

Microorganismes du sol: des outils biologiques pour satisfaire les objectifs de développement durable



Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes
UMR IRD-INRA-CIRAD-SupAgro-Université de Montpellier
TA A-82/J, Campus International de Baillarguet, 34398 Montpellier Cedex 5, France
Tel: 04 67 59 38 82. Fax: 04 67 59 38 02. <http://umr-lstm.cirad.fr/>



[Comité Scientifique Français de
la Désertification](#)

Ecologie microbienne:

Rôle des communautés microbiennes dans la qualité des sols



2015

Année internationale
des sols

LST&M
LABORATOIRE
DES SYMBIOSES
TROPICALES & MÉDITERRANÉENNES

CONTEXTE



- Une **agriculture durable** qui respecte ses ressources et son environnement
- **Agroécologie** pour répondre aux enjeux agronomiques et environnementaux
 - Réduire/optimiser l'utilisation des intrants (fertilisants, pesticides, eaux)
 - Améliorer les performances et la stabilité des agroécosystèmes
 - Développer des modèles agricoles socialement porteurs de développement et d'équité

Repose sur **l'activation de processus écologiques dans les agrosystèmes** pour fournir des services écosystémiques et accroître la production.

Cette activation est basée sur la **mobilisation d'organismes vivants** (plantes, faune, micro-organismes) à travers les pratiques agricoles.

Les principales fonctions dans sols et agro-systèmes

- **Participation à la structuration du sol** (micro et macroagrégat, → flux air et eau, support d'ancrage → lutte contre l'érosion)



- **Participation aux cycles biogéochimiques:** Minéralisation des résidus, et des matières organiques du sol, synthèse de la MO des sols, cycles C, N, P, S, Fe, ETM,
→ Nutrition, Energie, Recyclage

- **Contribution à la croissance et à la santé des plantes:**

- Associations symbiotiques: augmentation de la disponibilité en éléments, fixateurs d'azote, mycorhizes
- Associations bénéfiques: PGPR (sol suppresseur)

- **Fonctions épuratrices des sols** (eau, air):
Dégradation d'hydrocarbures, pesticides



- **Réservoir de biodiversité:** (adaptation, résilience & stabilité (concept « assurance écologique » Loreau, 2000), produits naturels)

Combien d'individus ?

1 g sol



1 hectare



❖ Bactéries

100 millions à 1 milliard

2500 kg C



❖ Champignons

1 à 3 mètres de mycélium

3500 kg C



❖ Protozoaires

Quelques millions

250 kg C



❖ Nématodes

1000 à 2000



❖ Arthropodes

Jusqu'à 100

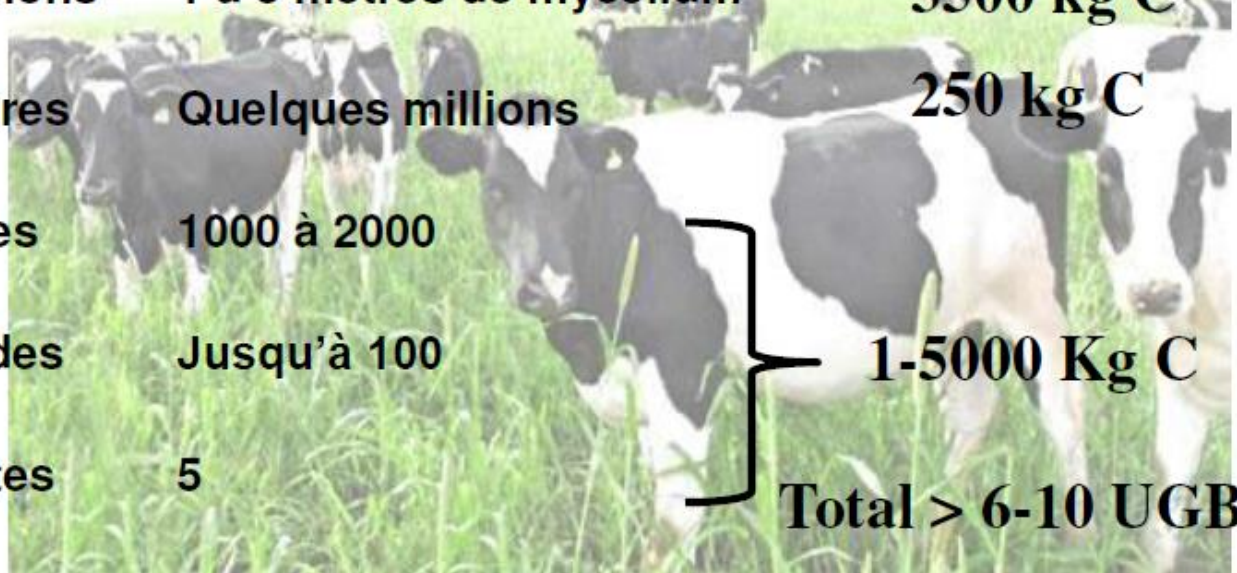


❖ Oligochètes

5

1-5000 Kg C

Total > 6-10 UGB





Bactéries (95% hétérotrophe dans un sol)

- > 10 000 espèces de bactéries décrites
- 1% des espèces microbiennes prospectées

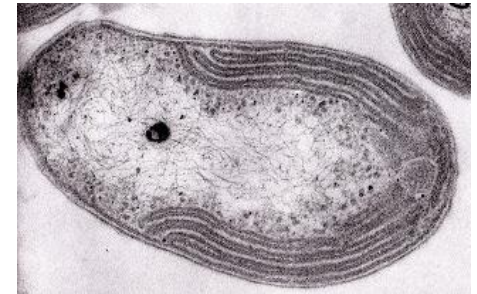
**Groupes
d'espèces**



Bacillus mycoïdes



***Streptomyces
coelicolor* (géosmine)**



***Nitrobacter
winogradskyi***

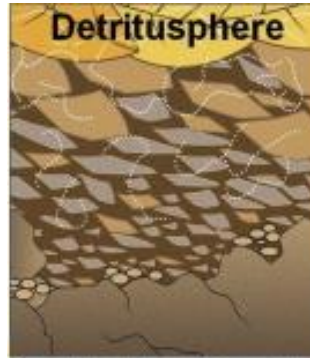
**Groupes
fonctionnels**



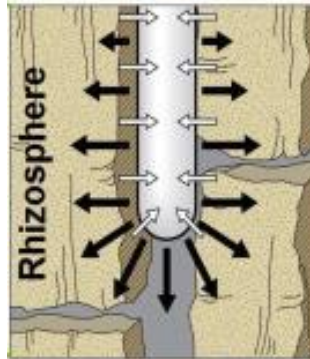
Biological Soil Crusts Stabilize the Soil



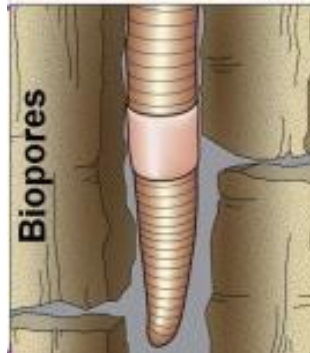
University of California
(cyanobacteria, fungi, algae...)



Résidusphère



Rhizosphère



Drilosphère

Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015

Des **hots-spots d'activités**
(env. 90% de l'activité biologique
du sol)

...Mycorrhizosphère

Volume of soil influenced by mycorrhizae

Spermosphere

Volume of soil influenced by germinating seed

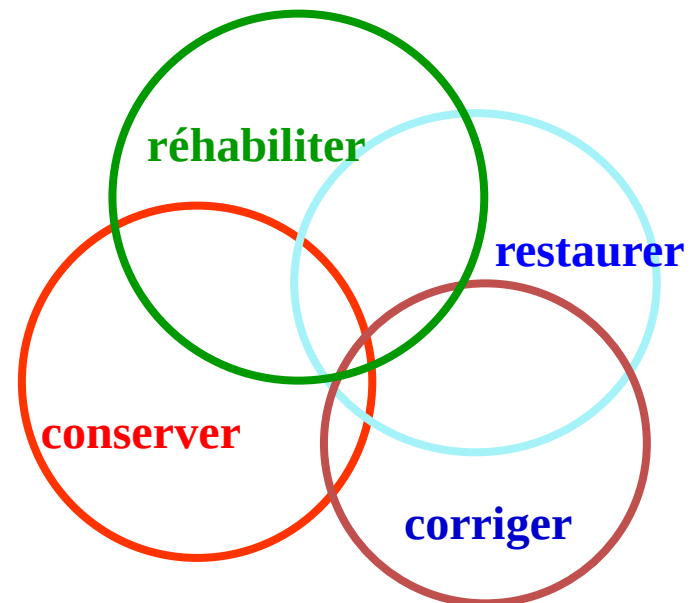
GESTION DE LA QUALITÉ DES SOLS

DÉFINITION de la qualité (ou santé) des sols:

Aptitude d'un sol à fonctionner dans les limites d'un écosystème naturel ou anthropisé, afin de **soutenir la production végétale et animale, de conserver ou d'améliorer la qualité de l'eau et de l'air et de promouvoir la santé des organismes vivants** (Karlen *et al.*, 1997).

GESTION

Notion relative selon les objectifs de production et environnementaux





Gestion de la composante mycorhizienne des sols pour améliorer durablement la productivité des agrosystèmes

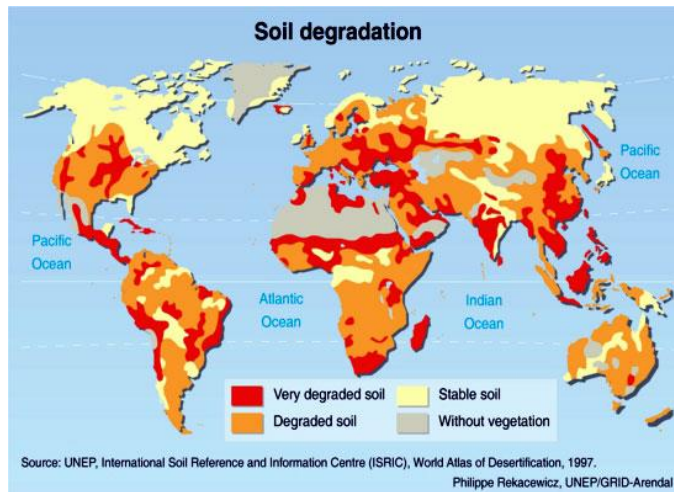
Par Robin DUPONNOIS

Directeur de Recherche à l'IRD

Directeur du Laboratoire des Symbioses Tropicales & Méditerranéennes

Membre-Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France

CONTEXTE



Quelques chiffres concernant la désertification (CSFD):

- ✓ Le tiers de l'humanité est touché.
- ✓ 40 % des terres émergées sont menacés dont 66 % sont déjà affectés.
- ✓ Tous les continents sont concernés : 37 % des terres arides sont en Afrique, 33 % en Asie, 14 % en Australie. Il en existe aussi en Amérique et sur les franges méridionales de l'Europe.
- ✓ Si rien n'est fait, 10 millions d'hectares de terres arables seront perdus chaque année, soit 1/5 de la France.

Quelques chiffres concernant la déforestation (FAO):

- ✓ Chaque année, 13 millions d'hectares de forêts sont détruits
- ✓ 18% de la forêt amazonienne a disparu en 40 ans
- ✓ 1,2 milliard de personnes vivent grâce aux richesses des forêts
- ✓ La destruction des forêts est responsable de 20% des émissions de gaz à effet de serre actuelles.

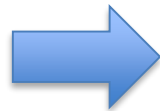


CONSTAT

Pour nourrir une population mondiale, en pleine expansion, nous n'avons pas d'autre choix que d'intensifier les cultures. Mais les agriculteurs sont confrontés à des contraintes sans précédent. Il leur faudra donc apprendre à produire plus avec moins (FAO, 2011)

PRODUIRE PLUS AVEC MOINS

UNE AGRICULTURE RESPECTUEUSE DES ÉCOSYSTÈMES POUR ATTEINDRE LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE



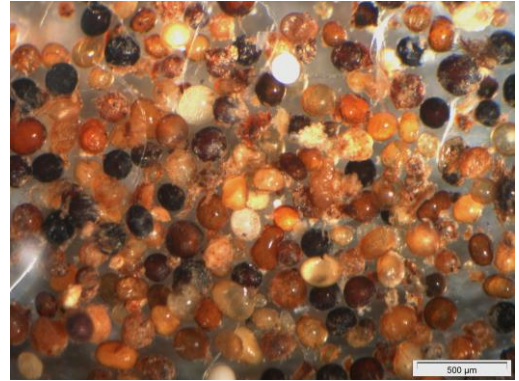
**LA SANTÉ DES SOLS: DES TECHNOLOGIES
POUR PRODUIRE PLUS AVEC MOINS**



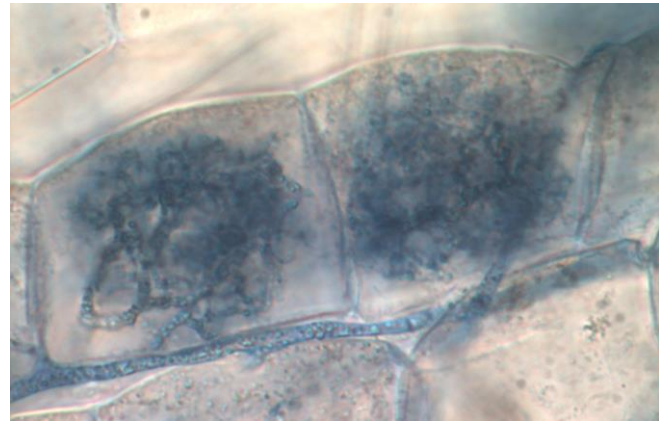
Symbioses mycorhiziennes arbusculaires

- Les plus anciennes (400 MA)
- 70% des plantes supérieures
- Glomeromycètes
- Exploration du sol, nutrition P, eau
- Symbiose intraracinaire et intracellulaire
- Non cultivables

Dans le sol



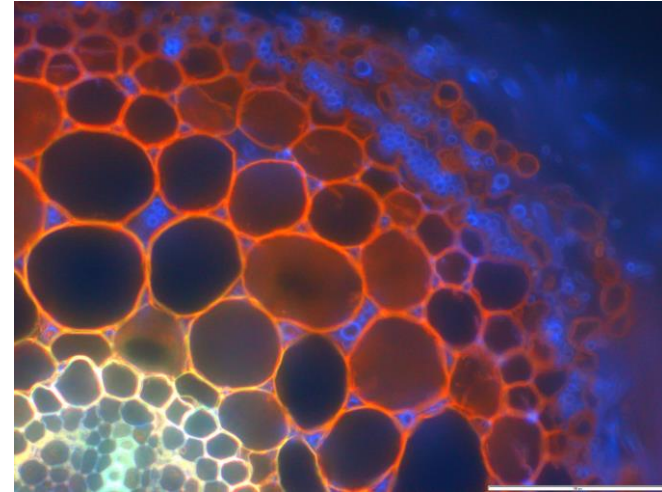
Dans la plante



LES MODÈLES D'ÉTUDE

Symbioses ectomycorhiziennes

- Environ 130 MA
- Principalement des ligneux tempérés et tropicaux
- Ascomycètes et Basidiomycètes
- Exploration du sol, nutrition P, eau
- Symbiose intraracinaire et intercellulaire
- Parfois cultivables

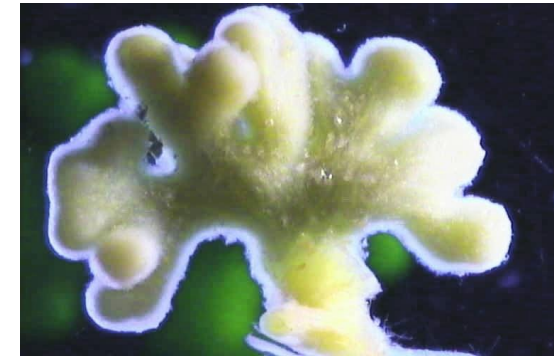


LES MODÈLES D'ÉTUDE

Symbioses fixatrices d'azote (nodule)

Environ 60 MA Légumineuses Partenaires bactériens

- *Rhizobium* (alpha)
- *Mesorhizobium* (alpha)
- *Ensifer* (alpha)
- *Bradyrhizobium* (alpha)
- *Methylobacterium* (alpha)
- *Azorhizobium* (alpha)
- *Neorhizobium* (alpha)
- *Phyllobacterium* (alpha)
- *Aminobacter* (alpha)
- *Ochrobactrum* (alpha)
- *Devosia* (alpha)
- *Shinella* (alpha)
- *Burkholderia* (beta)
- *Cupriavidus* (beta) ...

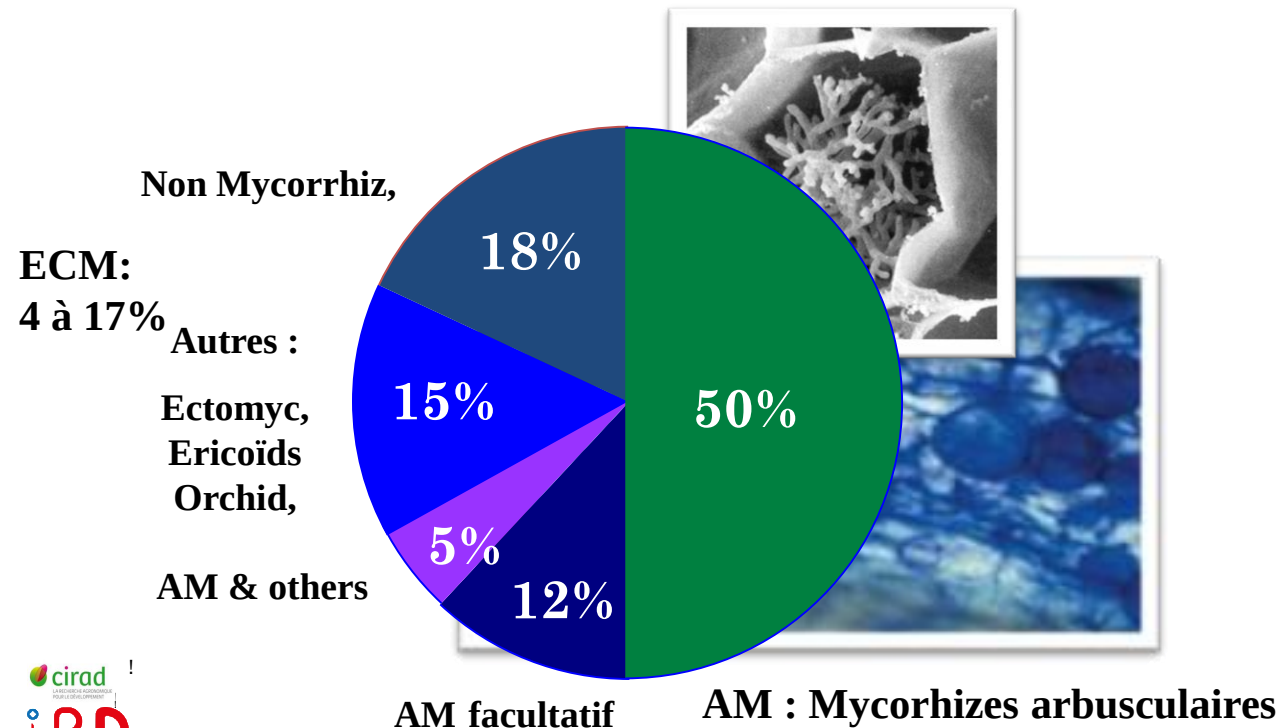


LES MODÈLES D'ÉTUDE



LA SYMBIOSE MYCORHIZIENNE:

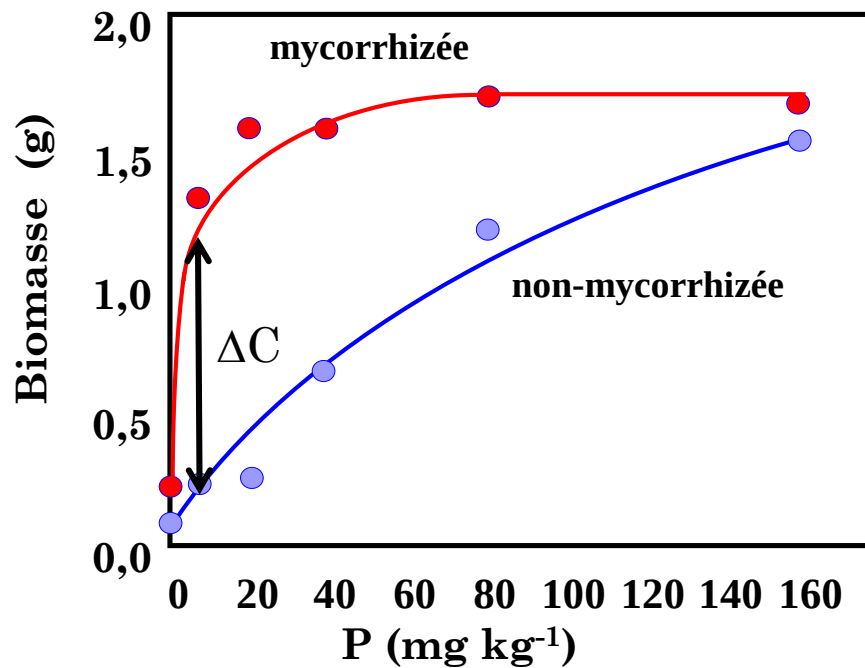
Une composante majeure dans les processus biologiques
assurant la productivité et la stabilité des écosystèmes



**LA MAJORITÉ DES
PLANTES NE
PEUVENT SE
DÉVELOPPER SANS
LA PRÉSENCE DE
CHAMPIGNONS
MYCORHIZIENS**

Répartition des principaux types de symbioses mycorhiziennes dans le
règne végétal (Brundrett, 2002 – New Phytologist)

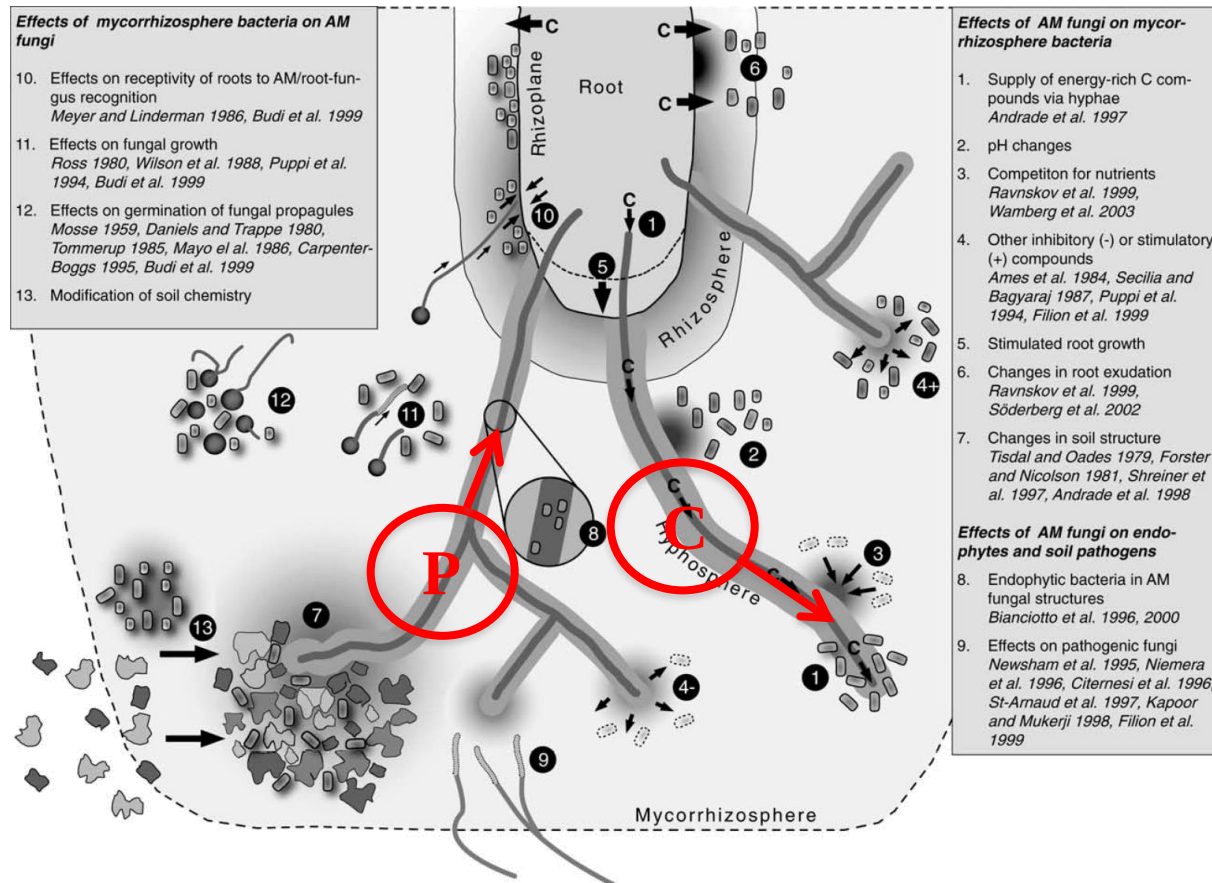
EFFET MYCORRHIZIEN ET CROISSANCE VÉGÉTALE



Un outil biologique particulièrement adapté aux conditions sous contraintes (Ex: carences minérales)



UNE NOUVELLE DIMENSION DONNÉE À LA SYMBIOSE MYCORHIZIENNE : LE CONCEPT DE COMPLEXE TROPHIQUE



From Johansson et al, 2004, FEMS Microbiology Ecology

Interactions entre les symbiotes fongiques et la microflore du sol

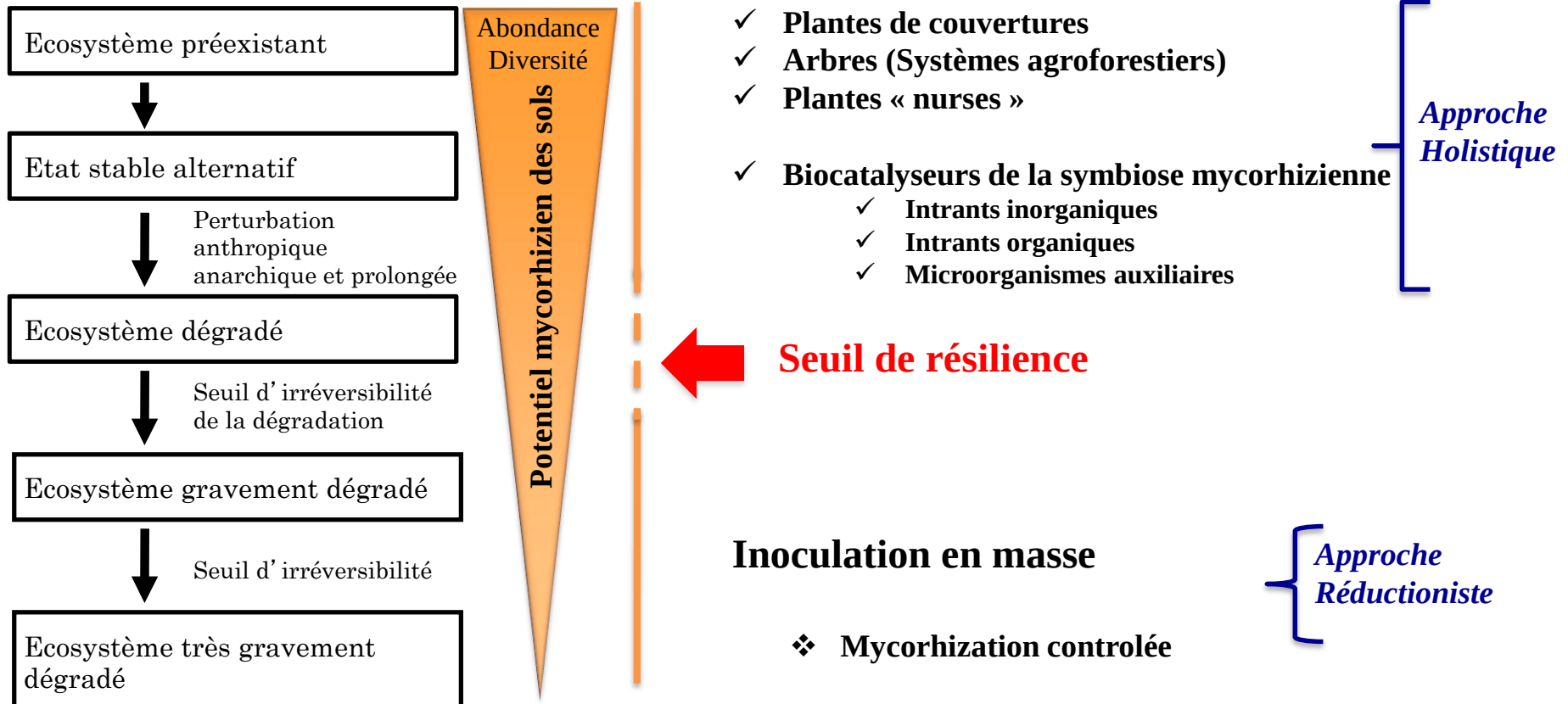
PRINCIPALES FONCTIONS DE LA SYMBIOSE MYCORHIZIENNE

Fonctions	Services rendus
Modification de l'architecture racinaire et formation d'un réseau mycélien dans le sol	Augmentation de l'agrégation du sol
Amélioration de la nutrition minérale de la plante (P, N)	Amélioration de la croissance de la plante et diminution de l'apport d'engrais
Sécrétion de « glomaline » dans le sol	Amélioration de la stabilité du sol et de sa capacité de rétention en eau
Protection contre les agents phytopathogènes	Amélioration de la tolérance de la plante aux stress biotiques et diminution de l'apport de pesticides
Modification du métabolisme de la plante hôte	Amélioration de la qualité du produit obtenu (Ex: plantes médicinales)



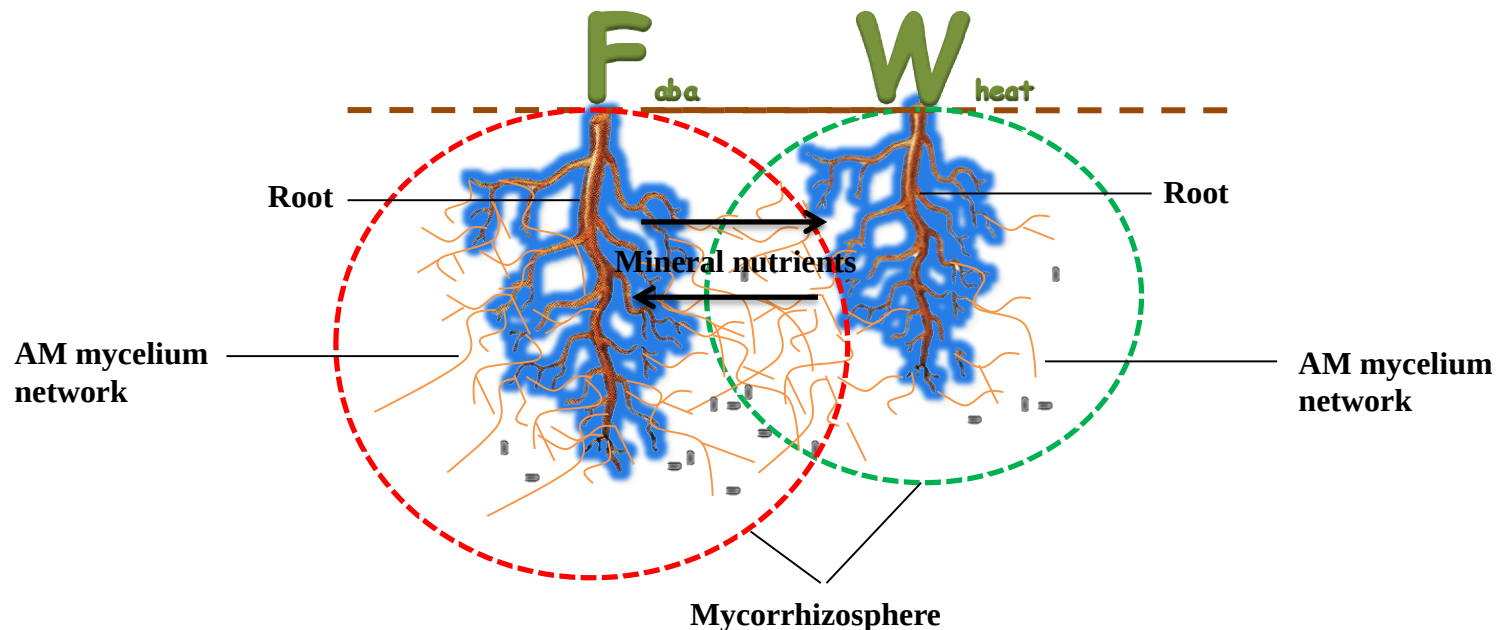
RAISONNER LA GESTION DE LA SYMBIOSE MYCORHIZIENNE EN FONCTION DES CARACTÉRISTIQUES DU MILIEU

STRATEGIES

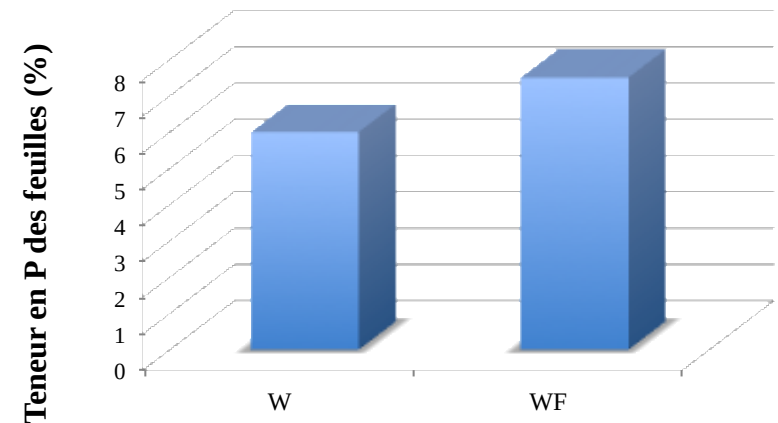
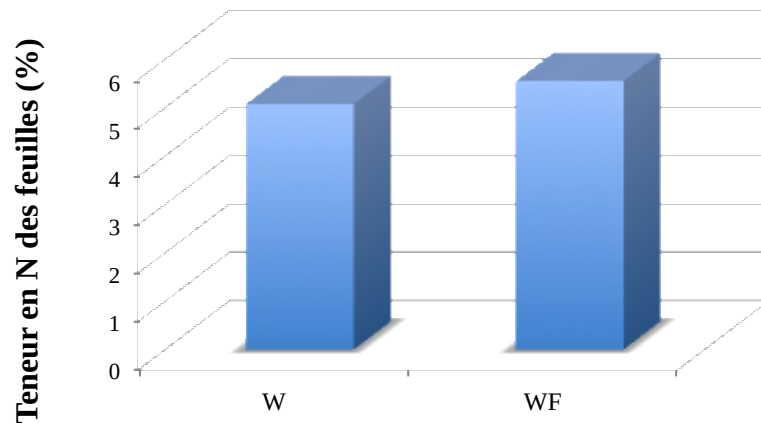
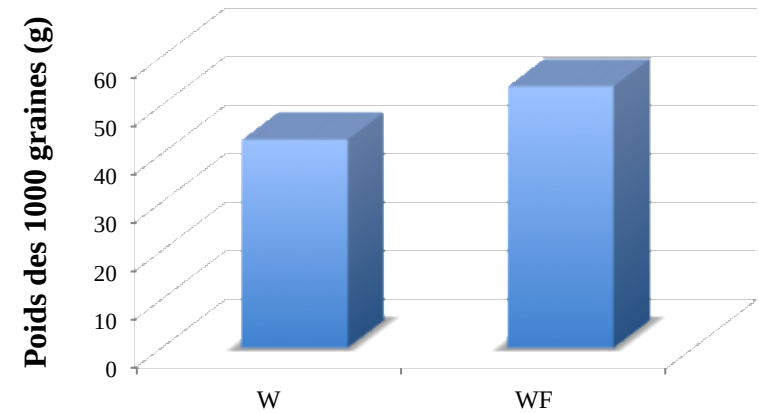
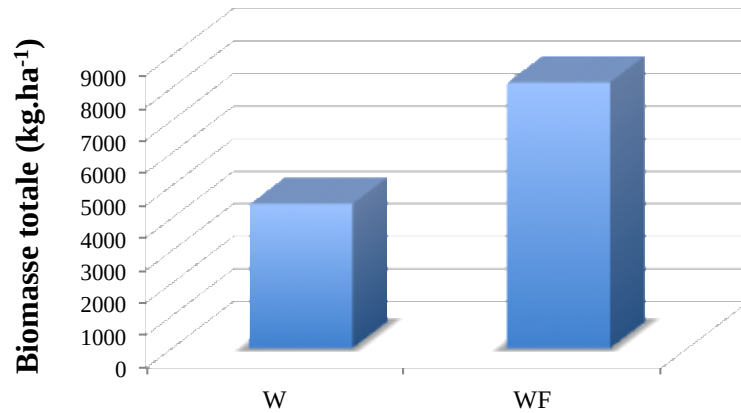


IMPACT DE LA SYMBIOSE MYCORHIZIENNE DANS L'EXPRESSION DU PROCESSUS DE FACILITATION

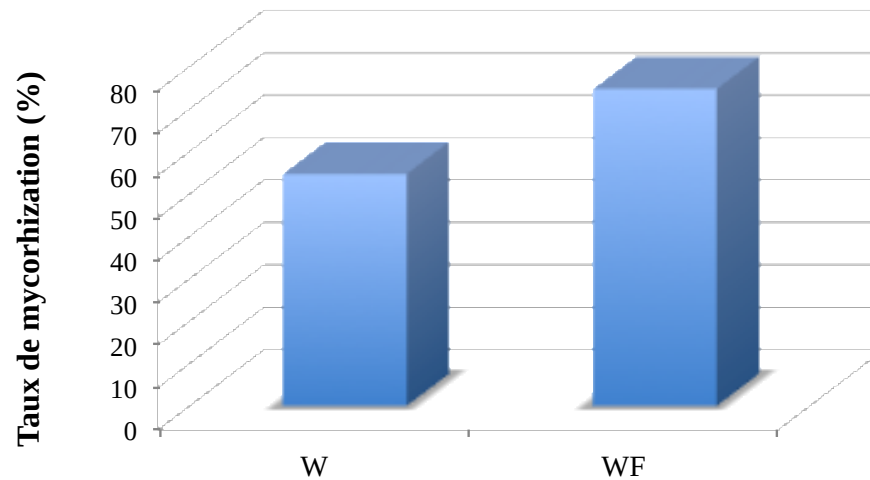
Le mycelium extramatriciel représente un vecteur biologique entre les différentes espèces cultivées permettant un partage des éléments nutritifs prélevés par chaque composante végétale du système



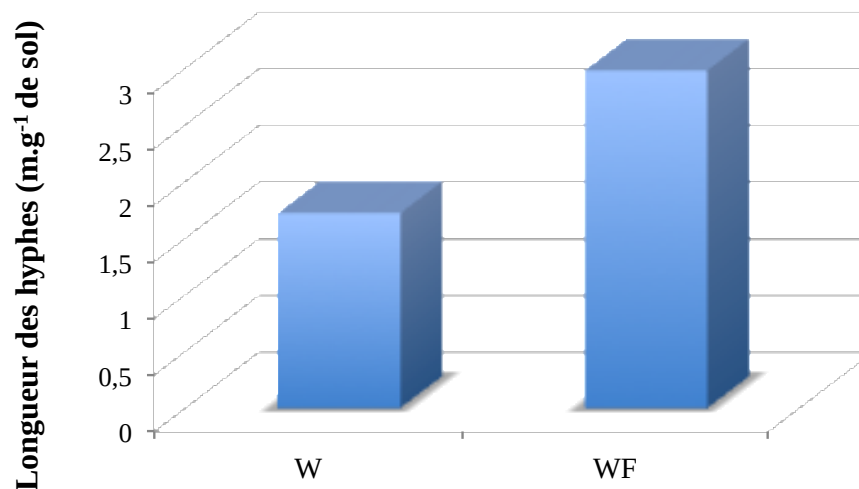
IMPACT DE LA CO-CULTURE AU CHAMP (APRÈS 2 ANNÉES DE CULTURE)



IMPACT DE LA CO-CULTURE AU CHAMP (APRÈS 2 ANNÉES DE CULTURE)



La co-culture augmente significativement le MSI du sol et le développement du blé en conditions *in situ*



Wahbi et al. (2016). Frontiers in Plant Science

LES PLANTES « NURSES » ET LA GESTION DU POTENTIEL MYCORHIZIEN DES SOLS

Exemple du couple *Lavandula stoechas* /
Cupressus atlantica

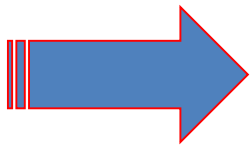
LES ÉCOSYSTÈMES MÉDITERRANÉENS

- ❑ Une strate végétale organisée en
« patches » formés par des espèces
pionnières
- ❑ Formation d'îlots de fertilité biologique et
chimique



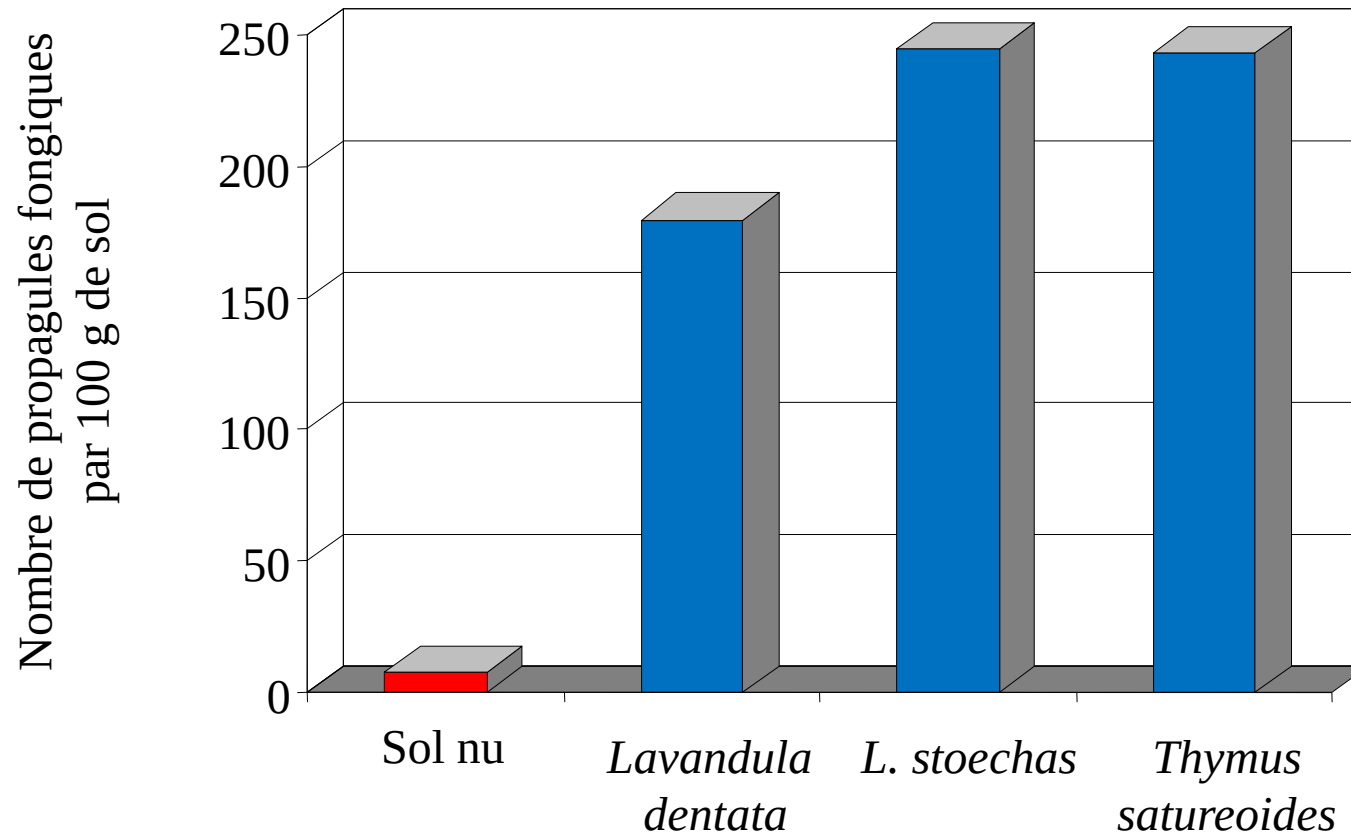
SYMBIOSE MYCORHIZIENNE ET « PLANTES NURSES »

- ✚ Espèces végétales fréquentes de la strate herbacée et arbustives dans des zones dégradées
- ✚ Ilots de fertilité chimique
- ✚ Réservoirs à propagules fongiques
- ✚ Vecteurs potentiels pour faciliter les phénomènes de régénération naturelle

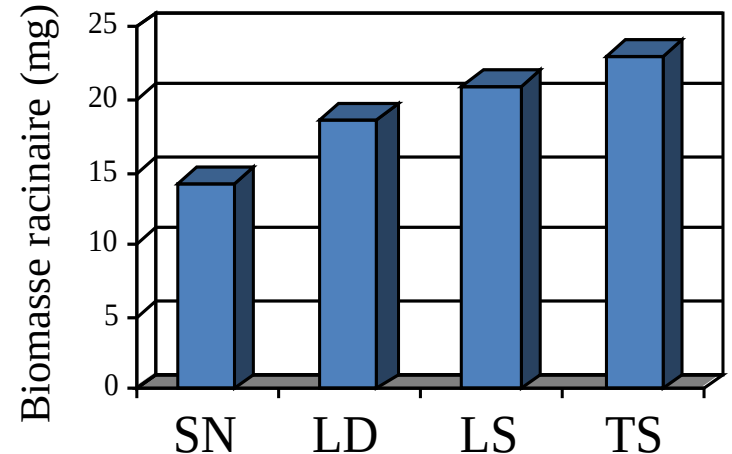
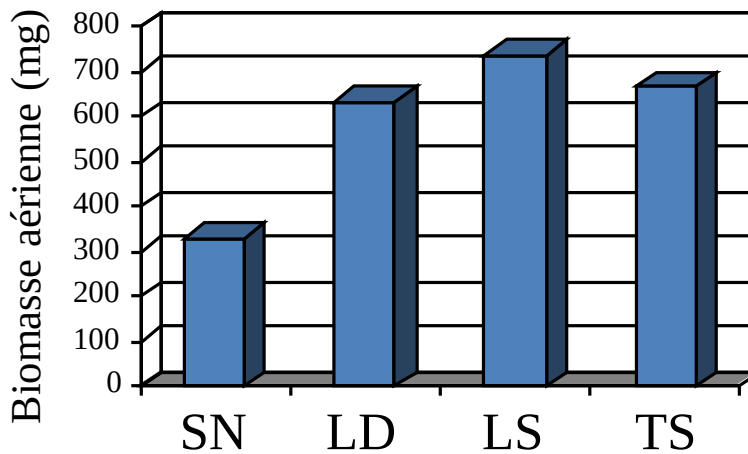
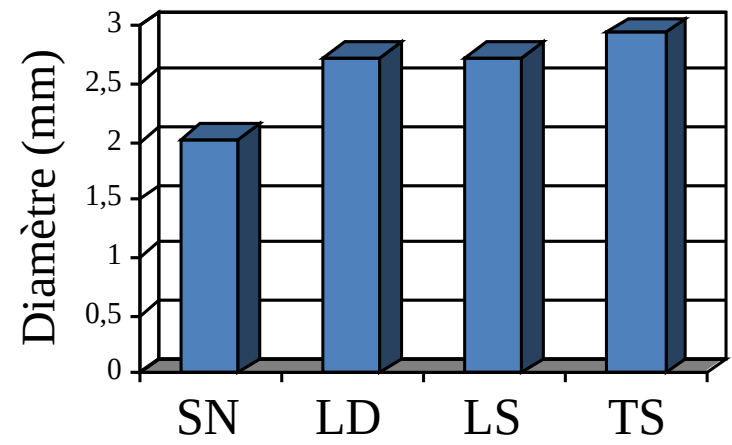
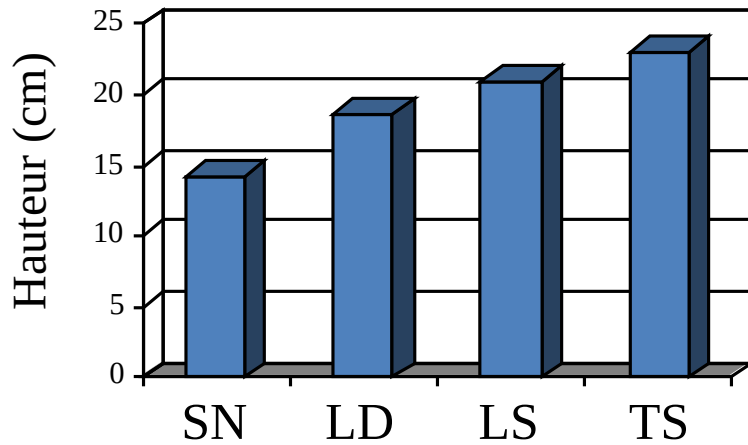


Valorisation en sylviculture
Exemple des formations de Cyprès
dans le haut Atlas marocains

DES ÎLOTS RICHES EN PROPAGULES MYCORHIZIENNES

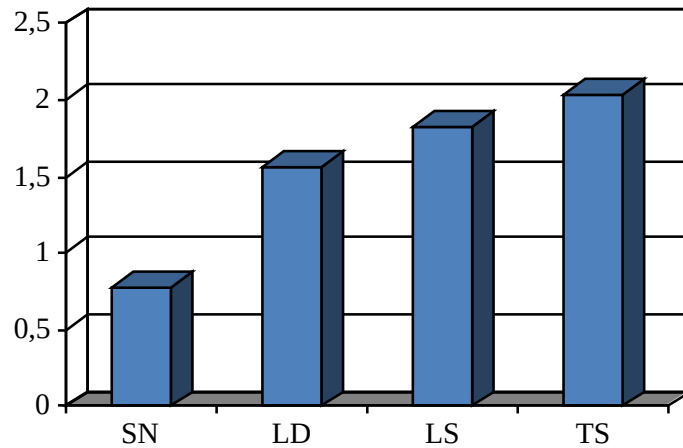


EFFET SUR LA CROISSANCE DE *C. ATLANTICA*

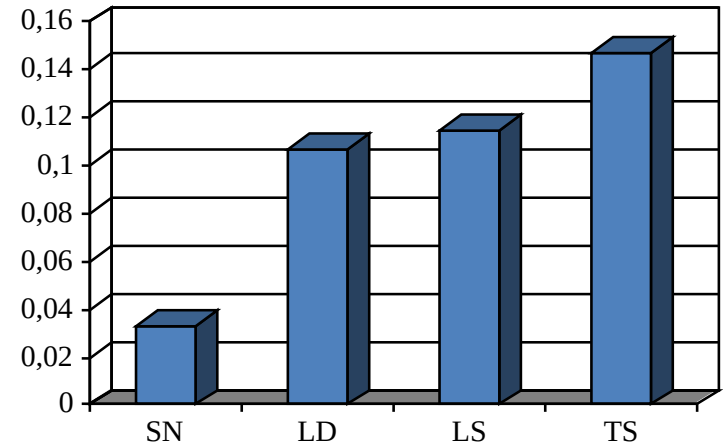


EFFET SUR LA NUTRITION MINÉRALE DE *C. ATLANTICA*

Ouahmane et al. (2006). Plant Ecology

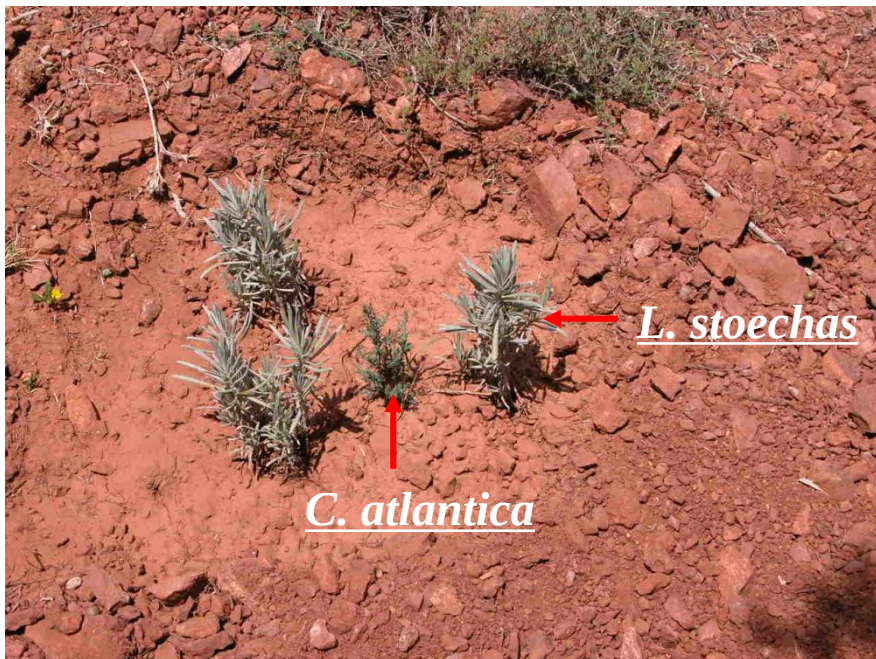


Azote (mg par plant)

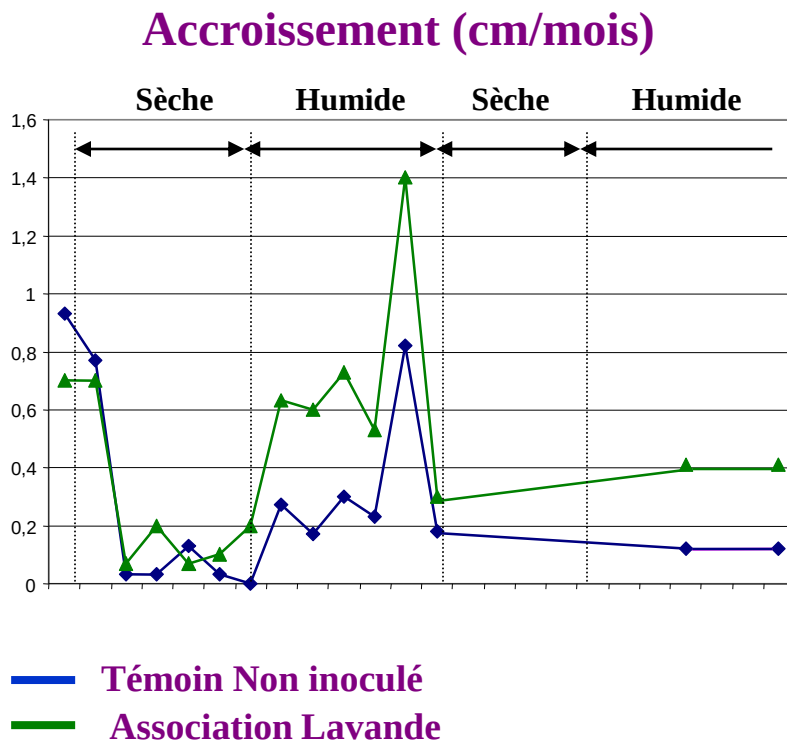


Phosphore (mg par plant)

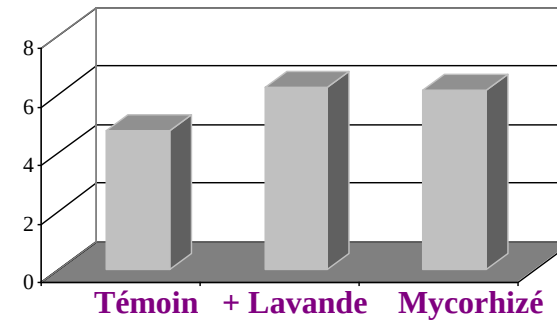
APPLICATIONS



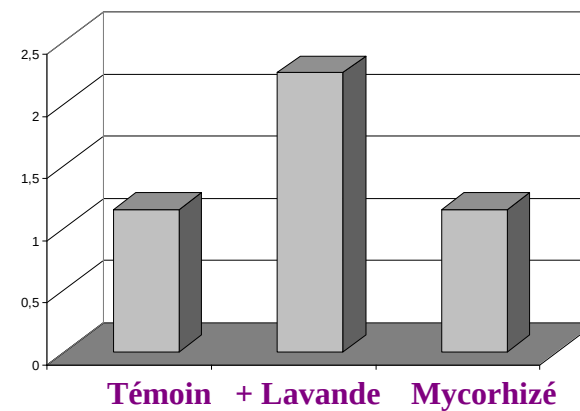
RESULTATS



Teneur en P des feuilles



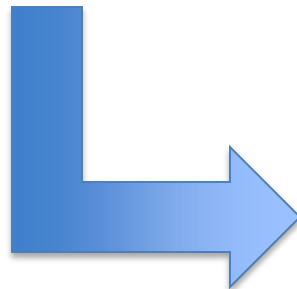
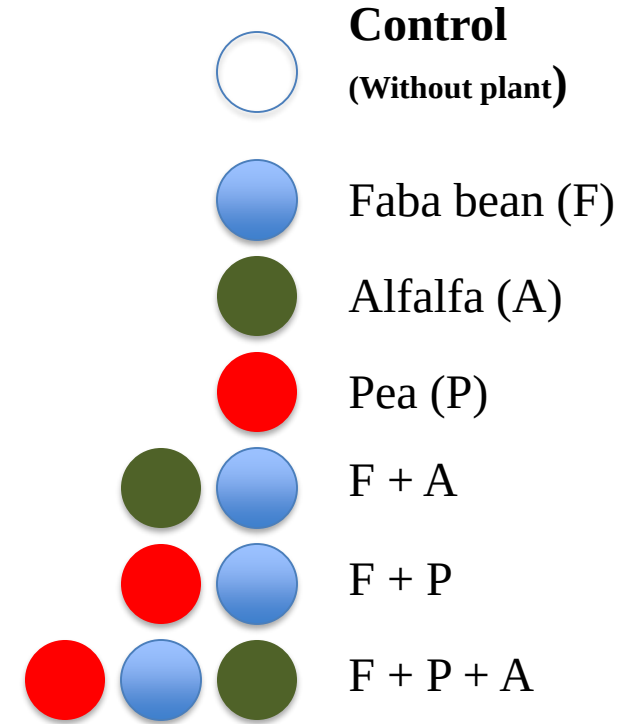
Longueur des hyphes (m g⁻¹ sol)



EXPERIMENTAL DESIGN

Assessment of the leguminous plant diversity impacts on the soil microbial functions

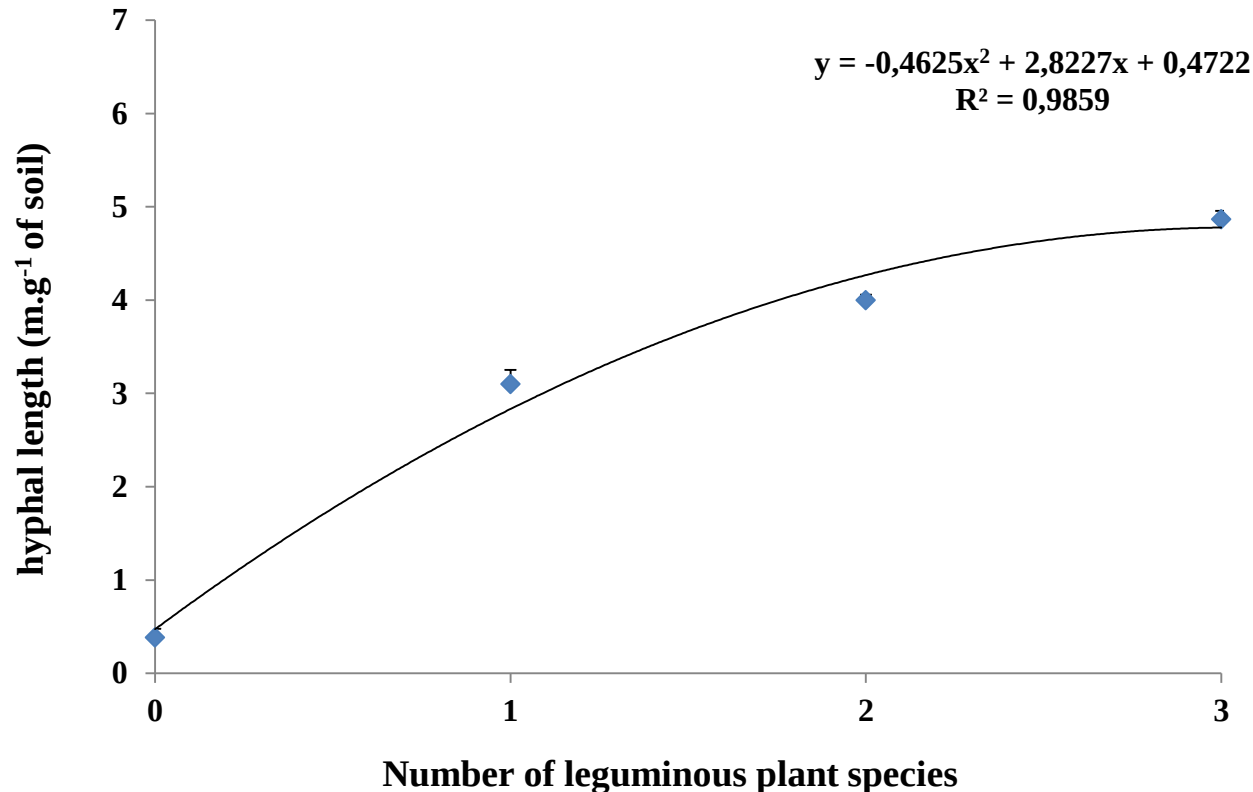
- ✓ Soil catabolic functions using the SIR (Substrate Induced Respiration) method
- ✓ Mycorrhizal soil infectivity
- ✓ Fluorescent Pseudomonad (FP) abundance
- ✓ FP inorganic phosphate solubilizing activities and of the FP effect on wheat growth (PGPR effect)



Measurement of the leguminous soil community feedback on the wheat growth

THE MYCORRHIZAL HYPHAL NETWORK

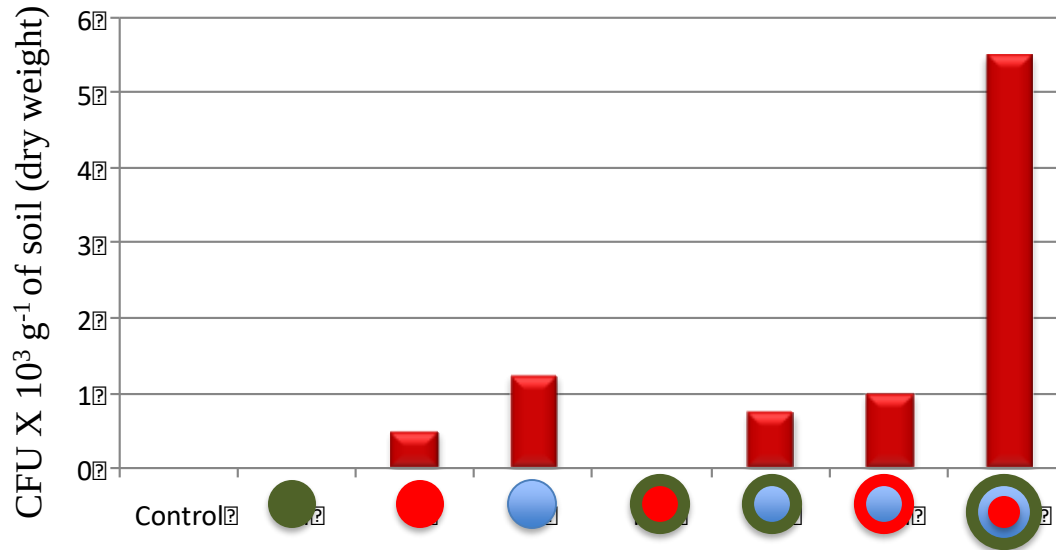
Relationship between total external arbuscular mycorrhizal hyphal length (m.g⁻¹ of soil) and the leguminous plant diversity



INCREASING LEGUMINOUS DIVERSITY IMPROVED THE DEVELOPMENT OF AM HYPHAL NETWORKS IN THE SOIL TREATMENTS

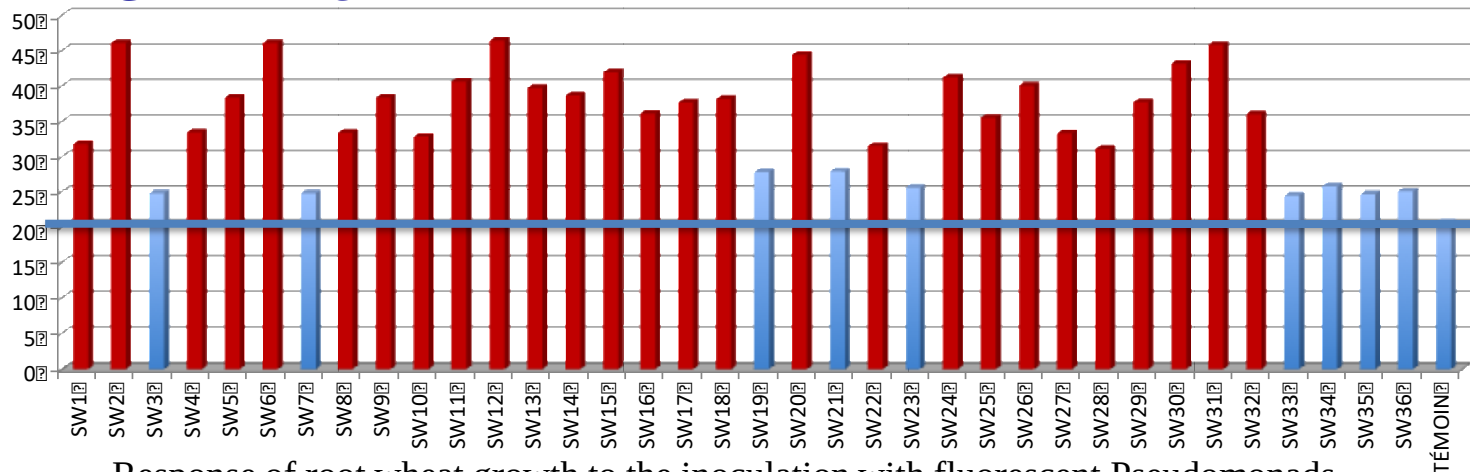
FLUORESCENT PSEUDOMONAD COMMUNITIES

FP ABUNDANCE



INCREASING
LEGUMINOUS DIVERSITY
INDUCED CHANGES IN
THE FP ABUNDANCE AND
ENHANCED THE NUMBER
OF FP STRAINS ABLE TO
PROMOTE THE WHEAT
ROOT GROWTH

PGPR EFFECT



Response of root wheat growth to the inoculation with fluorescent Pseudomonads

La mycorhization contrôlée

Maîtrise de la symbiose mycorhizienne entre une espèce végétale donnée et un symbiote fongique préalablement sélectionné

➤ **Choix de l' espèce végétale**

- Performance pour un paramètre donné (Ex: Vitesse de croissance)
- Adaptation au milieu à réhabiliter (Ex: sols salés, etc)

➤ **Choix du symbiote fongique**

- Compatibilité avec l' espèce végétale (Ex: champignons ectomycorhiziens)
- Performance pour un paramètre donné (Ex: impact sur la production ligneuse)
- Adaptation au milieu à réhabiliter (Ex: sols calcaires, etc)



LA MYCORHIZATION CONTRÔLÉE

Mycorhization du Cyprès de l'Atlas par un
complexe mycorhizien

ELEVAGE EN PÉPINIÈRE

	Traitements	
	Témoin	Complexe mycorhizien
Hauteur (cm)	12,3 (0,46) a	16,1 (0,71) b
Biomasse aérienne (mg)	1163 (20) a	1893 (264) b + 38,5%)
Biomasse racinaire (mg)	740 (64) a	1183 (132) b
Biomasse totale (mg)	1903 (62) a	3077 (392) b + 38,1%)
Teneur en P (mg g⁻¹ MS)	0,09 (0,01) a	0,167 (0,03) b
Teneur en N (mg g⁻¹ MS)	2,23 (0,23) a	3,50 (0,1) b
Taux de mycorhization (%)	-	41,2 (2,3)

PLANTATION EN MILIEU NATUREL (1^{ère} ANNÉE)

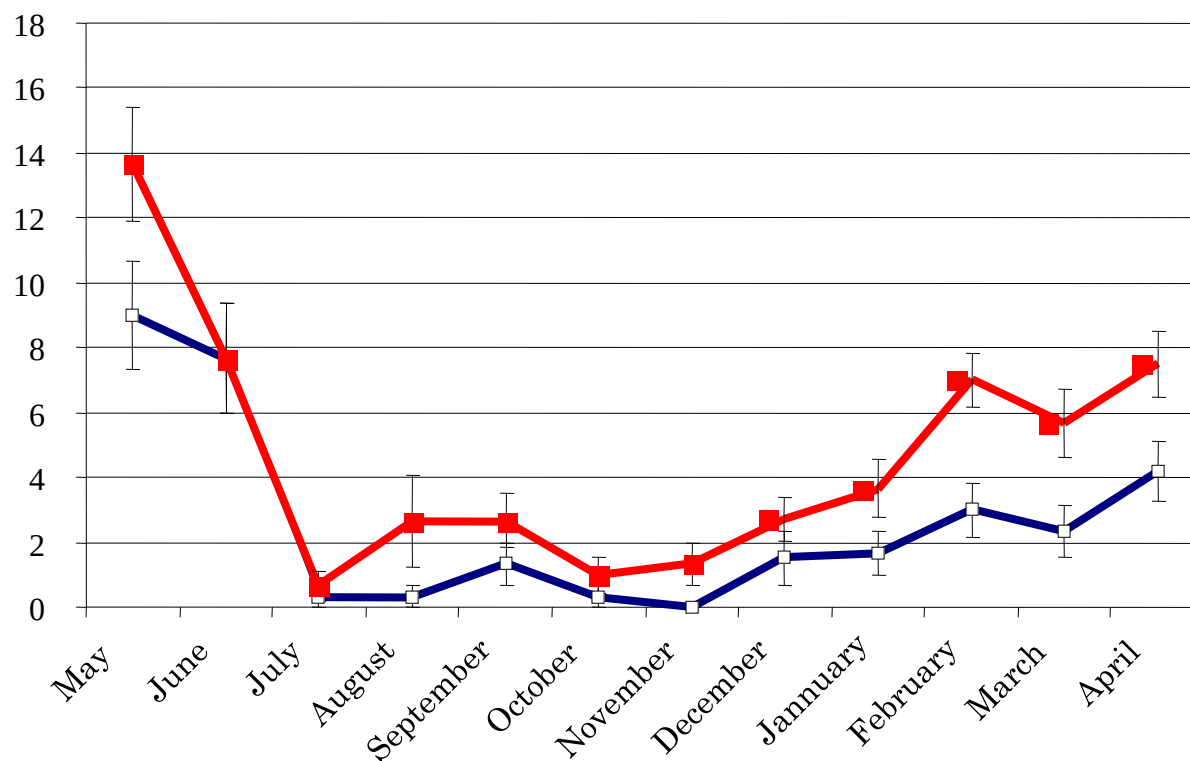


Témoin

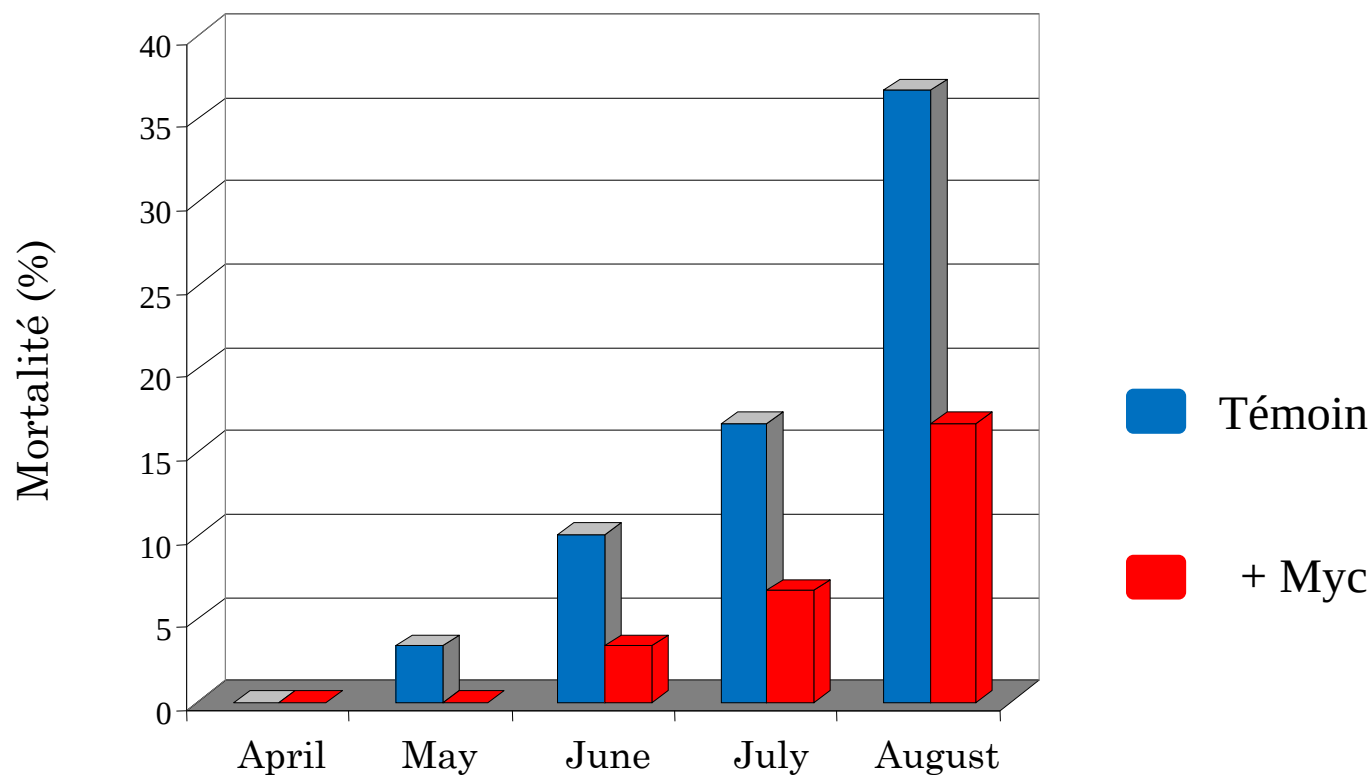


Inoculé

EVOLUTION DE LA CROISSANCE



CRISE DE TRANSPLANTATION





MYCORHIZATION CONTRÔLÉE

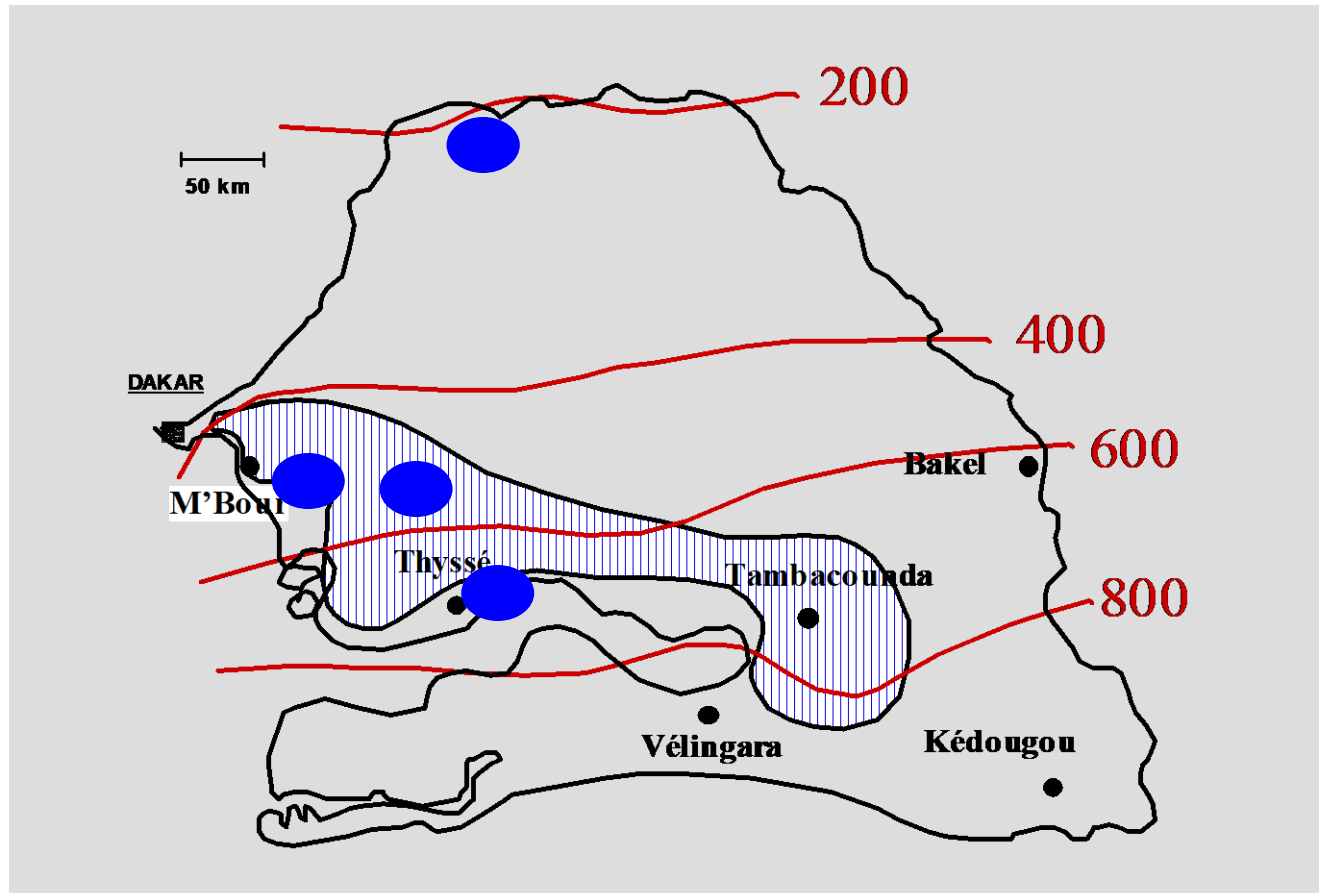
Impact de *Rhizophagus irregularis*, un champignon mycorhizien arbusculaire, sur la croissance du blé dur



Effects of *R. irregularis* application one year (2012) and two years (2013) after the AMF inoculation in the field experiment located in the Haouz valley at about 30 km at the West of Marrakech (Morocco).

	Treatments			
	Control		+ <i>R. irregularis</i>	
	2012	2013	2012	2013
Total biomass Yield (kg.ha ⁻¹)	4312 (20.4) ⁽¹⁾ a ⁽²⁾	4184 (28.7) a	4662 (25.6) a	5401 (71.6) b
Spike number per ha (x 10 ⁴)	177.1 (27.5) a	167.3 (29.1) a	227.7 (18.8) b	236.7 (26.9) b
Thousand-seed weight	42.3 (2.5) a	41.7 (2.8) a	42.7 (2.5) a	45.2 (2.5) b
Shoot N content (%)	nd ⁽³⁾	5.31 (0.60) a	nd	5.39 (0.11) a
Shoot P content (mg.g ⁻¹)	nd	6.25 (0.91) a	nd	7.62 (0.29) b
Mycorrhizal colonization (%)	46.7 (5.8) a	54.7 (4.7) a	53.9 (5.6) a	66.9 (3.9) b
Hyphal length (m g ⁻¹ dry soil)	1.66 (0.08) a	1.83 (0.09) a	1.72 (0.07) a	2.89 (0.07) b

Expériences de mycorhization contrôlée (Modèle: *Acacia holosericea* / *Pisolithus albus*)

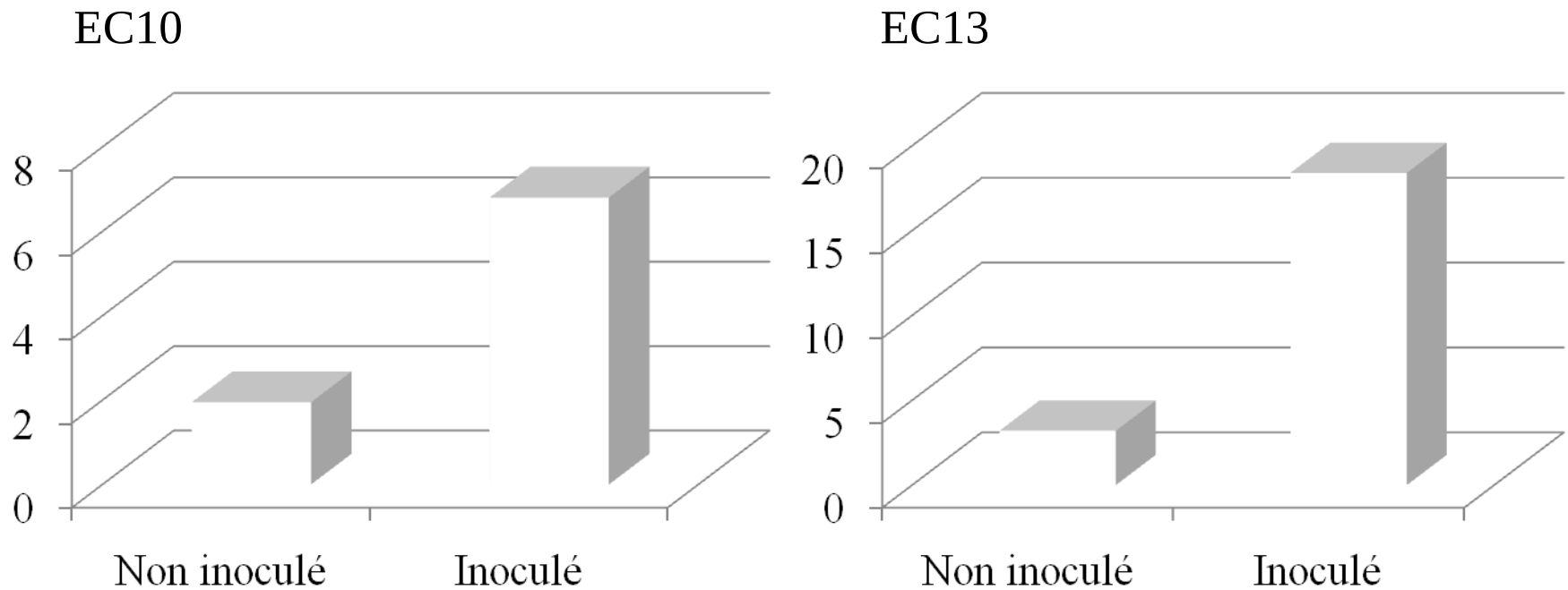




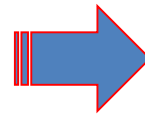
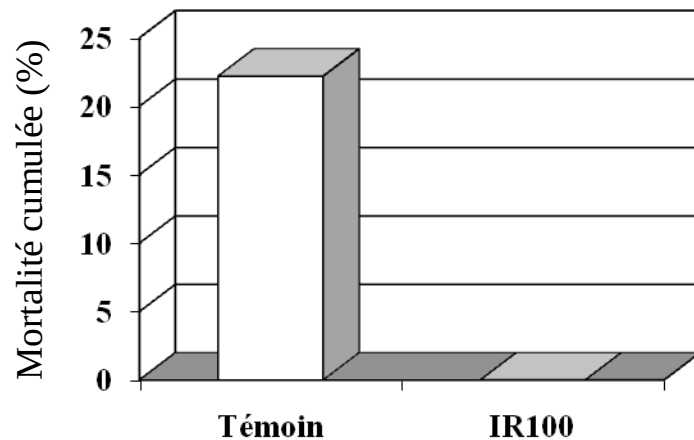
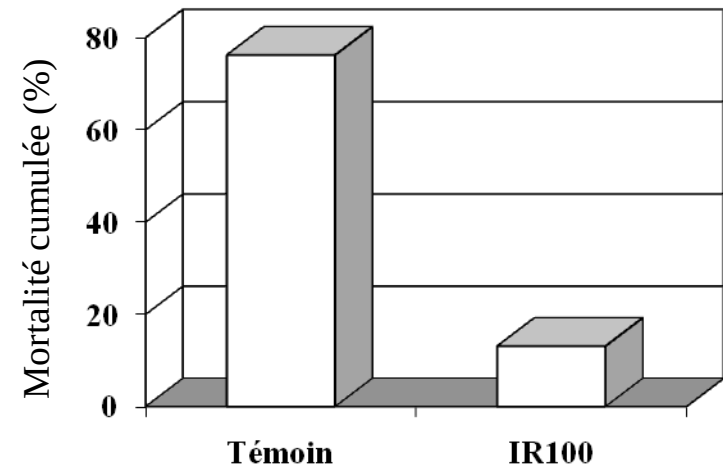
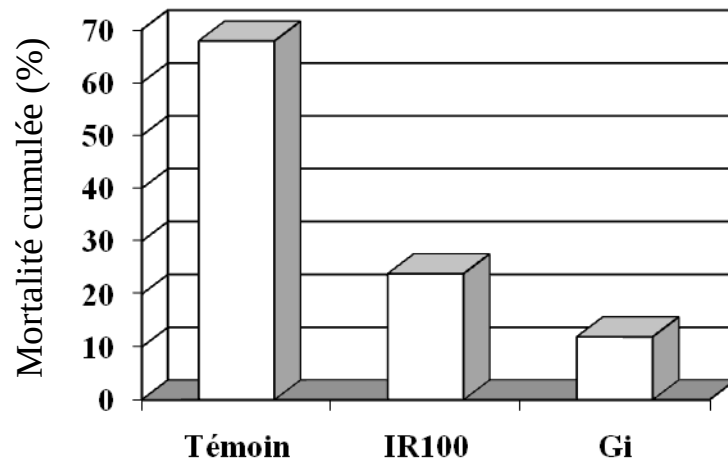


Acacia holosericea / *Pisolithus albus* (2 ans)

Quelques résultats (rendements en tonne ha⁻¹ après 18 mois de plantation)



Quelques résultats (Crise de transplantation)



Réduction de la crise de transplantation chez les plants mycorhizés

LES CONDITIONS DE LA VALORISATION DE LA SYMBIOSE MYCORHIZIENNE EN AGROÉCOLOGIE

Malgré un potentiel indéniable, la valorisation de la symbiose mycorhizienne en agriculture reste trop simpliste en ignorant les fondamentaux de l'écologie microbienne des sols



Comprendre les déterminants **biotiques et abiotiques de la réceptivité des sols à l'inoculation mycorhizienne**



Décrire et comprendre la réponse de la microflore du sol à l'inoculation ou à la gestion des symbiotes mycorhiziens



Résoudre les problèmes liés à la biotechnologie de l'inoculation (production en masse d'inocula fongiques, formulation des inocula fongiques, etc)



LA PLATE-FORME LSTM

TRANSFERT & INNOVATION



*Ensemble d'expertises scientifiques et techniques
et des moyens mutualisés pour :*

- ✓ **Maîtriser** la **sélection**, la **production**, la **formulation**,
l'**utilisation** et le **traçage** d'inocula type PGPR
- ✓ Proposer une large gamme de **prestations** permettant
d'élaborer un ensemble de stratégies culturales adaptées
à la demande des utilisateurs et respectueuses des règles
d'une gestion durable des terres



LES DOMAINES D'INNOVATIONS AU LSTM

BIOPESTICIDES

*Fight against nematodes, striga,
Fermentation Production Method*

PHYTOREMEDIATION

Phytostabilisation of polluted soils

BIOFERTILIZERS

*Using phosphate granules, fungal
inocula, powder termite ..*

DEFENSES ET PROTECTION

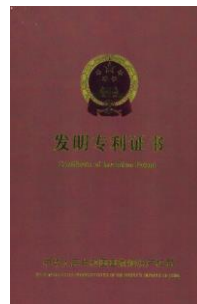
Augmentation des défenses de la plante

OUTILS BIOTECHNOLOGIQUE

*Développement de marqueurs moléculaires, pour la traçabilité,
la sélection variétale. Développement de système de
production de protéines d'intérêt dans un système végétal.
Transfert de gène d'intérêt.*

LSTM Patent taken (14 + 2)

Example: A method for remediation of soil contaminated with heavy
metals (WO / 2009/106777) (Duponnois, R. + 3)



UNE NÉCESSITÉ D'INTERAGIR AVEC LA SPHÈRE SOCIO-ÉCONOMIQUE EN MATIÈRE DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET D'INNOVATIONS EN INGÉNIERIE MICROBIENNE APPLIQUÉE À L'AGROÉCOLOGIE

Pour assurer un compromis avec les missions académiques d'un institut ou d'une université à savoir :

- ✓ **Elaboration de solutions adaptées aux défis globaux fondées sur l'évidence scientifique**
- ✓ **Conception d'innovations responsables**
- ✓ **Transfert d'expertises et de savoir-faire spécifiques**
- ✓ **Formation**

Nécessité de **CO-CONSTRUIRE des projets de R&D dans un périmètre Public/Privé pour définir conjointement :**

- ✓ **La pertinence des modèles étudiés**
- ✓ **La pertinence de la méthodologie retenue**
- ✓ **Les perspectives de transfert de technologie (Scaling-up, formation, etc)**
- ✓ **Les perspectives en termes d'innovations futures**



LA CONSTRUCTION D'UN RÉSEAU INTERNATIONAL



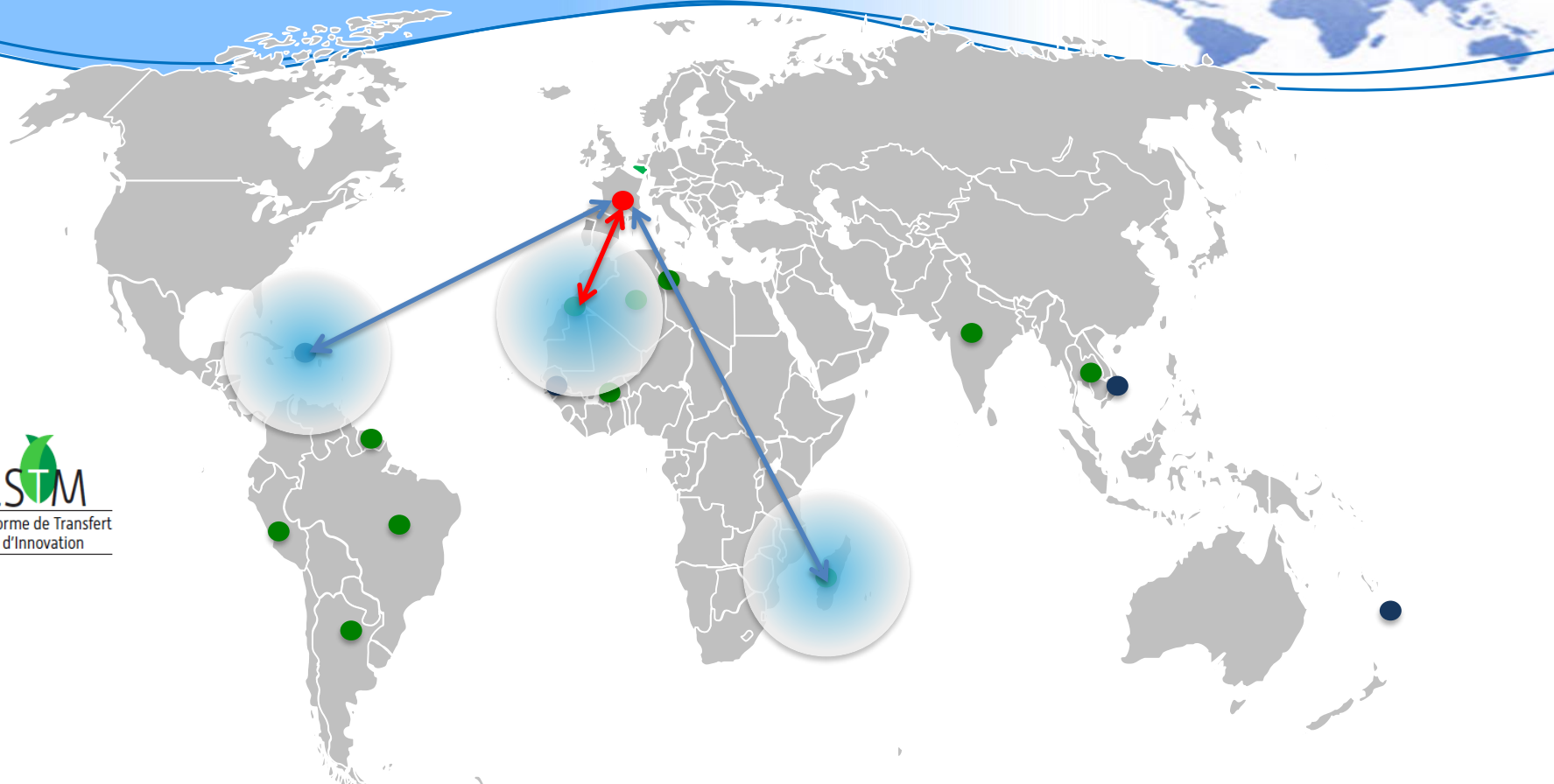
Implantation principale de l'UMR



Implantations secondaires avec chercheurs affectés chez le partenaire



Partenariats, chantiers : projet communs et collaborations



DES STRUCTURES CRÉÉES POUR PROMOUVOIR UNE VALORISATION RESPONSABLE DES RESSOURCES MICROBIENNES TELLURIQUES

Laboratoire d'idées « *Microbiologie des sols & Production végétale durable* »

- Microbiologie des sols et stockage du Carbone
- La Plante: Moteur des fonctions microbiennes du sol
- Bio-stimulants: Quels cahiers des charges ?
- Pratiques innovantes: Moteur des fonctions microbiennes du sol

Centre de Ressources Biologiques (CRB) Mi3P

- Structure ayant pour vocation de conserver, de valoriser et de diffuser des microorganismes originaires principalement des agroécosystèmes méditerranéens ou tropicaux et présentant des propriétés biofertilisantes et/ou biopesticides.
- Permettant de répondre aux demandes en matière de recherche scientifique et d'innovations en ingénierie microbienne appliquée à l'agroécologie