



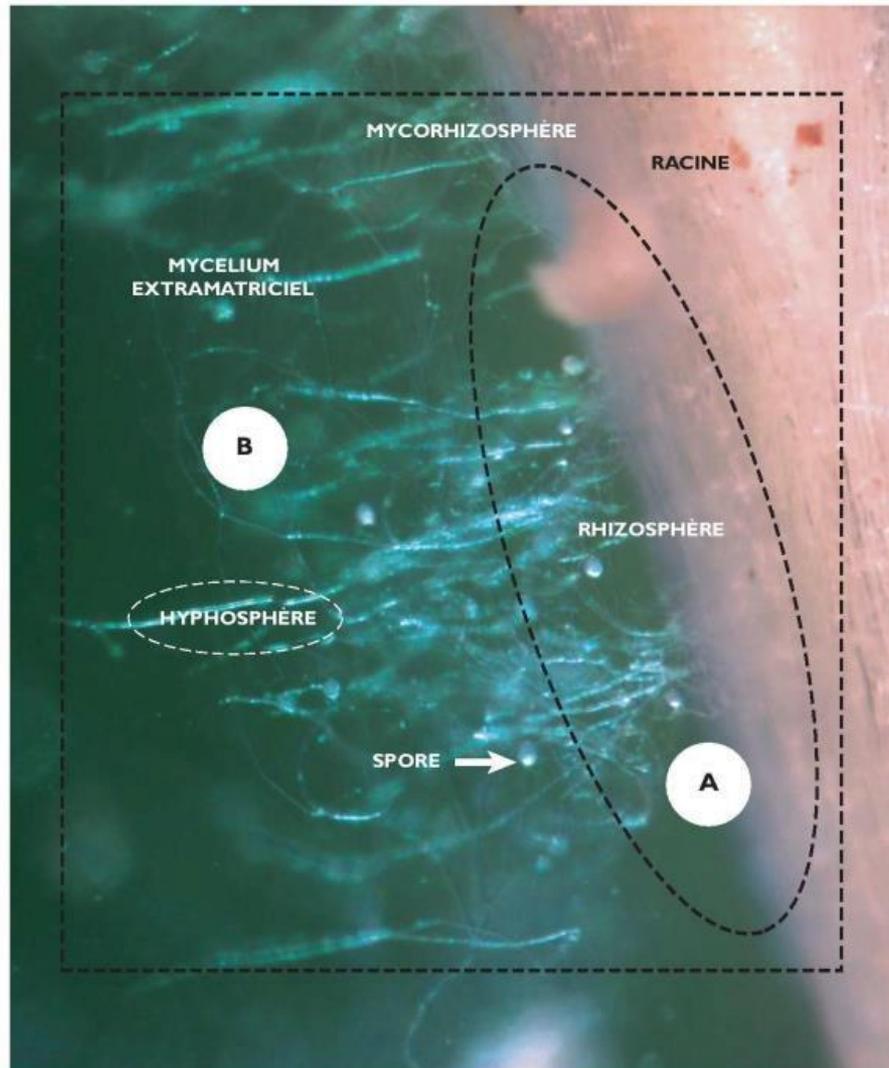
## **Les micro-organismes du sol : rôle et importance en bio-fertilisation de la culture de la fraise**



## Les micro-organismes du sol : rôle et importance en bio-fertilisation de la culture de la fraise



# Sol-Rhizosphère-Plante

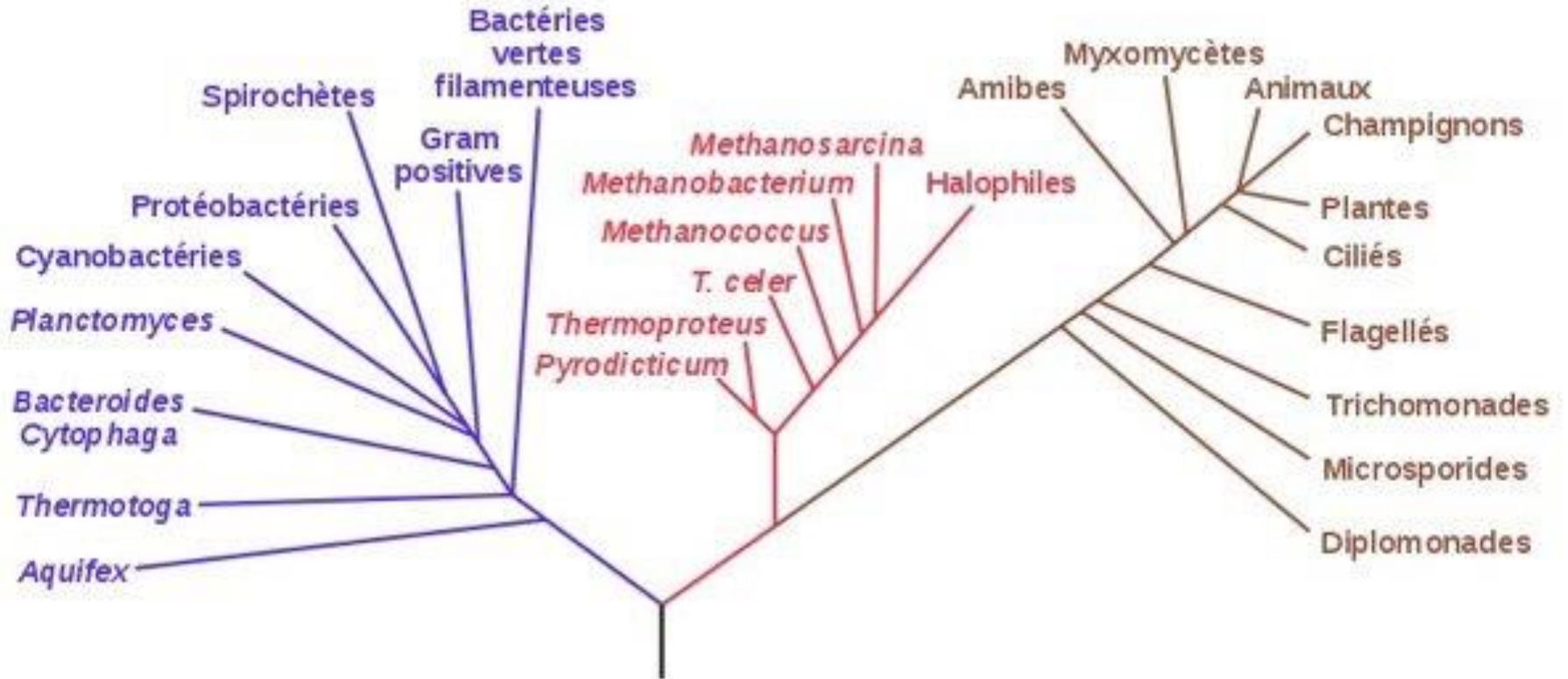


Schématisation de la compartimentation de la zone du sol adjacente aux racines (d'après Johansson et al. 2004)

## Bactéries

## Archées

## Eucaryotes



*Microorganismes du sol*

## Rhizobacteria

- Colonisent la rhizosphère qui est un volume de sol sous influence de racines, en association avec les poils racinaires, et des exsudats de plantes (Dessaux et al., 2009).
- A l'intérieur ou à proximité immédiate des racines ou des extensions fongiques.
- Certaines sont spécialisées, avec parfois des préférences pour telle ou telle espèce de plante ou de champignon mycorhizien (Garbaye, 2013).
- Parmi ces bactéries certaines sont dites:
  - ✓ Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR (Kloepper, 1978).
  - ✓ Bactérie auxiliaire de la mycorhization, BAM (Garbaye, 1994).

## Les bactéries de type PGPR

Effets bénéfiques de ces Rhizobacteria dans la croissance de la plante en conditions de stress ou non, ainsi que dans le cadre d'une agriculture à faibles apports d'intrants (Vessey and al, 2003).

Rôle important lié à plusieurs mécanismes :

- ✓ Indirect : Prévention et réduction des effets néfastes de pathogènes de la plante.
- ✓ Direct : Production de composés bénéfiques à la plante hôte favorisant sa croissance.

Interne: *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*.

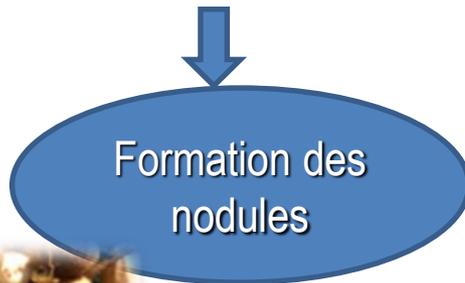
Externe: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Azotobacter*, *Azospirillum*.

## Les bactéries (libre ou symbiotiques) fixatrices d'azote

Importance :

- Amélioration de la nutrition azotée des plantes
- Courant chez les légumineuses (Haricots, Arachide...

Groupe des fixateurs symbiotique  
Ex: Rhizobia



Groupe des fixateurs libre

Ex: Azotobacter,  
Azospirillum

Plante

## Les bactéries dites BAM

Première mention par Mosse en 1962 chez *Glomus* sp.

Effets possibles (Frey-Klett and al., 2011 ; Jeffries et al, 2003) :

- ✓ Au niveau de la racine : Hausse du nombre de racines latérales, faciliter la pénétration.
- ✓ Au niveau du symbiote : Germination, croissance mycélium.
- ✓ Indirectement : “dialogue moléculaire”.

Bactéries impliquées : Protéobactéries, Firmicutes et Actinobactéries.

# Autres microorganismes bénéfiques pour la fertilité du sol

Agents biologiques (lutte contre les microorganismes phytopathogène)



Actinomycètes



Pseudomonas

Bactéries capables de solubiliser le phosphate

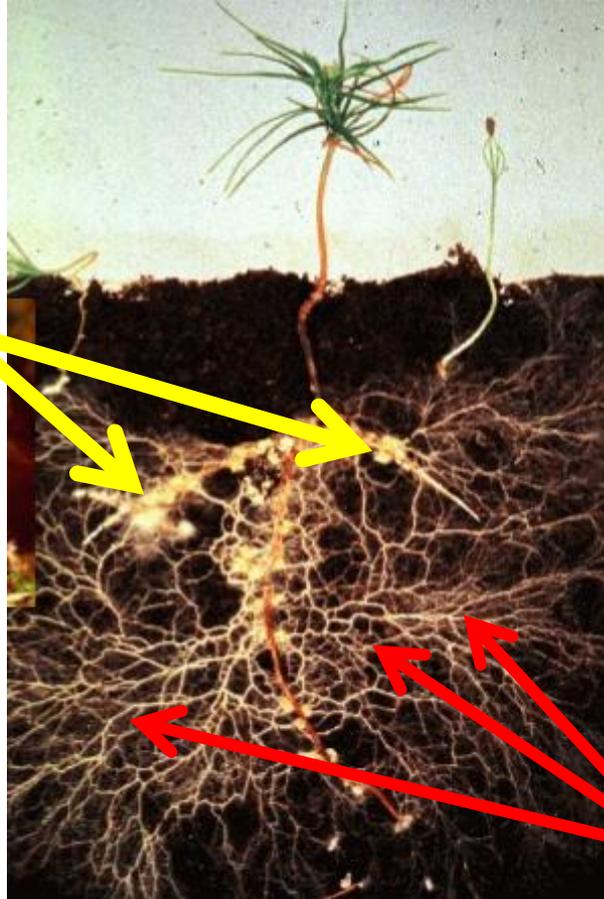
Mobilisation et solubilisation d'éléments nutritifs (azote, phosphore,...)



Production de substances d'intérêts agronomiques (Enzymes, antibiotiques...)

## Les champignons mycorhiziens

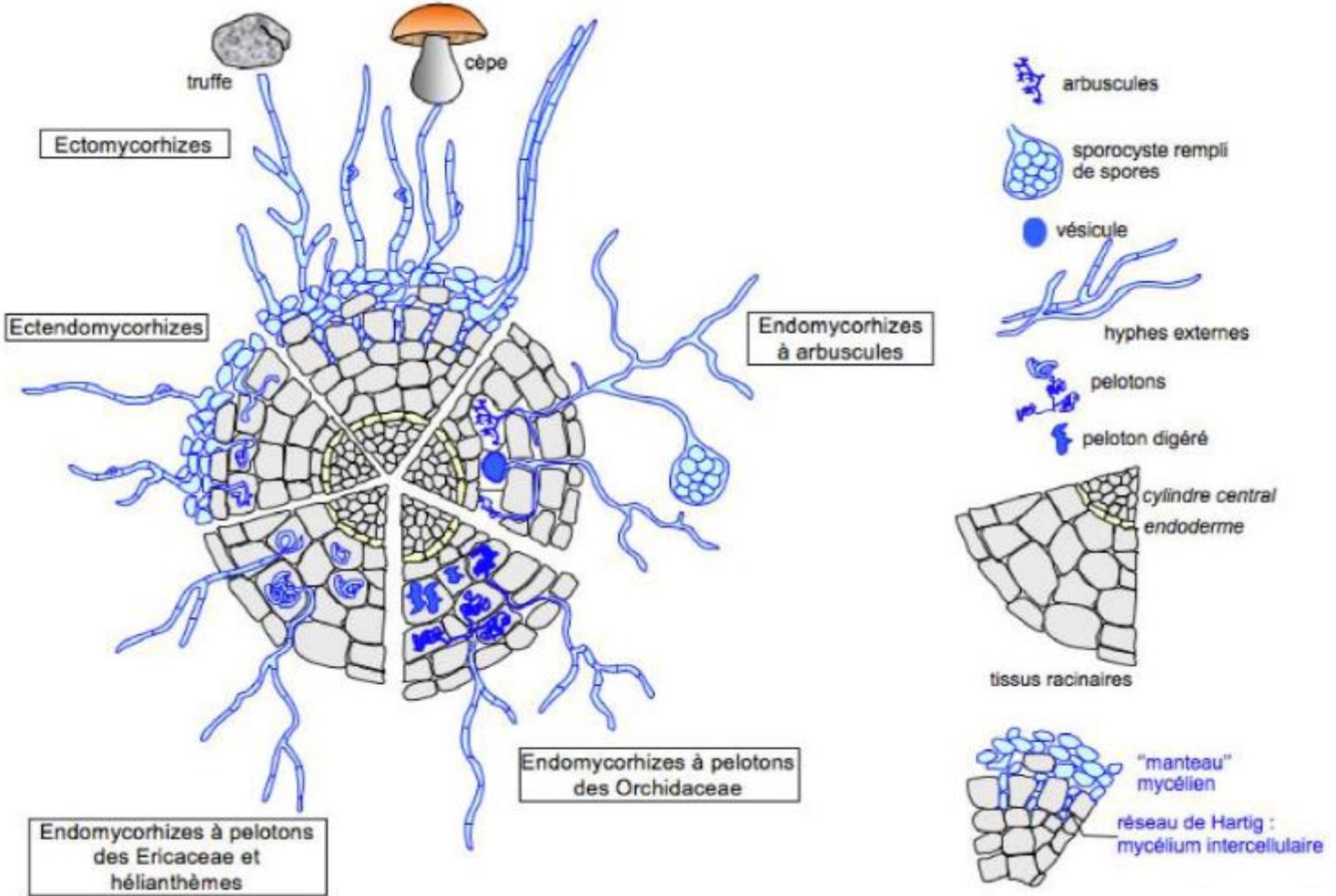
**Mycorhizes**  
Lieu d'échange  
entre le champignon  
et la plante



**Hyphes extramatriciels**  
prospection du volume  
du sol, réaction de  
libération et absorption  
de P à partir des  
composés complexes

Autres éléments concernés : Zn, Cu, N

# Les champignons mycorhiziens



Les différents types d'associations mycorhiziennes.  
(selon Selosse et Le Tacon 1998)

# Les champignons Endomycorhiziens



Spore

Hyphe extra-radriculaire

Hypopodium



Appresorium

Epiderme

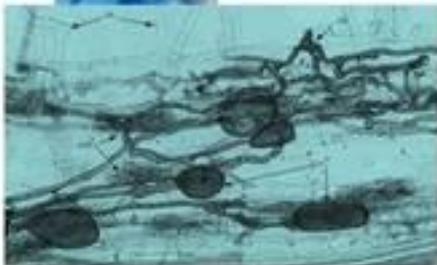
Hypoderme

Cortex

Hyphe intra-radriculaire

Arbuscules

Vesicule



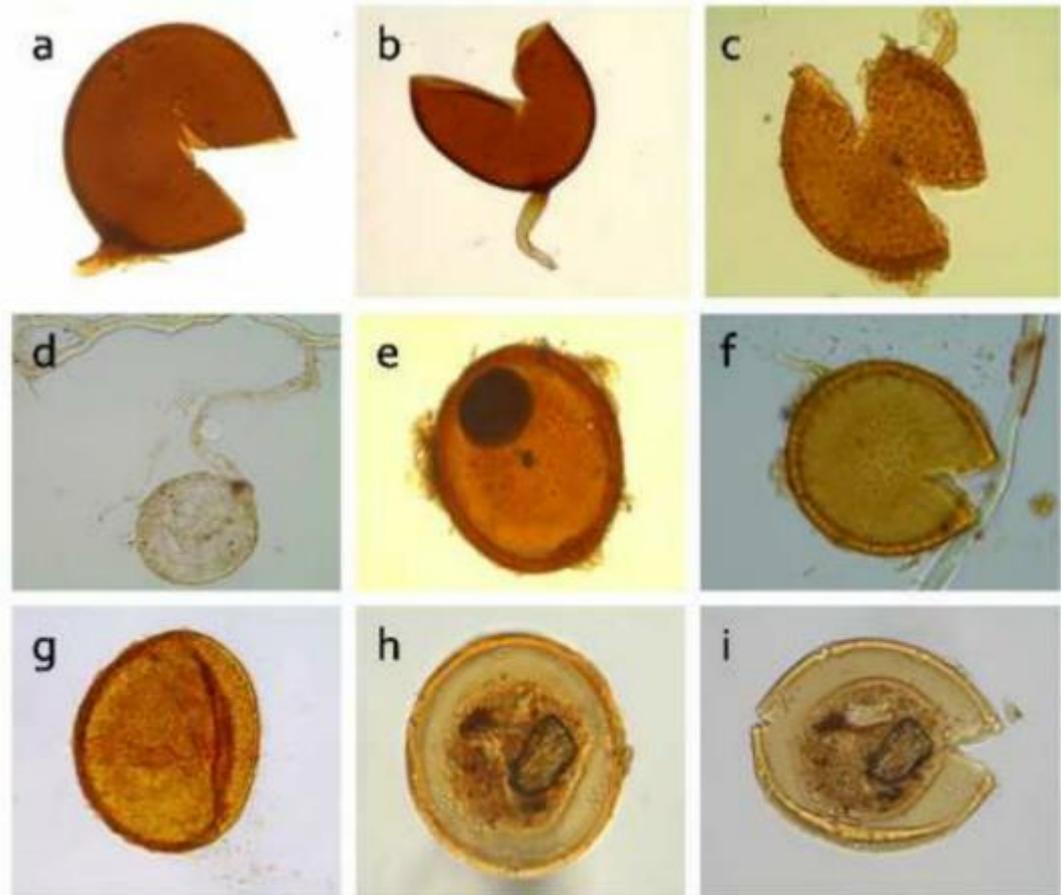
- Association avec 90% d'espèces végétales

## Les champignons Endomycorhiziens

- Le *Rhizoglofus irregulare*, principal champignon utilisé pour l'inoculation en agriculture.

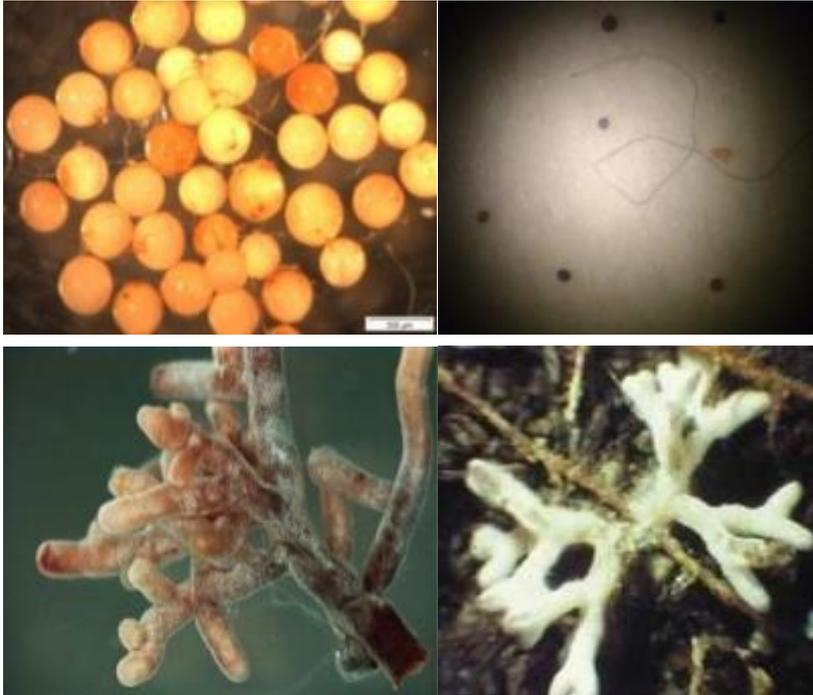


Gigaspora calospora  
J. André Fortin



AMF spores from Clerodendrum rhizosphere soils. a-f: *Glomus* species ( *G. etunicatum*, *G. geosporum* , *G. lamellosum*, *G. viscosum*, *G. macrocarpum*...

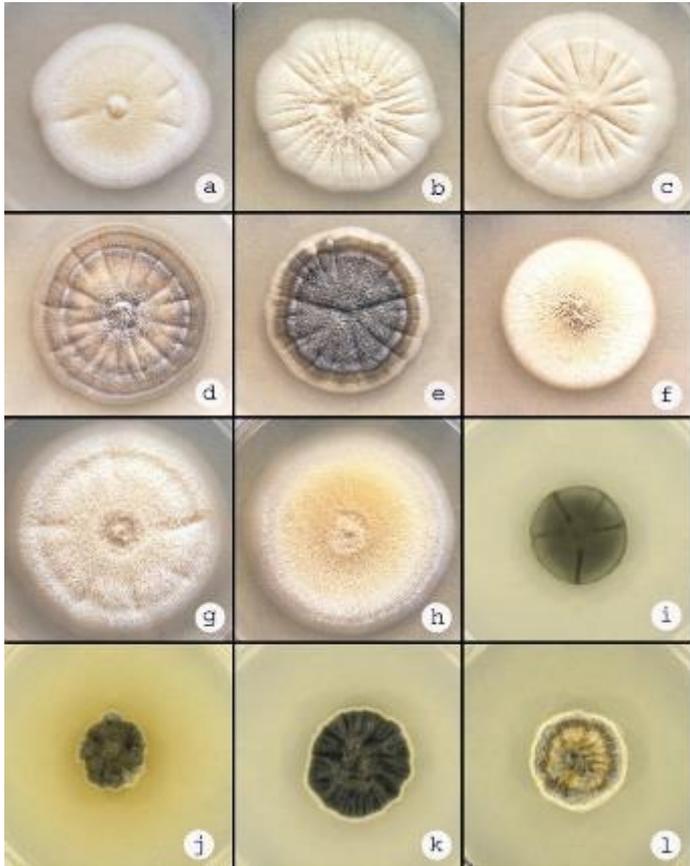
## Les champignons *Ectomycorhiziens*



**Ectomycorhizes**

- Association en général avec les arbres forestiers
- Les champignons les plus étudiés : *Thelephora* et *Cenococcum*.
- La fructification des champignons est un processus qui dépend de l'espèce de champignon, de facteurs climatiques, de l'âge des peuplements et de traitements sylvicoles (p.ex. fertilisation, éclaircies).
- La formation de sporophores, difficile à obtenir en conditions contrôlées, dépend du champignon impliqué, de la qualité du substrat, des conditions de culture (p.ex. humidité, lumière, température) et de la production de métabolites par la plante hôte

# Les champignons mycorhiziens des Ericacées



Différentes souches de *Meliniomyces variabilis*.



- Association spécifiques aux éricacées (Myrtillier...).
- Cultivables sur milieu de culture.

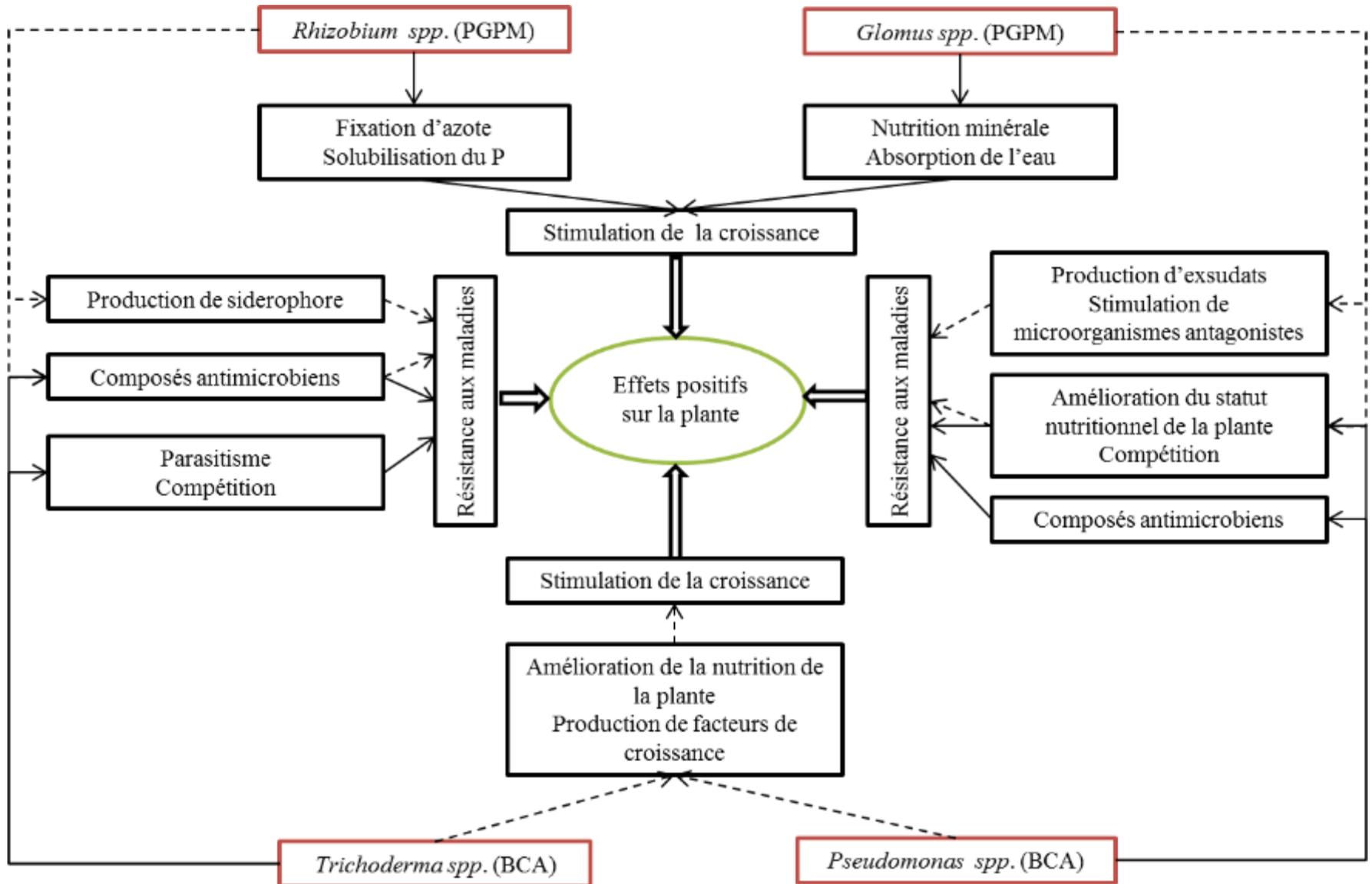


*Calluna vulgaris*



*Vaccinium myrtillus*

# Rôle de Micro-organismes du sol



Modes d'action potentiels des PGPM et des agents de control biologique sur la plante.  
(Ligne continue: action directe. Ligne discontinue: action indirecte) (selon Tyler J. Avis 2008)

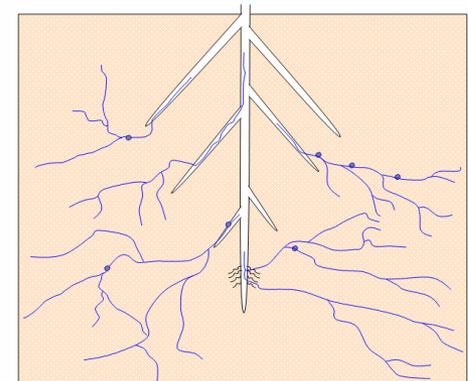
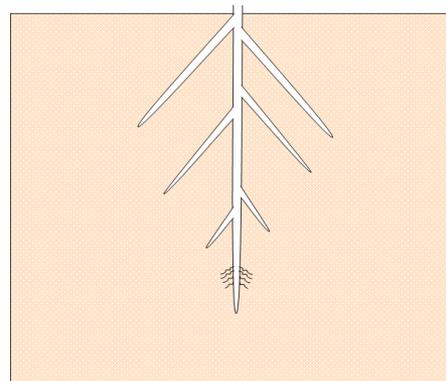
## Intérêt de la mycorhization

Au niveau de la plante hôte :

- ✓ Amélioration de la nutrition minérale.
- ✓ Protection contre différents pathogènes.
- ✓ Tolérances aux stress abiotiques.

Au niveau de l'interface sol-plante :

- ✓ Interactions avec d'autres groupes microbiens.
- ✓ Compartimentation de la microflore du sol.



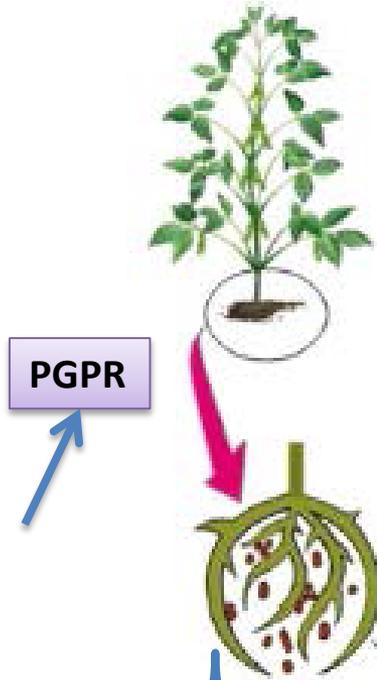
Zone d'exploration du sol par les racines d'une plante mycorhizée ou non

## *Facteurs limitant de la mycorhization*

La formation, le développement et l'efficacité de la symbiose endomycorhizienne ne sont pas liés seulement aux espèces de plantes hôtes et des endophytes mais à tout un ensemble de facteurs biotiques et abiotiques.

- Le pH,
- L'aération,
- L'humidité,
- La température,
- La lumière,
- La texture du sol,
- Les éléments minéraux et la matière organique,
- Les fongicides.

# Mécanismes d'action des PGPR



## Bio-fertilisation

- Fixation d'azote
- Solubilisation du phosphore
- Production de sidérophores

## Bio-contrôle

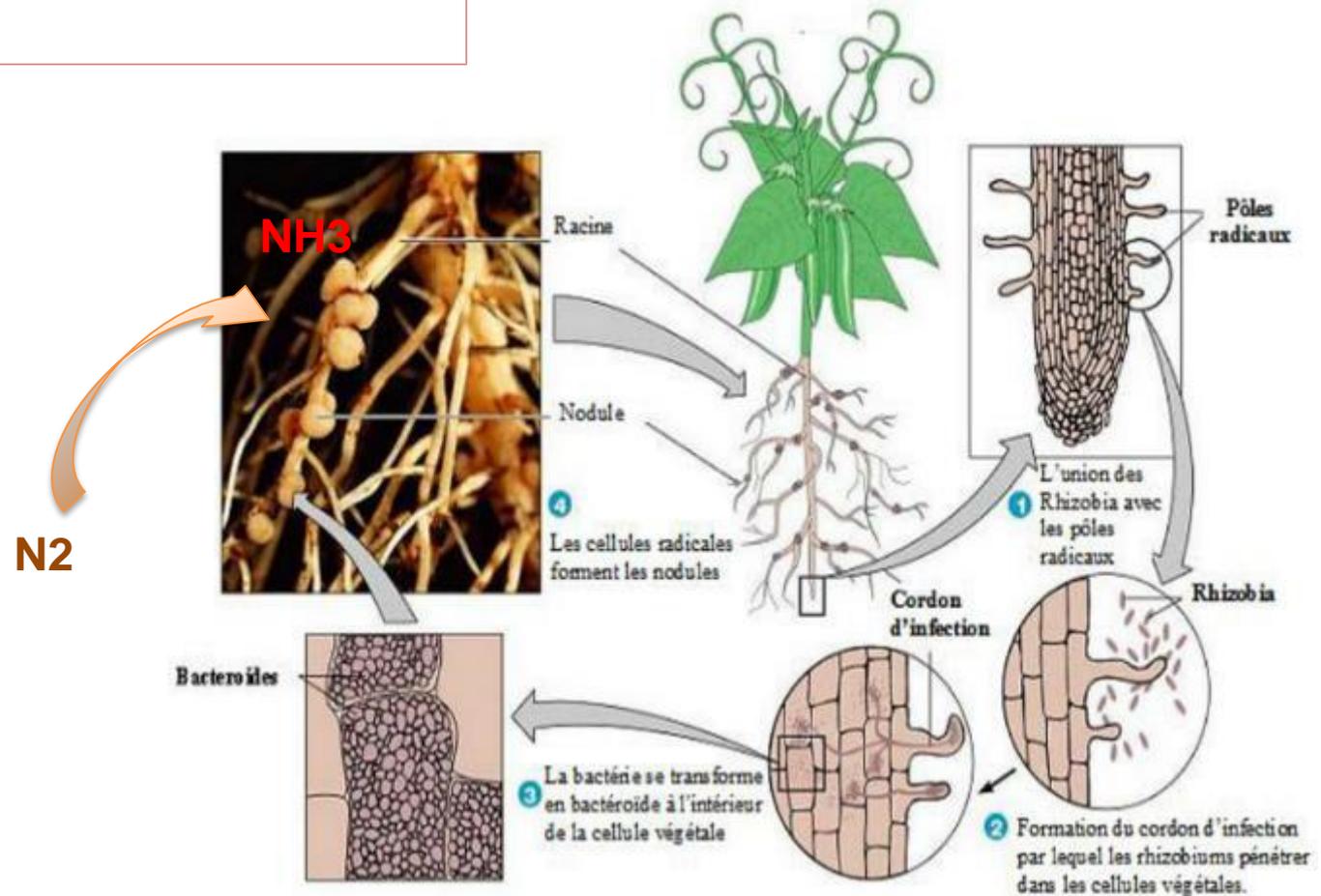
- Production des métabolites antifongiques
- Production de composés volatiles
- Induction d'une réponse systémique chez la plante
- Compétition pour l'espace et les nutriments

## Bio-stimulation

- Production des phytohormones : l'acide indole acétique, les cytokinines, l'acide gibbérillique...

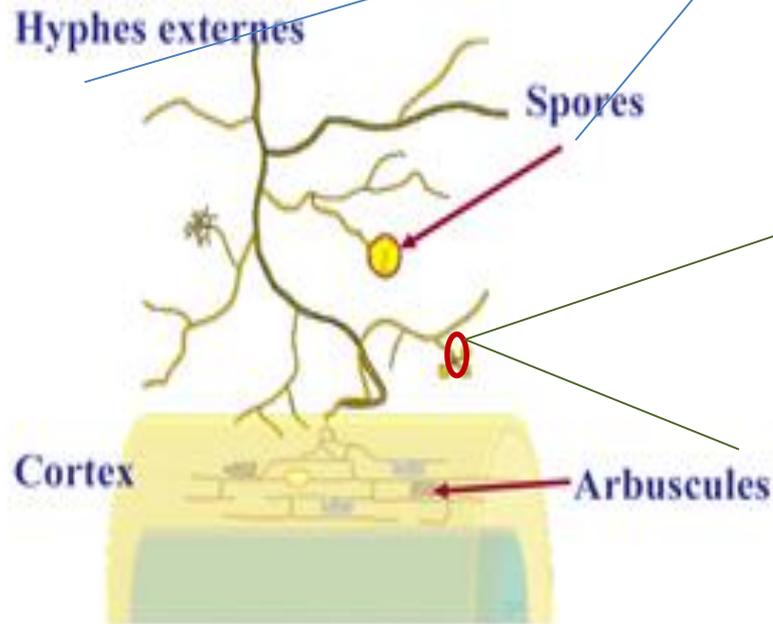
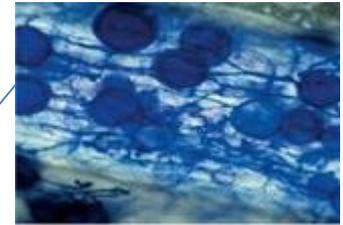
# Symbiose plante-bactérie

**les nodosités**, associations d'une bactérie ou d'une cyanobactérie et d'une racine, sont spécifiques de certaines familles des végétaux, comme les fabacées.



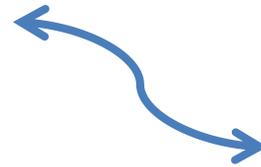
## Symbiose plante-champignon

*Association entre un champignon et les racines d'une plante permettant des transferts d'éléments minéraux, d'eau et de carbone organique entre le champignon et la plante hôte.*



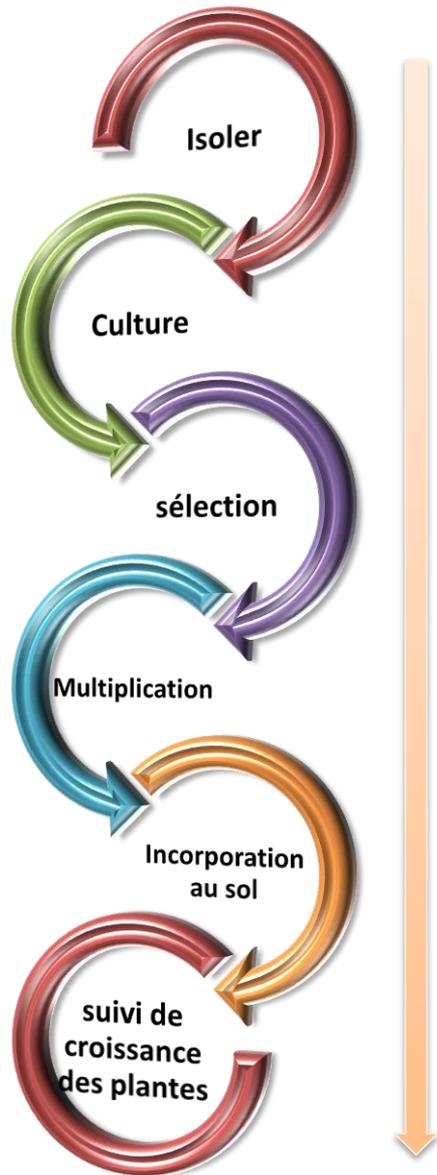
<i>Règne</i>	<i>Plantae</i>
<i>Sous-règne</i>	<i>Tracheobionta</i>
<i>Classe</i>	<i>Magnoliopsida</i>
<i>Sous-classe</i>	<i>Rosidae</i>
<i>Genre</i>	<i>Fragaria</i>
<i>Embranchement</i>	Spermatophyta (Angiosperme)
<i>Ordre</i>	<i>Rosales</i>

?



**Les champignons  
endomycorhiziens**

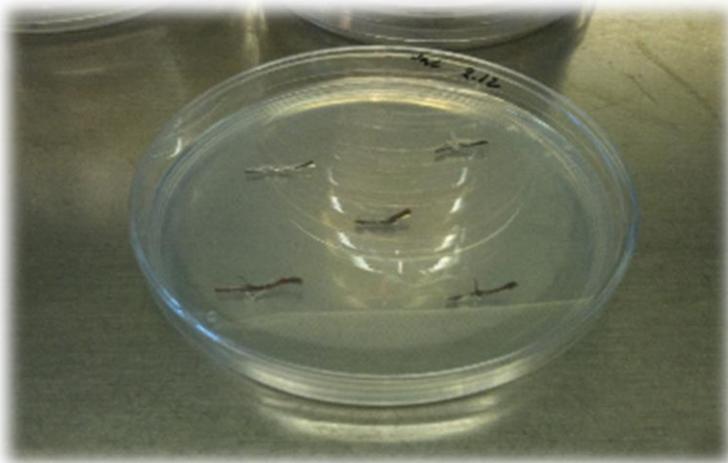
# Mycorhization contrôlée



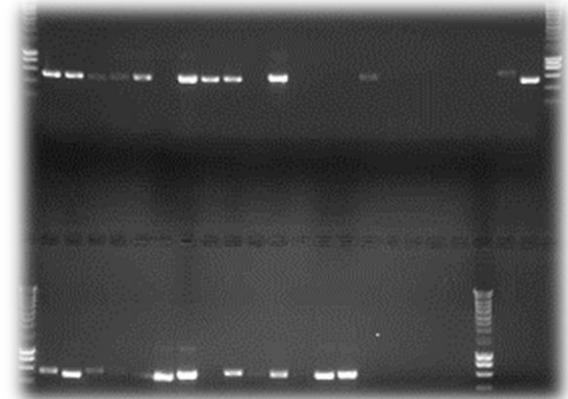
# *Mycorhization contrôlée*



**Isolement des racines**



**Culture**



**Identification  
moléculaires**

## Production d'inoculum



**Fermentation en milieu solide  
(FMS)**



**Matériel fongique**

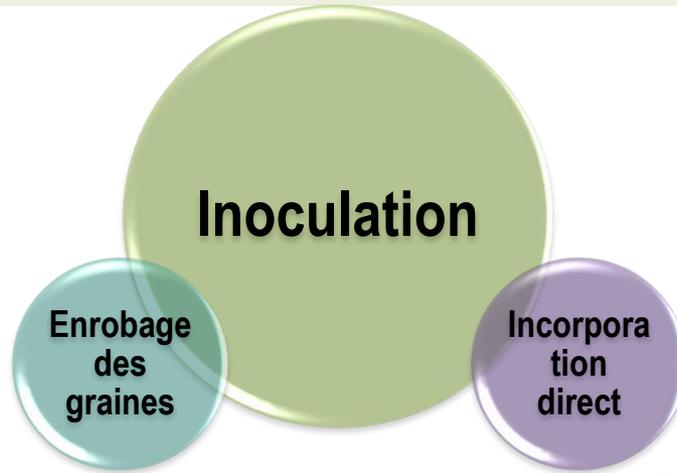


**Milieu liquide**

L'inoculum constitue la forme sous laquelle le champignon sera apporté à la plante. Il s'agit généralement d'une culture pure du champignon cible.

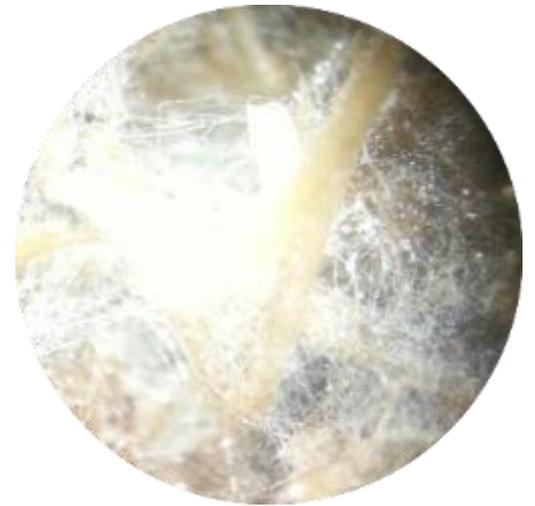
## Production d'inoculum

L'inoculation consiste à mettre le champignon directement en contact avec la plante hôte considérée. Il existe diverses méthodes pour introduire les inocula de champignons mycorhiziens dans une culture au champ:



Méthodes d'inoculation

## *Production d'inoculum*



Biomasse Fongique en FMS

# Production d'inoculum



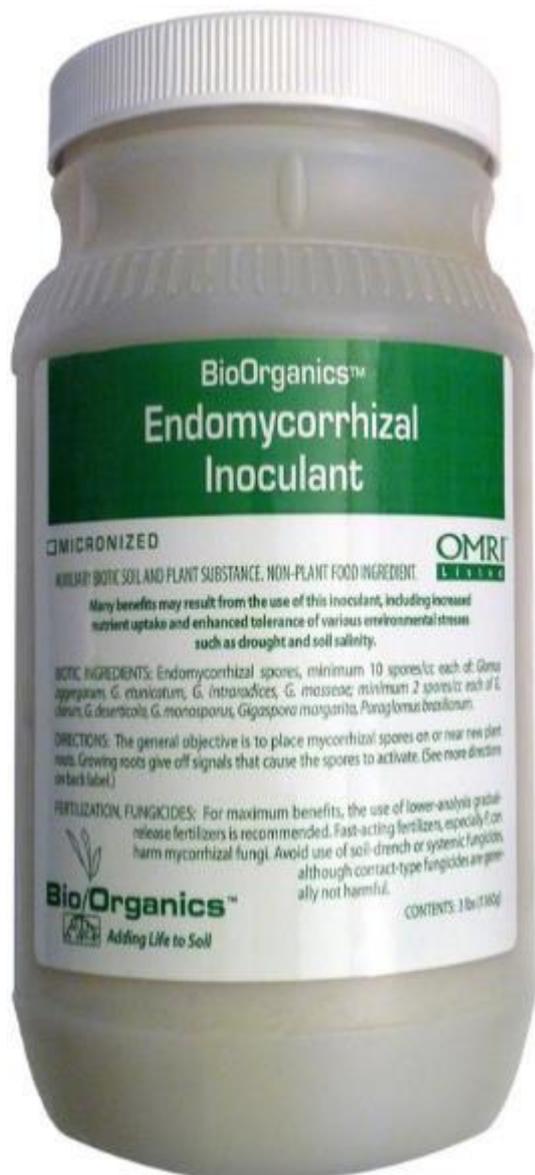
Méthode développée à l'aide des racines de poireaux



Méthode industrielle au Canada



## Les champignons mycorhizée utilisée:



- *Glomus mosseae*
- *Glomus intraradices*
- *Glomus monosporus*
- *Gigaspora margarita*

Espèce fongique	Matériel d'isolement	Plante hôte	Provenance
<i>Pisolithus strobus</i>	Sporophore	<i>A. mangium</i>	Sénégal
<i>Boletus</i> sp. 1	Sporophore	<i>A. bella</i>	Guinée
<i>Boletus</i> sp. 2	Sporophore	<i>Uapaca</i> sp.	Guinée
<i>Scleroderma dictyosporum</i>	Sporophore	<i>A. africana</i>	Burkina Faso
<i>Scleroderma dictyosporum</i>	Sporophore	<i>A. africana</i>	Burkina Faso
<i>Scleroderma dictyosporum</i>	Sporophore	<i>A. africana</i>	Sénégal
<i>Scleroderma bermudense</i>	Sporophore	<i>C. wifera</i>	Sénégal
<i>Scleroderma verrucosum</i>	Sporophore	<i>U. guineensis</i>	Burkina Faso
<i>Scleroderma</i> sp. 2	Sporophore	<i>A. africana</i>	Guinée
<i>Scleroderma</i> sp. 5	Sporophore	<i>A. africana</i>	Guinée
<i>Scleroderma</i> sp.	Sporophore	<i>M. kerstinguii</i>	Burkina Faso
<i>Scleroderma</i> sp.	Sporophore	<i>U. guineensis</i>	Burkina Faso
Champignon théléphoroïde	Ectomycorhize	<i>A. africana</i>	Sénégal
Champignon théléphoroïde	Ectomycorhize	<i>A. africana</i>	Guinée

## Exemples d'utilisations

**Tournesol** : Hausse croissance par *Glomus intraradices* en cas de stress hydrique (Porcel and al, 2004).

**Blé** : Hausse croissance par *Azotobacter chroococcum* avec la dissolution de TCP et rock phosphate (Kumar and Narula, 1999).

**Tomate** : Hausse croissance par *Glomus mosseae* / *Pseudomonas* spp, avec une hausse de la nutrition P (Gamalero et al, 2004).

**Fraise**: Double inoculation de fraises avec des bactéries et AMF

**Myrtille**: inoculation par les champignons Ericoides

Source of Variability	Shoot Dry Weight (g)	Shoot/Root Ratio	Content in Shoot Biomass (mg/Plant)		
			P	K	Mg
<b>AMF (A)</b>					
None (control and bacteria)	0.28 b <sup>1</sup>	1.65 b	0.92 b	5.88 b	0.75 a
<i>Glomus etunicatum</i>	0.48 a	2.13 b	0.92 b	6.03 b	0.70 a
<i>Glomus fasciculatum</i>	0.52 a	3.08 a	1.73 a	9.02 a	0.93 a
<b>Bacteria (B)</b>					
None (control and AMF)	0.49 b	3.38 ab	1.64 a	8.51 a	0.96 a
<i>Agrobacterium radiobacter</i>	0.36 bcd	2.36 bc	1.27 ab	7.54 a	0.93 a
<i>Pseudomonas putida</i>	0.44 bc	3.85 a	1.39 ab	8.73 a	0.90 a
<i>Bacillus subtilis</i>	0.32 cd	1.66 c	1.14 bc	4.83 b	0.62 a
<b>Bacterial isolates</b>					
M30	0.67 a	1.59 c	1.55 a	8.43 a	0.94 a
M45	0.46 bc	2.04 c	1.38 ab	8.76 a	0.97 a
K33	0.42 bc	1.58 c	0.61 d	4.23 b	0.42 a
P27	0.38 bcd	2.24 c	1.35 ab	7.03 a	0.83 a
B1	0.50 b	2.50 bc	0.87 cd	8.36 a	0.90 a
B2	0.23 d	1.37 c	0.65 d	3.65 b	0.46 a
<b>ANOVA significances</b>					
A	*** <sup>2</sup>	**	*	*	ns
B	***	**	***	**	ns
A × B	ns	ns	**	*	ns

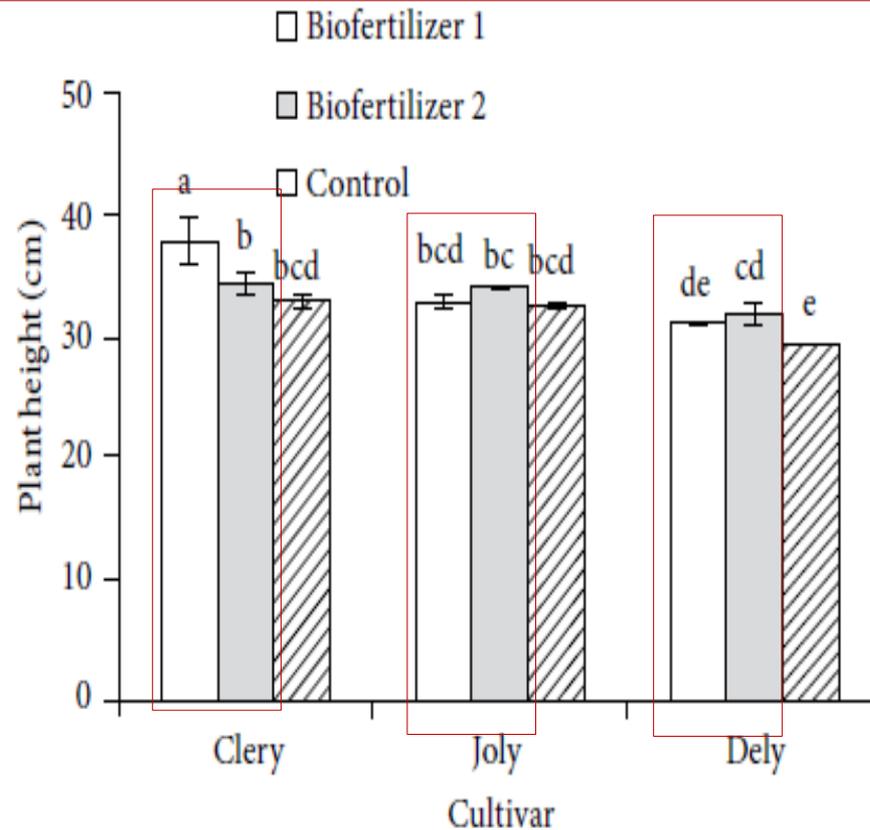
Etudier les effets de la double inoculation de fraises avec des bactéries et AMF sur la croissance et la nutrition de fraisières



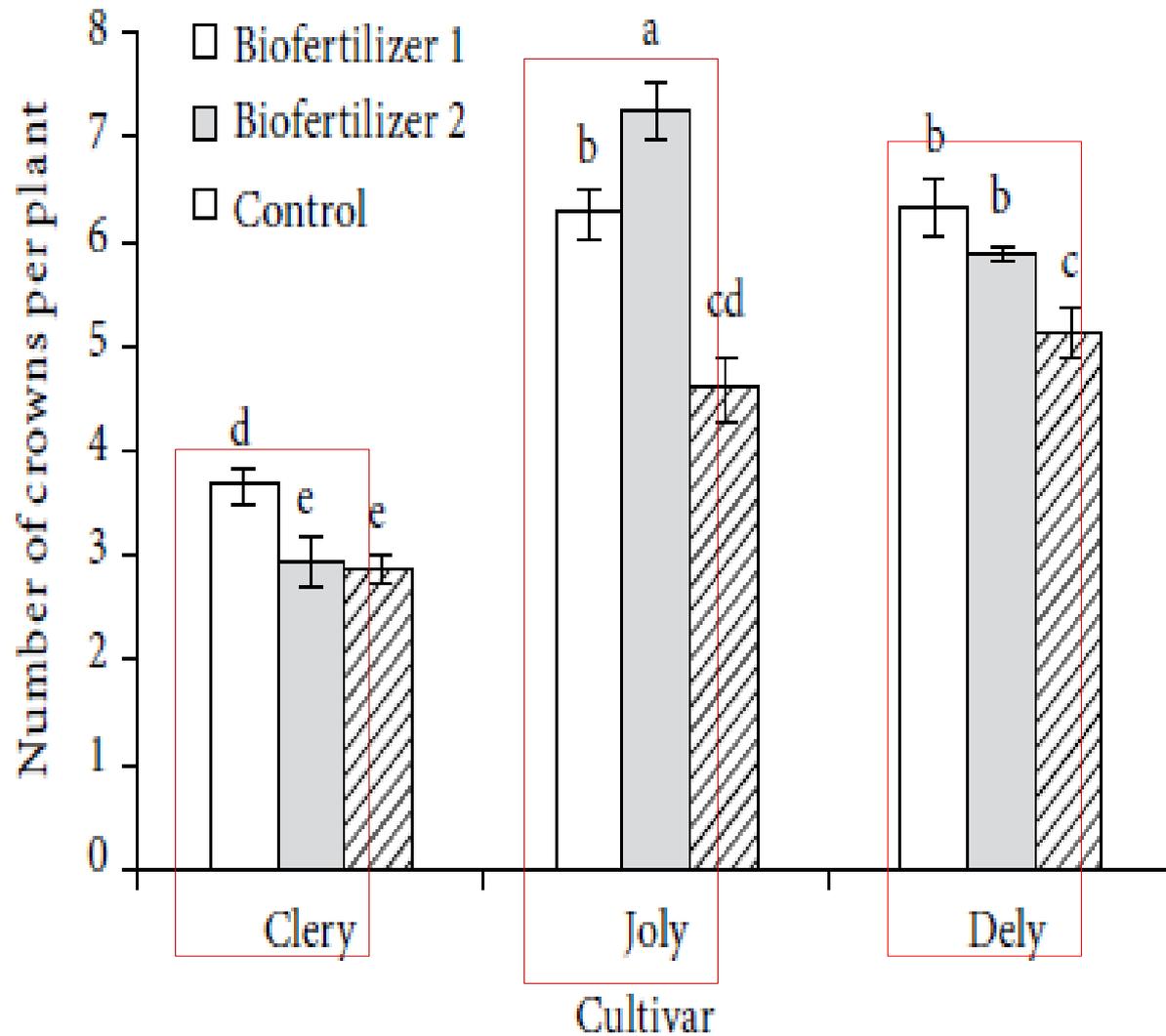
*Glomus fasciculatum*,  
*Glomus etunicatum*  
*Glomus claroideum*

**Poids moyen des pousses et des racines et teneur en P, K et Mg dans les pousses**

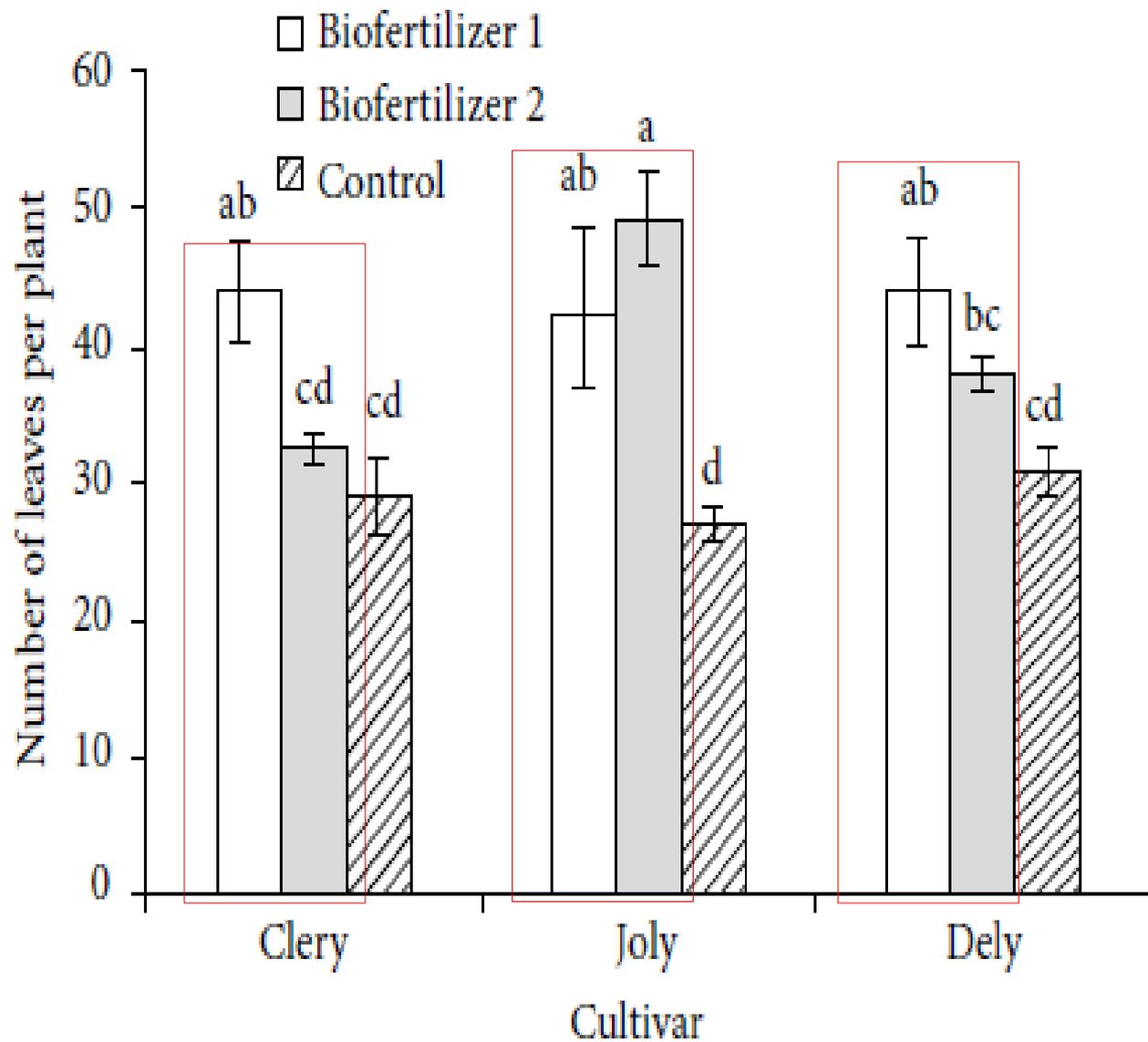
- Trois variété fraises: Cléry, Joly et Dely
- Deux types de biofertilisant ont été appliqués:
  - Biofertilisant 1 (inoculum du mélange de cultures bactériennes liquides du genre Azotobacter, Derxia et Bacillus)
  - Biofertilizer 2 (inoculums de culture liquide de bactéries diazotopes appartenant au genre Klebsiella).



Effet de biofertilisant et du cultivar sur la taille de la plante



Effet du biofertilisant et du cultivar sur le nombre de couronnes par plante



Effet biofertilisant et du cultivar sur le nombre de feuilles par rosette:

## L'influence du biofertilisant et du cultivar sur la teneur en macroélément dans les feuilles de fraisier:

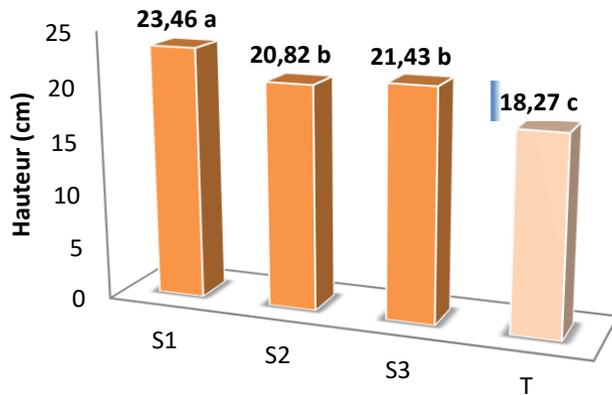
Factor		N (%)	P ( $\mu\text{g mL}^{-1}$ )	K ( $\mu\text{g mL}^{-1}$ )	Ca ( $\mu\text{g mL}^{-1}$ )	Mg ( $\mu\text{g mL}^{-1}$ )
Fertilizer (A)	Biofertilizer 1	2.03 $\pm$ 0.03 a	22.81 $\pm$ 0.90 a	63.20 $\pm$ 2.99 b	127.16 $\pm$ 14.83 a	32.79 $\pm$ 3.46 a
	Biofertilizer 2	1.98 $\pm$ 0.03 ab	21.04 $\pm$ 1.64 a	62.24 $\pm$ 3.74 b	113.98 $\pm$ 7.01 a	28.69 $\pm$ 2.59 a
	Control	1.94 $\pm$ 0.01 b	22.07 $\pm$ 1.32 a	70.94 $\pm$ 5.35 a	113.36 $\pm$ 3.24 a	29.01 $\pm$ 0.66 a
Cultivar (B)	Clery	2.00 $\pm$ 0.03 a	20.17 $\pm$ 1.03 b	52.58 $\pm$ 1.27 b	125.84 $\pm$ 7.15 a	32.68 $\pm$ 1.98 a
	Joly	2.03 $\pm$ 0.03 a	25.10 $\pm$ 1.10 a	72.06 $\pm$ 2.67 a	133.54 $\pm$ 11.07 a	33.71 $\pm$ 2.68 a
	Dely	1.93 $\pm$ 0.02 b	20.65 $\pm$ 1.16 b	71.74 $\pm$ 4.17 a	95.12 $\pm$ 4.20 b	24.10 $\pm$ 1.17 b
ANOVA						
A		*	ns	*	ns	ns
B		*	*	*	*	*
A $\times$ B		*	*	*	*	*

# L'influence du biofertilisant et du cultivar sur les propriétés chimiques des fruits

Factor	Soluble solids content	Titrateable acidity	Vitamin C	Total anthocyanins	Total phenolics	Total antioxidant capacity	
	(%)	(% malic acid)	(mg 100 g <sup>-1</sup> FW)	(mg C3G eq 100 g <sup>-1</sup> )	(mg GAE 100 g <sup>-1</sup> FW)	(mmol TE 100 g <sup>-1</sup> FW)	
Fertilizer (A)	Biofertilizer 1	10.56 ± 0.36 a	0.70 ± 0.02 b	17.46 ± 0.79 a	26.65 ± 2.54 b	199.60 ± 16.73 b	1.85 ± 0.19 a
	Biofertilizer 2	10.68 ± 0.14 a	0.81 ± 0.05 a	16.40 ± 0.88 a	33.30 ± 1.36 a	231.12 ± 5.45 a	1.61 ± 0.10 b
	Control	10.38 ± 0.29 a	0.73 ± 0.02 b	17.16 ± 0.49 a	24.76 ± 2.45 c	197.08 ± 8.55 b	1.45 ± 0.10 c
Cultivar (B)	Clery	10.75 ± 0.37 a	0.86 ± 0.04 a	16.05 ± 0.46 b	29.22 ± 1.30 b	182.92 ± 12.06 c	1.31 ± 0.06 c
	Joly	10.34 ± 0.25 a	0.71 ± 0.02 b	19.46 ± 0.49 a	34.37 ± 1.42 a	229.93 ± 12.16 a	2.08 ± 0.11 a
	Dely	10.51 ± 0.17 a	0.67 ± 0.01 c	15.51 ± 0.32 b	21.13 ± 2.12 c	214.94 ± 5.59 b	1.52 ± 0.10 b
ANOVA							
A	ns	*	ns	*	*	*	
B	ns	*	*	*	*	*	
A × B	ns	*	ns	*	*	*	

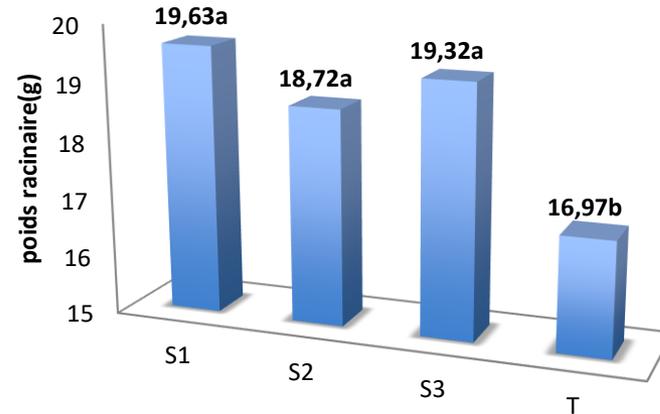
L'étude a montré que l'application de Biofertilizer a un effet significatif sur la croissance des plantes, et le contenu des macroéléments feuilles.

## Effet de la mycorhization sur les paramètres de croissance de la myrtille



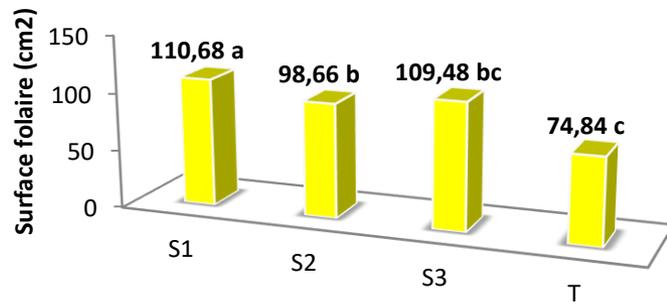
Pr<0.05

28,4%/ témoin



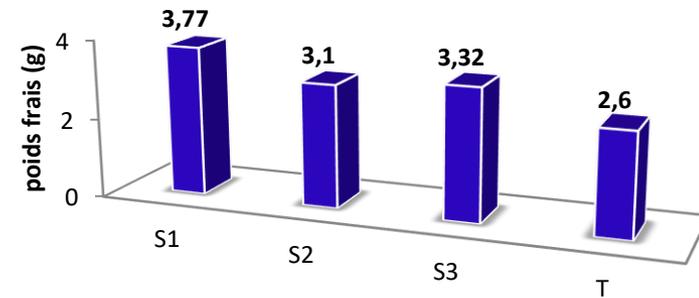
Pr<0.05

15,67 %/ témoin



Pr<0.05

47,88 %/ témoin



Pr<0.05

45 %/ témoin

## Effet de la mycorhization sur les paramètres de croissance de la myrtille



Myrtille mycorhizée sur 1: tourbe+sol; 2: non mycorhizé;

Myrtille Mycorhizée sur 1: tourbe+sol; 2: myrtille non mycorhizée.

## *Conclusion*

- Les études ont montré que l'utilisation de certains micro-organismes du sol comme les champignons mycorhiziens/Bactéries pouvaient stimuler significativement le développement de la plante et diminuer significativement le pH du sol, et les attaques au maladies et ravageurs.
- Il est maintenant largement admis qu'il convient d'utiliser et de valoriser les ressources endémiques de microorganismes symbiotiques dans les agrosystèmes.
- Il faut concevoir un système de culture basé sur la valorisation de la biodiversité locale, afin d'optimiser la productivité et la stabilité des périmètres cultivés au Maroc.

**Merci de votre  
attention**

