

Interactions plantes-microorganismes

Comment allier bonne production primaire et qualité de l'environnement

Sylvie Mazurier

UMR 1347 Agroécologie

INRA-Agrosup-Université de Bourgogne, CMSE, Dijon

Pôle EcoIDur (Ecologie des communautés et systèmes agricoles Durables)
équipe IMR (Interactions Multitrophiques dans la rhizosphère)

Plan

- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance pour la qualité de l'environnement
- Evolution des méthodes d'étude et perspectives

□ Plan

- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

Introduction

- Les plantes partagent le même environnement que les microorganismes depuis l'origine de leur développement, leur évolution est liée
- Première preuve d'interaction (symbiose plante-champignon) datée à environ -400 millions d'années
- Grande diversité des types d'interactions et des mécanismes impliqués
- Décrites et étudiées sur la base de schémas théoriques/ modèles dynamiques plutôt que une base rigide qui associe un type d'organisme à un type d'interaction

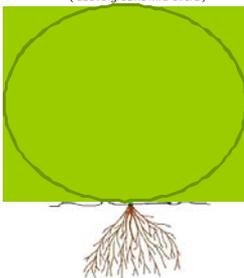
□ Plan

- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

Introduction

Phyllosphère
(above-ground microflora)



□ Colonisation épiphyte plus complexe que l'on pensait avant le développement des études de 'non cultivables'

□ Bactéries -phyllobactéries-

*à la base des trichomes



*au niveau des stomates



*le long des veines foliaires



□ Microorganismes présents en grand nombre sans provoquer de maladies mais point d'entrée de certains pathogènes

- Plan
- Introduction**
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

Introduction

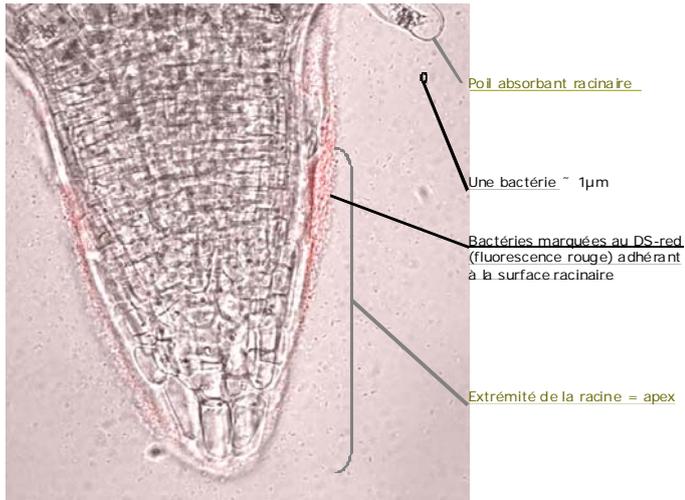
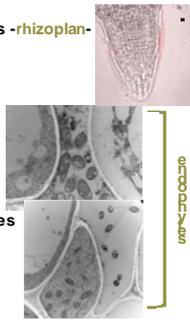
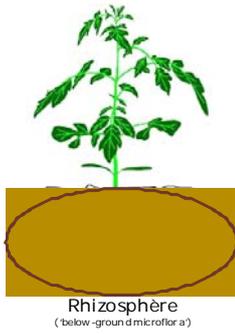
- Zone de développement et d'activité microbienne intense**
- La plante produit des rhizodépôts dont les exsudats racinaires
- Bactéries - rhizobactéries -

*dans le sol rhizosphérique - pas de contact direct-

*à la surface des racines - rhizoplan-

*dans l'apoplasme

*à l'intérieur des cellules



- Plan
- Introduction**
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

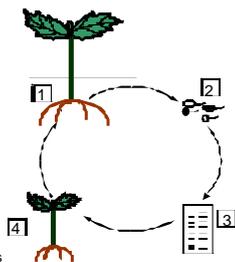
Introduction

- zone d'échanges et d'interactions intenses

- Boucle de rétroaction notion de coût/bénéfice

- La dynamique de ces interactions peut être assimilée à une boucle de rétroaction

- Variations de l'environnement rhizosphérique
- Perception de ces variations par la microflore
- Modifications de la structure, de la diversité et de l'activité de la microflore
- Conséquences de ces modifications sur les plantes

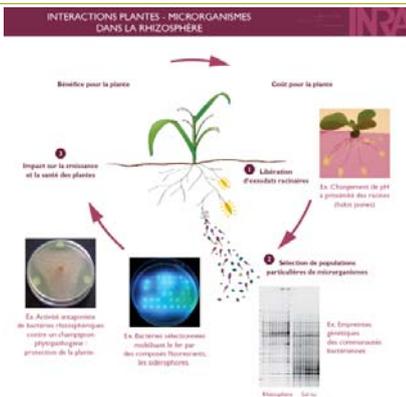


- Plan
- Introduction**
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

Introduction

- Notion de coût/bénéfice



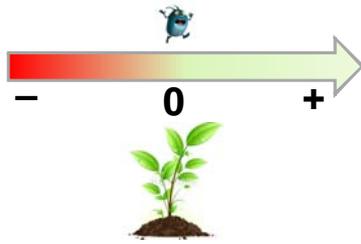
- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

Introduction

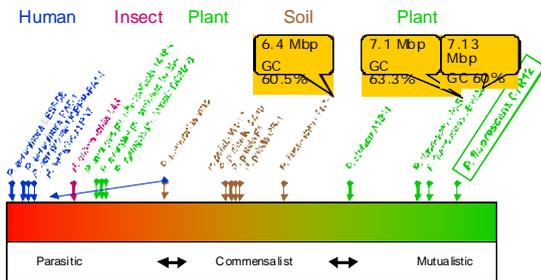
□ Continuum/gradient :

parasitisme – commensalisme – mutualisme



X		Organisme A		
		délétère	neutre	bénéfique
Organisme B	délétère		Amensalisme	Prédation, parasitisme
	neutre	Amensalisme	Neutralisme	Commensalisme
	bénéfique	Prédation, parasitisme	Commensalisme	Symbiose, Mutualisme

Bacteria, Proteobacteria, Gammaproteobacteria, Pseudomonales, *Pseudomonadaceae*, *Pseudomonas*, *Pseudomonas fluorescens* C7R12.



- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

Introduction

□ Les groupes microbiens et les autres microorganismes trouvés dans la rhizosphère : bactéries, actinomycètes, champignons, nématodes, protozoaires, algues et microarthropodes

□ Beaucoup de ces organismes sont des commensaux et effet neutre sur la plante

□ Certains membres de cette communauté microbienne exercent des effets délétères ou bénéfiques sur la croissance et la santé de la plante

□ Les principaux délétères : champignons pathogènes, oomycètes, bactéries, nématodes

□ Les principaux bénéfiques : les champignons mycorhiziens (endo- et ecto-), les bactéries et actinomycètes fixateurs d'azote, et les bactéries et champignons promoteurs de croissance – PGPR/PGPB, Plant Growth Promoting Rhizobacteria/Bacteria

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions directes

Proximité-contact; Rôle essentiel des systèmes membranaires bactériens; capteurs (TCS...), transporteurs membranaires (ABC, TonB dépendants...) systèmes de sécrétion bactériens (I, II, III, IV, V, VI). Mise en place de dialogues moléculaires

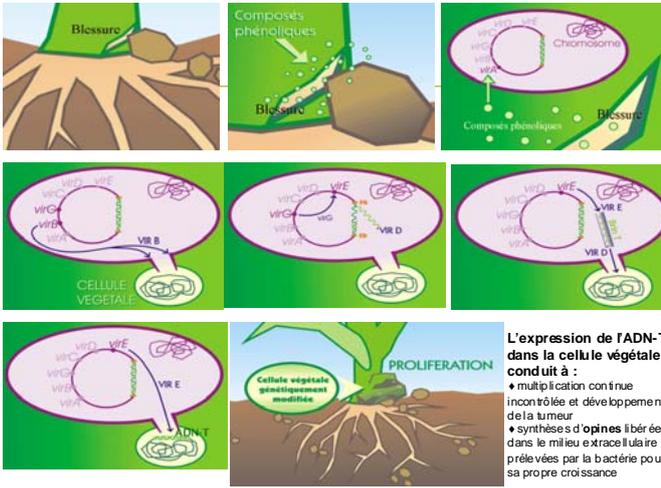
Interactions délétères: pathogénie et développement de maladies

□ Les agents de maladies d'origine tellurique ('soilborne pathogens') deux groupes majeurs pour leur importance économique, *funges* (champignons vrais et oomycètes) et *nématodes*

□ Moins d'importance et d'agents pathogènes d'origine tellurique chez les bactéries et les virus

□ Principales bactéries pathogènes, *Ralstonia solanacearum* (pourriture brune pomme de terre, tomate), *Agrobacterium tumefaciens* (galle du collet), bactéries filamenteuses *Streptomyces* (galle de la pomme de terre...)

Agrobacterium tumefaciens ou la transgénèse naturelle, importance du T4SS



L'expression de l'ADN-T dans la cellule végétale conduit à :
 ♦ multiplication continue incontrôlée et développement de la tumeur
 ♦ synthèses d'opines libérées dans le milieu extracellulaire prélevées par la bactérie pour sa propre croissance

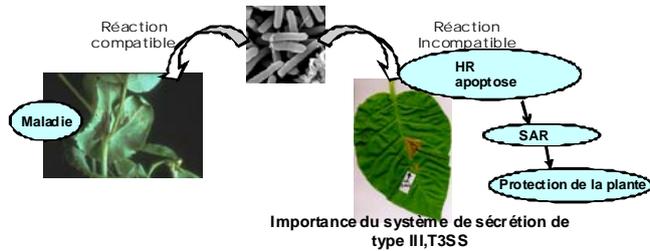
- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions directes

□ *Ralstonia solanacearum* (pourriture brune pomme de terre, tomate), ex modèle d'interaction avec une bactérie pathogène à Gram négatif

- ✓ pathogénie: réactions plante/bactérie compatibles
- ✓ dans les réactions incompatibles, le pathogène ne se développe pas: réaction hypersensible de la plante (HR, Hypersensitivity Reaction) et activation des mécanismes de défense de la plante (immunité)

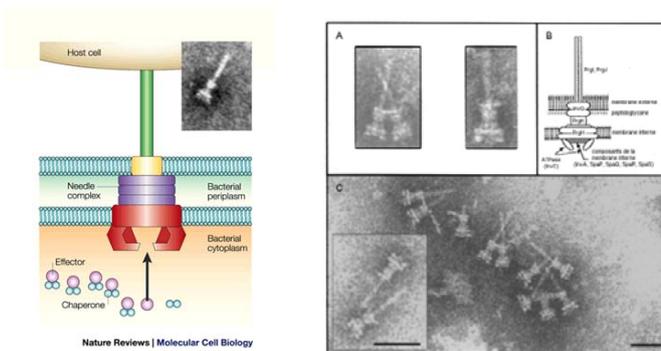


Importance du système de sécrétion de type III, T3SS

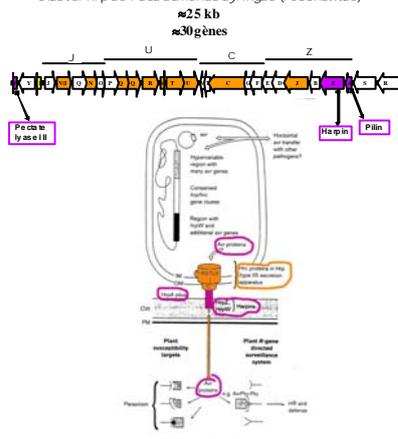
- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions directes



Cluster hrp de *Pseudomonas syringae* (reconstitué)



- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

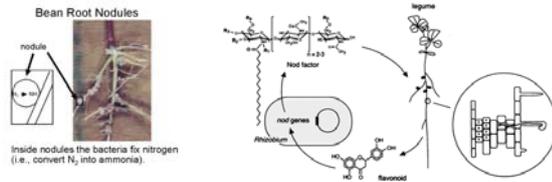
Interactions directes

Interactions bénéfiques

- Faciliter l'accès aux ressources: azote, phosphate, fer, eau...

L'azote

Symbioses fixatrices d'azote *Frankia* et les rhizobia



Les fixateurs libres: *Azospirillum* spp.

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

Interactions directes

Le phosphore

-Phosphore présent dans les sols mais toujours sous forme assimilable par les plantes (minéral inorganique, apatite; formes organiques, inositol phosphate et esters de phosphate) + engrais immobilisés



*Symbioses mycorhiziennes

*PGPR solubilisatrices de phosphates

-Solubilisation par acides organiques (a. citrique, a. gluconique...)

*PGPR minéralisant les formes organiques

-Action de différentes phosphatases

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

Interactions directes

Le fer

4ème élément de l'écorce terrestre, mais peu disponible car en conditions aérées, le fer est sous Fe^{3+} , et aux valeurs de pH compatibles avec les cultures, Fe^{3+} est complexé $Fe(OH)_3$

Iron overloading induces oxidative stress

Fenton reaction

$$Fe^{2+} + O_2^{2-} \rightarrow Fe^{3+} + O_2^{\cdot -}$$

$$Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + HO_2^{\cdot} + H^+$$

$$O_2^{\cdot -} + H_2O_2 \rightarrow O_2 + HO_2^{\cdot} + HO_2^{\cdot}$$

Iron deficiency induces chlorosis symptoms

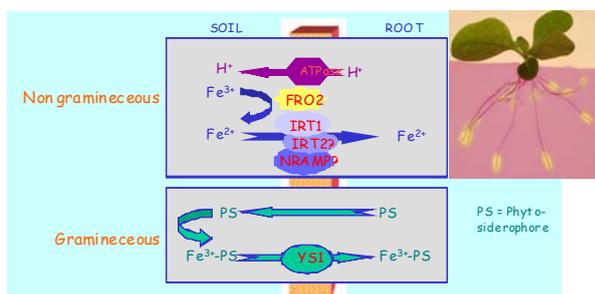
Vansuyt et al.

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

Interactions directes

deux stratégies d'acquisition du fer par les plantes

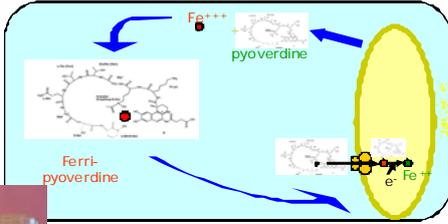


- Plan
- Introduction
- **Interactions directes**
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

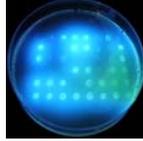
Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions directes

✓ Les bactéries ont développé une stratégie active de récupération du fer dans le milieu par la synthèse de sidérophores et de protéines membranaires spécifiques



□ Grande diversité des molécules (>500)

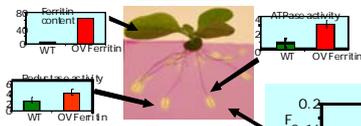
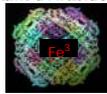


- Plan
- Introduction
- **Interactions directes**
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

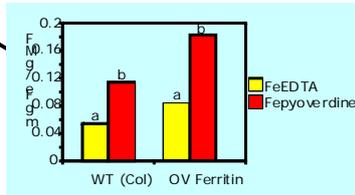
Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions directes

✓ Utilisation d'un mutant d'*Arabidopsis thaliana* surexpresseur de ferritine



✓ Le fer chélaté à la pyoverdine est incorporé efficacement dans la plante

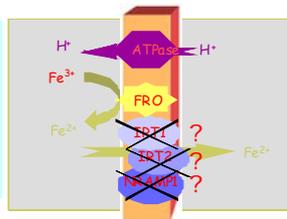
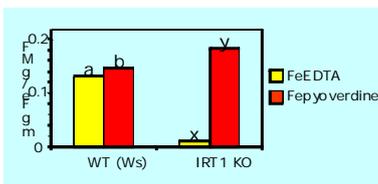


Varsuyt et al. 2007

- Plan
- Introduction
- **Interactions directes**
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions directes



✓ Les transporteurs de fer décrits jusqu'ici ne sont pas impliqués dans le transport de la ferripyoverdine

Varsuyt et al. 2007

✓ Effets indirects en agissant sur la compétition pour le fer entre microorganismes

- Plan
- Introduction
- **Interactions directes**
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions directes

□ Moduler les équilibres hormonaux

✓ Certaines bactéries du sol sont productrices de cytokinines, de gibberellines, d'acide indole acétique (AIA/IAA). Action directe de l'AIA sur la promotion de croissance racinaire

✓ L'éthylène et son équilibre dans les cellules est important sur le développement physiologique de la plante, croissance racinaire, germination, floraison, ...

Certains PGPB ont un effet par la production d'ACC déaminase (1-aminocyclopropane-1-carboxylate déaminase), enzyme qui dégrade un précurseur immédiat de l'éthylène et qui l'empêche d'atteindre des niveaux inhibiteurs de croissance.

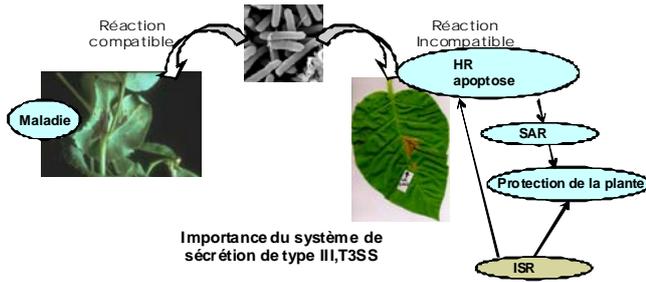
✓ Effets indirects en agissant sur la mise en place des symbioses racinaires qui mettent en jeu des modifications d'équilibres hormonaux

- Plan
- Introduction
- **Interactions directes**
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions directes

□ Stimuler les réactions de défense de la plante



- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Interactions bénéfiques

Etudes des interactions microorganisme-microorganisme dont les conséquences sont bénéfiques pour la croissance et la santé de la plante

Concernent les agents de biocontrôle, de lutte biologique, qui permettent de diminuer l'impact de pathogènes

Concernent les microorganismes capable de favoriser l'effet bénéfique d'autres microorganismes comme les symbiotes

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Différents mécanismes interviennent dans ces interactions entre microorganismes

Compétition pour l'espace et pour les nutriments

Antiobiose

Prédation-parasitisme

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes



- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes



- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

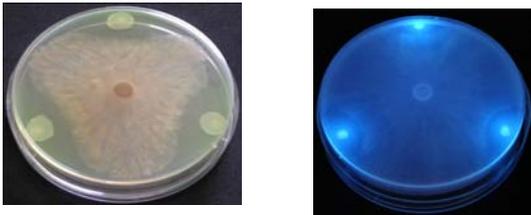
✓ stratégie active de récupération du fer dans le milieu par la synthèse de sidérophores et de protéines membranaires spécifiques

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

On observe un antagonisme dû à la compétition pour le fer



- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

□ Définition originale (Waksman, 1942):

"Les antibiotiques sont des substances chimiques naturelles produites par des microorganismes qui ont le pouvoir d'inhiber la croissance ou même de détruire d'autres microorganismes"

□ Modifiée dans sa compréhension actuelle:

"Les antibiotiques sont des substances chimiques naturelles produites par des microorganismes qui ont le pouvoir d'inhiber la croissance ou même de détruire d'autres des microorganismes"

□ Association à une utilisation thérapeutique:



- Plan
- Introduction
- Antagonisme microbien
- Exemples -Etude de cas
- Autres effets
- Evolution & conséquences

Antagonisme microbien – rôle de l'antibiose

Les antibiotiques *sensus stricto*

- Grande diversité de molécules, de microorganismes d'origine, de mécanismes d'action et de mécanismes de résistance → grande variété d'interactions.

Classe d'antibiotiques	Exemples	Mécanismes de résistance
Aminosides	Kanamycine, gentamicine, tobramycine	3, 4
Ansamycines	Rifampicine	2, 3
7-lactamines	Penicillines, méthicillines, céphalosporines	1, 2, 3, 4, 5
Bléomycine	Bléomycine	7
Chloramphénicol	Chloramphénicol	1, 2, 4
Glycopeptides	Vancomycine	3
Macrolides	Erythromycine, clarithromycine	2, 3, 4
Hydrazides nicotinniques	Isoniazide	9
Quinolones	Acide nalidixique	2, 3
Sulfamides-triméthoprime	Cotrimoxazole	2, 6, 8
Tétracyclines	Tétracycline, minocycline	1, 2, 3(?), 6(?)

1-Réduction de la perméabilité cellulaire. 2-Efflux actif hors de la cellule. 3-Modification de la cible. 4-Détoxication de l'Ab. 5-Sequestration de l'Ab par une protéine. 6-Voie métabolique alternative. 7-Capture de l'antibiotique. 8-Surproduction de cible de l'Ab. 9-Incapacité à activer le prodrogue (qui requiert l'activité d'une catalase cellulaire).

- Plan
- Introduction
- Interactions directes

Interactions plantes-microorganismes

- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions indirectes

- production de 2,4-diacétylphloroglucinol ou 2,4-DAPG **Les *Pseudomonas* du sol**
- productions de phénazines
- productions de pyolutéorine pouvoir fongitoxique efficace contre les oomycètes, notamment *Pythium ultimum*
- productions de pyrrolnitrine, Ce métabolite très actif a également connu un usage médical pour le traitement des mycoses cutanées tandis qu'un dérivé de la molécule a été développé comme fongicide agricole (*fludioxonil*), actif dans le contrôle de *R. solani*, *V. dahliae*, *G. graminis* et *F. oxysporum*.



Plus d'autres moins étudiés: lipopeptides cycliques (viscosianmide, tensine et amphisine, ...)

- Plan
- Introduction
- Antagonisme microbien
- Exemples -Etude de cas
- Autres effets
- Evolution & conséquences

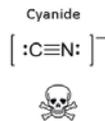
Antagonisme microbien – rôle de l'antibiose

Le cyanure d'hydrogène (HCN)

- Production de biosurfactants (lipopeptides).
- Production d'HCN par certaines souches de bactéries appartenant au genre *Pseudomonas*.

La production de HCN par les *Pseudomonas* est impliquée dans la suppression d'agents pathogènes comme *Thielaviopsis basicola*, *Septoria tritici* et *Puccinia recondita*.

Le composé agit directement sur les cellules de l'agent pathogène en bloquant la cytochrome oxidase dans la chaîne respiratoire.



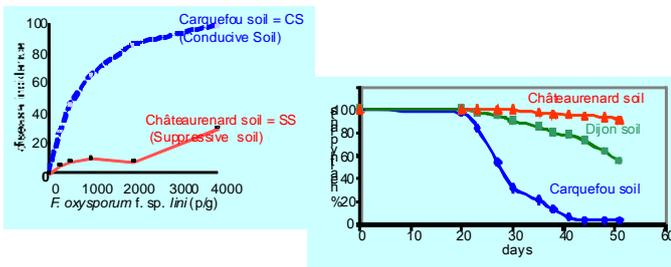
- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

Interactions indirectes

Exemple des sols naturellement résistants aux maladies = plusieurs types de mécanismes associés

- Certains sols sont connus pour leur résistance naturelle aux maladies d'origine tellurique (natural soil suppressiveness)



- Il existe un continuum entre résistance et sensibilité (conductiveness)

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Beet cyst nematode	<i>Heterodera schachtii</i>
Bacterial wilt	<i>Ralstonia solanacearum</i>
Root rot of avocado	<i>Phytophthora cinnamomi</i>
Root rot of banana	<i>Cylindrocladium</i>
Root rot of pea	<i>Aphanomyces euteiches</i>
Root rot of several plant species	<i>Pythium</i>
Root rot of several plant species	<i>Rhizoctonia solani</i>
Root rot of tobacco	<i>Thielaviopsis basicola</i>
Scab of potato	<i>Streptomyces scabies</i>
Take-all of wheat	<i>Gaeumannomyces graminis</i> var. <i>Tritici</i> =Ggt
Wilt of many plant species	<i>Fusarium oxysporum</i>

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Types de sols résistants

Baker and Cook (1974) proposent types de sols résistants:

- le pathogène ne s'établit pas,
- il s'établit mais ne provoque pas la maladie,
- il s'établit et cause d'abord la maladie mais la gravité de la maladie diminue lorsque la même culture est maintenue.

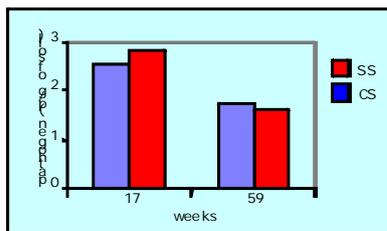
- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Types de sols résistants

2nd type: sols résistants aux fusarioses vasculaires



Après introduction, un inoculum de *F. oxysporum* conserve une densité similaire dans les sols résistants (SS) et dans les sols sensibles (CS).

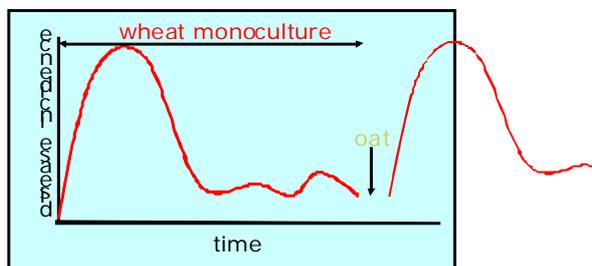
- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Types de sols résistants

3^{ème} type: sols résistants au piétin échaudage



La résistance à la maladie est acquise si le blé est cultivé en monoculture sur plusieurs années, elle est perdue si la monoculture est interrompue.

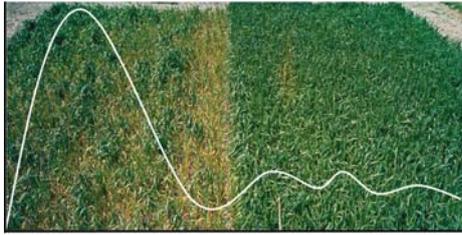
- Plan
- Introduction
- Interactions directes

Interactions plantes-microorganismes

Interactions indirectes

- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

□ Interactions indirectes



- Plan
- Introduction
- Interactions directes

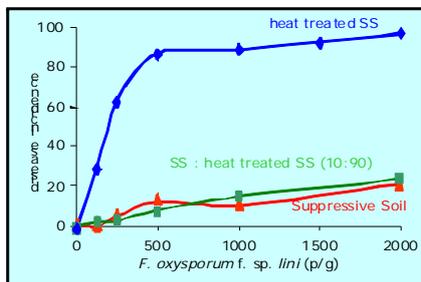
Interactions plantes-microorganismes

Interactions indirectes

- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

□ Interactions indirectes

Mise en évidence de la nature microbienne de la résistance



La résistance disparaît après un traitement biocide comme un traitement à la chaleur.
L'effet est restauré en mélangeant une petite quantité de sol résistant au sol traité (ici 'pied de cuve' 10 pour 90).

- Plan
- Introduction
- Interactions directes

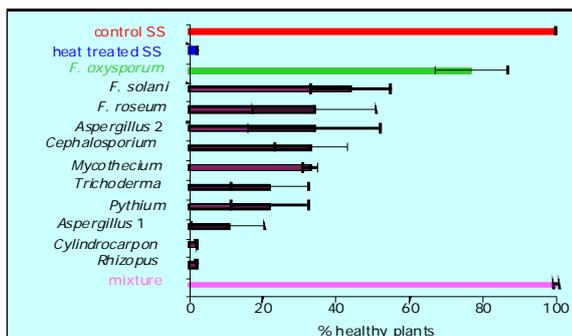
Interactions plantes-microorganismes

Interactions indirectes

- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

□ Interactions indirectes

Mise en évidence de groupes microbiens impliqués



Mise en évidence de l'importance des *F. oxysporum* non pathogènes dans la fusariose vasculaire.

- Plan
- Introduction
- Interactions directes

Interactions plantes-microorganismes

Interactions indirectes

- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

□ Interactions indirectes

Mise en évidence de groupes microbiens impliqués

En suivant des stratégies de même nature, mise en évidence de l'importance des *Pseudomonas* spp. fluorescents dans différentes résistances:

- Pourriture noire des racines de tabacs
- Piétin échaudage sur blé
- Fusarioses vasculaires

Dans le cas de la **résistance des sols au piétin échaudage**, deux stratégies ont été suivies pour évaluer le rôle de l'antibiose:

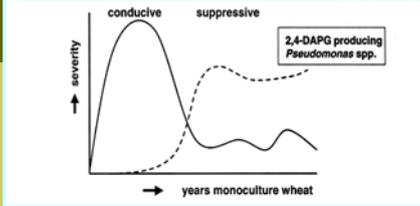
- Analyse de métabolites impliqués dans l'antagonisme de souches isolées contre Ggt et identification des gènes correspondants ⇒ démonstration du rôle des phenazines dans l'antagonisme de *P. fluorescens* 2-79 contre Ggt

- Comparaison, en SS & CS, de la densité de populations portant des gènes codant différents antibiotiques et recherche directe de la présence des molécules ⇒ démonstration du rôle du 2,4-DAPG dans la résistance acquise au piétin échaudage

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

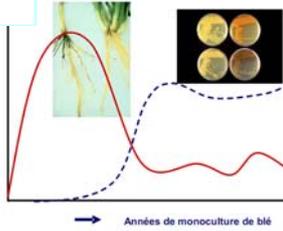
Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes



Mise en évidence de groupes microbiens impliqués

La monoculture de blé en présence de l'agent pathogène Ggt favorise le développement des populations antagonistes de *Pseudomonas* spp. fluorescents produisant du 2,4-DAPG

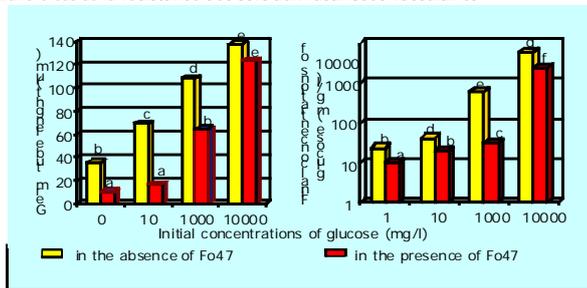


- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Dans le cas de la **résistance des sols aux fusarioses vasculaires**

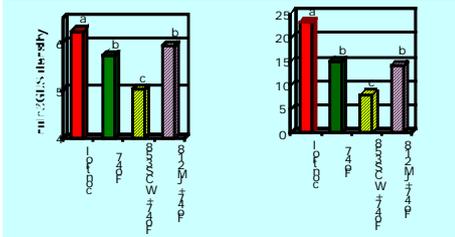


L'antagonisme des *F. oxysporum* non pathogènes dans la fusariose vasculaire est lié à la compétition pour le carbone.

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

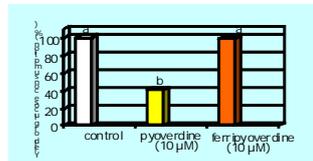
Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes



Les *Pseudomonas* augmentent l'antagonisme des *F. oxysporum* non pathogènes, cet effet est attribué à la synthèse de sidérophores.

La compétition pour le fer induite par la synthèse de pyoverdine diminue l'efficacité du métabolisme du carbone chez le pathogène



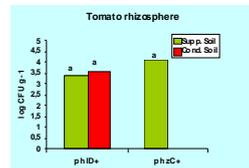
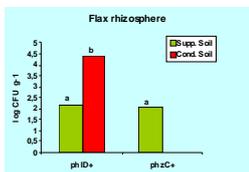
- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Density of fluorescent pseudomonads harboring genes encoding DAPG and phenazine in SS & CS

- *phlD*+ pseudomonads were not detected in any of the two bulk soils
- *phzC*+ pseudomonads were detected only in the suppressive bulk soil (3.9 log CFU g⁻¹)



phzC+ pseudomonads were only detected in only in the Châteaurenard suppressive soil

- Plan
- Introduction
- Interactions directes

Interactions plantes-microorganismes

- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

- **Interactions indirectes**



- Plan
- Introduction
- Interactions directes

Interactions plantes-microorganismes

- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

- **Interactions indirectes**



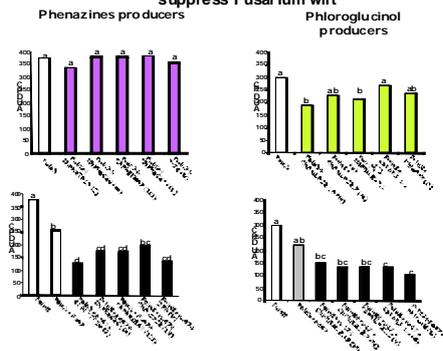
- Plan
- Introduction
- Interactions directes

Interactions plantes-microorganismes

- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

- **Interactions indirectes**

Diversity of fluorescent pseudomonads harboring genes encoding DAPG and phenazine in selection of representative isolates and evaluation of their ability to suppress Fusarium wilt

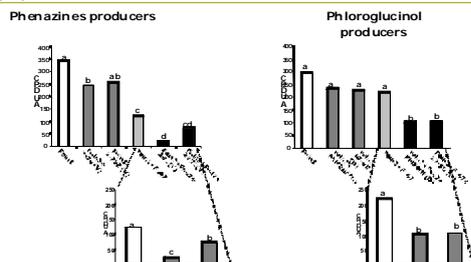


- Plan
- Introduction
- Interactions directes

Interactions plantes-microorganismes

- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

- **Interactions indirectes**

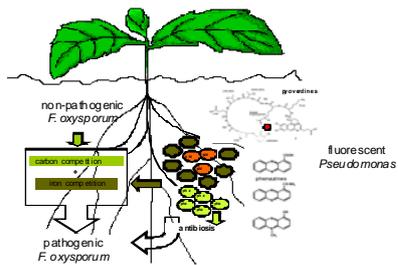


Collectively, these results suggest that **phenazine-producing pseudomonads could provide a substantial contribution to the natural suppressiveness to Fusarium wilt diseases** in combination with other microorganisms (e.g. non-pathogenic *Fusarium oxysporum*) that play a key role in Fusarium wilt suppressiveness.

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

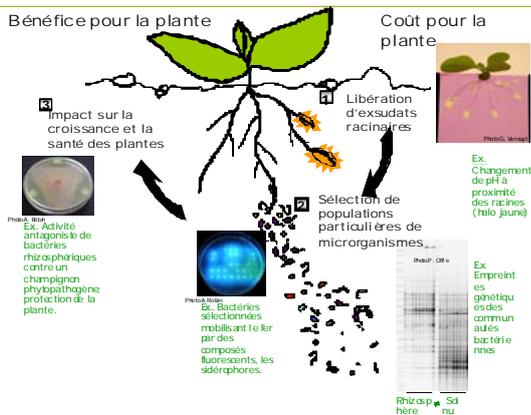
Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes



Mazurier et al. ISMEJ (2009) 3977-991.

Interactions plante-microorganismes dans la rhizosphère



- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Certains microorganismes capable de favoriser l'effet bénéfique d'autres microorganismes comme les symbiotes

Certains bactéries sont capables de favoriser la nodulation dans la mise en place de la symbiose fixatrice d'azote en modulant la production de phytohormones, en favorisant la production de flavonoïdes par les plantes...

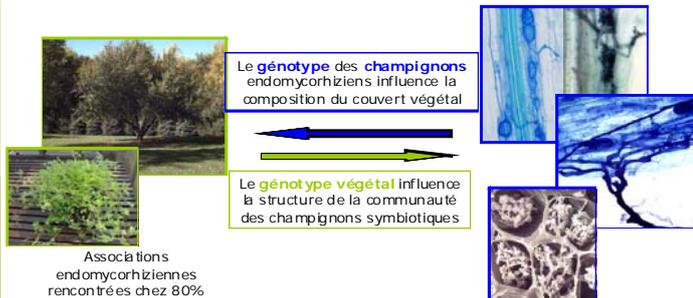
Certains bactéries sont capables de favoriser la mise en place et le fonctionnement des mycorhizes. Elles sont qualifiées de MHB (Mycorhization Helper Bacteria)

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Symbiose endomycorhizienne (400 millions d'années)



Co-évolution des génotypes végétaux, fongiques et bactériens?

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Différents mécanismes connus impliqués dans les effets des MHB

Les MHB peuvent favoriser l'établissement de la symbiose puis son fonctionnement :

- germination des spores
- développement mycélium dans la phase saprophyte du champignon
- développement des racines...

Les bactéries mécanismes connus mis en jeu sont globalement similaires à ceux développés pour les interactions directes avec la plante.

En favorisant la croissance et le développement du champignon symbiotique et/ou celui de la plante, leur association est favorisée.

De nouveaux mécanismes mis en évidence

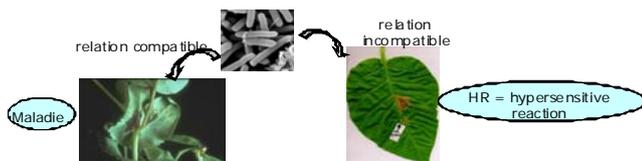
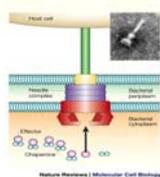
- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

- SST3 permettent l'injection de protéines effectrices de la cellule de procaryote dans la cellule d'eucaryote.

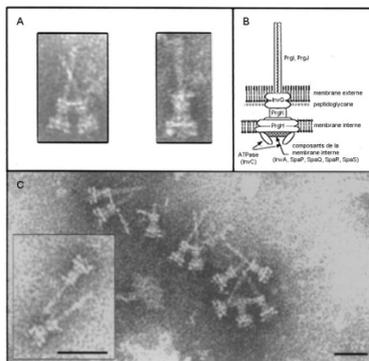
- SST3 ont été décrits comme impliqués dans:
 - ✓ la pathogénie, lors de relations compatibles plantes/bactéries
 - ✓ la réaction d'hypersensibilité de la plante (HR), lors de relations incompatibles.



- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes



- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

- Jusqu'à un passé récent, les SST3 étaient uniquement décrits chez les *Pseudomonas* pathogènes.

- Les SST3 apparaissent également être fortement représentés chez les *Pseudomonas* saprophytes, en particulier chez ceux associés à la plante.

	phytopathogènes	saprophytes	
		sol	plante
souches avec <i>hrcRST</i>	100%	35%	59%

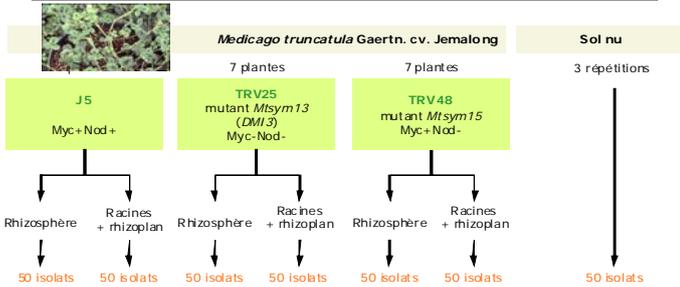
- Plan
- Introduction
- Interactions directes

Interactions plantes-microorganismes

- Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions indirectes

Sol de Châteaurenard (35 jours)



350 isolats cultivables de *Pseudomonas* spp. fluorescents

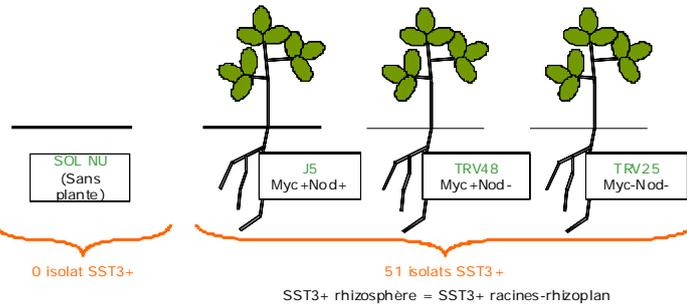
- Plan
- Introduction
- Interactions directes

Interactions plantes-microorganismes

- Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions indirectes

Confirmation de l'enrichissement des *Pseudomonas* spp. fluorescents SST3+ dans la rhizosphère



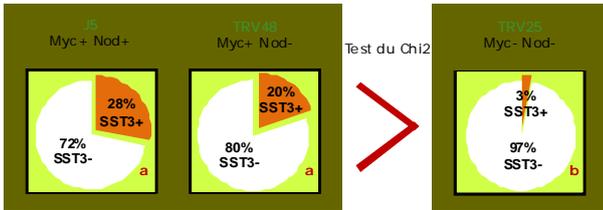
- Plan
- Introduction
- Interactions directes

Interactions plantes-microorganismes

- Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions indirectes

Distribution des isolats SST3+ selon le génotype des plantes



Aucune influence de la symbiose fixatrice d'azote

TRV25 = mutant qui bloque la pénétration des hyphes du CMA dans la racine

Colonisation des racines par les CMA nécessaire (symbiose mycorhizienne fonctionnelle)

- Plan
- Introduction
- Interactions directes

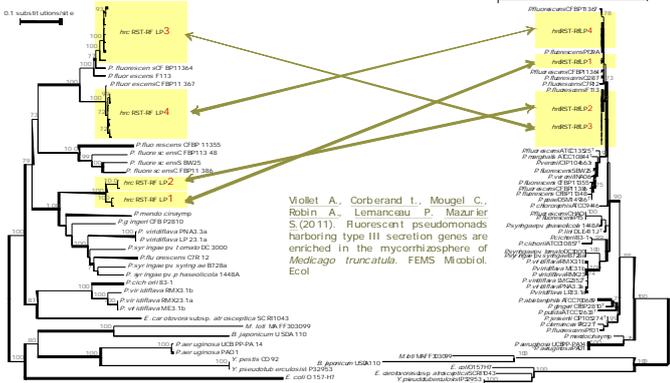
Interactions plantes-microorganismes

- Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions indirectes

Analyse des séquences *hrcRST*

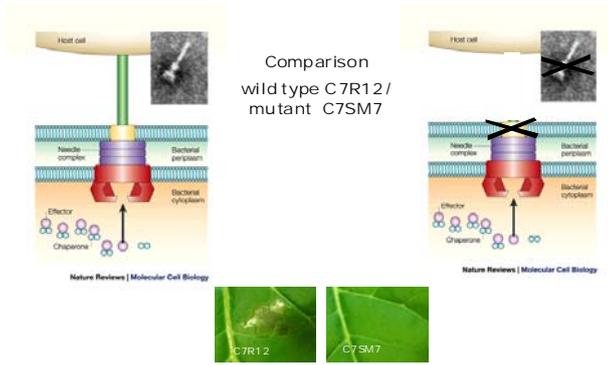
Analyse des séquences d'ARNr16S



- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes



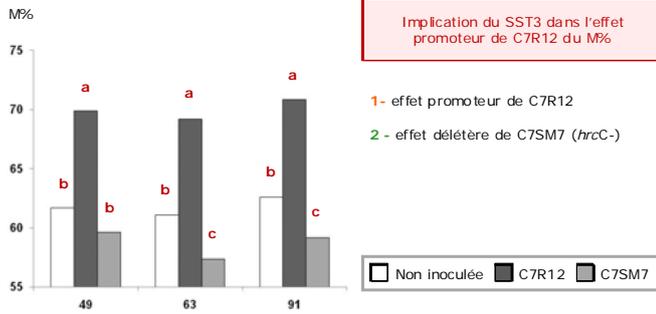
- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

Test PLSD de Fisher, 5%

Intensité de colonisation des racines par les champignons mycorhizogènes (M%)



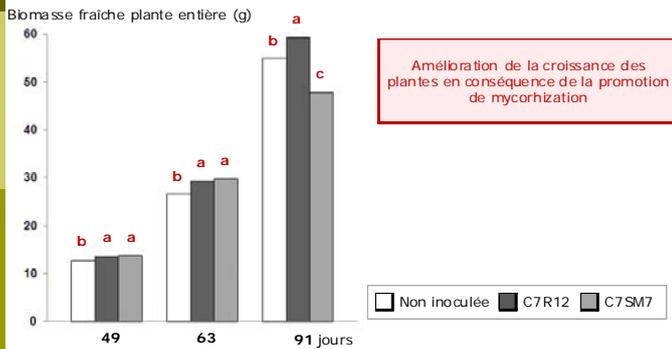
- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- **Interactions indirectes**
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Interactions indirectes

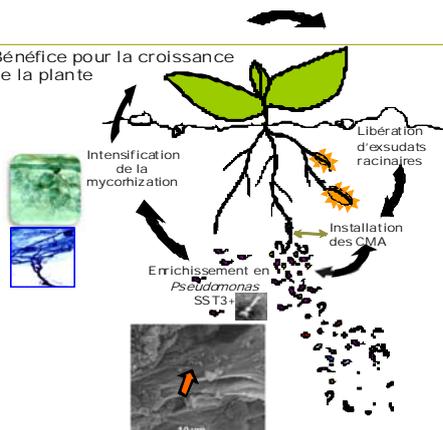
Test PLSD de Fisher, 5%

Croissance de la plante



Interactions plante-microorganismes dans la rhizosphère

Bénéfice pour la croissance de la plante



- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

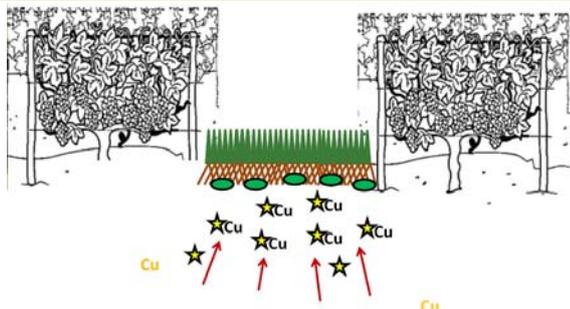
Interactions plantes-microorganismes

□ Optimiser les interactions bénéfiques entre plante et microorganismes (effets de biofertilisation, biostimulation, bioprotection) doit permettre de mieux gérer les intrants.

□ Amélioration de la phytoremédiation pour la dépollution des sols

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution & perspectives

Interactions plantes-microorganismes



Shirley et al., 2011

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement

Interactions plantes-microorganismes

Evolution des études & perspectives

□ Grande diversité des types d'interactions et grande diversité dans les mécanismes responsables.

□ *In vivo* les effets biologiques globaux observés sont la résultante d'un ensemble d'interactions.

□ *In vitro* les approches ont été plutôt focalisées sur des couples d'organismes ou un type d'interaction : travail sur des organismes modèles à l'échelle des interactions cellulaires et moléculaires et sur des populations définies de microorganismes

□ Nouvelles perspectives apportées par le développement de la génomique et le développement des méthodes d'études de communautés microbiennes ne nécessitant pas d'isoler et de cultiver les microorganismes

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement

Interactions plantes-microorganismes

Evolution des études & perspectives

OPEN ACCESS Freely available online

PLoS GENETICS

Comparative Genomics of Plant-Associated *Pseudomonas* spp.: Insights into Diversity and Inheritance of Traits Involved in Multitrophic Interactions

Joyce E. Loper^{1,2*}, Karl A. Hassan³, Dmitri V. Mavrodji¹, Edward W. Davis II¹, Chee Kent Lim³, ...

Abstract

We provide here a comparative genome analysis of ten strains within the *Pseudomonas fluorescens* group including seven new genomic sequences. These strains exhibit a diverse spectrum of traits involved in biological control and other multitrophic interactions with plants, microbes, and insects. Multilocus sequence analysis placed the strains in three sub-clades, which was reinforced by high levels of synteny, size of core genomes, and relatedness of orthologous genes between strains within a sub-clade. The heterogeneity of the *P. fluorescens* group was reflected in the large size of its pan-genome, which makes up approximately 54% of the pan-genome of the genus as a whole, and a core genome representing only 45–52% of the genome of any individual strain. We discovered genes for traits that were not known previously in the strains, including genes for the biosynthesis of the siderophores actinobactin and pseudomonine and the antibiotic 2-heptyl-5-propyl-alkylresorcinol; novel bacteriocins; type II, III, and VI secretion systems; and insect toxins. Certain gene clusters, such as those for two type III secretion systems, are present only in specific sub-clades, suggesting vertical inheritance. Almost all of the genes associated with multitrophic interactions map to genomic regions present in only a subset of the strains or unique to a specific strain. To explore the evolutionary origin of these genes, we mapped their distributions relative to the locations of mobile genetic elements and repetitive extragenic palindromic (REP) elements in each genome. The mobile genetic elements and many strain-specific genes fall into regions devoid of REP elements (i.e., REP deserts) and regions displaying atypical tri-nucleotide composition, possibly indicating relatively recent acquisition of these loci. Collectively, the results of this study highlight the enormous heterogeneity of the *P. fluorescens* group and the importance of the variable genome in tailoring individual strains to their specific lifestyles and functional repertoire.

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution des études & perspectives

Interactions plantes-microorganismes



Available online at www.sciencedirect.com

SciVerse ScienceDirect

Current Opinion in
Plant Biology

Challenges and progress towards understanding the role of effectors in plant-fungal interactions

Maryam Rafiqi¹, Jeffrey G Ellis², Victoria A Ludowici³, Adrienne R Hardham³ and Peter N Dodds²

Both mutualistic and biotrophic pathogenic fungi rely on living host plants for growth and reproduction and must modify host cell structure and function for successful infection. The deployment of a diverse set of secreted virulence determinants referred to as 'effectors', many of which are directly delivered into the host cell, is postulated to be the key to host infection. This review provides a snapshot of the current progress in fungal effector biology. Recent genome sequencing of rust and powdery mildew obligate biotrophs has provided insight into the repertoires of potential effectors of these highly specialised pathogens. Identification of the first host-translocated effectors from mutualistic fungi has revealed that these fungi also manipulate host cells through effectors. The biological activities of some fungal effectors are just beginning to be revealed, while much uncertainty still surrounds the mechanisms of transport into host cells.

Current Opinion in Plant Biology 2012, 15:477-482

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution des études & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Les modes d'action principalement développés ou envisagés jusqu'ici:

✓ la sélection végétale, création de nouvelles variétés

✓ Sélection microbienne et inoculation (*Bradyrhizobium japonicum* sur le soja, champignons mycorhizogènes, agents de lutte biologique...)

✓ le traitement par molécules bio-actives (facteurs *nod*, éliciteurs de mécanismes de défense...)

- Plan
- Introduction
- Interaction directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution des études & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

□ Les études d'agécologie d'interactions entre communautés vont permettre d'élargir les possibilités:

Développement des études basées directement sur les acides nucléiques extraits des sols

- de communautés globales (bactéries, champignons...)
- de communautés fonctionnelles (dénitrifiants, producteurs d'antibiotiques...)
- de communautés spécifiques (groupe taxonomique particulier bactérien...)

But: description de l'évolution de ces communautés en fonction de la variation de facteurs environnementaux – conditions pédo-climatiques, pratiques culturales-

Objectif: optimiser les effets bénéfiques de la microflore des sols

Identifier les facteurs environnementaux importants et définir des seuils critiques/Faciliter l'identification de liens entre structure et fonction des communautés / Proposer de nouveaux outils d'évaluation de la qualité des sols

Identifier des conditions environnementales propices au développement et/ou à l'installation de populations microbiennes favorables à la croissance et à la santé des plantes

- Plan
- Introduction
- Interactions directes
- Interactions indirectes
- Importance sur la qualité de l'environnement
- Evolution des études & perspectives

Interactions plantes-microorganismes

Projet européen 58 BIOFUTUR 326 • NOVEMBRE 2011



EcoFINDERS
Caractériser la biodiversité et le fonctionnement des sols en Europe
23 partenaires de 10 pays européens et la chine



Après l'air et l'eau, la Commission européenne souhaite mettre en oeuvre une politique de gestion durable du précieux patrimoine que constituent les sols à travers une directive cadre. Une volonté qui implique des connaissances scientifiques et opérationnelles sur la biodiversité et le fonctionnement des sols.

EcoFINDERS

- on quelques chiffres
- ▶ Durée : 4 ans (2011 à 2014)
 - ▶ Budget : Financé à hauteur de 7 M€ par le 7^e Programme cadre européen
 - ▶ Plus de 200 chercheurs
 - ▶ 10 pays européens partenaires : France, Suède, Royaume-Uni, Danemark, Allemagne, Pays-Bas, Irlande, Italie, Portugal, Slovaquie, Slovinie

Pour en savoir plus
www.ecofinders.eu
 Coordinateur d'EcoFINDERS : Philippe LEMANCEAU
 UMR Agrobiologie Agropar/INRA/Université de Bourgogne BP 86510 21065 Dijon cedex France