

Interactions plantes - microbiote : état des connaissances et pistes pour de nouvelles stratégies de contrôle



Christophe Mougel
Rencontres 2019 GIS PIClég
21-22 novembre 2019



@Mougel_Christ



La plante cultivée en interaction avec son environnement

Stress abiotiques

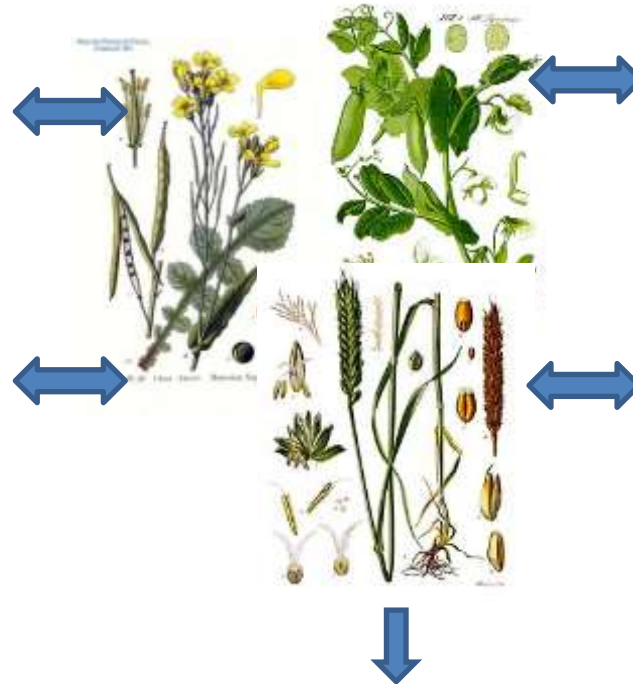


Nutrition:
N, P, S



Changement climatique :
température, eau

Culture



Stress biotiques



Compétition:
adventices



Bioagresseurs:
insectes,
nématodes,
pathogènes (virus,
bactéries, protiste,
champignons et
oomycetes)

- **Combinaison de pratiques agronomiques incluant le choix du génotype de plante (résistant, adapté) assurant un revenu**

Agroécologie

■ Contexte sociétal

- Conceptions de nouvelles pratiques agricoles

Maintain productivity



and reduced environmental impacts

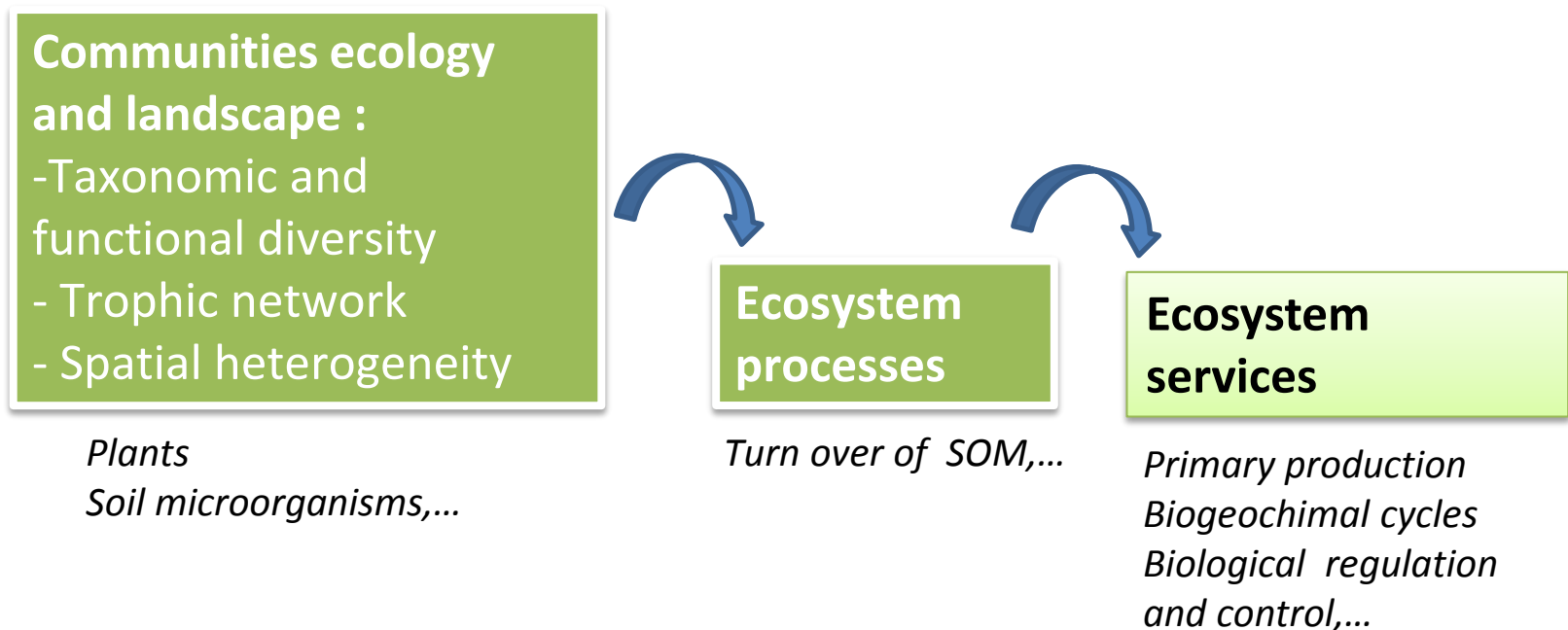
- F - Grenelle environnement
- F - Ecophyto II 2025
- EU WaterFramework Directive (waiting for those on soil)



Agroécologie

■ Contexte scientifique

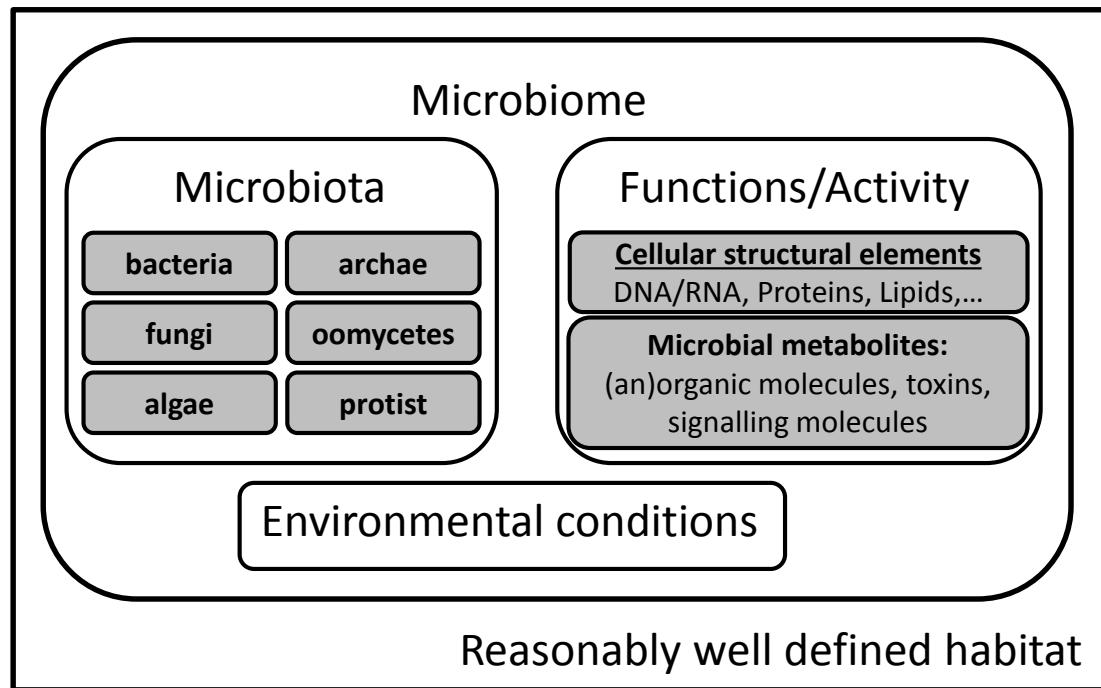
- Meilleure mobilisation de la biodiversité et des régulations biologiques pour réduire l'utilisation des intrants



- Explorer de nouveaux leviers: les interactions plante-'microbiote'

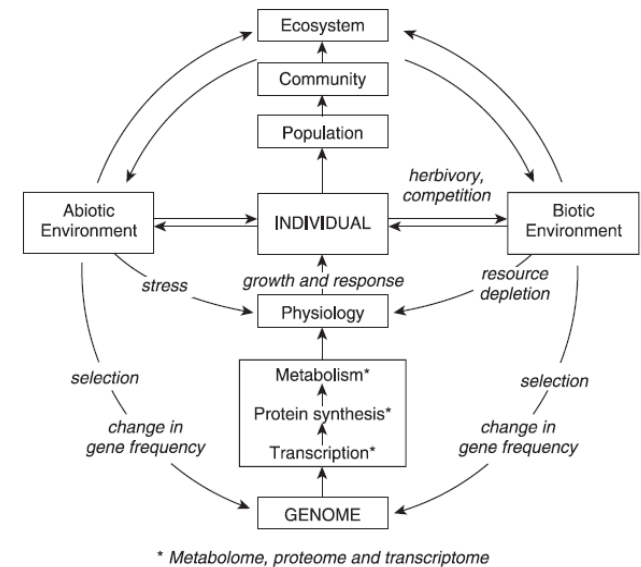
Microbiote - Microbiome

- The 'microbiota' consists of the assembly of microorganisms (community) belonging to different kingdoms (Prokaryotes [Bacteria, Archaea], micro-Eukaryotes [e.g. Protozoa, Fungi, Algae]) in a defined environment which interact together
- 'Microbiome': not only the microbiota, but also their functions/activities (structural elements and metabolites) and the surrounding environmental conditions = dynamic ecosystem



Ecologie des communautés

- L'écologie des communautés étudie les **patrons de diversité, d'abondance et de composition d'espèces** au sein de ces communautés, ainsi que les processus responsables de ces patrons.
- Utilise les processus de génétique des populations : **dispersion, sélection, spéciation et dérive** .



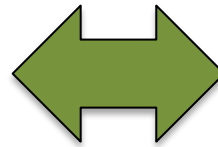
Fitter, J Ecol 2005

- Ces processus d'assemblage (notamment spéciation) ont été adaptés aux communautés microbiennes = **processus de diversification** (intègre diversité phénotypique et fonctionnelle).
- Les études actuelles portant sur les interactions plante-microbiote associent des analyses de la diversité taxonomique et/ou fonctionnelle

Microbiologie versus écologie microbienne



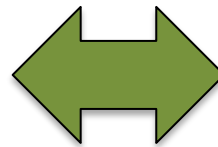
Pasteur (1822-1895)



Microbiome

(2005-the future)

Des souches utilisées en lutte biologique

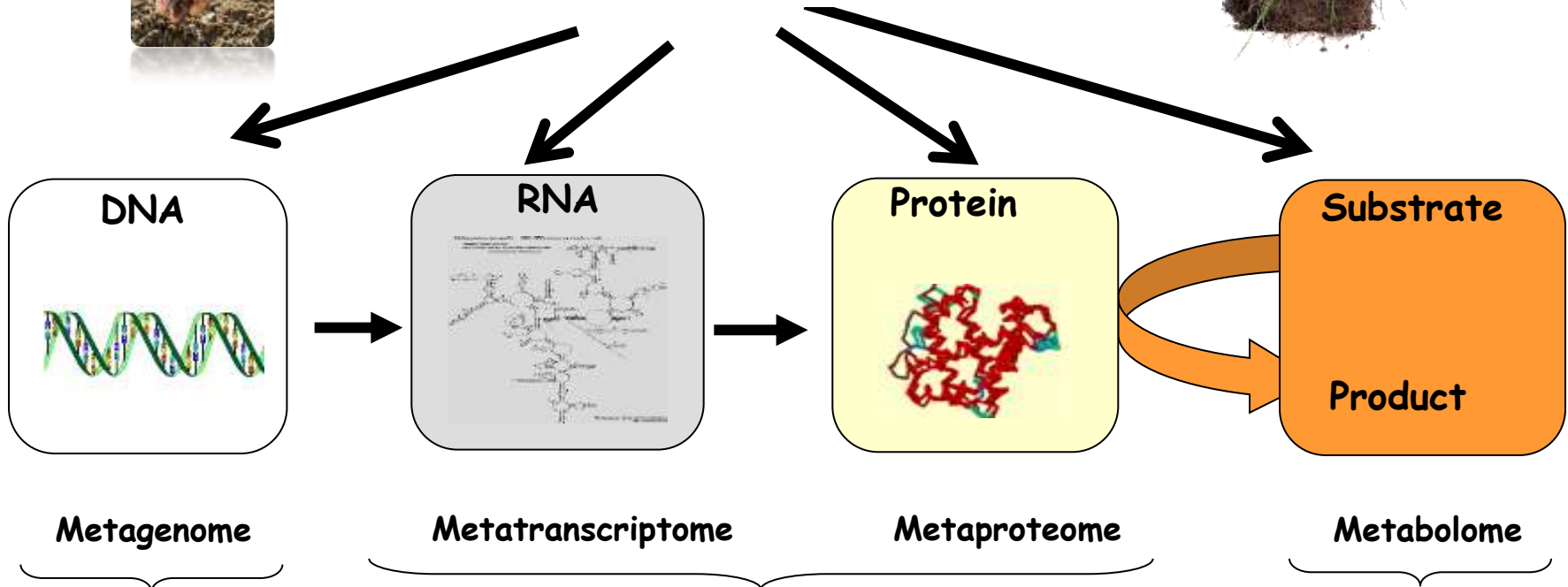


Pilotage des microbiotes pour l'agroécologie

Les études en écologie des communautés= des approches 'omiques'



Sol / Tissus de la plante (racine, feuilles, graines, ...)



Abondance
Diversité
génétique/taxonomique
ou fonctionnelle

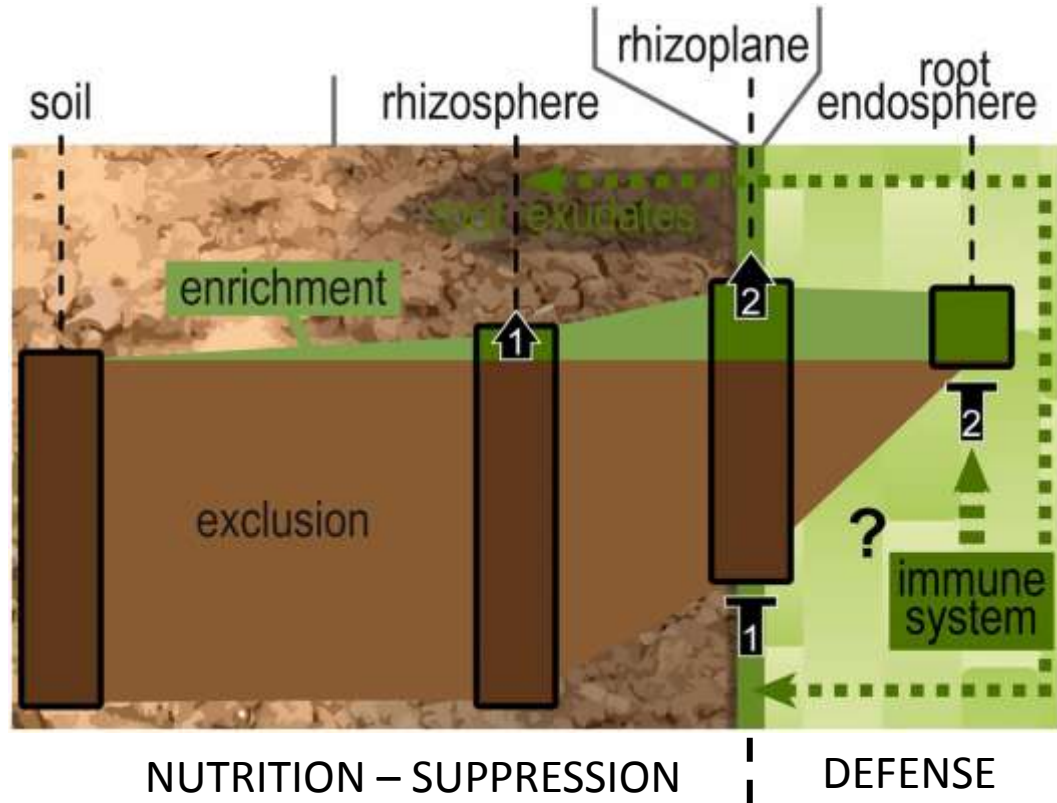
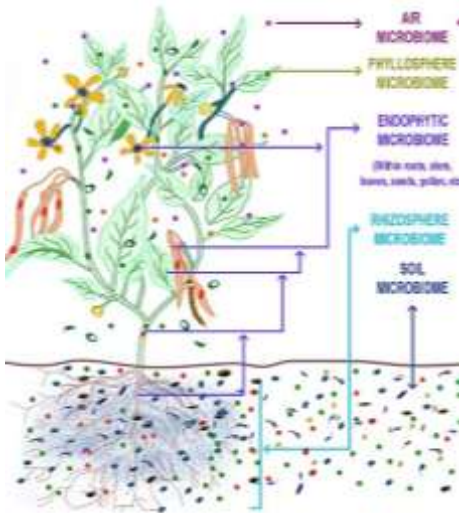


Fonctionnalité

Activité

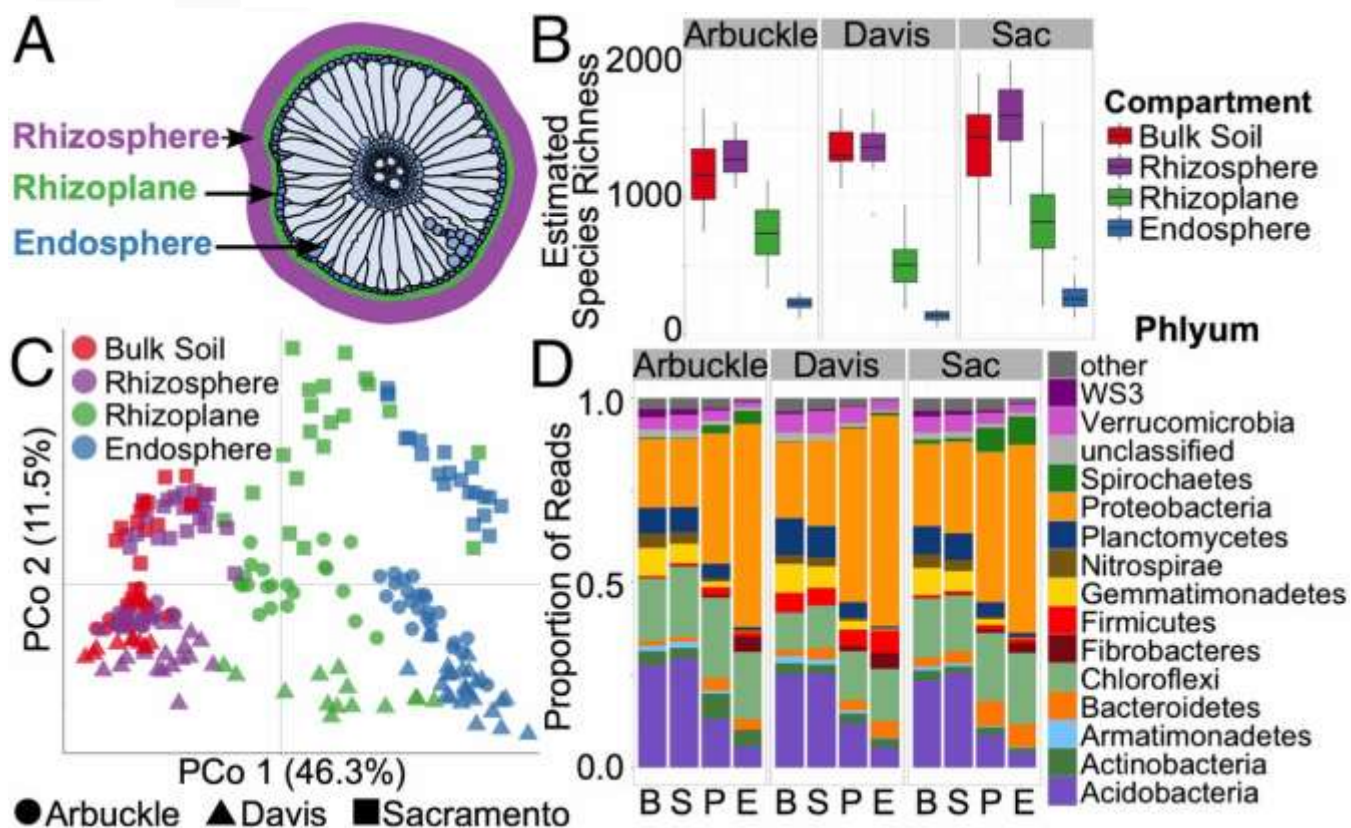
- Des approches moléculaires pour mieux comprendre l'assemblage des communautés, leur dynamique et leur fonctionnement dans différents contextes écologiques/agronomiques

Compartiment racinaire: interface sol-plante



van der Heijden & Schlaeppi 2015
<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1500709112>

Effet type de sol, effet spatial et temporel sur les communautés microbiennes

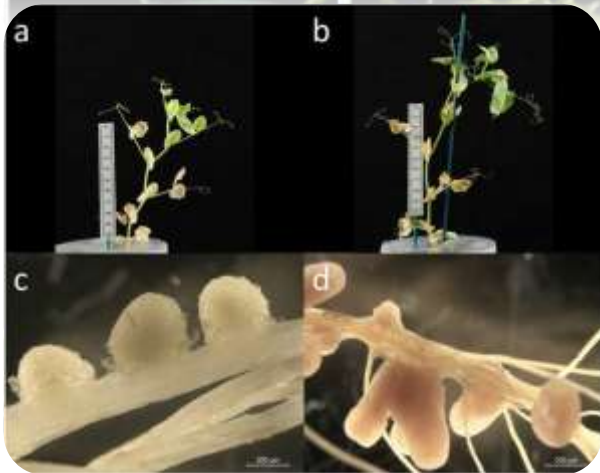


Mougel et al. 2006 *New Phytologist* 170: 165-175

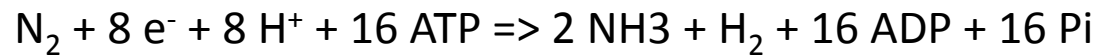
Edward et al. 2015

<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1414592112>

Nutrition N : les 'rhizobiacées'



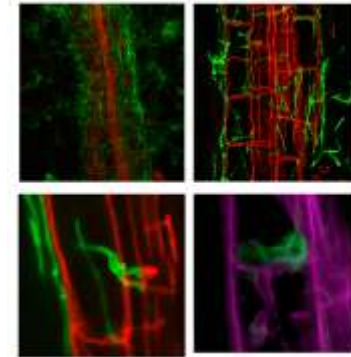
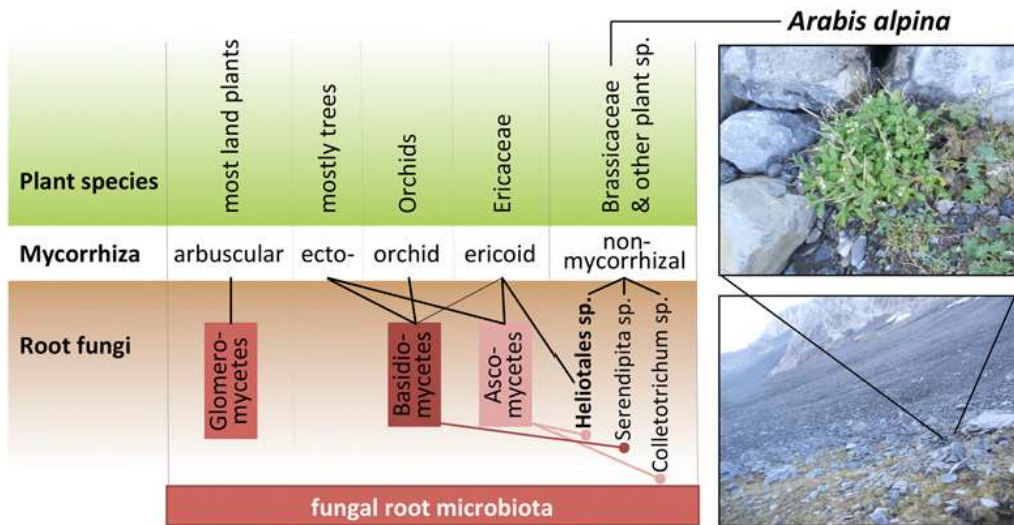
- Fixation biologique du N_2 = processus biologique le plus important après la photosynthèse (Rockström et al Nature 2009) = nutrition en N
- Limités aux légumineuses => importance en agriculture



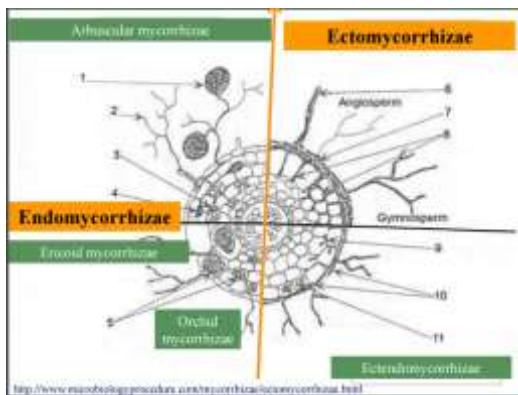
- Cas des tricheurs (nod+/fix-)

Westhoek et al, Scientific Reports, 2017

Nutrition P : les mycorhizes



OTU00033 = Helotiales sp.



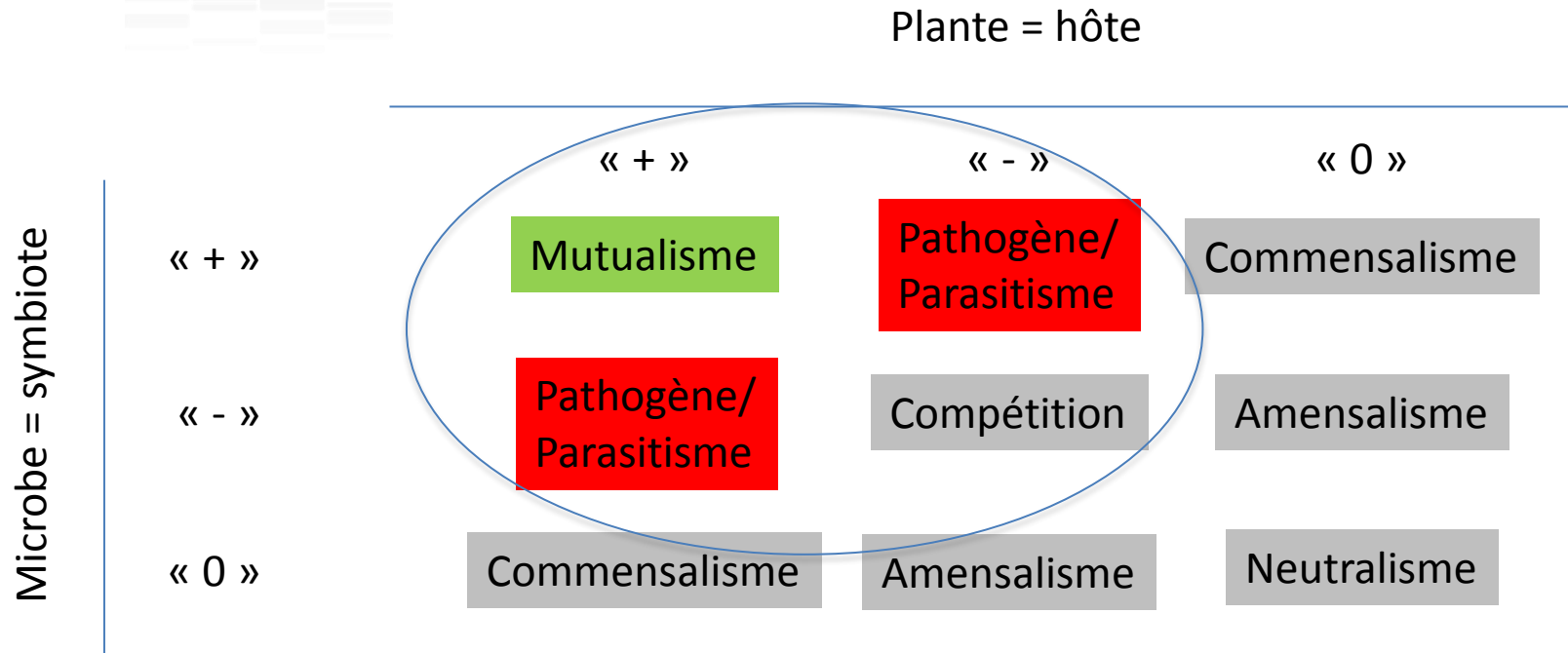
Nutrition en P

80% des plantes mais pas les *Brassicaceae*

Etude des communautés => autre forme d'association pour les *Brassicaceae*

Almario et al., PNAS, 2017
Van der Heijden et Schlaeppi, PNAS 2017

Gradient d'interactions plante - microbe

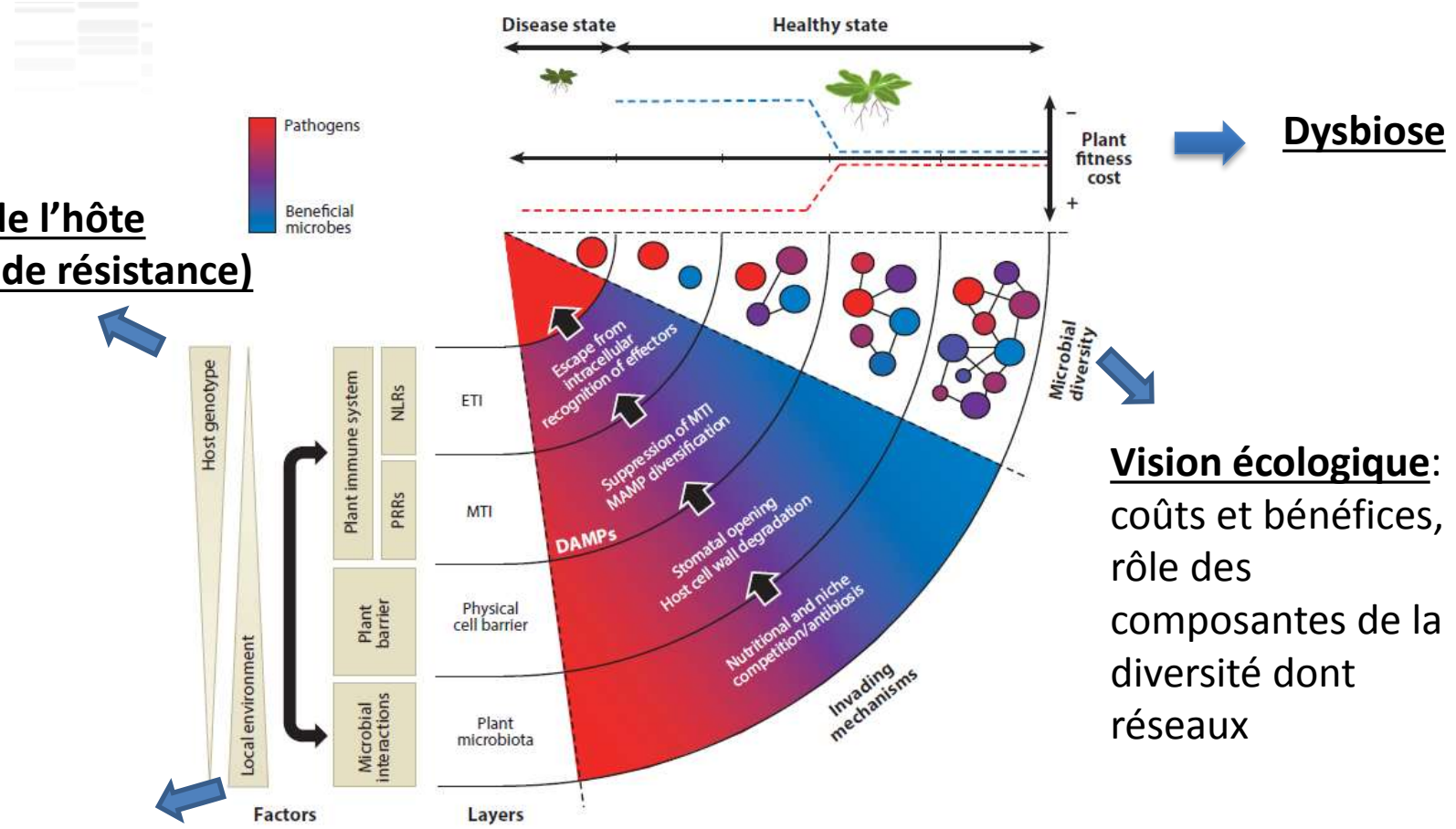


- Continuum entre mutualisme et parasitisme, le cas des tricheurs !
- Balance coûts-bénéfices dans les interactions => co-adaptation / co-évolution

Microbiote, bioagresseur(s) et système immunitaire des plantes

Génétique de l'hôte (gènes/QTL de résistance)

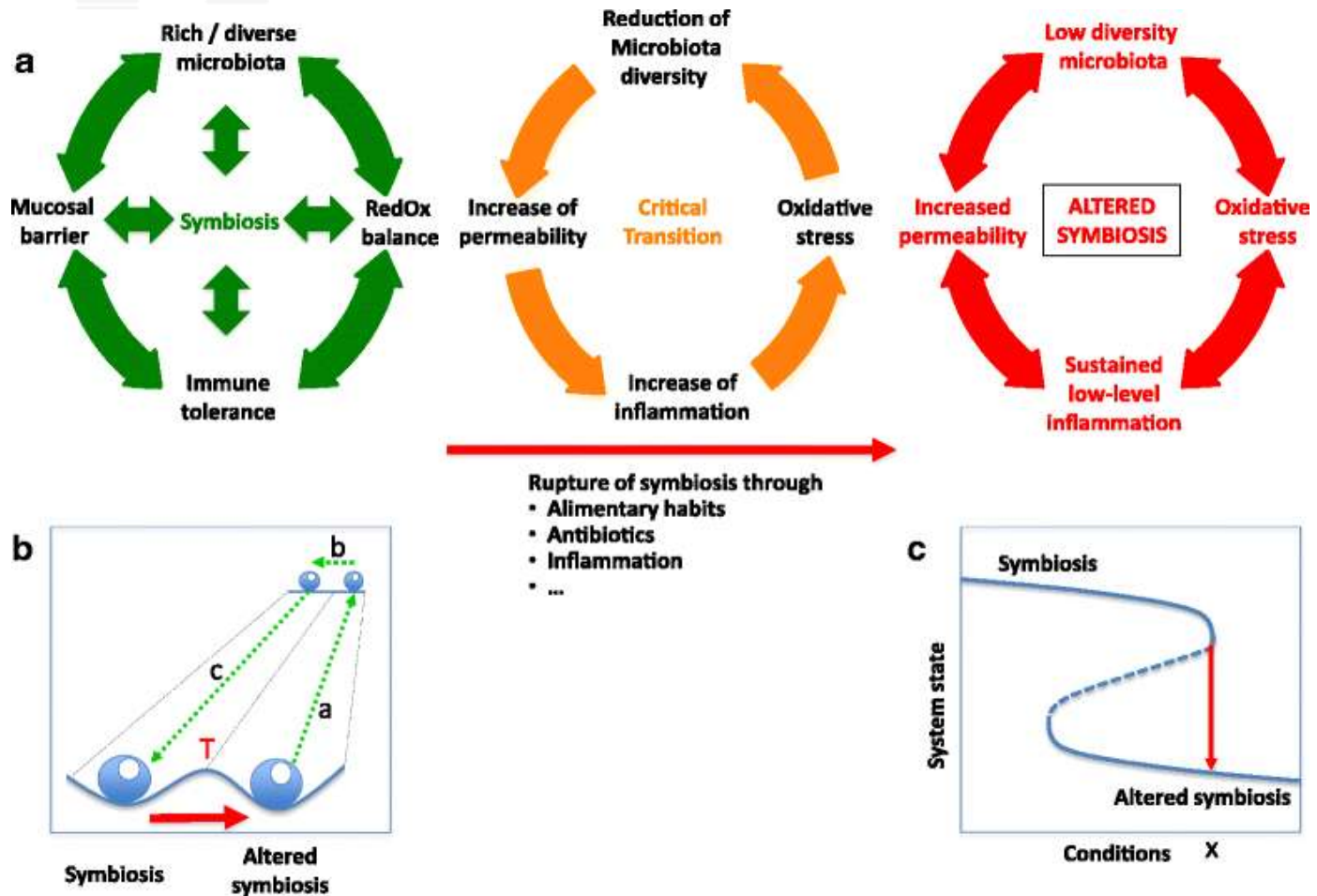
Contexte environnemental (pédo-climat-pratiques)



Vision écologique:
 coûts et bénéfiques,
 rôle des
 composantes de la
 diversité dont
 réseaux

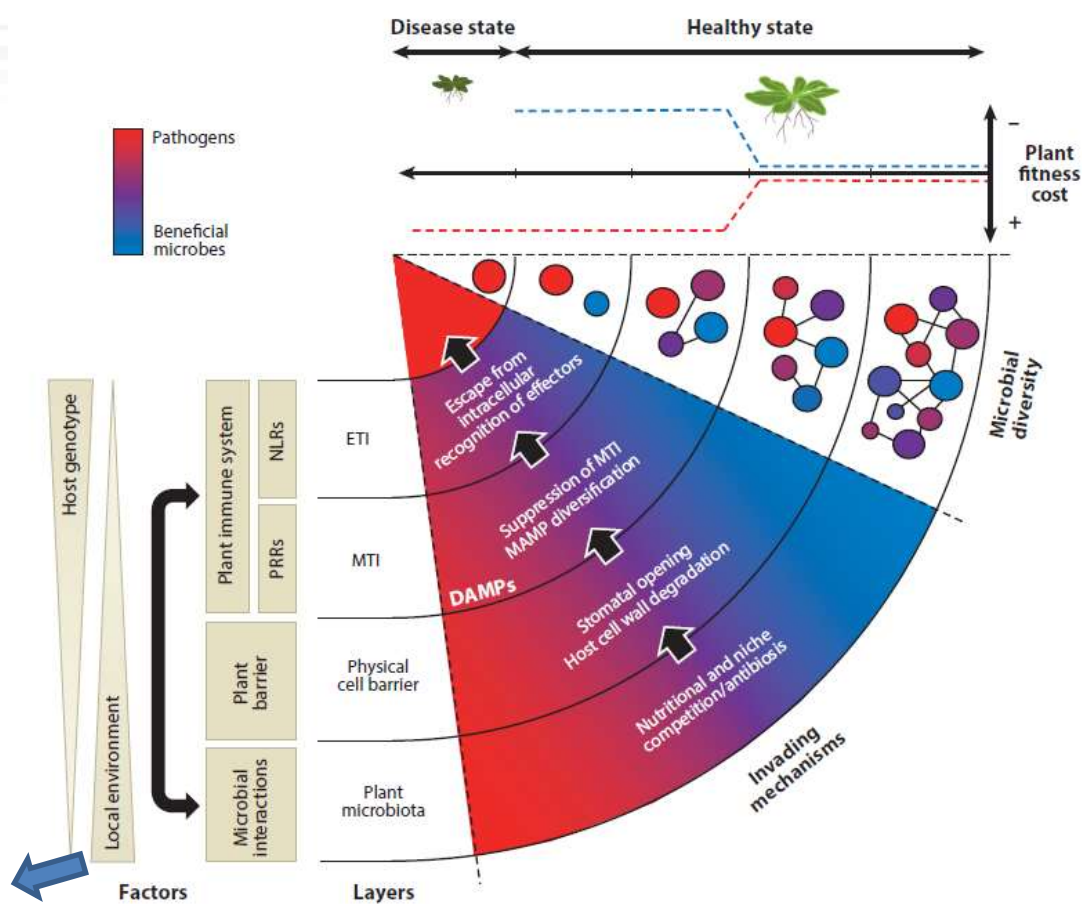
Adapté de Hacquard et al., Annual Review of Phytopathology, 2017

Stabilité du microbiote et dysbiose



Van de Guchte et al. 2018

Microbiote, bioagresseur(s) et système immunitaire des plantes

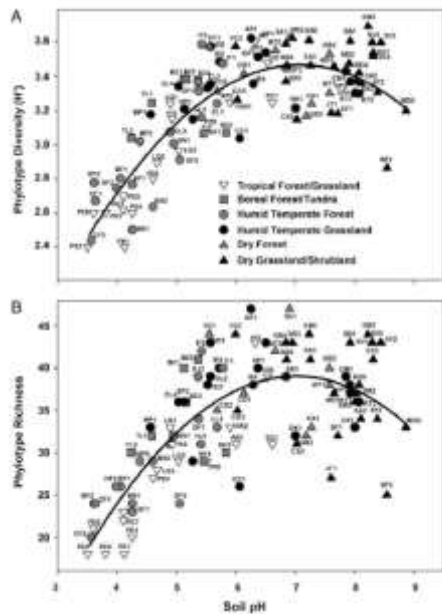


Contexte environnemental (pédo-climat-pratiques)

Adapté de Hacquard et al., Annual Review of Phytopathology, 2017

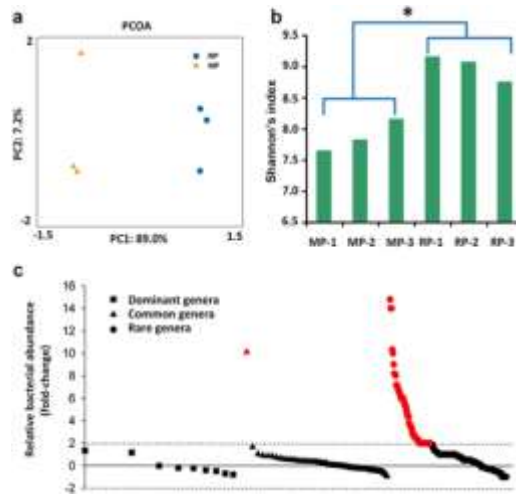
L'environnement sol = le réservoir de diversité

pH du sol



Fierrer et Jackson, PNAS 2006

Monoculture versus Rotation



Li et al. ISME Journal 2018

Type de pratique

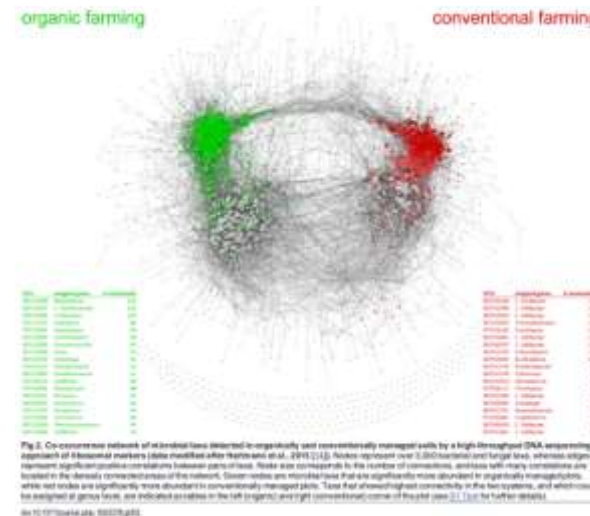


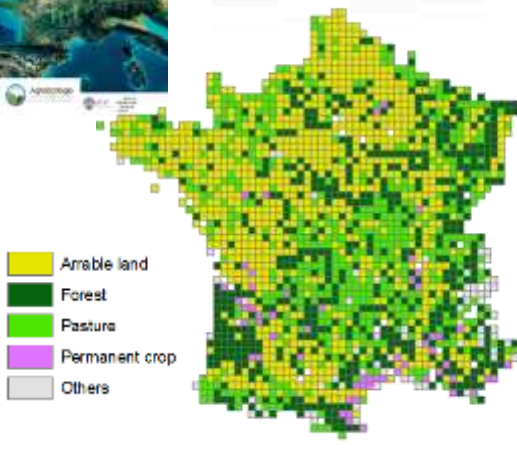
Fig 2. Co-occurrence network of microbial taxa identified in organically and conventionally managed soils by a high-throughput DNA sequencing approach of 8 bacterial markers (data modified after Hartmann et al., 2015 [14]). Nodes represent over 5,000 taxonomic and fungal taxa, whereas edges represent significant correlations between pairs of taxa. Node size corresponds to the number of interactions, and lines with heavy connections are located in the central core of the network. Shannon's index of microbial taxa that are significantly more abundant in organically managed plots, while not more and significantly more abundant in conventionally managed plots. Taxa that are significantly more abundant in the two systems, and which were less abundant in both systems, are indicated in red in the left (organic) and right (conventional) column of Fig 2. Full taxonomic details are available in Table S1.

van der Heijden & Hartmann PLOS Biol 2016

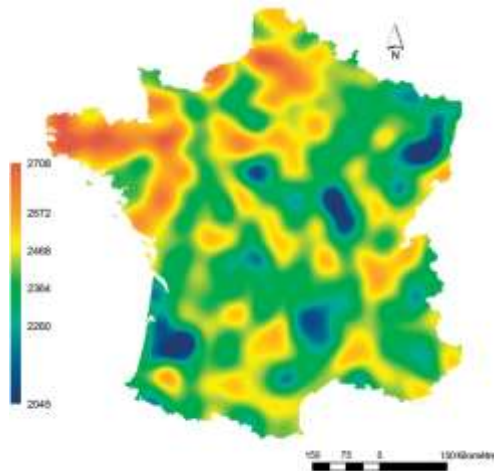
- Facteurs de diversification : pédo-climatique (pH, texture, SOM) >> pratiques agronomiques (travail du sol, intercropping, génotype de la plante,...)



Biogéographie des microbiotes



Mode d'occupation
(données RMQS)

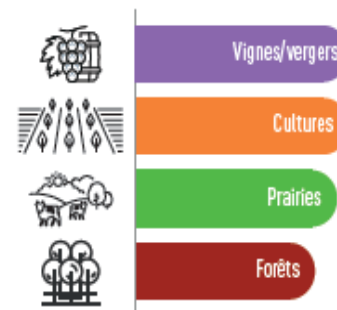


Diversité bactérienne

Type de sol

pH ++	Teneur en sable +
Teneur en argile ⊖⊖	Ratio C/N ⊖⊖

Mode d'usage



- Co-variables associées aux données permettent d'identifier et hiérarchiser les facteurs de diversifications.
- Cartes (à échelle large) de la prévalence des différents phyla/genre.
- Développement de bioindicateurs et d'outils de conceptions et évaluations des pratiques agricoles.
- Nécessité de coupler à des données fonctionnelles

Dequiedt et al., 2011, Global Ecology and Biogeography
 Horigue et al., 2016. Ecological Indicators
 Terrat et al., 2017. Plos ONE
 Karimi et al., 2018. Sciences advances

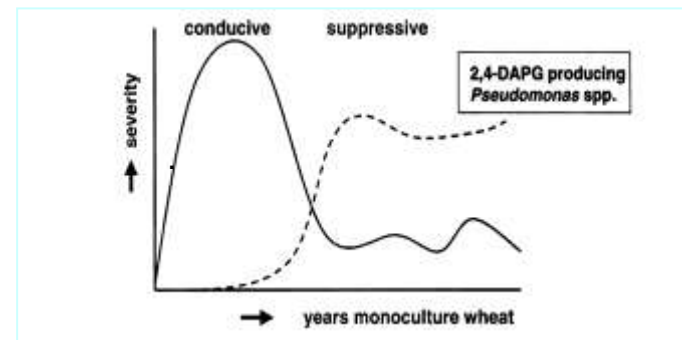
Les interactions microbes-microbes pour expliquer le phénotype sol suppressif

Table 1. Some of the important diseases and their probable mechanisms for suppression.

Disease	Causal Organism	Probable mechanism for suppression
Fusarium wilt	<i>Fusarium oxysporum</i>	Growth of saprophytic microbial community
Take-all	<i>Gaeumannomyces graminis</i> var. <i>tritici</i>	Activity of certain antibiotic producing fluorescent Pseudomonads or parasitism by <i>Trichoderma</i> spp.
Collar rot, Root rot, Damping off	<i>Rhizoctonia solani</i>	Increased parasitism by <i>Trichoderma</i> spp.
Root rot	<i>Phytophthora parasitica</i>	Rhizobacteria and parasitism by <i>Trichoderma</i> spp.
Potato Scab	<i>Streptomyces scabies</i>	Production of antibiotics inhibitory to the pathogen by diverse species of non pathogenic <i>Streptomyces</i> .
Root rot or Dieback	<i>Phytophthora cinnamomi</i>	Direct antagonism, mycoparasitism and/or production of metabolites by fungi

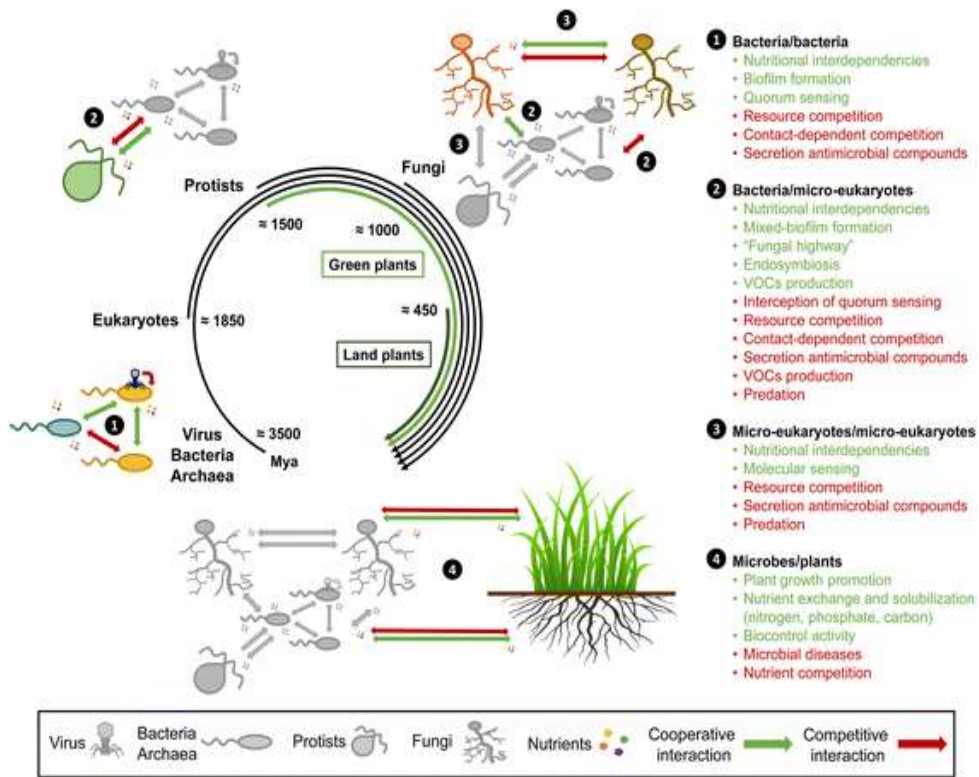
Devi and Meetei 2018 IJCR in Biosciences and Plant Biology 5: 67-75

Piétin échaudage

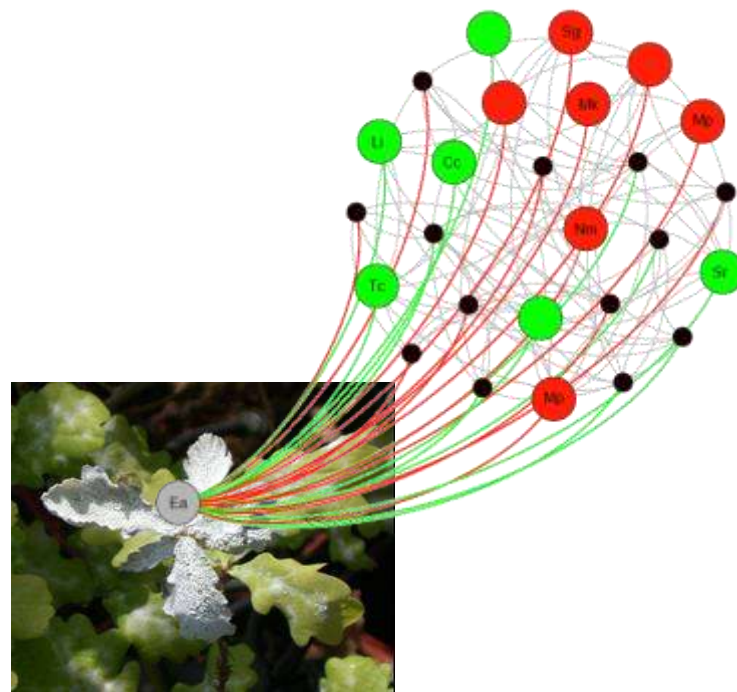


Weller et al. 2002. Annu. Rev. Phytopathol. 40:309-348.

Des processus et des fonctions autour des interactions



Hasanni et al. 2019

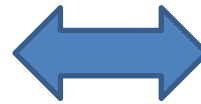


Jakuschkin et al. 2016

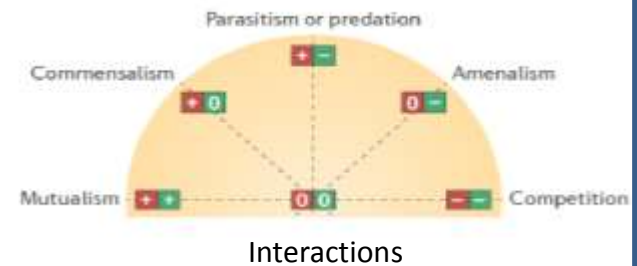
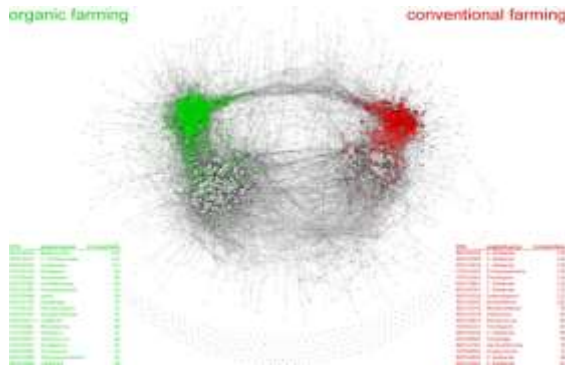
... et les insectes ravageurs/ennemis naturels

Des réseaux co-occurrence aux réseaux écologiques

Network metrics/index
Co-occurrence networks
Genes network

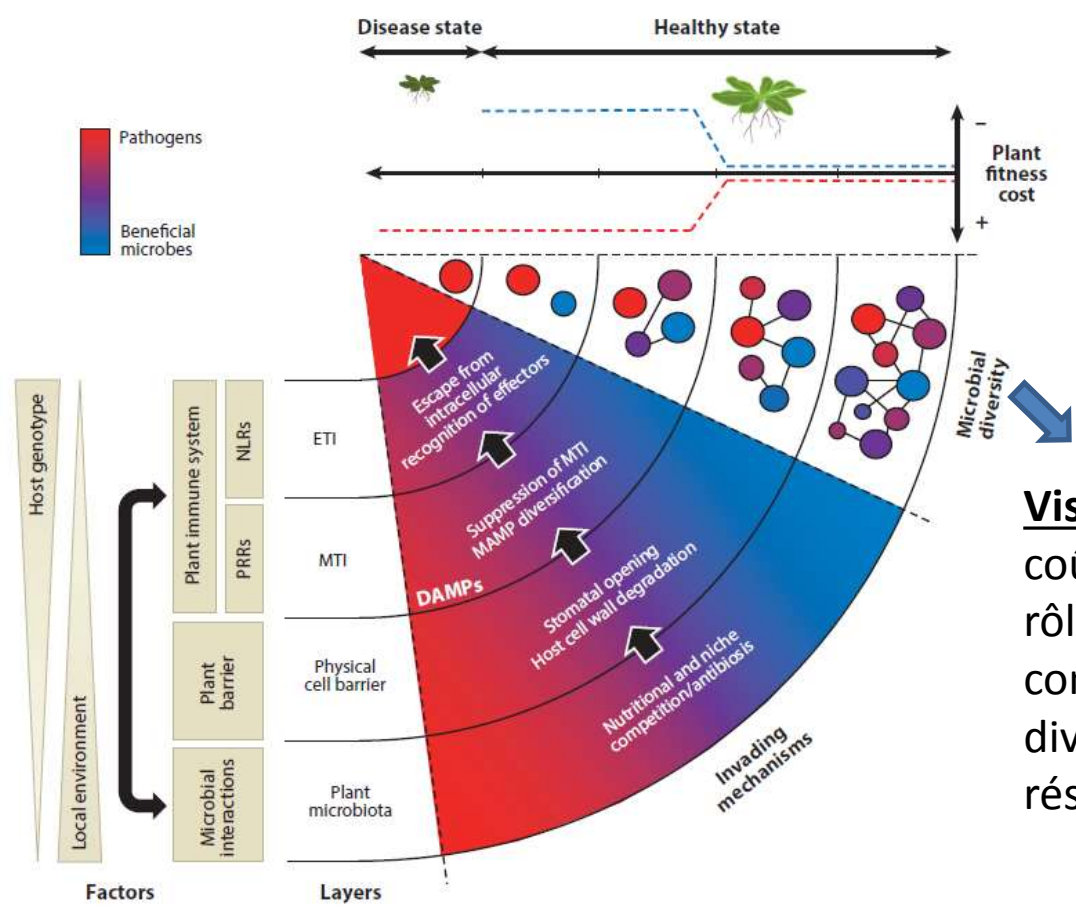


Ecological networks
(link structure-functions)



Hartman et al., 2015;
Vacher et al., 2016

Microbiote, bioagresseur(s) et système immunitaire des plantes



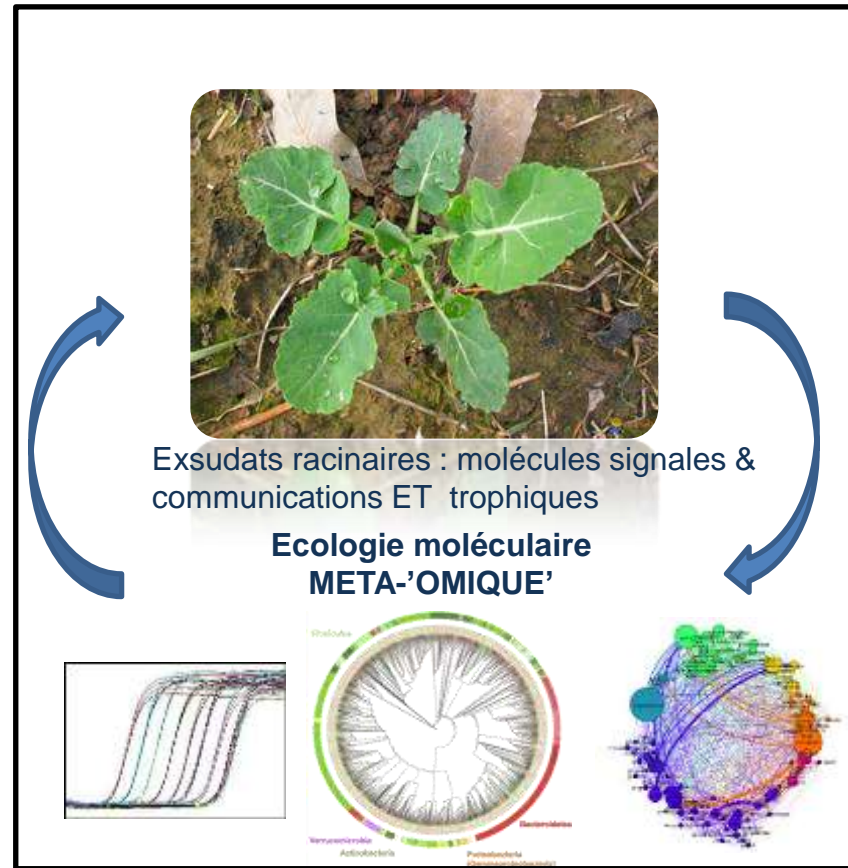
Vision écologique:
 coûts et bénéfiques,
 rôle des
 composantes de la
 diversité dont
 réseaux

Adapté de Hacquard et al., Annual Review of Phytopathology, 2017

Interactions plante 'saine' -microbiote

Light
CO₂
eg Environment factors

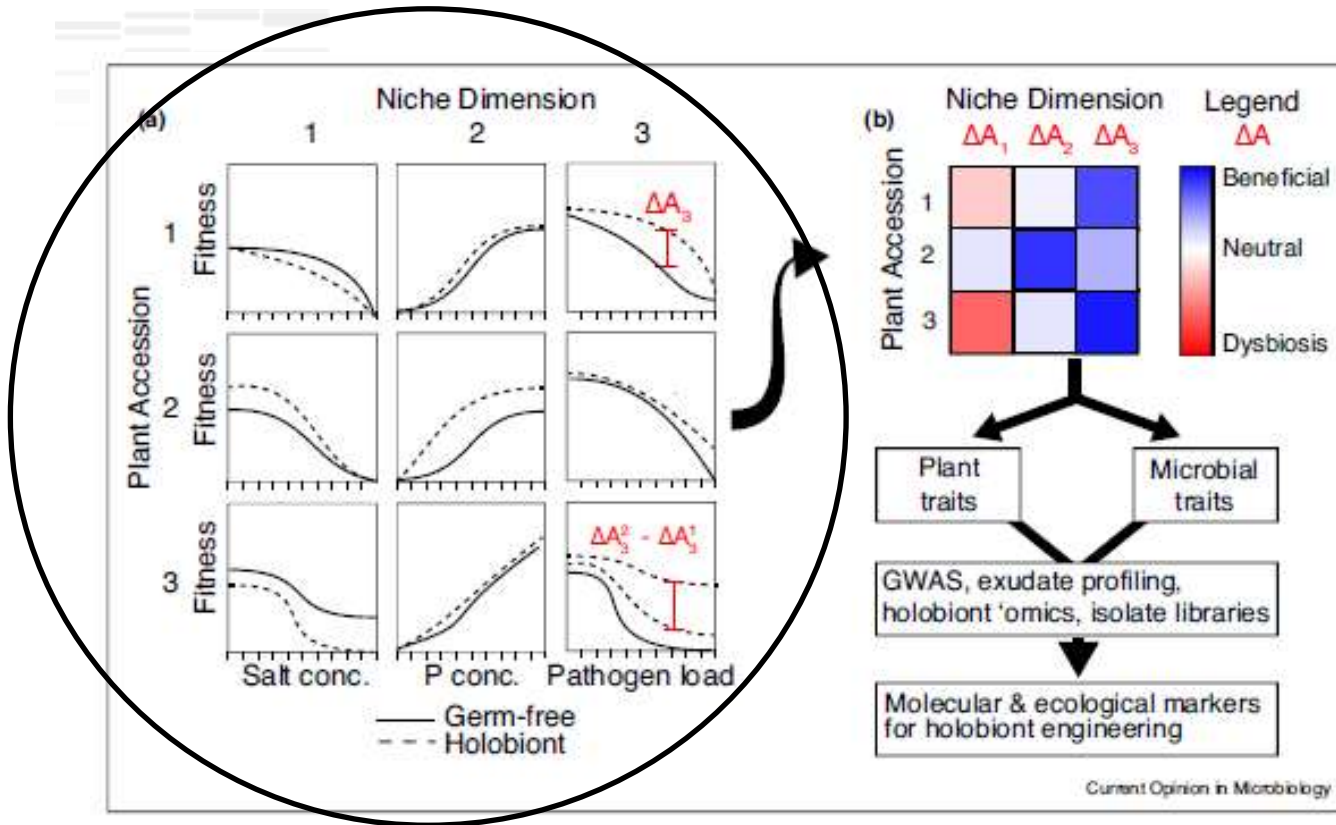
Souche microbienne,
consortia,
communautés
microbiennes
=
effet sur croissance et
santé
=
Phénotype 'étendu'



Sol = réservoir diversité

5-40%
photosynthétats,
modification
environnement sol
=
effet de la plante sur
les microbes
=
Effet rhizosphère

“Microbial associated phenotypes”



Oyserman et al., 2018. Current opinion in microbiology

- Contextes microbiens modulant la réponse de la plante à différents stress.
(approches naturalistes versus approches expérimentales)

Relation diversité microbienne et phénotype étendu dans les interactions plante-microbiote-bioagresseur

Oilseed rape holobionts

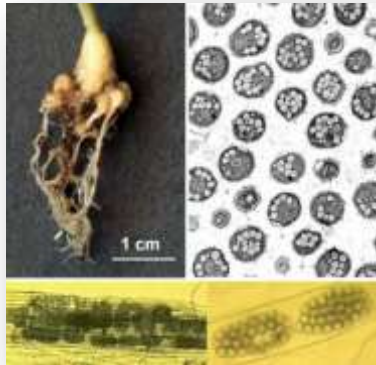
Plasmodiophora brassicae

Heterodera schachtii

Delia radicum

Leptosphaeria maculans

Brevicoryne brassicae



Below ground

Above/below ground

Above ground

Pathology index
Pathogen quantification

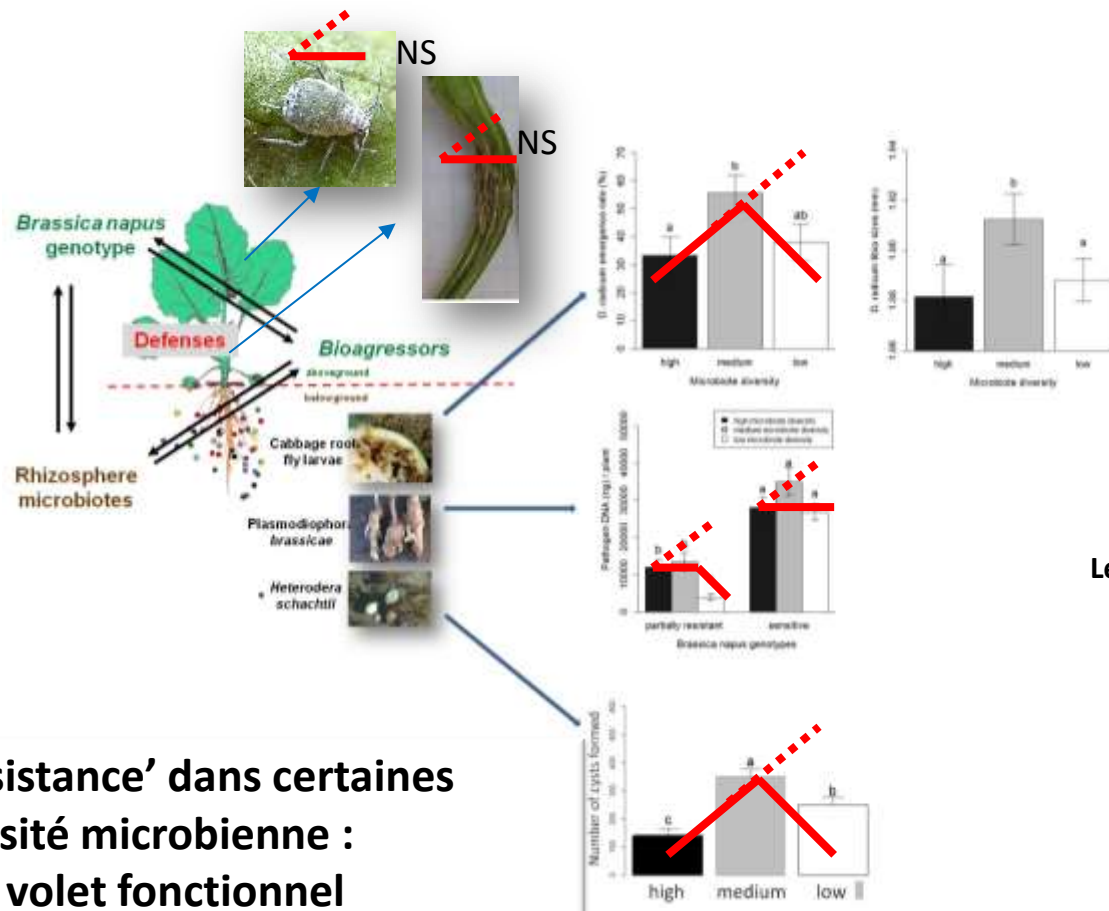
Number of cysts
Number larvae/cyst

Laying rate
Emergence rate / adult fitness
Plant metabolites
Behaviour

Pathology index
Disease severity

Survival rate
Fecundity
Biomass

Relation diversité microbienne et phénotype étendu dans les interactions plante-microbiote-bioagresseur(s)



Lachaise et al., 2017
Ourry et al, 2018

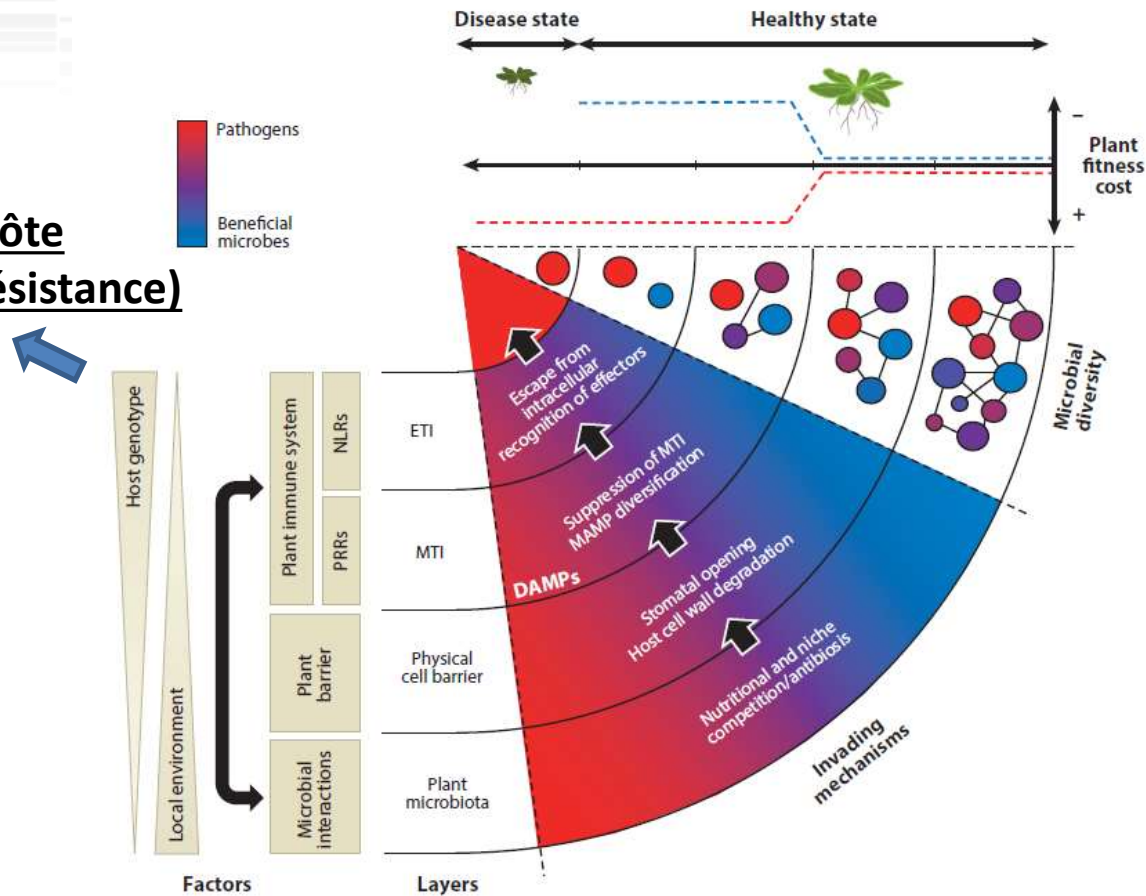
Lebreton et al. 2019
Lebreton et al. in preparation

Mougel et al. unpublished

- Phénotype de 'résistance' dans certaines conditions de diversité microbienne : développement du volet fonctionnel

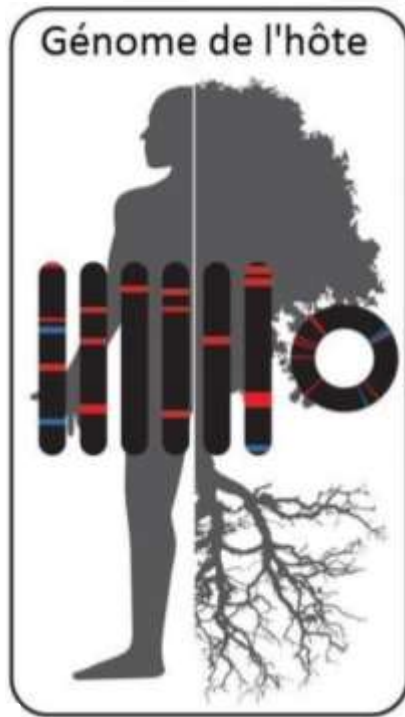
Microbiote, bioagresseur(s) et système immunitaire des plantes

Génétique de l'hôte (gènes/QTL de résistance)



Adapté de Hacquard et al., Annual Review of Phytopathology, 2017

Vision classique de l'organisme



$$\text{Phénotype de l'hôte} = \text{G} + \text{E} + (\text{G} \times \text{E})$$

Le microbiote est un constituant de
environnement pouvant interagir
avec un macro-organisme



Adapté de Theis et al. 2016
doi:10.1128/mSystems.00028-16

Meta-organisme et phénotype étendu

1 *Regiella insecticola*

- Protection against fungi (and parasitoids)
- Adaptation to host plant



Buchnera aphidicola

- obligatory symbiont
- provides essential aa

3 *Serratia symbiotica*

- Heat tolerance
- Protection against parasitoids

4 *Hamiltonella defensa*

- Protection against parasitoids



2 *Spiroplasma* sp.

- Protection against fungi
- Male-killing



8 *Wolbachia* sp.

- Unknown effect

7 *Rickettsiella viridis*

- Protection against fungi and predators
- Color change



6 *Rickettsia* sp.

- Protection against fungi
- Heat tolerance

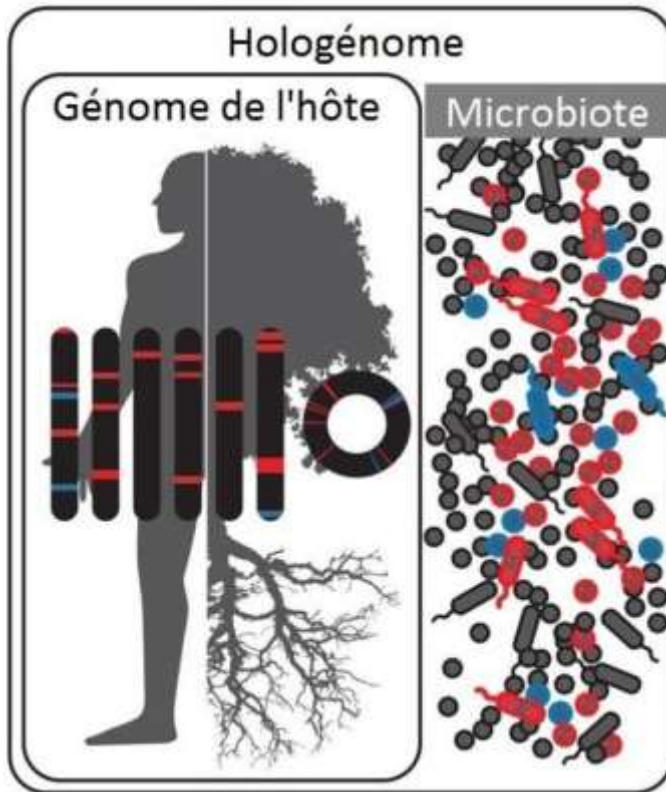


5 PAXS (Pea Aphid X-type Symbiont)

- Protection against fungi and parasitoids
- Heat tolerance

Chen *et al.*, 2000; Montlor *et al.*, 2002; Oliver *et al.*, 2003; Tsuchida *et al.*, 2004; Scarborough *et al.*, 2005; Guay *et al.*, 2009; Tsuchida *et al.*, 2010; Vorburger *et al.*, 2010; Simon *et al.* 2011; Lukasik *et al.* 2013; Russel *et al.* 2013; Heyworth & Ferrari, 2015; Polin *et al.* 2016

Changement de paradigme dans la perception d'un organisme



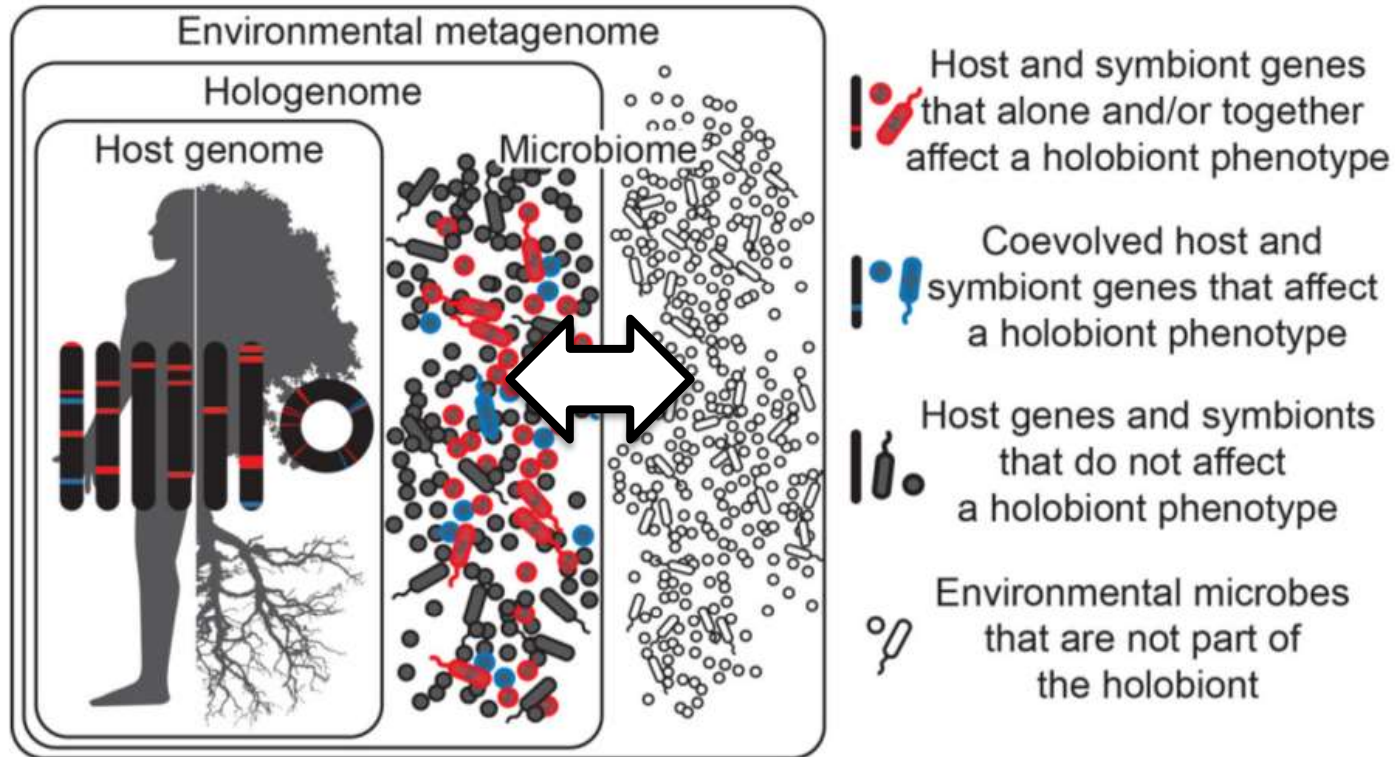
Adapté de Theis et al. 2016
doi:10.1128/mSystems.00028-16



$$P = H + E + (H \times E)$$

Hologénome (H) = host genome + métagenome

Interactions plante-microbiote-bioagresseurs



Theis et al. mSystems 2016

Holobiont/hologenome theory in evolution

Point of view 1

Holobiont = unité de sélection



Aphids/
parasitoid



Root fly/
parasitoid

Organismes en interaction sont co-adaptés et peuvent co-évoluer

Zilber-Rosenberg & Rosenberg, 2008
Bordenstein & Theis, 2018

Transmission verticale

Point of view 2

Holobiont = écosystème dynamique (interactions microbe-microbe et hôte-microbe)



Bees



Termites

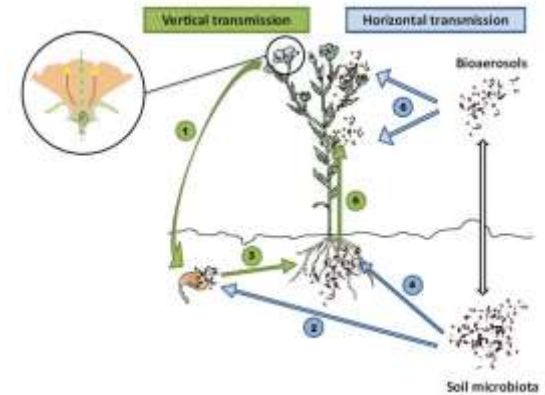


Human

Organismes en interaction sont co-adaptés

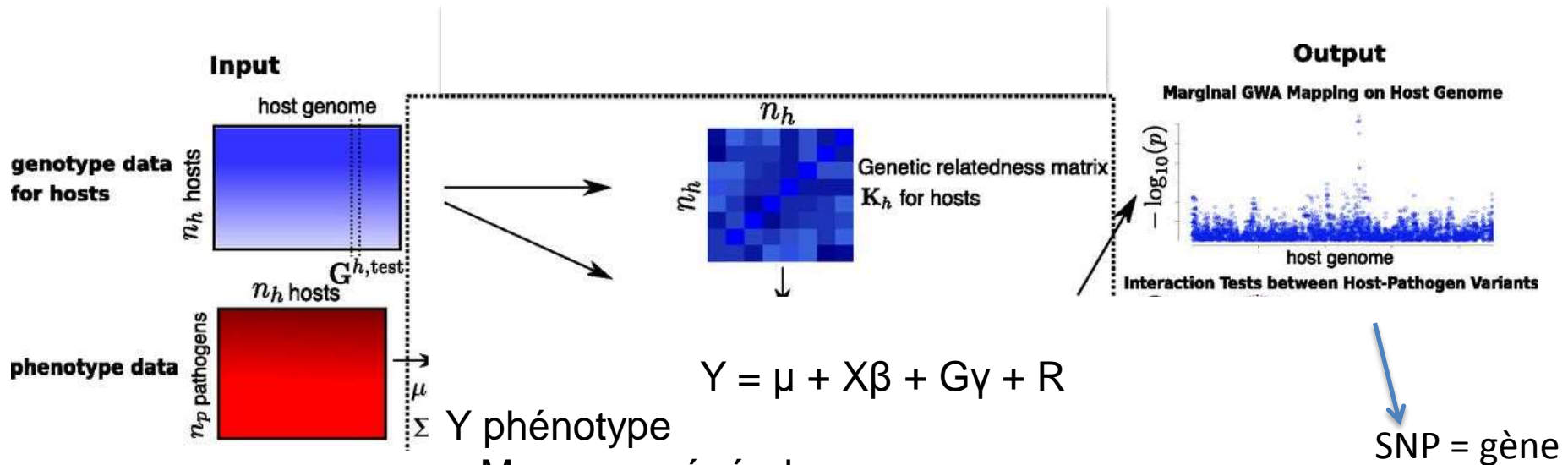
Coyte et al., 2015
Douglas & Werren, 2016

Transmissions horizontales >>> verticales



Plant
(seed & clonality)

Analyse génétique de l'interaction (QTL/gene mapping)



Y phénotype

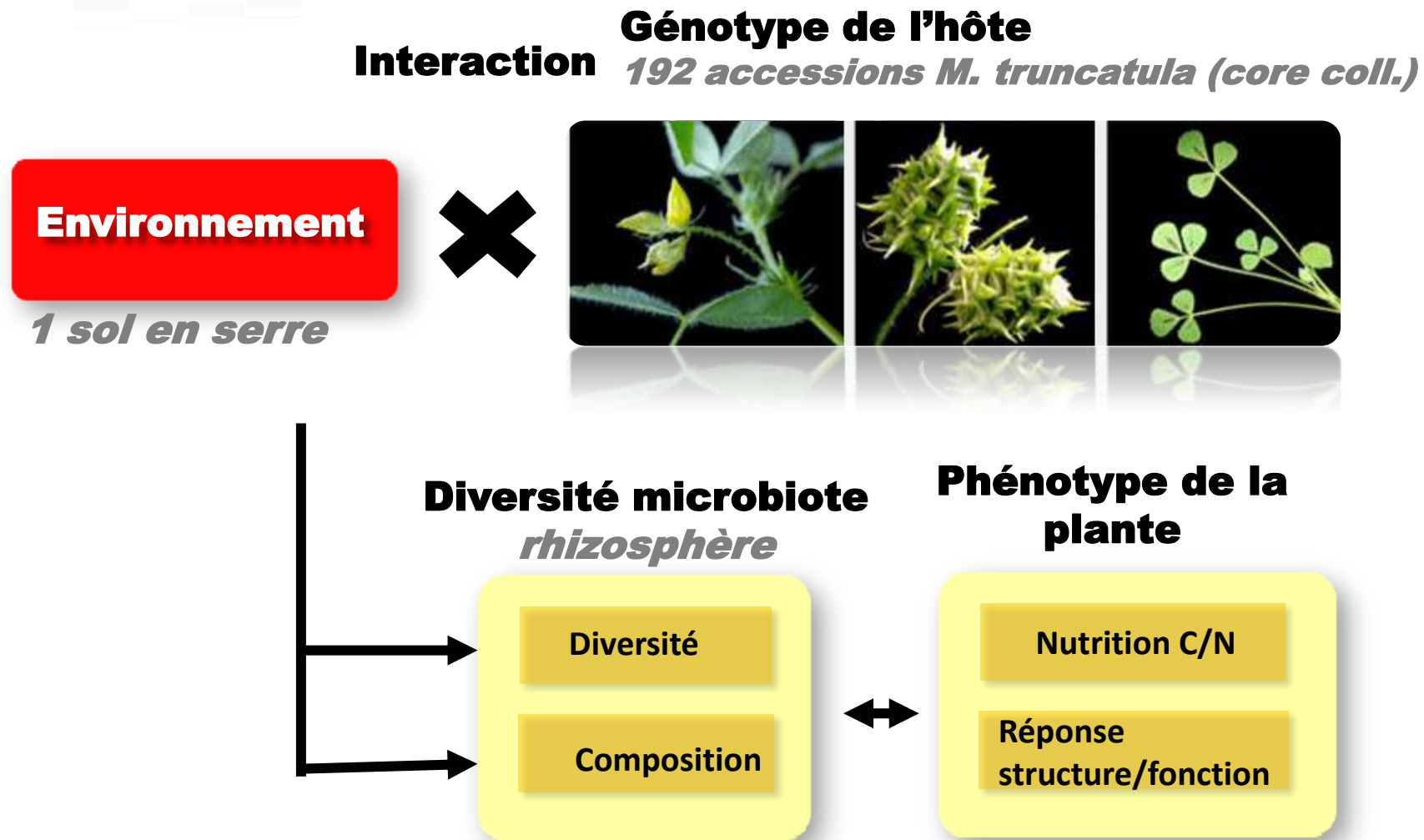
μ Moyenne générale

$X\beta$ Covariables, en particulier correction pour la structure génétique de la population

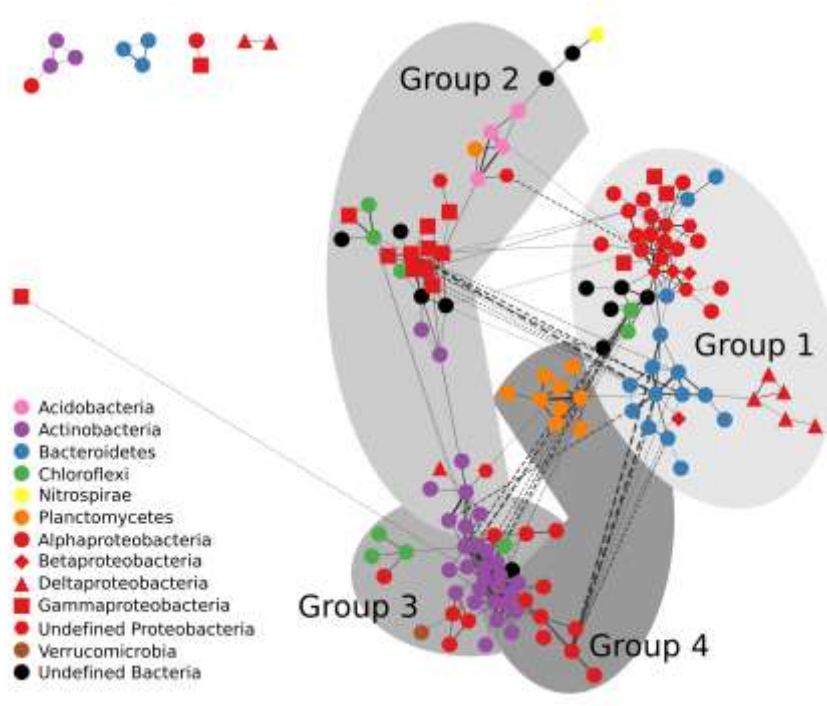
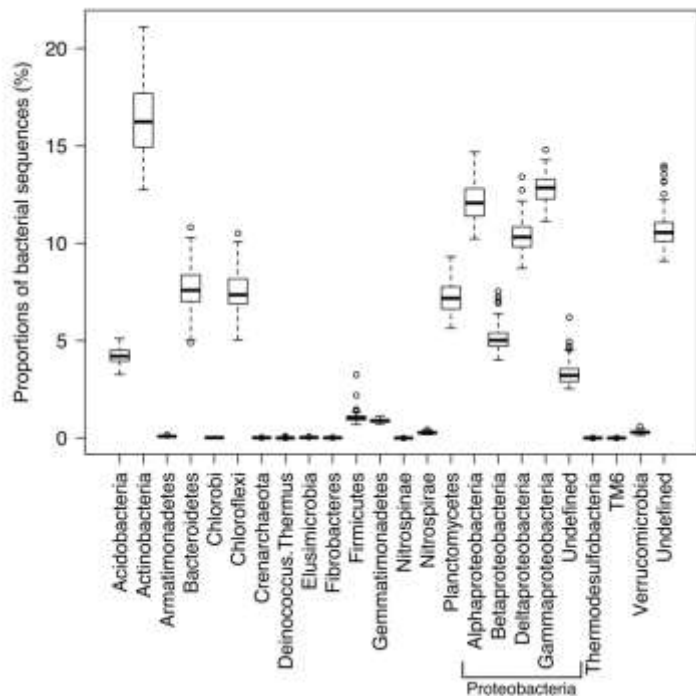
$G\gamma$ Effet du SNP testé

R Matrice résiduelle, incorporant éventuellement des effets d'apparentement

Analyse génétique des bases d'interaction du microbiote par la plante

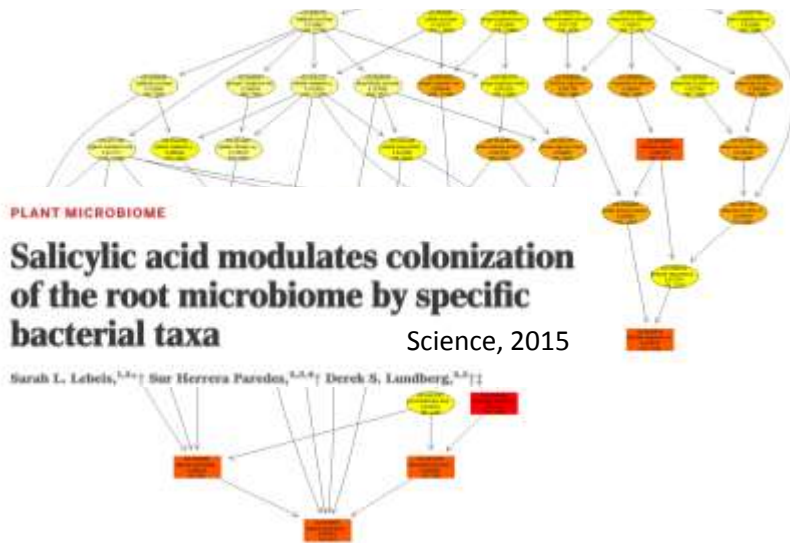


Données ‘phénotypiques’ = paramètres de diversité du microbiote et/ou stratégie nutritionnelle de la plante



- Proteobacteria, Acidobacteria, Actinobacteria, Bacteroidetes, Chloroflexi, Planctomycetes
- 157 OTU (core microbiote) présentant des différences d’occurrences
- Associations fortes entre Proteobacteria-Acidobacteria et Proteobacteria-Actinobacteria-Bacteroidetes-Chloroflexi

Analyse globale des gènes de la plante associés aux OTU significatives



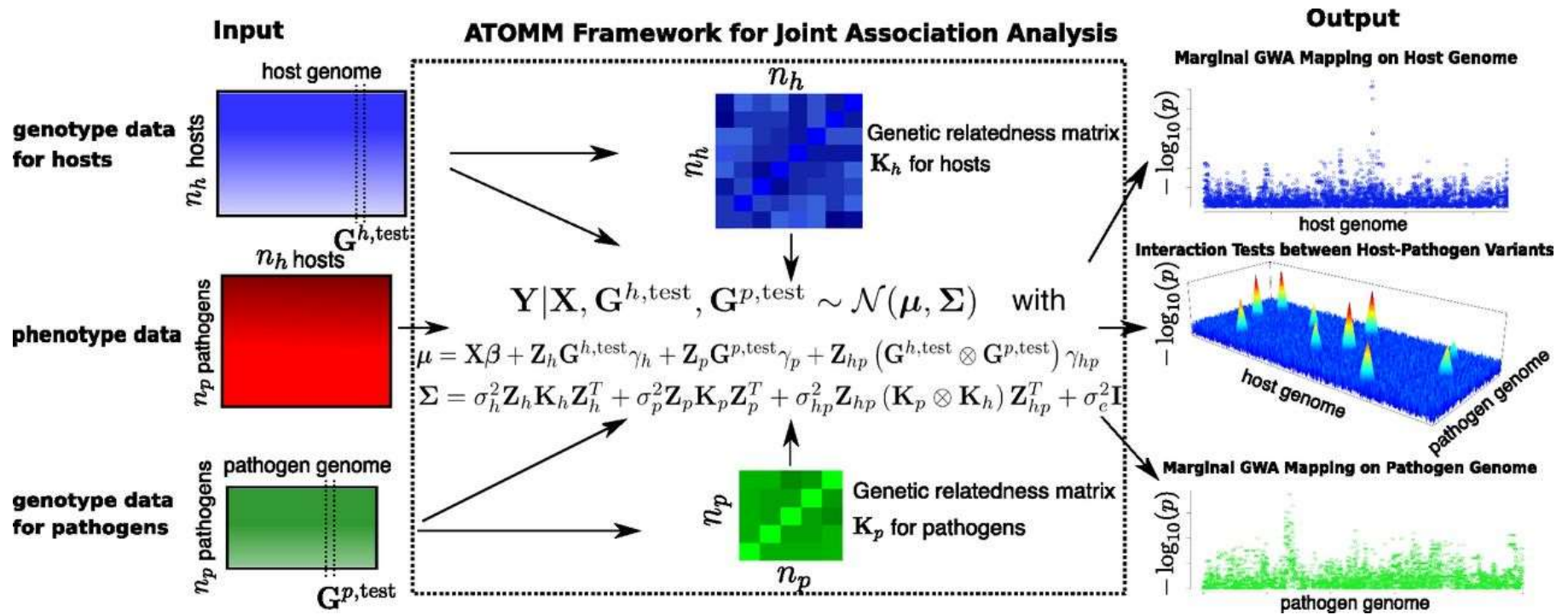
- **SA and other hormones induced genes** (MYB transcription factors, BIR1, CRK, auxin signaling, IAA synthesis, glutathion metabolism)
- **Genes involved in iron homeostasis**
- **Translocation of carbon**
- **Nitrogen nutrition**
- **Phenylpropanoid metabolism**

- Données consistantes vis-à-vis de la littérature plante-microbe

Zancarini et al. submitted

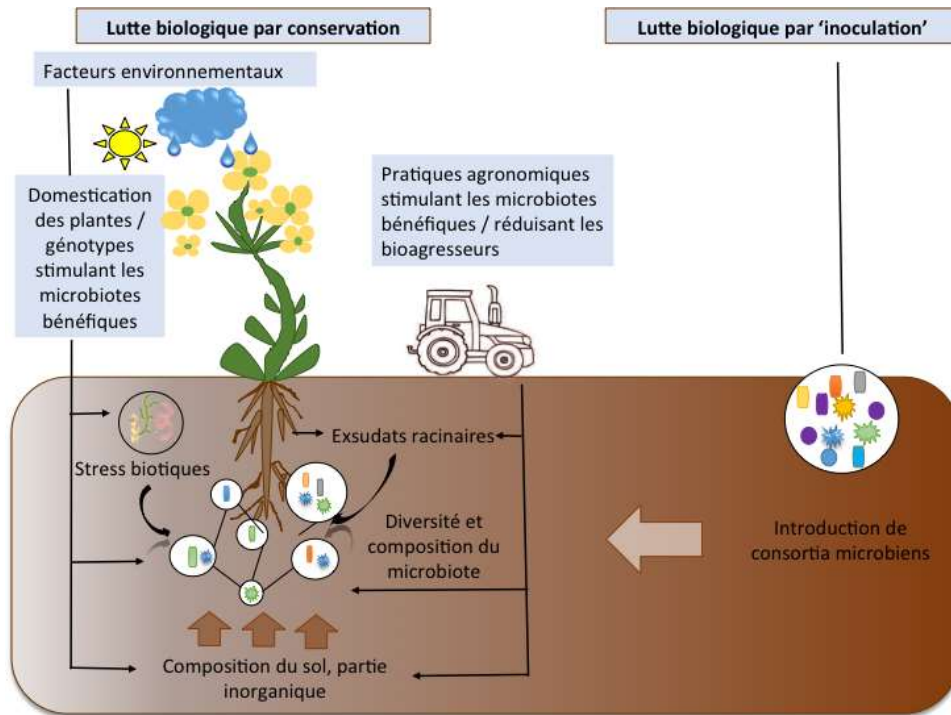
- Approche proposée sur d'autres d'intérêt agronomique 'Brassicaceae' avec volet fonctionnel cycle N et données métabolomiques plante (*e.g.* défenses).

Joined GWAS : base génétique de l'interaction hôte-microbiote

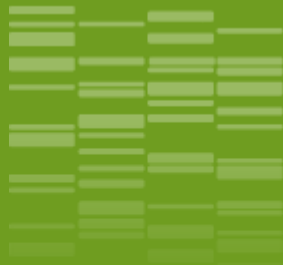


Wang et al. PNAS 2018;115:24:E5440-E5449

Vers une vision agroécologique de protection des plantes



- Identifier ou créer expérimentalement des MAPs d'intérêts (sol résistant, modulation défense directe/indirecte de la plante)
- Combiner les approches écologiques et mécanistes
- Développer les approches de type culturomique (sortie vers biocontrôle, biostimulation)
- Sélection variétale 'classique' versus sélection holobiont (approche GWAS sur des panels large dans différents contextes pédo-climatique-pratique)
- Mieux renseigner l'effet de la diversité des pratiques sur le couplage cluster d'espèces/module fonctionnel en lien avec 'résistance'



Interactions plantes - microbiote : état des connaissances et pistes pour de nouvelles stratégies de contrôle



Christophe Mougel
Rencontres 2019 GIS PIC-Lég
21-22 novembre 2019



@Mougel_Christ

