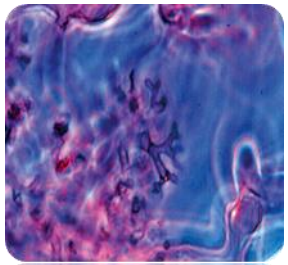
Le paysage des invisibles: l'application de l'écologie du paysage aux microorganismes

Cendrine Mony

Paysabio, UMR ECOBIO



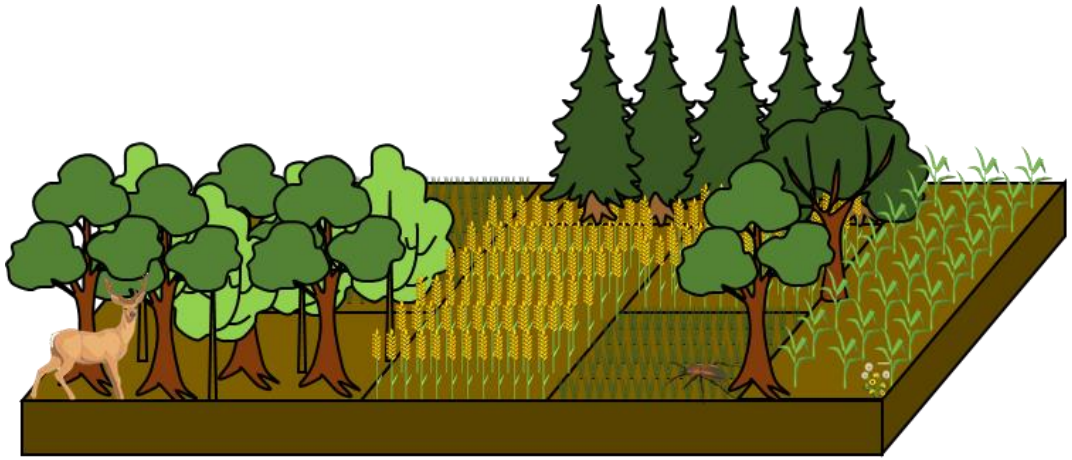
L'écologie du paysage et les macroorganismes

Activités humaines

Structure du paysage

Mécanismes opérant à l'échelle des métacommunautés

Patrons de biodiversité



L'écologie du paysage et les macroorganismes

Activités humaines

Structure du paysage

Mécanismes opérant à l'échelle des métacommunautés

Patrons de biodiversité

- Paysage étudié = plusieurs centaines de mètres ou kilomètres
- ~1/100-1000 en terme de rapport d'échelle entre la taille organisme et l'étendue du paysage
- Large corpus de connaissances reliant les composantes du paysage (quantité d'habitat, hétérogénéité de la mosaïque paysagère, …) et la biodiversité

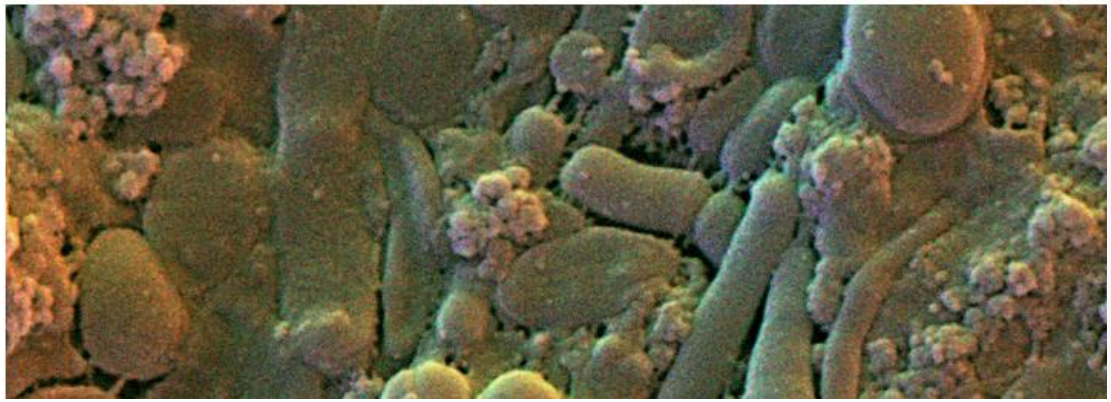
Les microorganismes, une biodiversité invisible

Et les microorganismes ???

The New York Times

TAKE A NUMBER

Earth May Be Home to a Trillion Species of Microbes

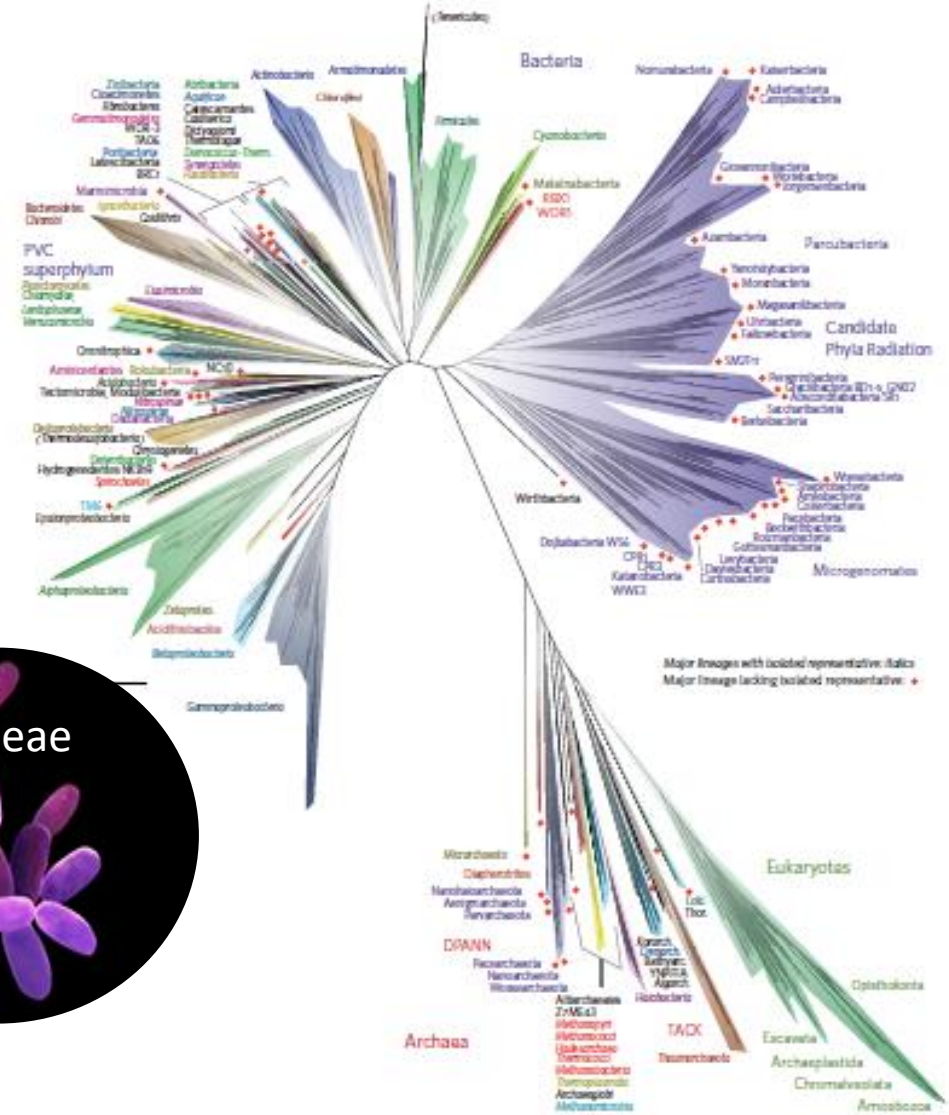


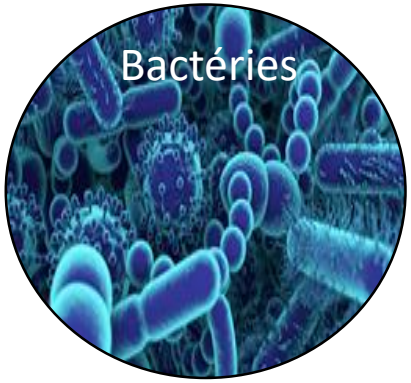
10^{12} = nb estimé d'espèces de bactéries

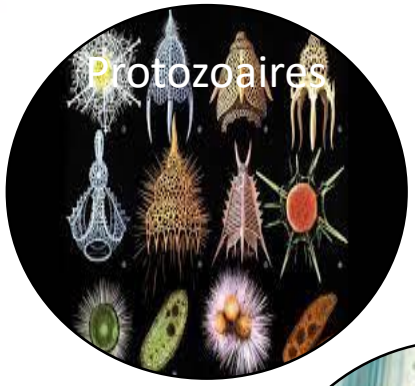
1 kg de sol ~100 000 à 10 millions d'espèces différentes

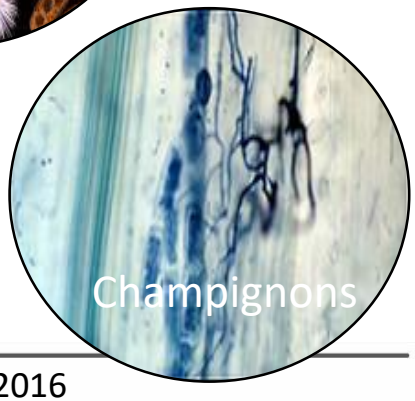
Une plante = plusieurs centaines d'espèces de microorganismes

Les microorganismes, une biodiversité invisible









Hug et al., 2016
(Nature microbiology, New tree of life)

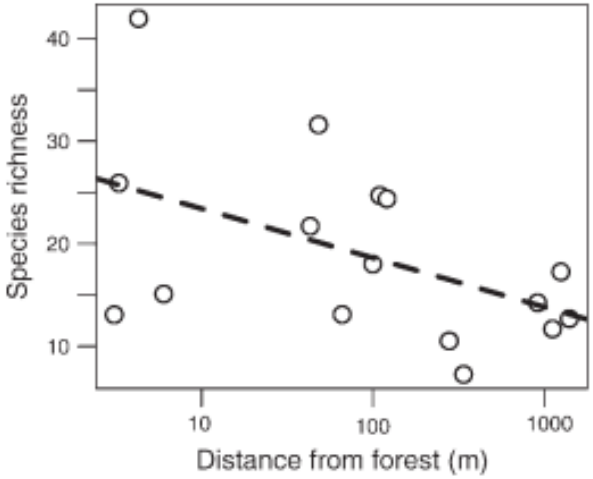
Les microorganismes, une biodiversité invisible

- Taille: de 0,5 à 100 µm
- Temps de génération: qqs dizaines de minutes à qqs années
- Reproduction souvent végétative -> multiplication exponentielle

Les microorganismes, une biodiversité invisible

- Taille: de 0,5 à 100 µm
- Temps de génération: qqs dizaines de minutes à qqs années
- Reproduction souvent végétative -> multiplication exponentielle

Théorie de Baas-Becking, 1934
« Everything is everywhere but the environment selects »



Peay et al., 2010 Ecology

L'écologie du paysage et les microorganismes

Des connaissances très fragmentaires focalisées surtout sur les pathogènes

Review TRENDS in Ecology and Evolution Vol.19 No.8 August 2004

Tree diseases and landscape processes: the challenge of landscape pathology

Ottmar Holdenrieder[1], Marco Pautasso[1,2], Peter J. Weisberg[3] and David Lonsdale[4]

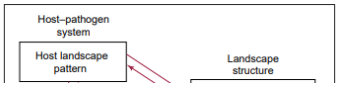
[1]Section of Forest Pathology and Dendrology, Department of Environmental Sciences, Federal Institute of Technology, 8092 Zurich, Switzerland
[2]Biodiversity and Macroecology Group, Department of Animal and Plant Sciences, University of Sheffield, Sheffield, UK, S10 2TN
[3]Department of Natural Resources and Environmental Science, University of Nevada, Reno NV 89512, USA
[4]Independent consultant on tree diseases, 33 Kings Road, Alton, Hampshire, UK, GU34 1PX

Forest pathology inherently involves a landscape perspective, because tree pathogens propagate according to heterogeneous spatial patterns of flow and isolation. Landscape pathology is a field that is now emerging from the transdisciplinary cooperation of forest pathologists with landscape ecologists. Here, we review recent broad-scale assessments of tree disease risk, investigations of site and host preferences for several root rot pathogens, and regional historical analyses of pathogen outbreak in plantations. Crucial topics include fragmentation effects on pathogen spread and geophysical features that predispose forest patches to disease expression. Recent methodological developments facilitate the spatially explicit analysis of reciprocal coarse-scale relationships among hosts and pathogens. Landscape pathology studies fill a significant research gap in the context of our understanding of sustainable forest management, the introduction of exotic organisms and how climate change might affect the spread of disease.

Together with anthropogenic influences, abiotic factors and herbivores, forest pathogens are key to the shaping of the dynamics and diversity of forested landscapes (e.g. [1]). The spread of pathogens and the expression of disease are also influenced by landscape features and by the spatial patterns of vegetation, which includes host, reservoir

has been demonstrated in several recent studies, including the analysis of tree mortality in Adirondack Park, New York [4] and the role of laminated root rot, caused by *Phellinus weirii*, in stand replacement processes in Oregon (e.g. [5]). Studies at a larger scale are also important in predicting rates of spread of pathogens and the spatial patterns of their impacts, as shown by studies of sudden oak death in California [6] (Box 1) and beech bark disease in the Catskill Mountains, New York [7].

Although fine-scale studies have often dominated forest pathology, it is now recognized that our understanding (and, ultimately, managing) of diseases on a regional scale requires a broader scope of investigation (e.g. [8]). As a result, there has been a widespread adoption of epidemiological approaches for managing diseases [9,10]. Increasingly, such approaches consider how the spatial structure of host populations influences epidemic spread rates [11]. Therefore, by building on the tradition of plant disease epidemiology [12], many contemporary epidemiological



10

HABITAT FRAGMENTATION AND INFECTIOUS DISEASE ECOLOGY

Gerardo Suzán, Fernando Esponda, Roberto Carrasco-Hernández, and A. Alonso Aguirre

In this chapter we address the effects of habitat loss and fragmentation on infectious disease ecology, first on a theoretical basis and second by reviewing published empirical studies that examine this relationship. We report the mechanisms proposed in the empirical studies to explain the observed results. Finally, we suggest avenues for future research describing other drivers that should be considered for disease emergence in fragmented habitats and the development of alternative theoretical models and empirical studies on multispatial scales that will help to understand patterns and processes.

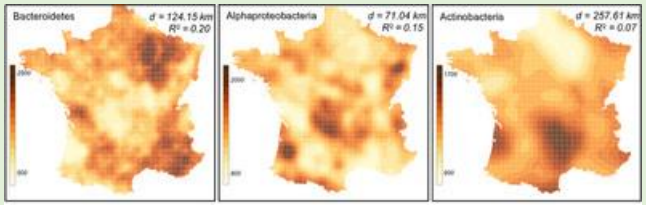
The integration of both theoretical and empirical findings on habitat changes and infectious diseases ecology will help scientists and policymakers to build transdisciplinary thinking to predict and understand disease dynamics, and simultaneously develop con-

analyzed from the perspective of landscape ecology, which establishes that some characteristics of any ecological system will be directly or indirectly affected by the spatial context that surrounds it. Landscapes are conceptualized as units of higher organization level formed by a collection of ecosystems in a geographic area. A landscape is a spatially heterogeneous area that can be mathematically described based on patterns of shapes, sizes, clustering, and diversity of different surface units. Many of the present ideas regarding ecological landscape studies and disease ecology are based on the theory of island biogeography, developed by MacArthur and Wilson (1967). This theory identifies size and isolation of islands as important factors influencing diversity and suggests that smaller and more isolated islands are likely to show lower species diversity than larger islands.

L'écologie du paysage et les microorganismes

Biogéographie

(e.g. Martiny et al., 2007; Donadson et al., 2016)



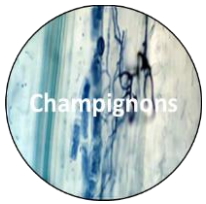
Métacommunautés

(e.g. Livingston et al., 2012; Miller et al., 2018)

Ecologie du paysage

(e.g. Peay et al. 2017; Roy et al., 2020)

Assemblages microbiens



Paysage à large échelle et microorganismes

Activités humaines

Structure du paysage

Mécanismes opérant à l'échelle des métacommunautés

Patrons de biodiversité

Y-a-t-il une relation et à quelle échelle ?

Paysage à large échelle et microorganismes

Exemple de l'influence du type de conduite agricole et de la haie sur le microbiote du blé

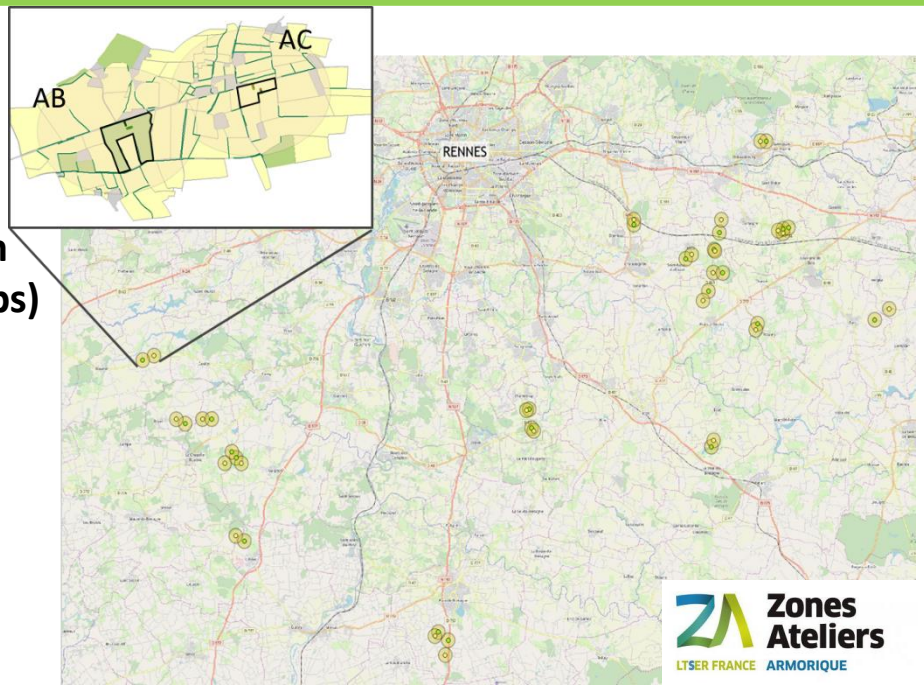
A l'échelle du paysage

A l'échelle de la parcelle

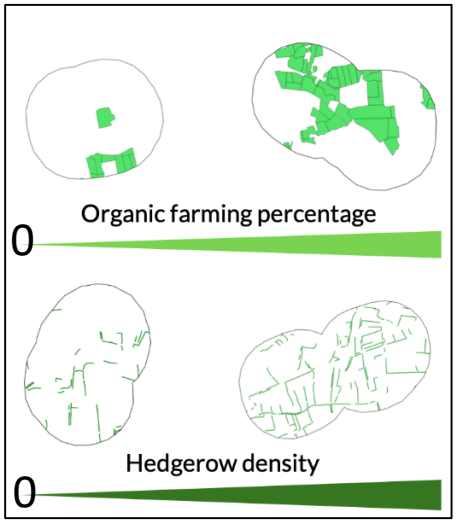
Ricono et al., rev FEMS

Paysage à large échelle et microorganismes

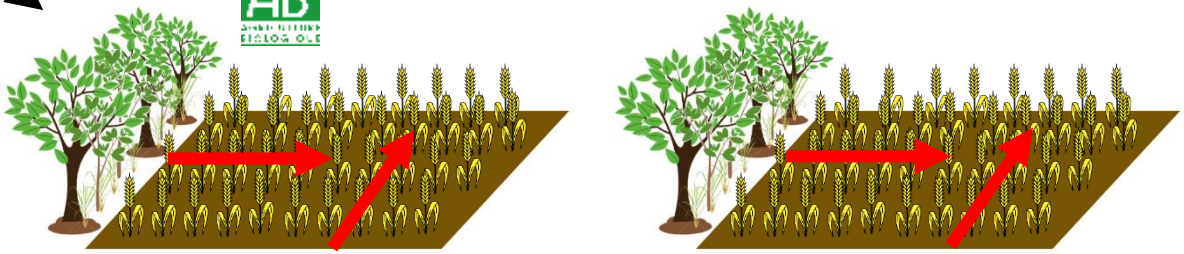
20 paysages (buffer de 500m autour des champs)



Echelle du paysage



Echelle de la parcelle



4 points de prélèvement le long des deux gradients de bordures

Ricono et al., rev FEMS

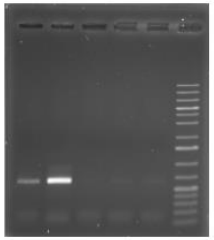
Paysage à large échelle et microorganismes

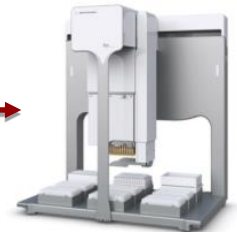
Caractérisation des assemblages microbiens par séquençage massif d'amplicons

PCR

Purification

Séquençage





Extraction ADNs de racines (endosphère uniquement)

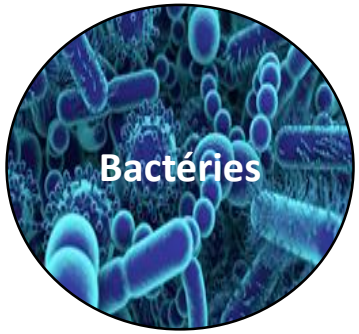
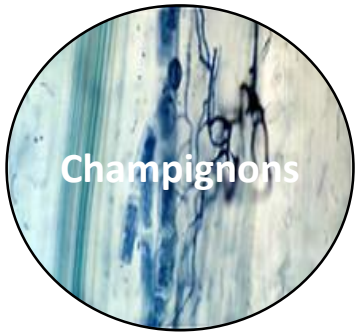
Amplification des ARNr 18S (champignons) et 16S (bactéries)

GEH Génomique Environnementale et Humaine

FROGS

Tableau de contingence des OTUS/clusters de séquences (abondance relative)

Paysage à large échelle et microorganismes

	A l'échelle du paysage	*A l'échelle de la parcelle*
 Bactéries		
 Champignons		

Echelle de réponse ?

Paysage à large échelle et microorganismes

	A l'échelle du paysage		*A l'échelle de la parcelle*		
	AB		AB		
Toutes Bactéries	+	-			
Acidobacteria					
Actinobacteria	+	-	+		
Bacterioides					
Firmicutes	+				
Proteobacteria	+	+			
Tous Champignons			+	-	-
Ascomycota					-
Basidiomycota				-	-
Chytridiomycota	+	-	+		
Glomeromycota			+		
Zygomycota			+		-

Paysage à large échelle et microorganismes

	A l'échelle du paysage		*A l'échelle de la parcelle*		
	AB		AB		
Toutes Bactéries	+	-			
Acidobacteria					
Actinobacteria	+	-	+		
Bacterioides					
Firmicutes	+				
Proteobacteria	+	+			
Tous Champignons			+	-	-
Ascomycota					-
Basidiomycota				-	-
Chytridiomycota	+	-	+		
Glomeromycota			+		
Zygomycota			+		-

Paysage à large échelle et microorganismes

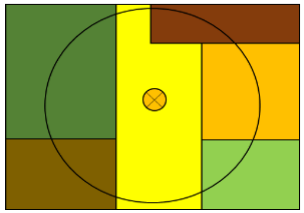
Activités humaines

Structure du paysage

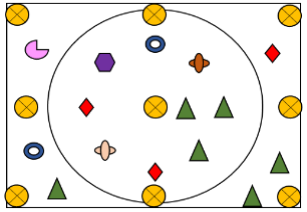
Mécanismes opérant à l'échelle des métacommunautés

Patrons de biodiversité

macro



PAYSAGE



micro

Echelle dépendante des groupes taxonomiques → **L'individu n'est plus forcément l'unité de dispersion**

Paysage biotique des microorganismes

Activités humaines

Structure du paysage

Mécanismes opérant à l'échelle des métacommunautés

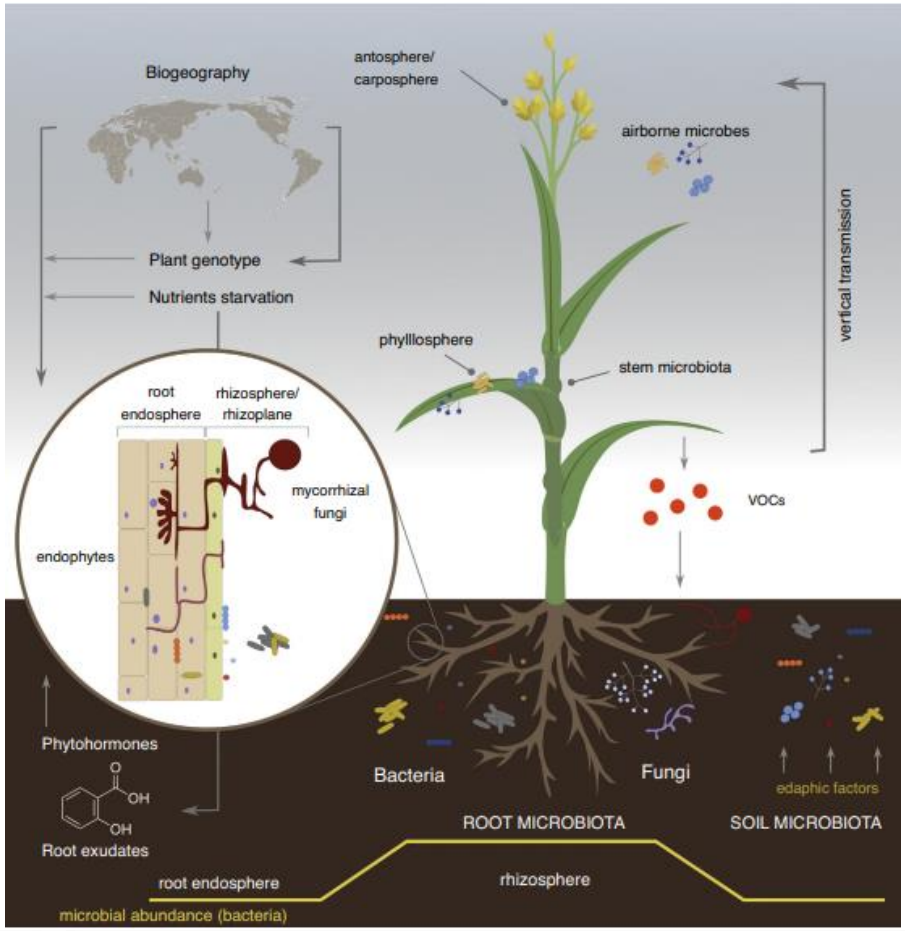
Patrons de biodiversité

Paysage = ensemble de taches d'habitats

Qu'est-ce-qu'un habitat pour un microorganisme ?

Paysage biotique des microorganismes

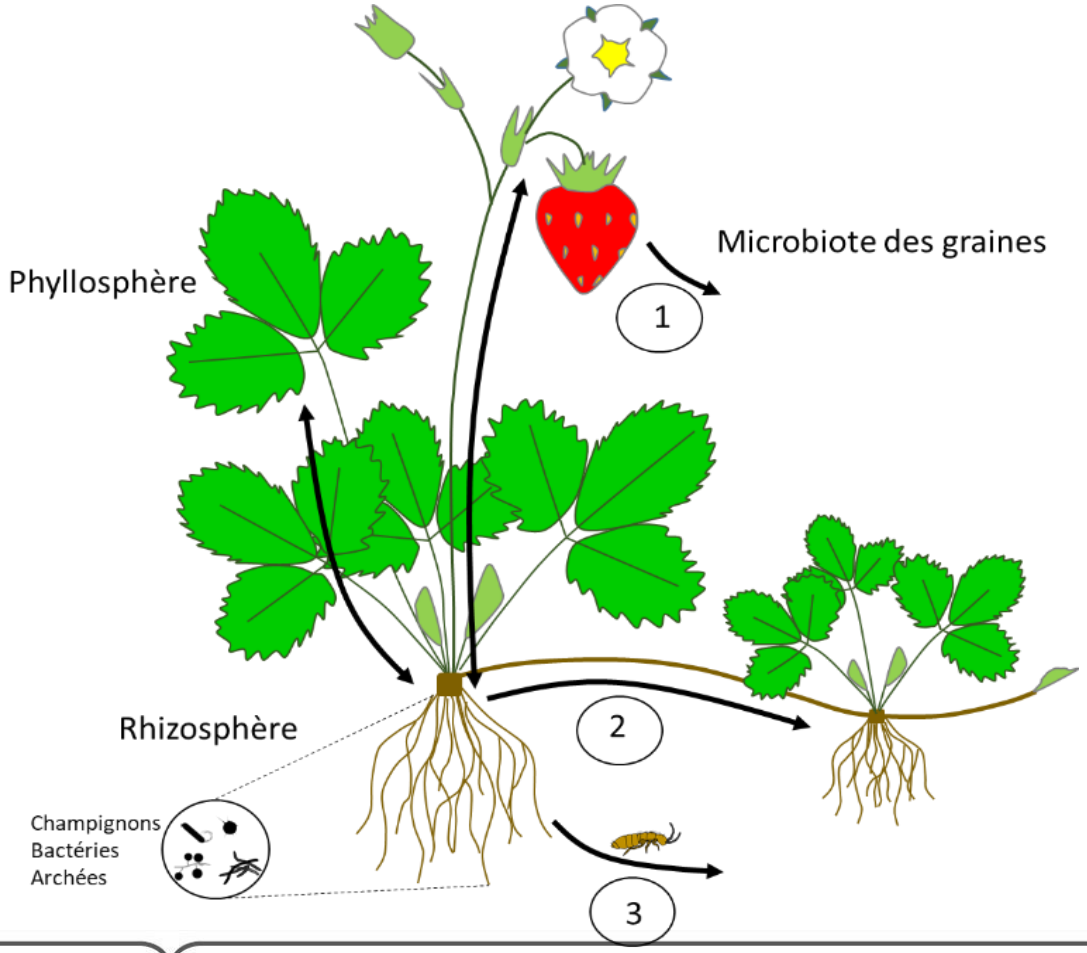
Les microorganismes colonisent tous les macroorganismes (microbiote)



Chialva et al., 2022 Current Opinion in Biotechnology

Paysage biotique des microorganismes

La dispersion de ce microbiote d'un individu à un autre

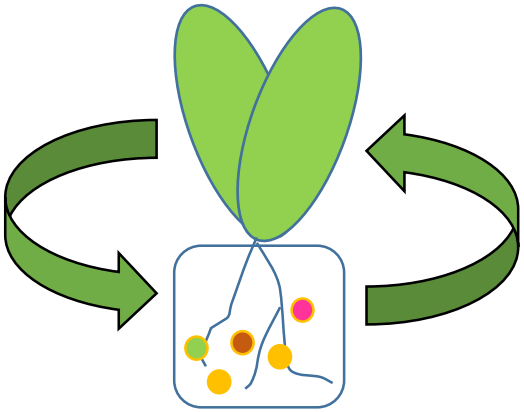


Paysage biotique des microorganismes

Le microbiote est généralement propre à chaque espèce/génotype

Exemple des plantes

Traits morphologiques de la plante
Mécanisme de défense
Mécanisme de sélection active des organismes les plus coopérateurs



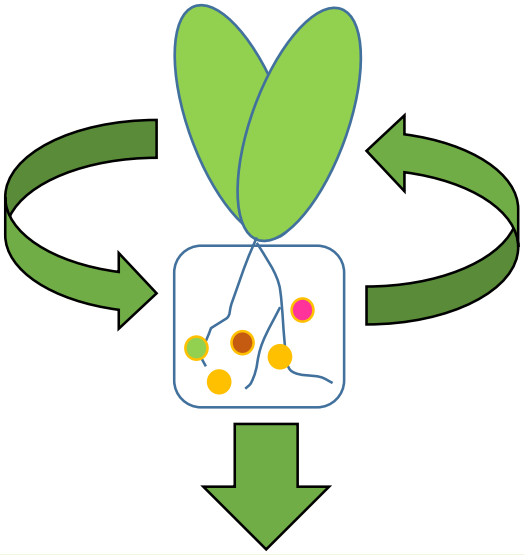
Nutriment (N, P) mais également résistance aux stresses

Paysage biotique des microorganismes

Le microbiote est généralement propre à chaque espèce/génotype

Exemple des plantes

Traits morphologiques de la plante
Mécanisme de défense
Mécanisme de sélection active des organismes les plus coopérateurs



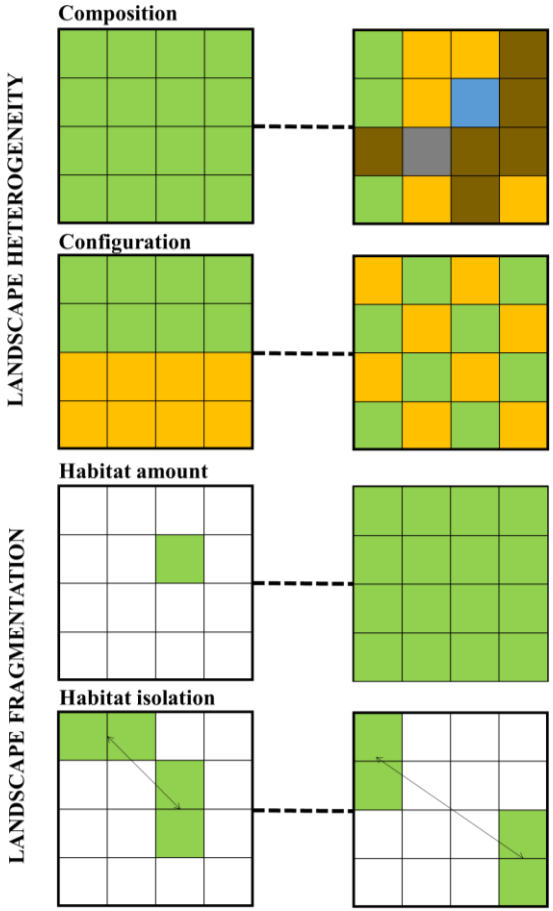
Nutriment (N, P) mais également résistance aux stresses

Préférence d'hôte

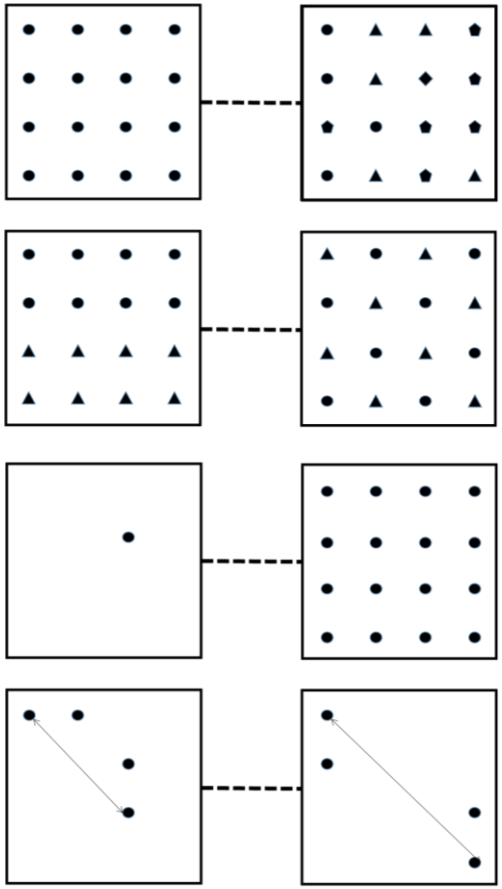
…Les hôtes peuvent ainsi être considérés comme des habitats plus ou moins favorables pour les microorganismes

Paysage biotique des microorganismes

Paysage « structurel »



Paysage biotique

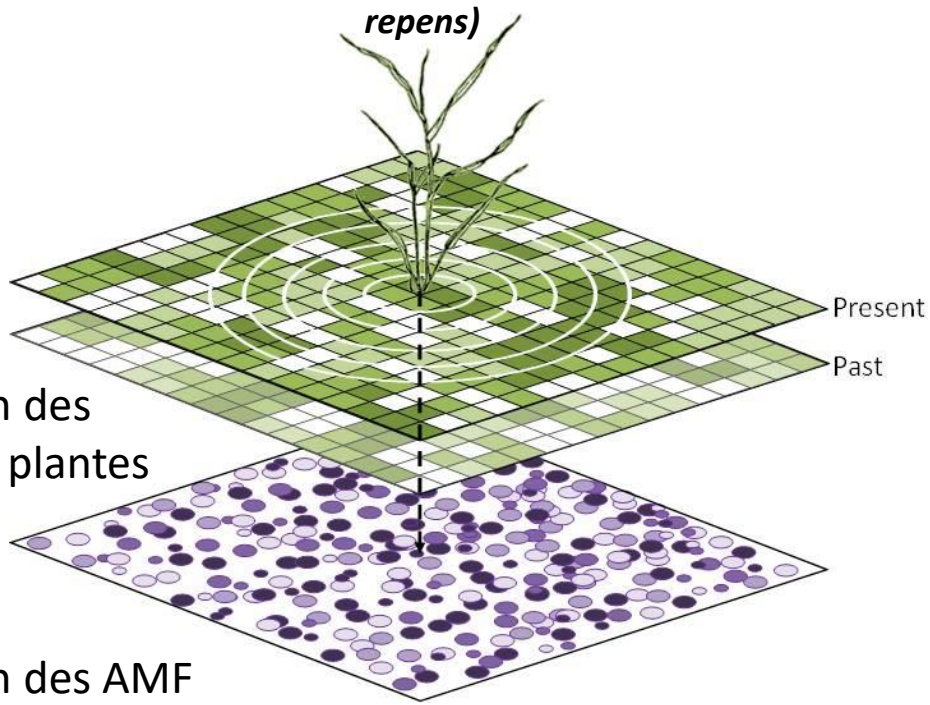


Mony et al., 2020c Frontiers in Microbiology

Paysage biotique des microorganismes

Différents mélanges prairiaux
(identité et diversité des espèces)

Assemblage en champignons mycorhiziens (AMF) d'une plante cible (B. pinnatum et E. repens)



Distribution des espèces de plantes

Distribution des AMF

Bittebiere et al., 2019 Journal of Ecology
Vannier et al., 2020. Fungal Ecology

L'écologie du paysage et les microorganismes

Certaines espèces de plantes influencent la diversité des AMF associés à la plante-cible

Composition du paysage floristique

% de recouvrement dans le buffer

- H. lanatus
- L. perenne
- A. nobilis
- C. nigra
- D. glomerata
- A. stolonifera
- H. mollis
- A. tenuis
- B. pinnatum
- E. repens
- R. Repens
- F. rubra

AMF assemblages

Richesse

Equitabilité

E. repens

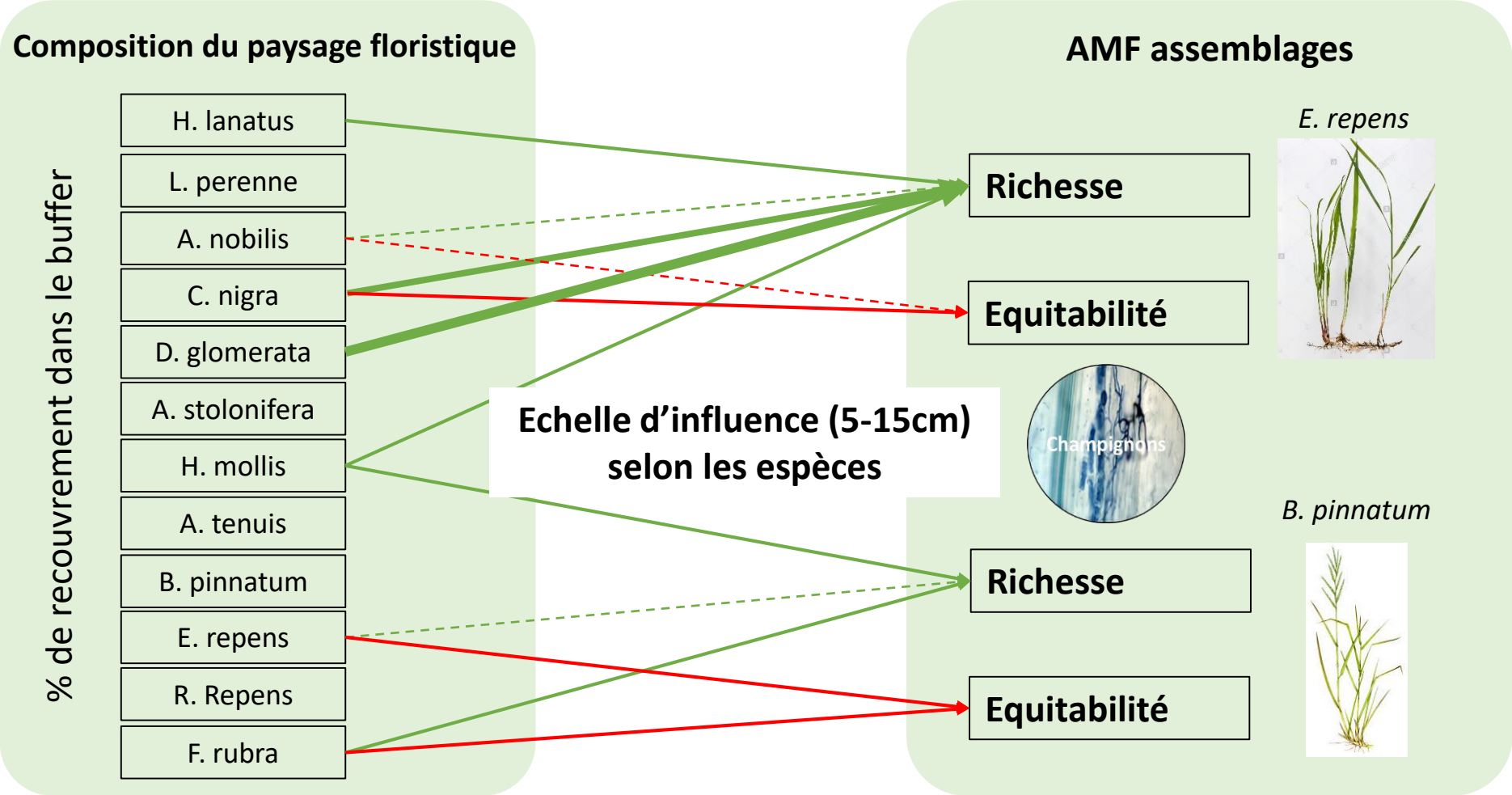
Richesse

Equitabilité

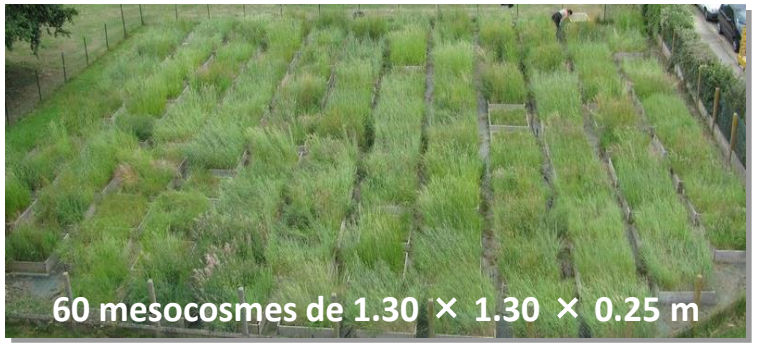
B. pinnatum

L'écologie du paysage et les microorganismes

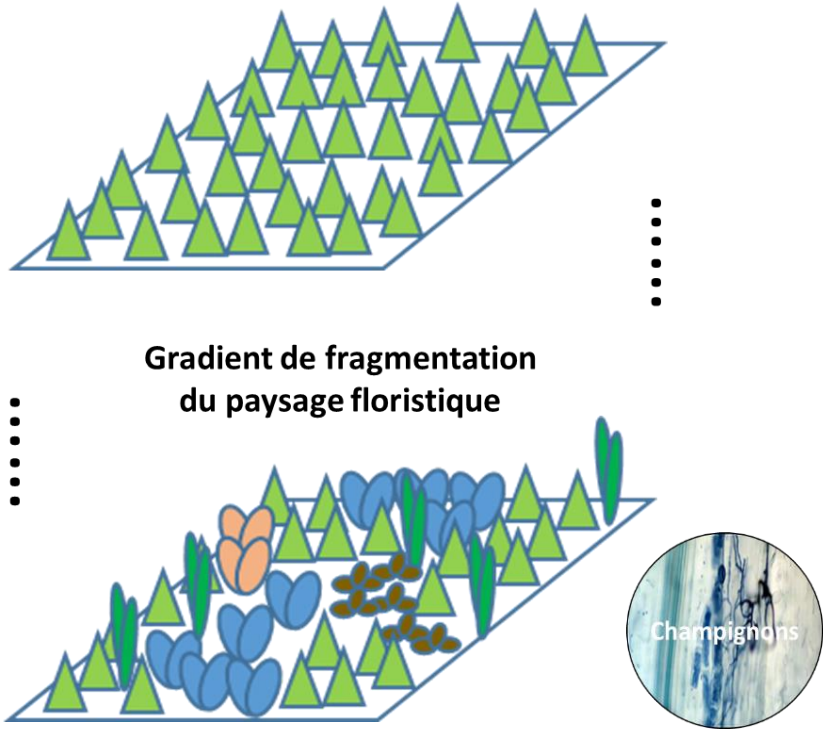
Certaines espèces de plantes influencent la diversité des AMF associés à la plante-cible



Paysage biotique des microorganismes



***Assemblage en champignons mycorhiziens d'une plante cible (B. pinnatum)* à l'échelle gamma**



Hétérogénéité de la mosaïque floristique

Composition (richesse floristique, équitabilité)

Configuration des plantes hôtes

Agrégation spatiale (taille des aggrégats)

Isolement (Distance euclidienne moyenne)

Fragstat

Productivité des plantes

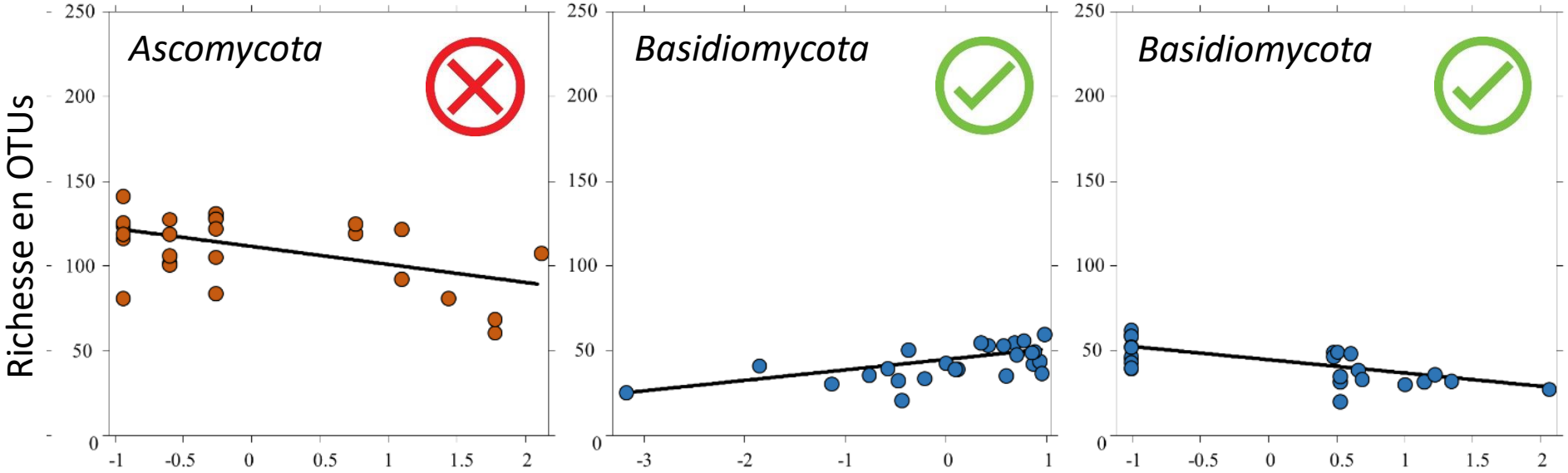
Biomasse

Mony et al., 2020a New phytologist

Paysage biotique des microorganismes

L'hétérogénéité de la matrice floristique influence les assemblages fongiques associés à B. pinnatum à l'échelle gamma

Composition | **Configuration**



Richesse floristique

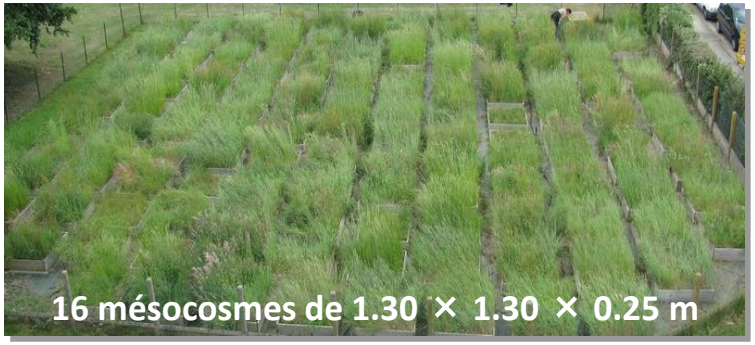
Agrégation spatiale des plantes hôtes

Isolement spatial entre plantes hôtes

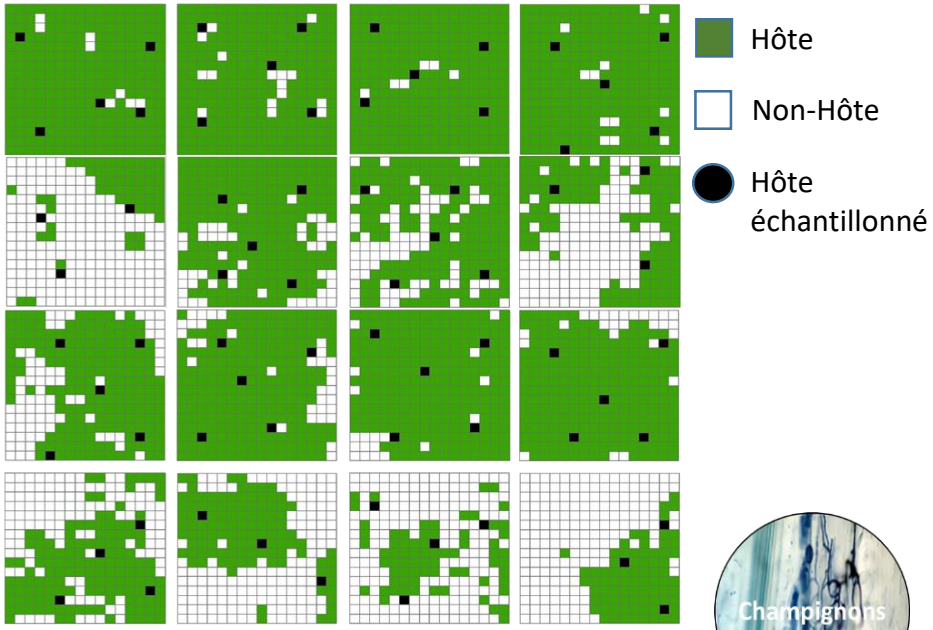
Mony et al., 2020a New Phytologist

Paysage biotique des microorganismes

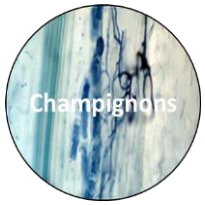
Isolement géographique ou connectivité fonctionnelle entre hôtes ?



Assemblage en champignons d'une plante cible (B. pinnatum)



Gradient de connectivité



Connectivité entre plante hôtes échantillonnées

Distance euclidienne

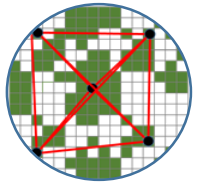
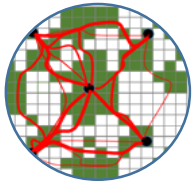
Distance de résistance (hôtes/non hôtes)

CIRCUITSCAPE

Mony et al., 2020b Ecology

Paysage biotique des microorganismes

Distance géographique ou connectivité fonctionnelle entre hôtes ?

	Distance euclidienne 	Distance de résistance 
Richesse		**Glomeromycota (↑)**
Equitabilité (indice de Piélou)		**Basidiomycota (↑)** **Glomeromycota (↓)**
Dissimilarité (indice Bray-Curtis)	Ascomycota (↓)	**Ascomycota (↓)** Basidiomycota (↓)

Mony et al., 2020b Ecology

Paysage biotique des microorganismes

Les corridors microbiens: un rôle dans la dispersion des microorganismes ?

Population de trèfles dans une matrice de brachypodes (10 réplicats/traitement)

Hu et al., soumis, PNAS

Paysage biotique des microorganismes

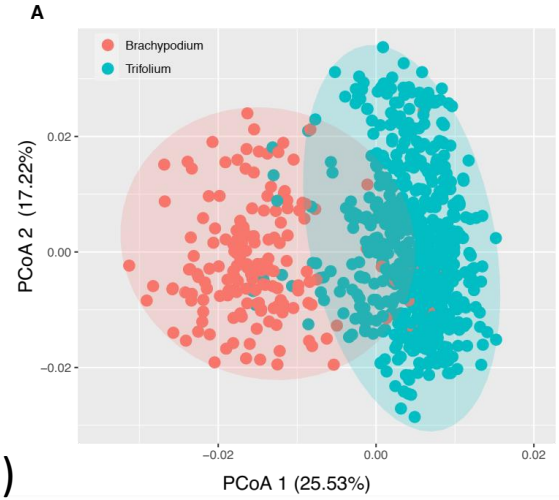
Les corridors microbiens: un rôle dans la dispersion des microorganismes ?

Population de trèfles dans une matrice de brachypodes (10 réplicats/traitement)

Hypothèses:

Les assemblages des communautés dans les habitats connectés sont plus riches et plus similaires entre eux que lors qu'ils sont isolés

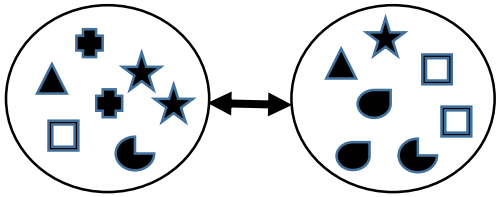
Composition microbienne (champignons)

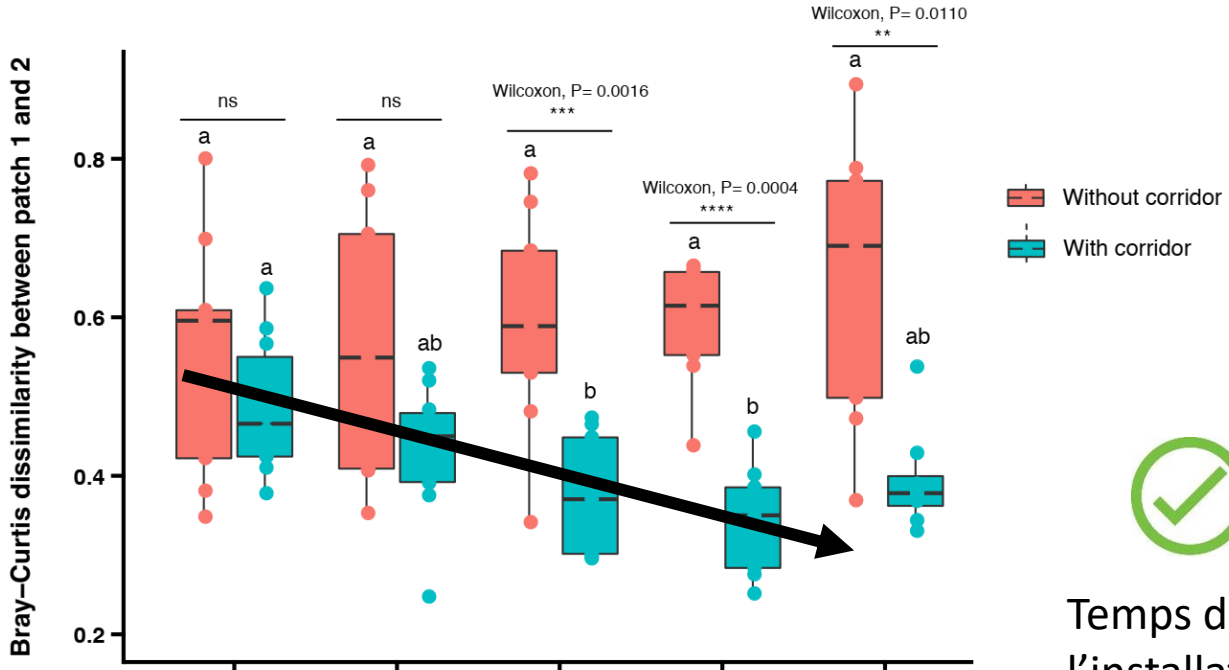


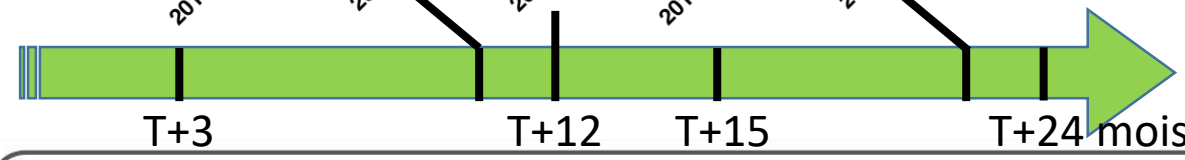
Hu et al., soumis, PNAS

Paysage biotique des microorganismes

Dynamique des assemblages en réponse à la présence de corridor







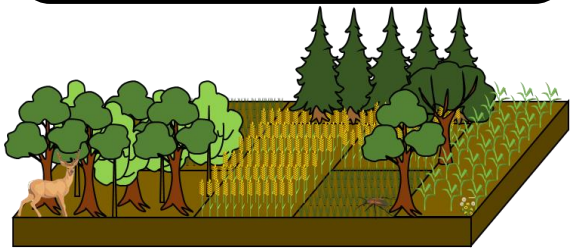
Temps depuis l'installation des dispositifs

Hu et al., soumis, PNAS

Paysage biotique des microorganismes

Activités humaines

Structure du paysage

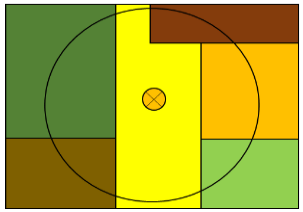


Mécanismes opérant à l'échelle des métacommunautés

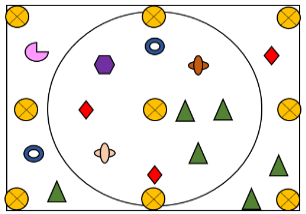
Patrons de biodiversité

L'individu n'est plus forcément l'unité de dispersion

macro



PAYSAGE



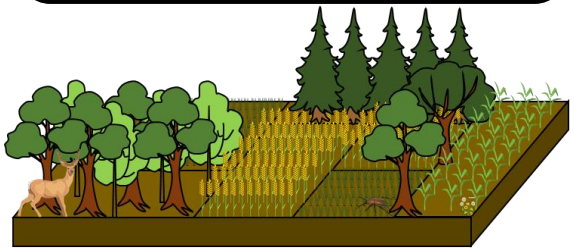
micro

Paysage biotique

Interactions Paysage/Microorganismes

Activités humaines

Structure du paysage



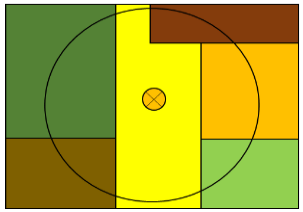
Mécanismes opérant à l'échelle des métacommunautés

Sens ?

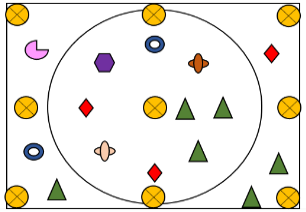
Patrons de biodiversité

L'individu n'est plus forcément l'unité de dispersion

macro



PAYSAGE



micro

Paysage biotique

Interactions Paysage/Microorganismes

Les microorganismes déterminent la fitness des hôtes auxquels ils sont associés

Interactions Paysage/Microorganismes

Les microorganismes déterminent la fitness des hôtes auxquels ils sont associés

Ex: Croissance de trèfle sur substrat stérile avec différents inoculats de champignons

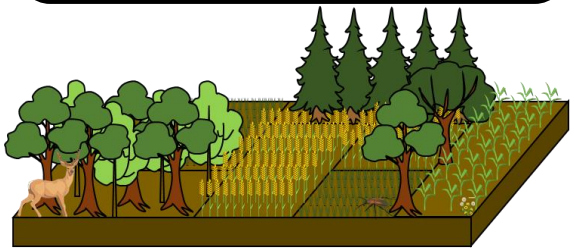
Croissance

Résistance aux stress (hydrique)

Interactions Paysage/Microorganismes

Activités humaines

Structure du paysage

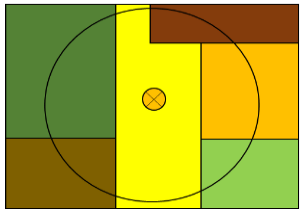


Mécanismes opérant à l'échelle des métacommunautés

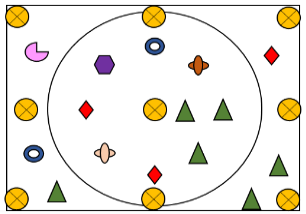
Patrons de biodiversité

L'individu n'est plus forcément l'unité de dispersion

macro



PAYSAGE



micro

Paysage biotique

Effet feedback

Coadaptation entre le paysage et les microorganismes

En synthèse…

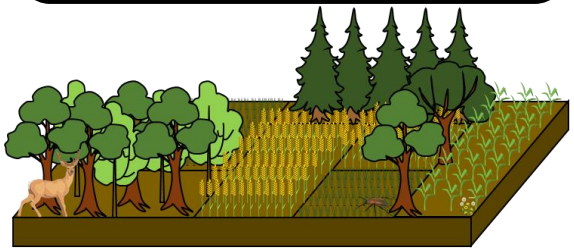
En synthèse…

Activités humaines

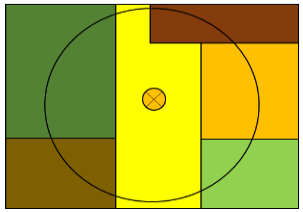
Structure du paysage

Mécanismes opérant à l'échelle des métacommunautés

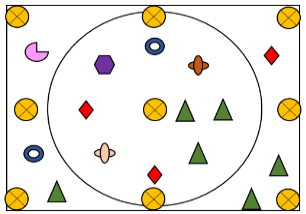
Patrons de biodiversité



macro



PAYSAGE



micro

L'individu n'est plus forcément l'unité de dispersion

Effet feedback

Paysage biotique

Coadaptation entre le paysage et les microorganismes

En synthèse…

frontiers in Microbiology

REVIEW
published: 20 November 2020
doi: 10.3389/fmicb.2020.561427

A Landscape of Opportunities for Microbial Ecology Research

Cendrine Mony[1], Philippe Vandenkoornhuyse[1], Brendan J. M. Bohannan[2], Kabir Peay[3] and Mathew A Leibold[4]*

[1] UMR CNRS ECOBIO, Université de Rennes, Rennes, France, [2] Institute of Ecology and Evolution, University of Oregon, Eugene, ORE, United States, [3] Department of Biology, University of Stanford, Stanford, CA, United States, [4] Department of Biology, University of Florida, Gainesville, FL, United States

Microbes encompass tremendous biodiversity, provide support to all living forms, including humans, and play an important role in many ecosystem services. The rules that govern microorganism community assembly are increasingly revealed due to key advances in molecular and analytical methods but their understanding remain a key challenge in microbial ecology. The existence of biogeographic patterns within microbial communities has been established and explained in relation to landscape-scale processes, including selection, drift, dispersal and mutation. The effect of habitat patchiness on microorganisms' assembly rules remains though incompletely understood. Here, we review how landscape ecology principles can be adapted to explore new perspectives on the mechanisms that determine microbial community structure. To provide a general overview, we characterize microbial landscapes, the spatial and temporal scales of the mechanisms that drive microbial assembly and the feedback between microorganisms and landscape structure. We provide evidence for the effects of landscape heterogeneity, landscape fragmentation and landscape dynamics on microbial community structure, and show that predictions made for macro-organisms at least partly also apply to microorganisms. We explain why emerging metacommunity approaches in microbial ecology should include explicit characterization of landscape structure in their development and interpretation. We also explain how biotic interactions, such as competition, prey-predator or mutualist relations may influence the microbial landscape and may be involved in the above-mentioned feedback process. However, we argue that the application of landscape ecology to

OPEN ACCESS

Edited by:
Eoin L. Brodie, Lawrence Berkeley National Laboratory, United States

Reviewed by:
Alban Ramette, University of Bern, Switzerland
Kimberley Warren-Rhodes, Ames Research Center, National Aeronautics and Space Administration (NASA), United States

***Correspondence:**
Cendrine Mony
cendrine.mony@univ-rennes1.fr

Specialty section:
This article was submitted to Terrestrial Microbiology

L'écologie du paysage pour les microorganismes

L'écologie du paysage appliquée aux microorganismes: des enseignements pour la préservation de ce compartiment

Des solutions basées sur les concepts d'écologie du paysage pour préserver la biodiversité microbienne

- L'importance de l'arrangement spatial des hôtes

Exemple des bandes fleuries

Exemple des pratiques de permaculture

L'écologie du paysage pour les microorganismes

L'écologie du paysage appliquée aux microorganismes: des enseignements pour la préservation de ce compartiment

Des solutions basées sur les concepts d'écologie du paysage pour préserver la biodiversité microbienne

- L'importance de l'arrangement spatial des hôtes
- Elargir les études sur l'effet des paysages à l'association macroorganismes/microorganismes

> Dispersion des assemblages via les macroorganismes
>
> « Microbial rescue » effect

Functional Ecology — British Ecological Society

Review | Full Access

Microbial rescue effects: How microbiomes can save hosts from extinction

Emmi A. Mueller, Nathan I. Wisnoski, Ariane L. Peralta, Jay T. Lennon

First published: 26 November 2019 | https://doi.org/10.1111/1365-2435.13493 | Citations: 10

Remerciements

Fondation de France

AGENCE FRANÇAISE POUR LA BIODIVERSITÉ
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR

cnrs

Zones Ateliers
LTSER FRANCE ARMORIQUE

Collaborateurs

Marine Biget
Anne-Kristel Bittebiere
Philomène Brunnelière
Françoise Burel
Romain Causse-Védrines
Sophie Coudouel
Aude Ernoult
Thierry Fontaine
Olivier Jambon
Hu Jie
Fouad Nassur
Claire Ricono
Léa Uroy
Philippe Vandenkoornhuyse
Nathan Vannier