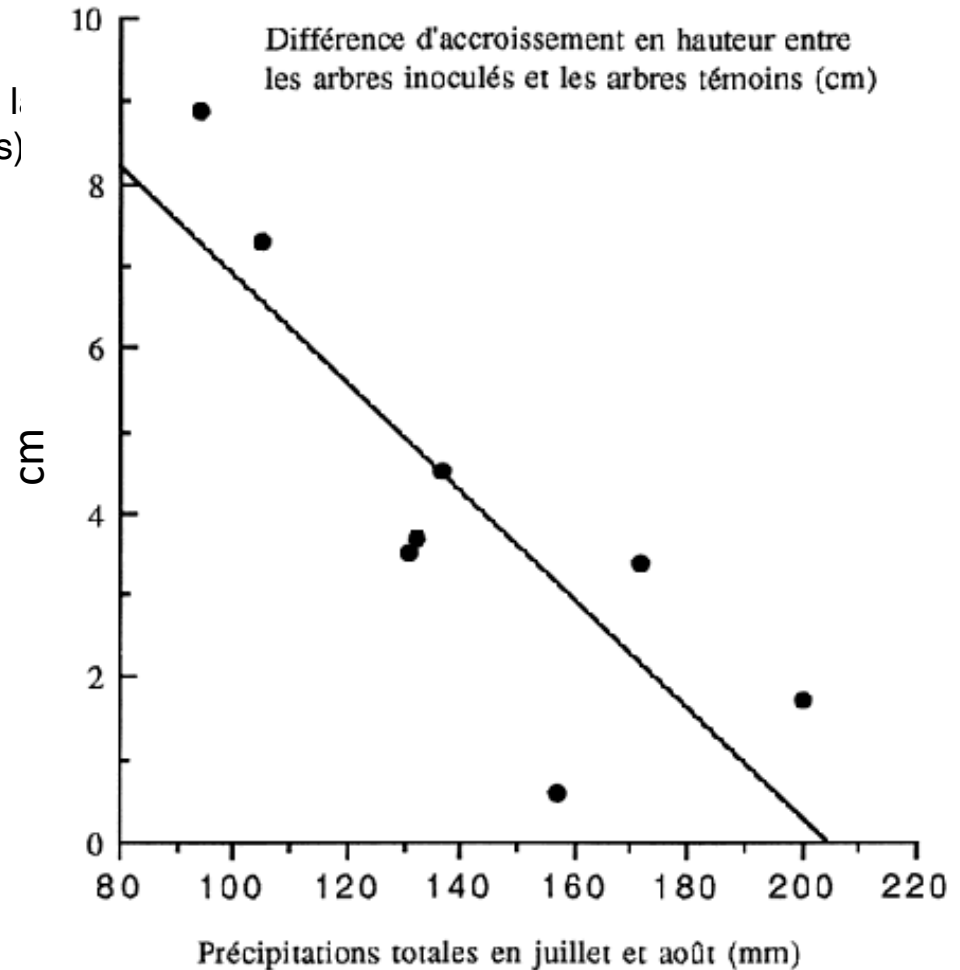
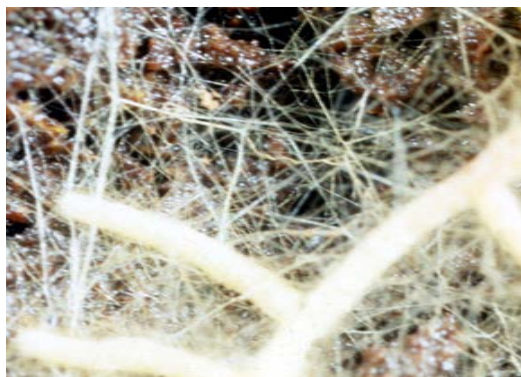
La mycorhization contrôlée: une stratégie d'adaptation des arbres à la sécheresse ?

Plantation de chêne sur les terrasses de la Moselle

Corrélation négative entre les précipitations estivales et l'effet de *Paxillus involutus* sur la croissance des plants (8 années de mesures) par rapport aux plants non mycorhizés

BOUXIÈRES

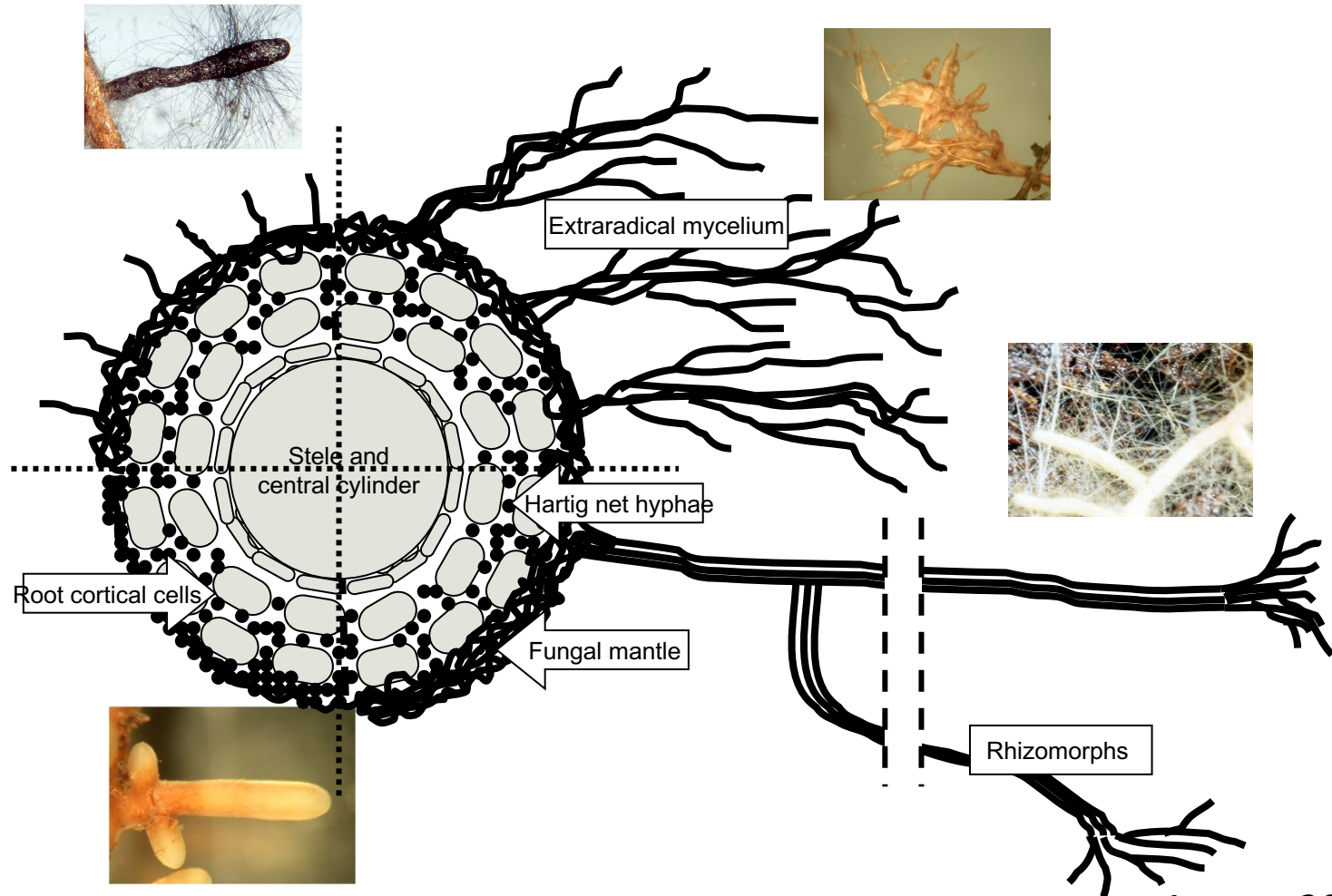
INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre



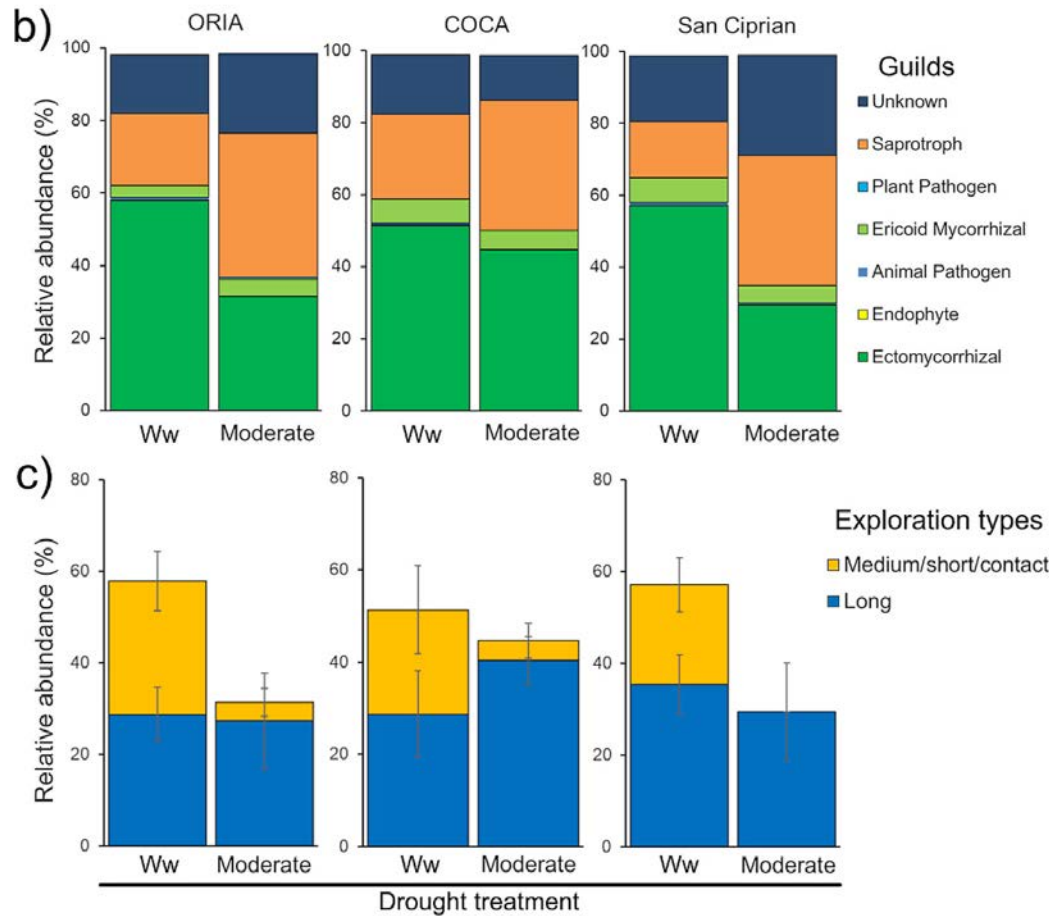
Garbaye & Churin, 1997 (For. Ecol. Management.)

Différents champignons mycorhiziens = différents types exploratoires

Le type exploratoire est-il un trait fonctionnel lié à la mobilisation des nutriments / eau (aide à la plantation)?



Le type exploratoire est-il un trait fonctionnel lié à la mobilisation des nutriments / eau?



Etude, en serre, de l'effet de la mycorhization « naturelle » sur la **réponse à la sécheresse** de *Pinus pinaster* face à une sécheresse modérée.

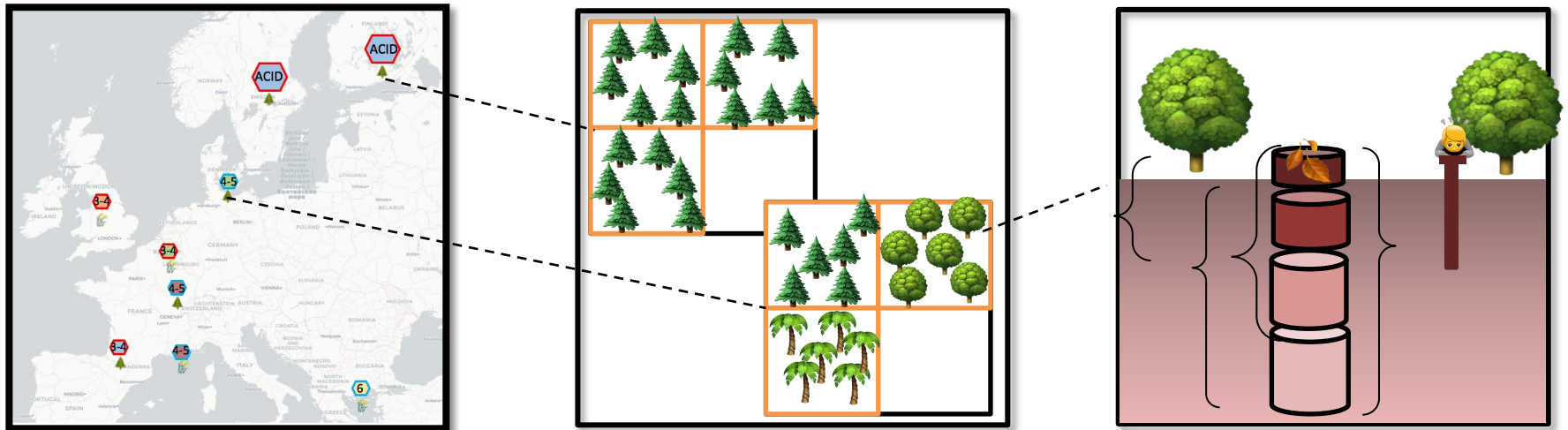
*Modéré, car seulement 8% des plants sont morts (par rapport au témoin).
Quand à la sécheresse sévère, 73% des plants sont morts... (statistiquement trop faible)*

Bien que le taux de mycorhization baisse, la proportion de types exploratoires longs augmente significativement

Castano et al., 2022 - SBB

Hypothèse: les types exploratoires (traits fonctionnels) pourraient être également liés aux capacités de mobilisation des nutriments

Quel lien avec la fertilité des sols?

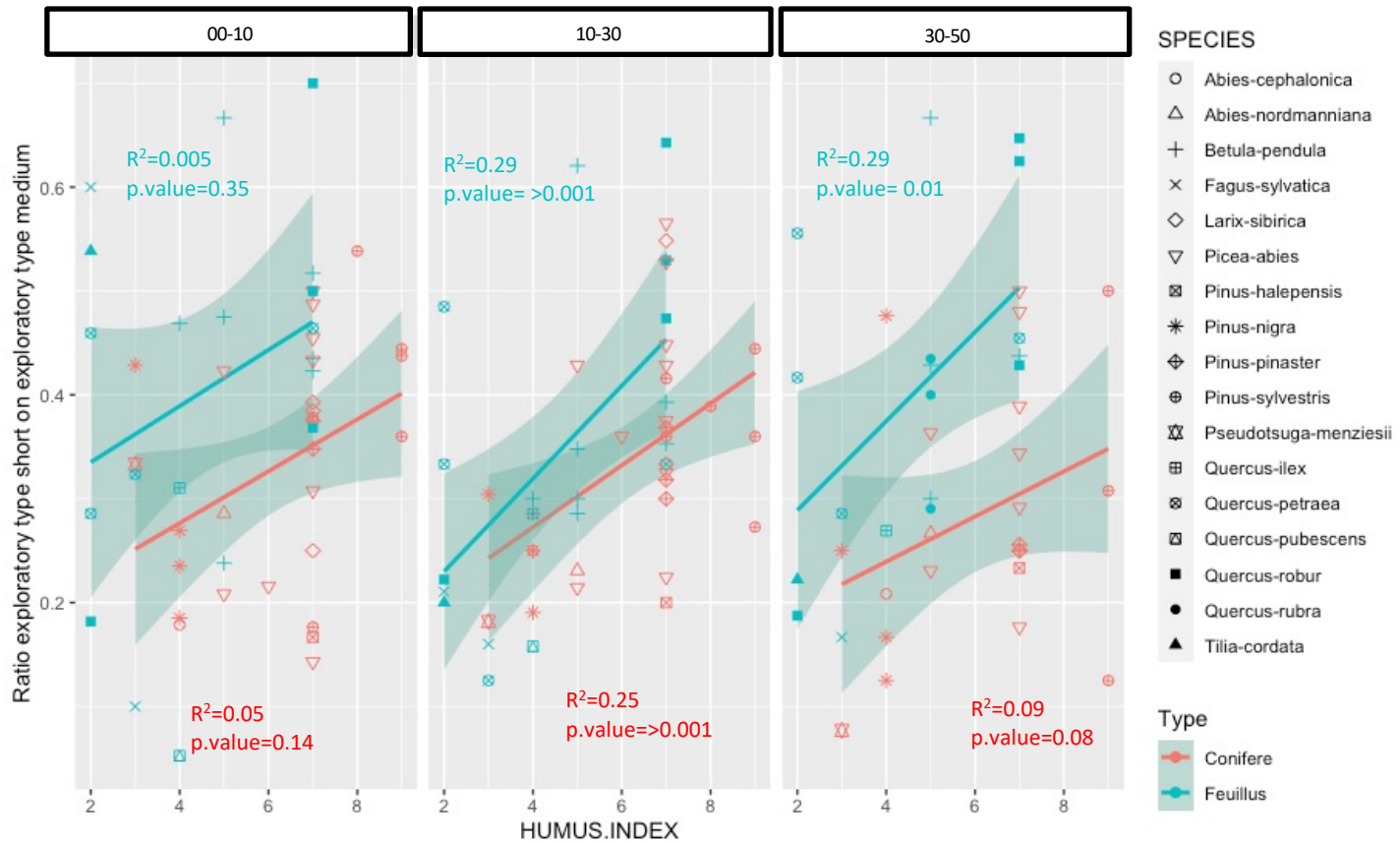


22 essences mycorhiziennes sur 9 sites (common garden) européens

METARBARCODING => Taxonomic annotation + functional / ecological trait (fungi)

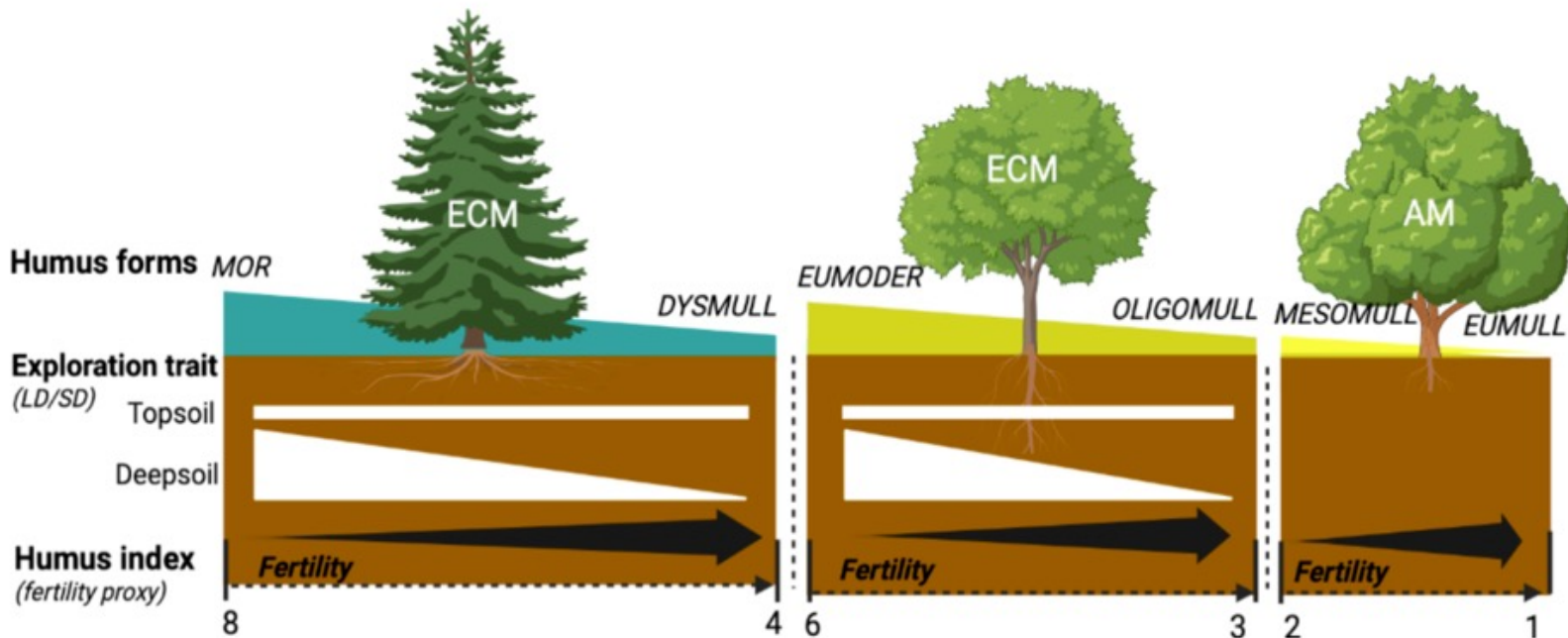
Hypothèse: les types exploratoires (traits fonctionnels) pourraient être liés aux capacités de mobilisation des nutriments

Quel lien avec la fertilité des sols?

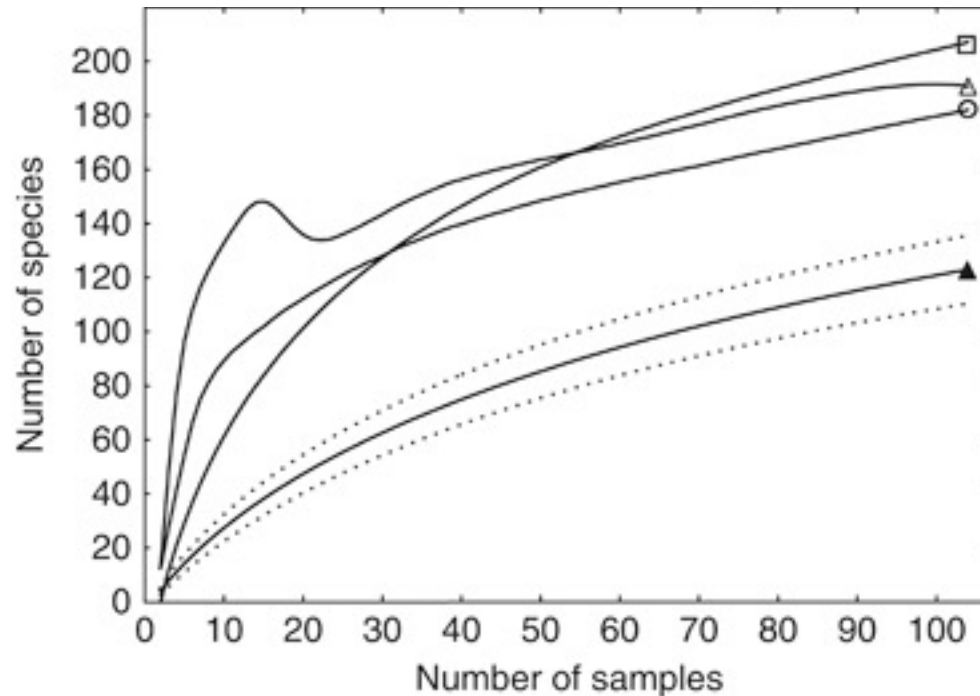


Hypothèse: les types exploratoires (traits fonctionnels) pourraient être liés aux capacités de mobilisation des nutriments

Quel lien avec la fertilité des sols?



Complexité des forêts: combien d'espèces de champignons ectomycorhiziens un arbre peut-il héberger?



Courbe d'accumulation d'espèces rares d'EcMF (triangle noir) associée à un seul tremble (*Populus tremula*), ses intervalles de confiance à 95% (lignes pointillées) et les estimations minimales de la richesse en espèces: Chao 2 (cercle ouvert), Jackknife 2 (carré ouvert) et ICE (triangle ouvert).

Influence de l'essence forestière (conifères et feuillus) sur la communauté fongique (site de Breuil)

Table 1 – Fungal diversity (total number of fungi and Shannon–Wiener index) and percentage of ECM and non-mycorrhizal fungi according to the different treatments

Treatments	Fertilisation	Number of fungal species	Shannon–Wiener index (H')	Percentage of ectomycorrhizal fungi	Percentage of non-mycorrhizal fungi
Native forest	–	186	4.89	56.45	43.55
Beech	–	116	4.36	61.21	38.79
Oak	–	84	4.04	51.19	48.81
Nordmann fir	–	109	4.34	63.30	36.70
Nordmann fir	+	124	4.44	54.84	45.16
Norway spruce	–	105	4.30	46.67	53.33
Norway spruce	+	111	4.37	52.25	47.75
Douglas-fir	–	70	3.90	45.71	54.29
Douglas-fir	+	81	4.07	50.62	49.38
Corsican pine	–	69	3.89	49.28	50.72
Corsican pine	+	59	3.79	40.68	59.32

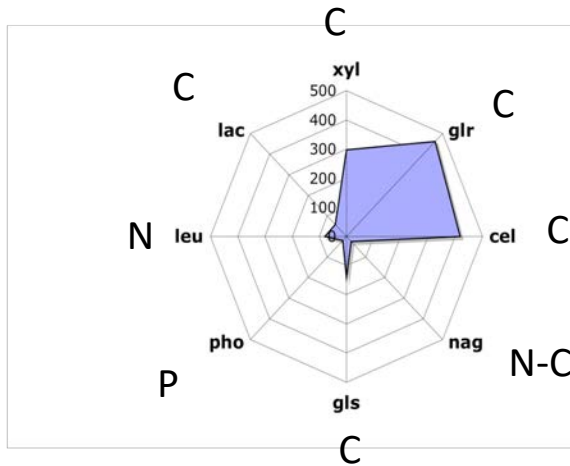
Répartition de 333 espèces fongiques sous 6 essences (TSF et plantations mono-spécifiques)



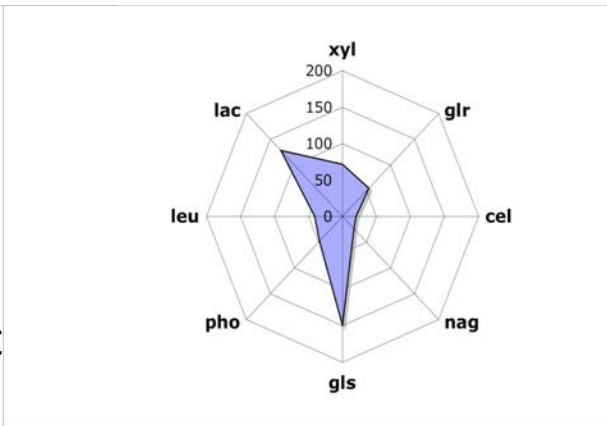
Pourquoi une telle diversité?

Vers une approche d'écologie fonctionnelle...

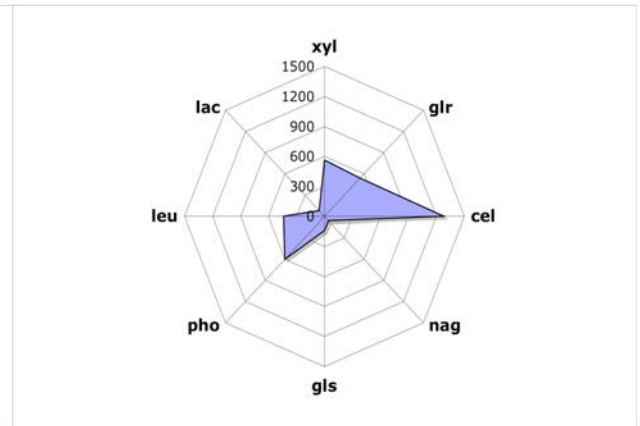
Peziza sp. (A1)



Byssocorticium atrovirens (A1)



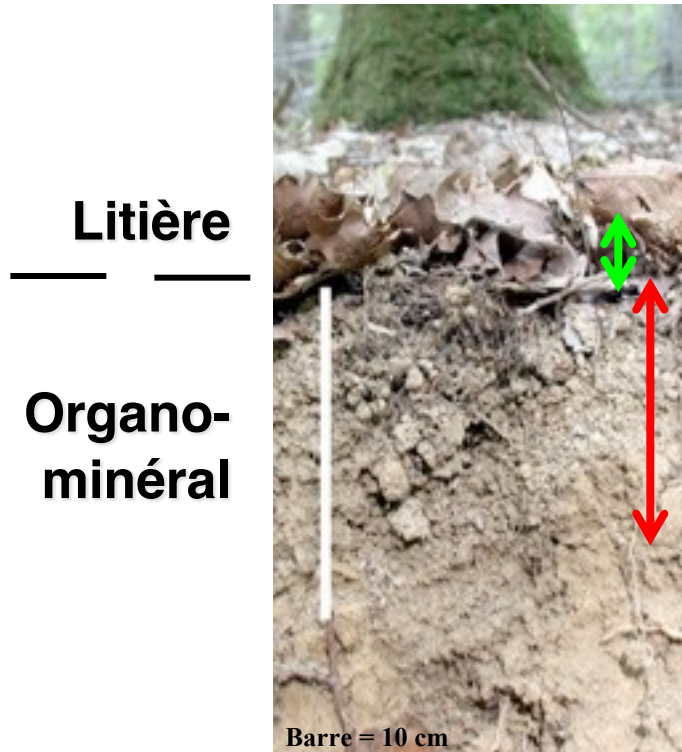
Tomentella lateritia (A1)



Complémentarité fonctionnelle des espèces (chênaie lorraine)

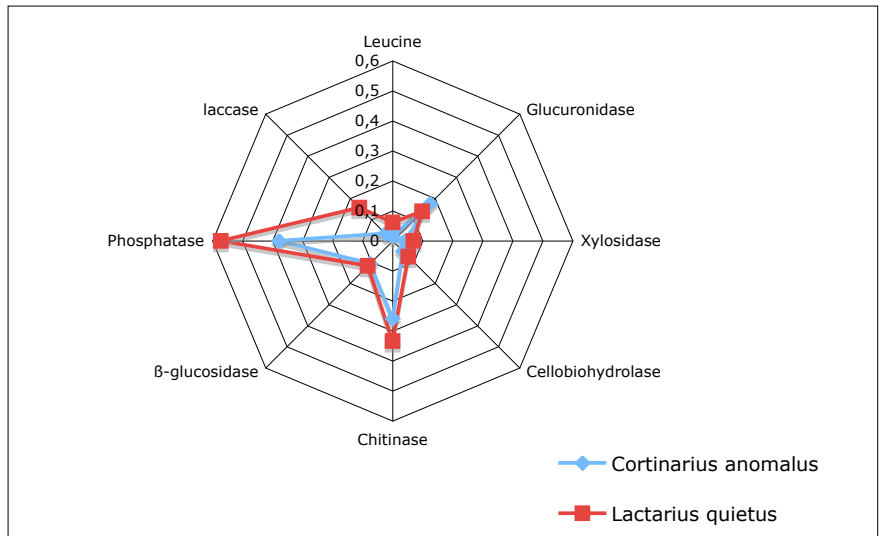
Vers une approche d'écologie fonctionnelle

Qui fait quoi?



L. quietus

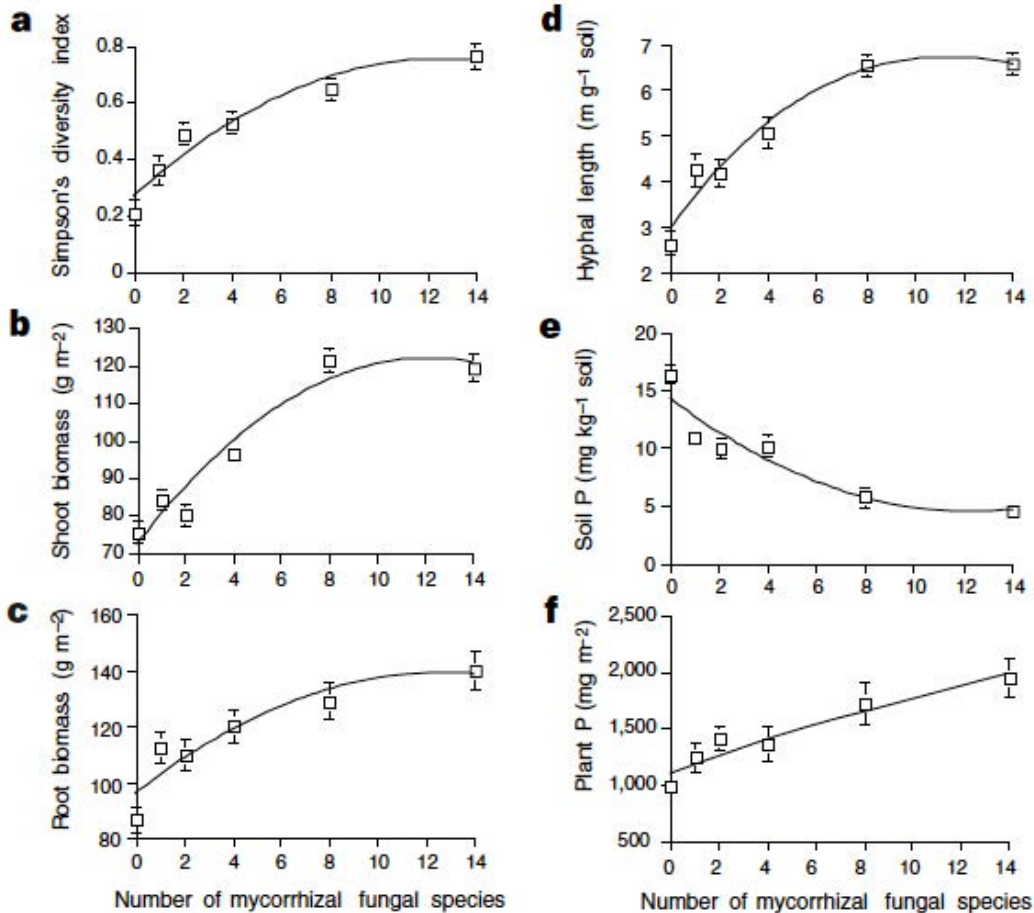
C. anomalus



**Redondance fonctionnelle
(complémentarité spatiale)**

Complexité des écosystèmes (prairies...): diversité végétale et diversité du microbiote

Conséquences sur la productivité et la croissance



Effet de l'augmentation du nombre de **champignons AM** sur différents paramètres chez 15 espèces végétales en mélange (15 x 100): *Agrostis gigantea*, *Bromus inermis*, *Poa compressa*, *Achillea millefolium*, *Aster cordifolius*, *Aster novae-angliae*, *Chrysanthemum leucanthemum*, *Daucus carota*, *Euthamia graminifolia*, *Fragaria virginiana*, *Plantago lanceolata*, *Ranunculus acris*, *Rudbeckia hirta*, *Geum macrophyllum* et *Solidago canadensis*.

Conclusions et principaux messages

- Les arbres hébergent un microbiote. Les champignons mycorhiziens en sont une composante (partenaires symbiotiques)
- Les interactions arbre – microbiote résulte d'une longue co-évolution (question de la migration assistée (régional / continental versus « exotique »)
- Mycorhization contrôlée: potentiel avantage à court terme (tolérance à la sécheresse)? Intérêt à moyen terme (succession dynamique du cortège fongique et spécificité d'hôte croissante avec l'âge du peuplement)?
- Limites d'une telle approche (conservation des ressources biologique, production, risque d'invasions, émergence des maladies, etc.)
- Le microbiote des arbres est fortement impacté par la gestion forestière (essence, âge, éclaircies, exportation de biomasse, etc.) => ex. TSF vs Futaie régulière. La diversité des espèces (fongiques) = diversité fonctionnelle
- Prise en compte du microbiote pour les orientations de gestion? Favoriser la diversité
- Les microbes ont une réponse adaptative rapide (en particulier les bactéries), mais est-ce suffisant pour supporter / accompagner l'adaptation des plantes?



MERCI POUR VOTRE ATTENTION...