

# Mécanismes d'établissement des symbioses entre légumineuses et microorganismes: aspects fondamentaux et appliqués



Jean-Michel Ané,  
Université du Wisconsin-Madison  
États-Unis d'Amérique

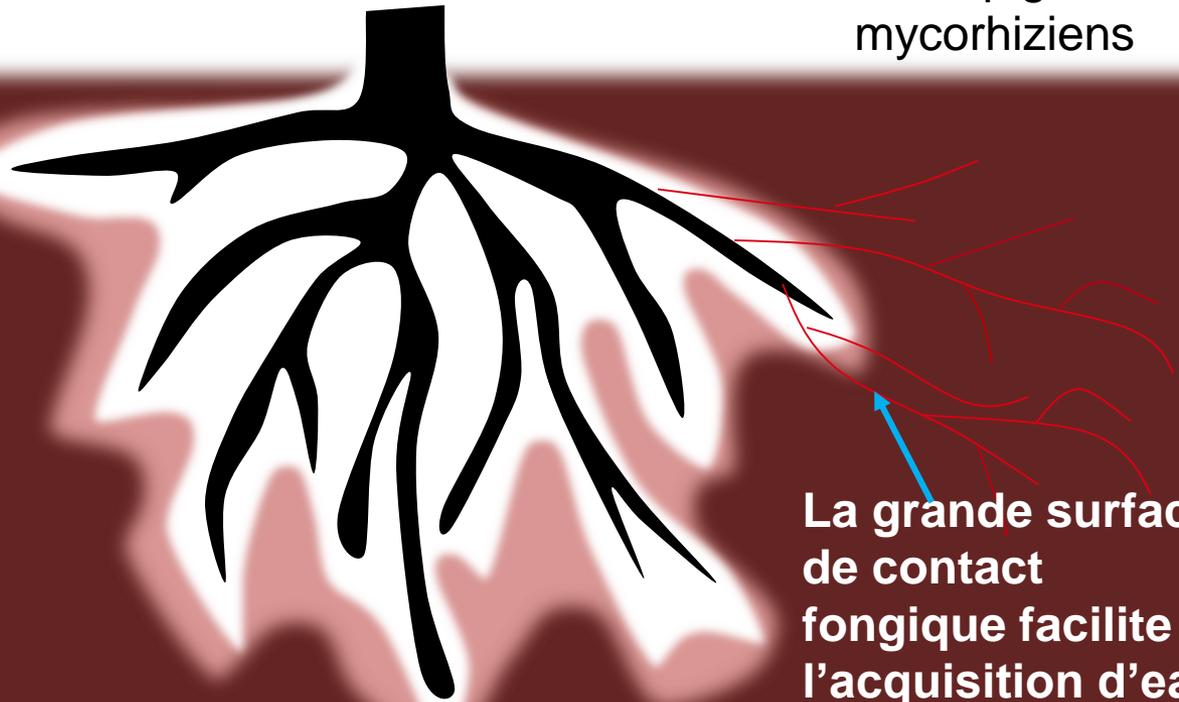


THE UNIVERSITY  
of  
**WISCONSIN**  
MADISON



# Mutualismes entre plantes et microorganismes

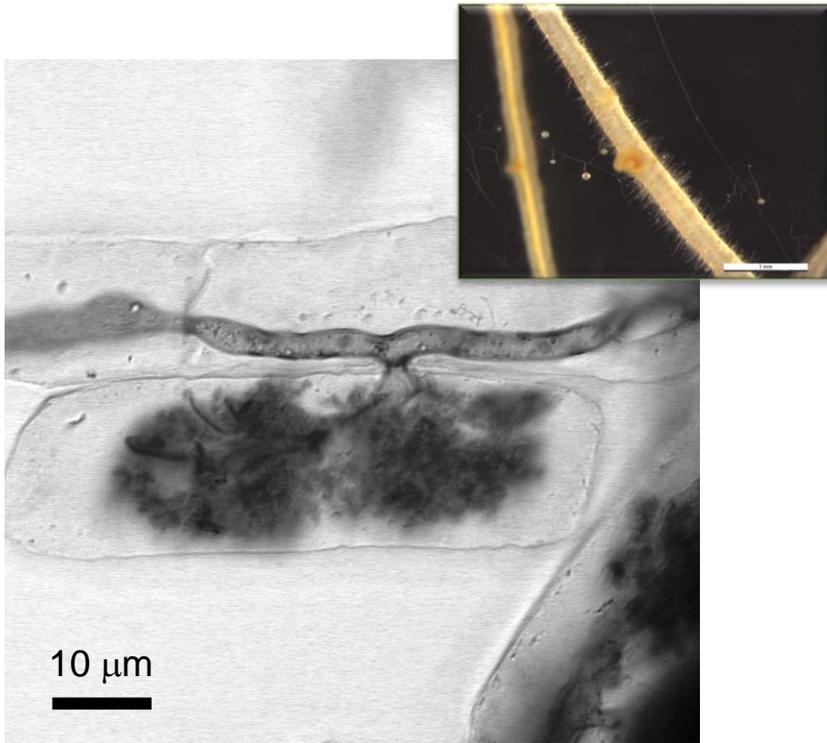
La plupart des  
plantes terrestres  
Champignons  
mycorhiziens



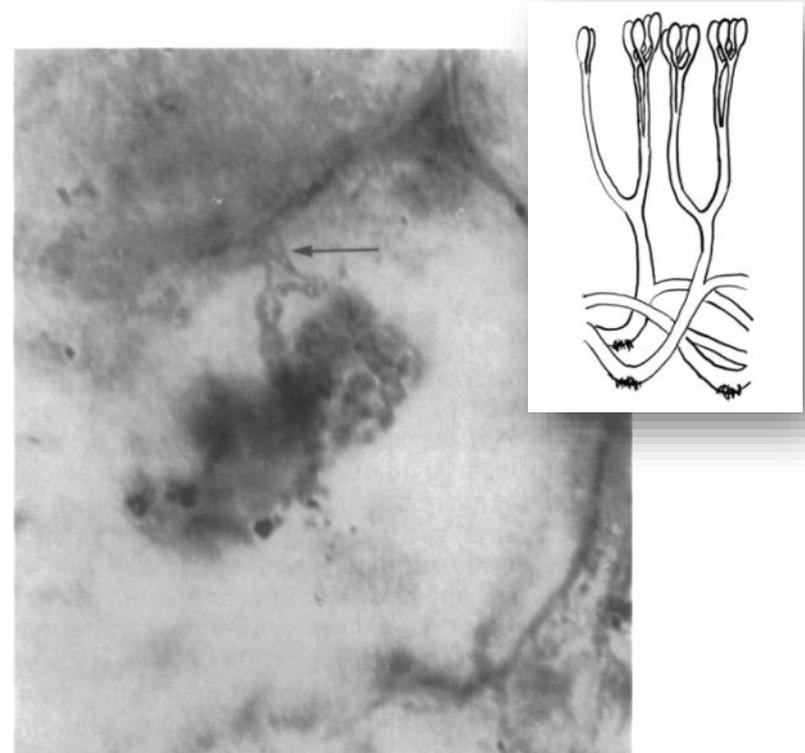
La grande surface  
de contact  
fongique facilite  
l'acquisition d'eau  
et de nutriments

# La symbiose mycorhizienne à arbuscules est ancienne et très répandue

Arbuscule dans une cellule racinaire de carotte (endosymbiose)



Champignon mycorhizien de 400 million d'années dans un fossile de plante du Dévonien, *Aglaophyton major*



Remy et al., 1994

# Mutualismes entre plantes et microorganismes

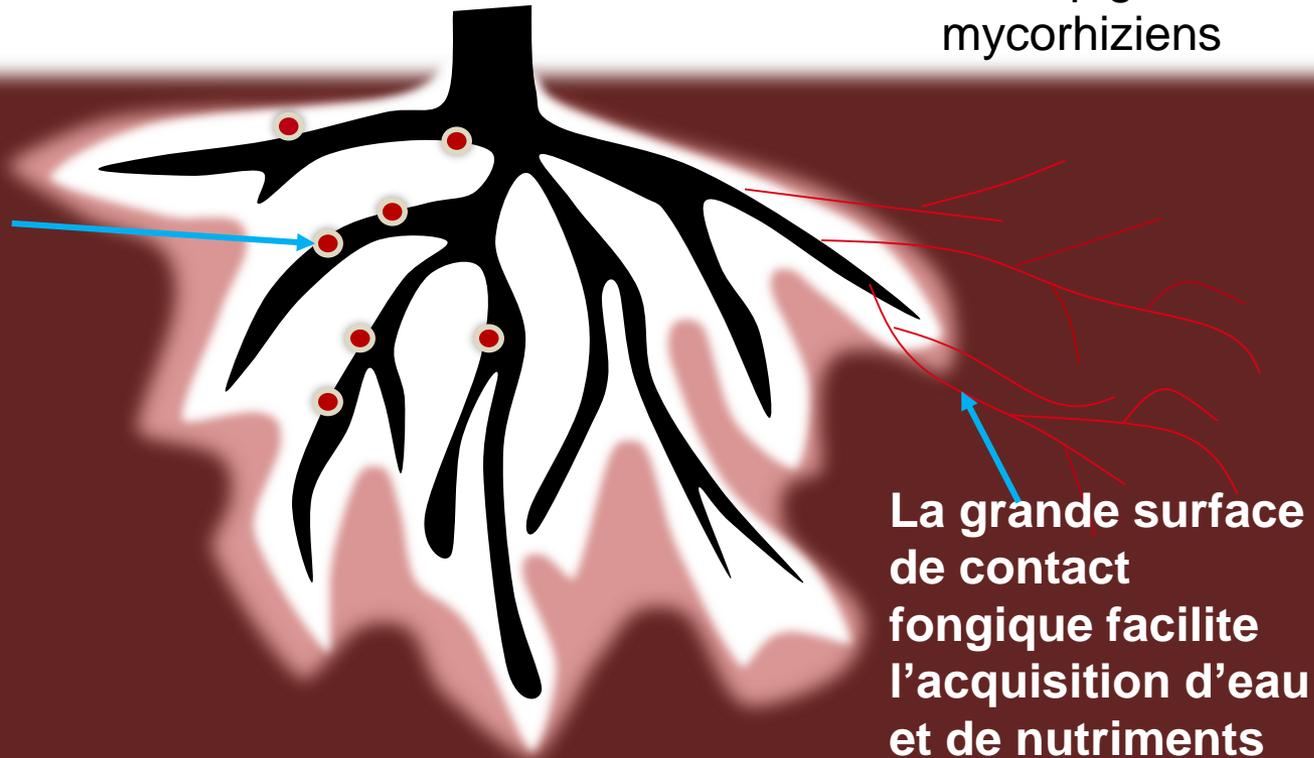
**Quelques plantes**

Bactéries fixatrices d'azote

**La plupart des plantes terrestres**

Champignons mycorhiziens

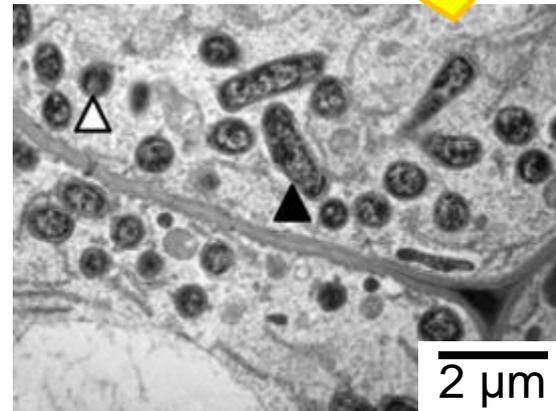
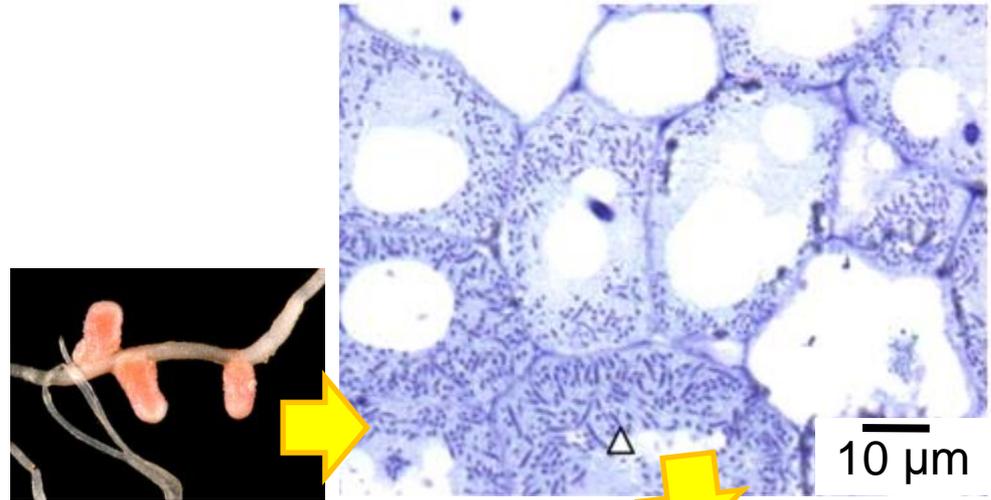
Les nodosités contenant les bactéries facilitent la fixation d'azote



La grande surface de contact fongique facilite l'acquisition d'eau et de nutriments

# Nodosités racinaires

- Les bactéries dans les cellules de la nodosité bénéficient de:
  - Une grande surface de contact avec la plante qui facilite les échanges
  - Une source abondante de carbone
  - Des taux d'oxygène faibles qui permettent à la fois la respiration et l'activité de la nitrogenase
- Organogénèse du nodosité
- Deux types de bactéries
  - Rhizobiums (proteobactéries) principalement avec des légumineuses (Fabales)
  - Frankia (actinobactéries) avec des Fagales, Cucurbitales et Rosales



Bacteroides  
dans une  
cellule de  
nodosité

# Mutualismes entre plantes et microorganismes

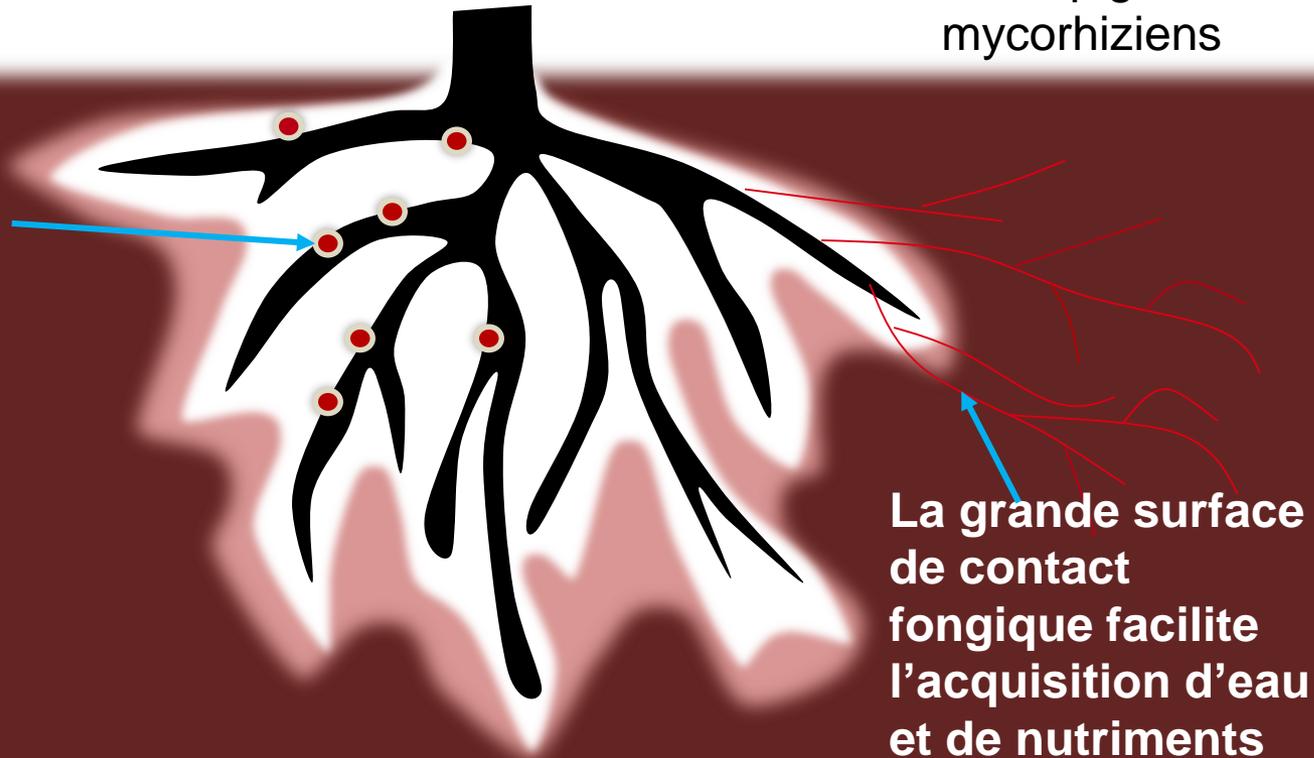
**Quelques plantes**

Bactéries fixatrices d'azote

**La plupart des plantes terrestres**

Champignons mycorhiziens

Les nodosités contenant les bactéries facilitent la fixation d'azote



La grande surface de contact fongique facilite l'acquisition d'eau et de nutriments

# Importance agronomique des symbioses microbiennes

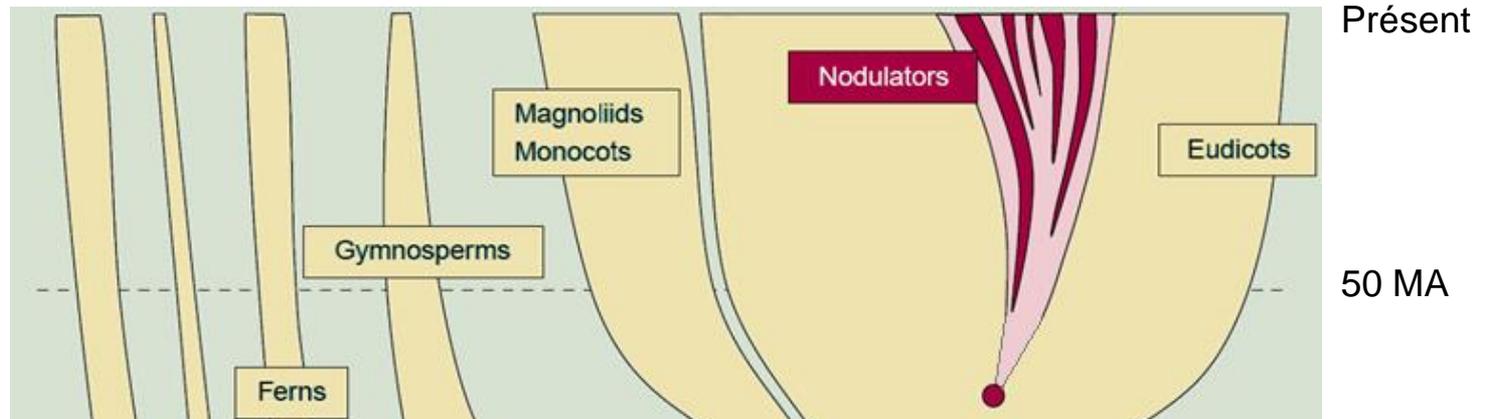


Department of  
Agronomy

COLLEGE OF AGRICULTURAL & LIFE SCIENCES - UNIVERSITY OF WISCONSIN



# Une histoire évolutive commune



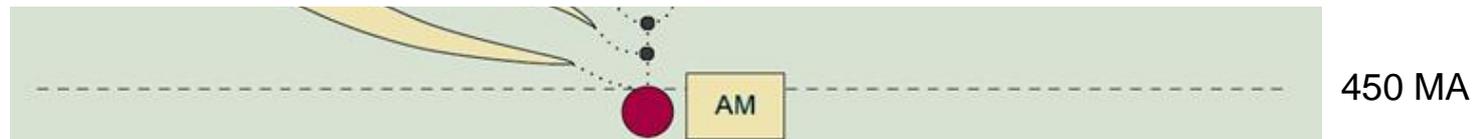
*Proc. Natl. Acad. Sci. USA*  
Vol. 92, pp. 2647–2651, March 1995  
Evolution

## Chloroplast gene sequence data suggest a single origin of the predisposition for symbiotic nitrogen fixation in angiosperms

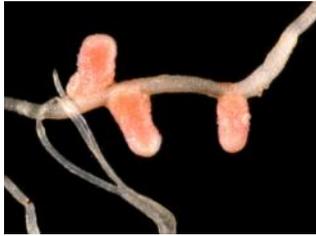
DOUGLAS E. SOLTIS\*, PAMELA S. SOLTIS\*, DAVID R. MORGAN†, SUSAN M. SWENSEN‡, BETH C. MULLIN§, JULIE M. DOWD¶, AND PETER G. MARTIN¶||

\*Department of Botany, Washington State University, Pullman, WA 99164-4238; †Department of Biology, Western Washington University, Bellingham, WA 98225; ‡Department of Biology, Indiana University, Bloomington, IN 47405; §Department of Botany, Center for Legume Research, University of Tennessee, Knoxville, TN 37996; and ¶Department of Botany, University of Adelaide, Adelaide, South Australia 5005, Australia

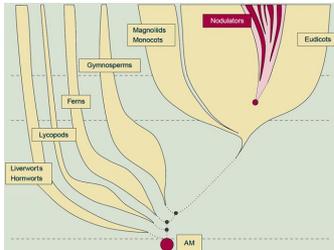
Communicated by Michael T. Clegg, University of California, Riverside, CA, November 14, 1994



Adapté de Kistner et Parniske, 2002



## Mécanismes d'établissement des symbioses



## Evolution de la symbiose rhizobium-légumineuses



## Développement de nouvelles symbioses



# Mécanismes d'établissement des symbioses



## Symbiose mycorhizienne à arbuscules

## Symbiose rhizobium - légumineuses

Reconnaissance

Colonisation

Organogénèse

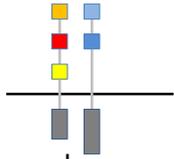


Facteurs Myc  
(LCOs et COs)

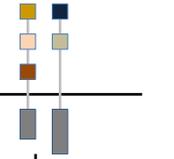


Facteurs Nod  
(LCOs)

Récepteurs  
facteurs Myc



Récepteurs  
facteurs Nod



Voie  
Symbiotique  
Commune

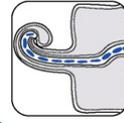


Corécepteur NORK  
Oscillations calciques



Décodeur CCaMK  
Facteurs de  
transcription

Voie  
Symbiotique  
Commune



Corécepteur NORK  
Oscillations calciques

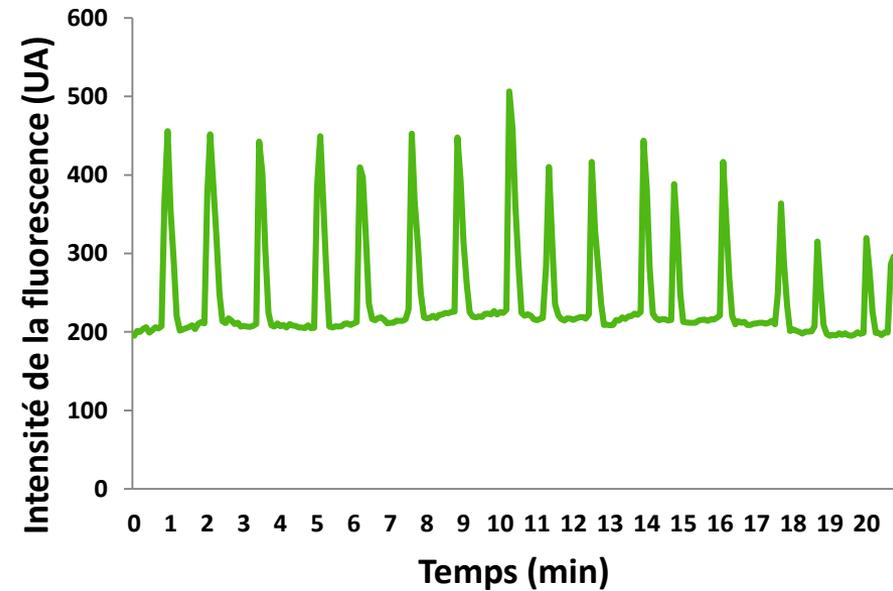
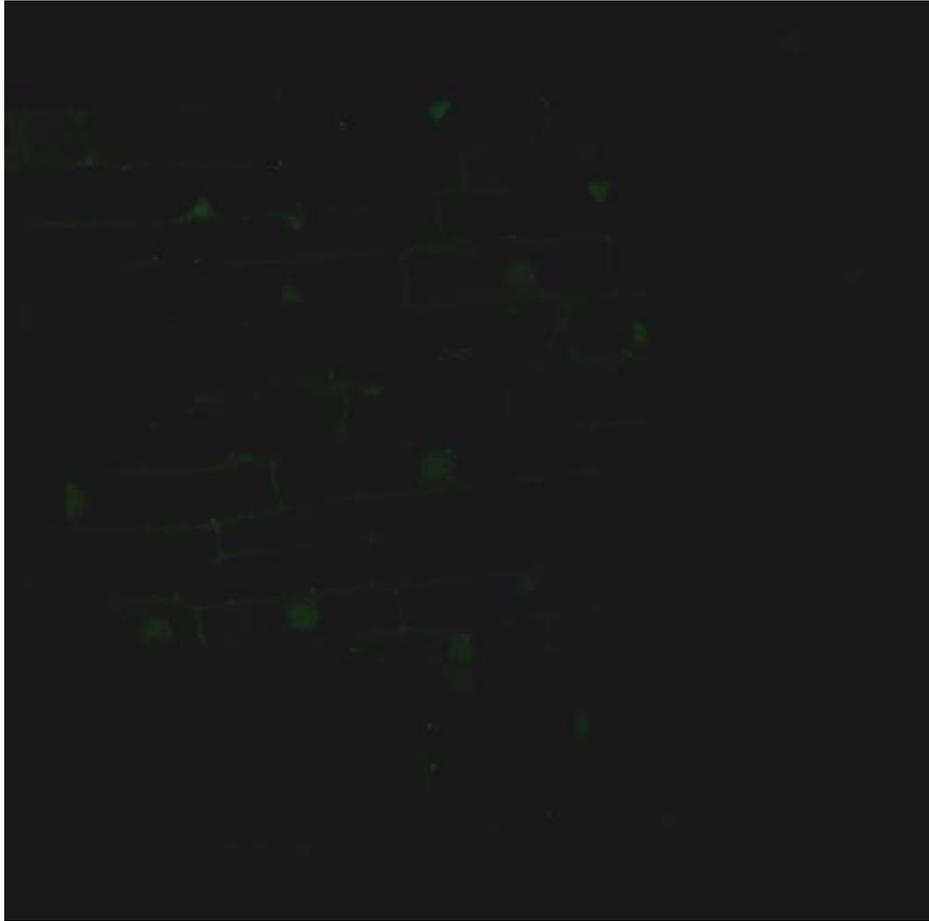


Décodeur CCaMK  
Facteurs de  
transcription

Plant hôte mycorhizienne

Légumineuses

# Oscillations calciques nucléaires et peri-nucléaires



Imagerie du calcium nucléaire  
grâce au senseur NLS-GECO

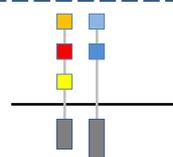
### Symbiose mycorhizienne à arbuscules



Facteurs Myc (LCOs et COs)

Reconnaissance

Récepteurs facteurs Myc



Colonisation

Voie Symbiotique Commune



Corécepteur NORK  
Oscillations calciques



Décodeur CCaMK  
Facteurs de transcription

Organogénèse

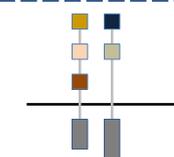
Plant hôte mycorhizienne

### Symbiose rhizobium - légumineuses

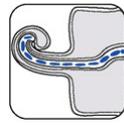


Facteurs Nod (LCOs)

Récepteurs facteurs Nod



Voie Symbiotique Commune



Corécepteur NORK  
Oscillations calciques



Décodeur CCaMK  
Facteurs de transcription

NIN



Récepteur LHK1  
Expression génique Organogénèse

Légumineuses

### Développement de racines latérales

Homologues de NIN (NLP)

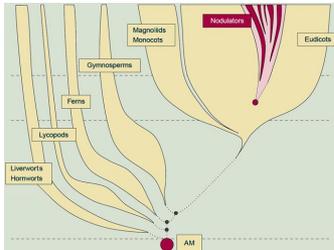


Récepteurs LHK  
Expression génique Organogénèse

Angiospermes

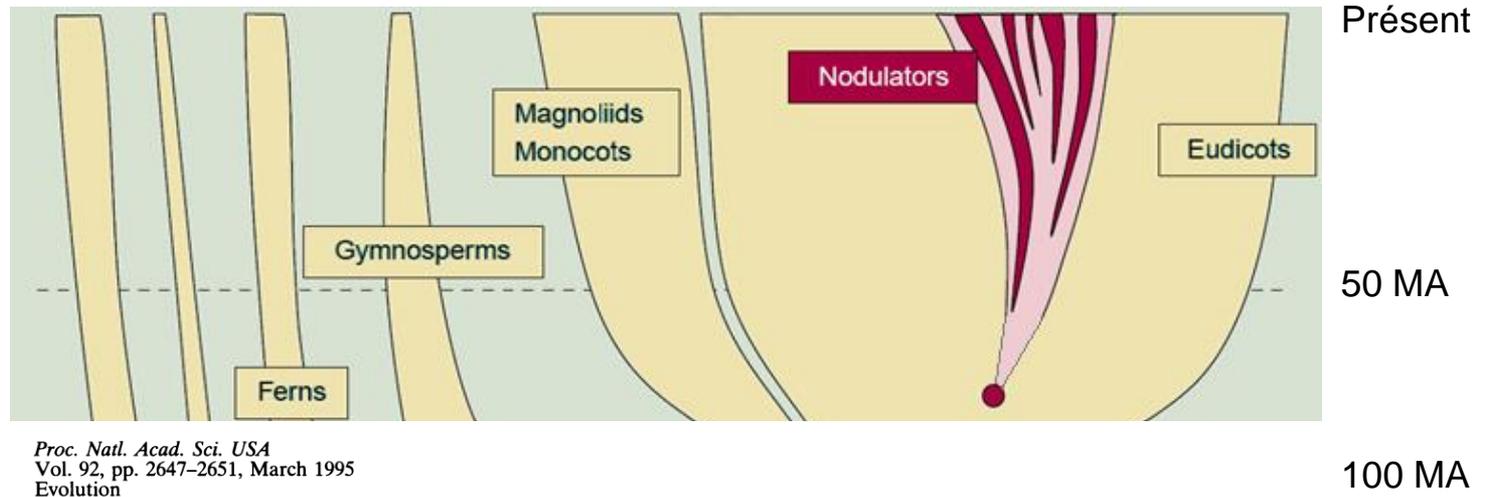


# Mécanismes d'établissement des symbioses



# Evolution de la symbiose rhizobium-légumineuses

# Une histoire évolutive commune

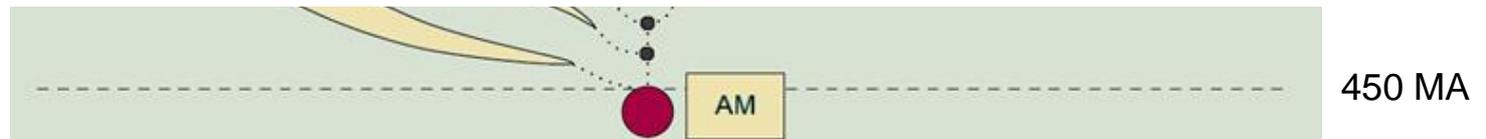


## Chloroplast gene sequence data suggest a single origin of the predisposition for symbiotic nitrogen fixation in angiosperms

DOUGLAS E. SOLTIS\*, PAMELA S. SOLTIS\*, DAVID R. MORGAN†, SUSAN M. SWENSEN‡, BETH C. MULLIN§, JULIE M. DOWD¶, AND PETER G. MARTIN¶||

\*Department of Botany, Washington State University, Pullman, WA 99164-4238; †Department of Biology, Western Washington University, Bellingham, WA 98225; ‡Department of Biology, Indiana University, Bloomington, IN 47405; §Department of Botany, Center for Legume Research, University of Tennessee, Knoxville, TN 37996; and ¶Department of Botany, University of Adelaide, Adelaide, South Australia 5005, Australia

Communicated by Michael T. Clegg, University of California, Riverside, CA, November 14, 1994



# Hypothèse depuis 20 ans: une prédisposition suivie d'origines indépendantes de la nodulation

ARTICLE

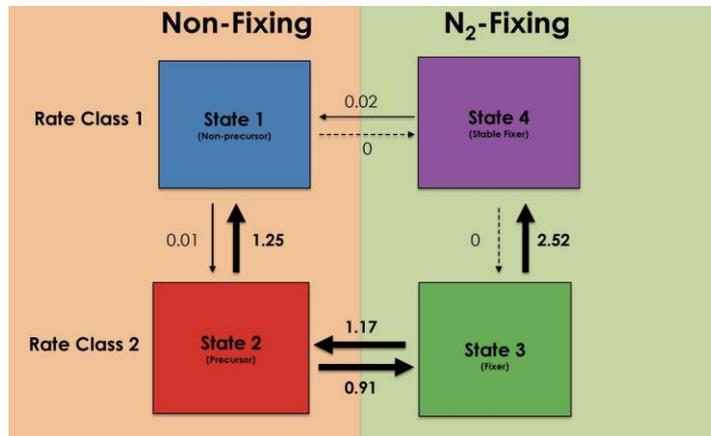
Received 4 Feb 2014 | Accepted 9 May 2014 | Published 10 Jun 2014

DOI: 10.1038/ncomms5087

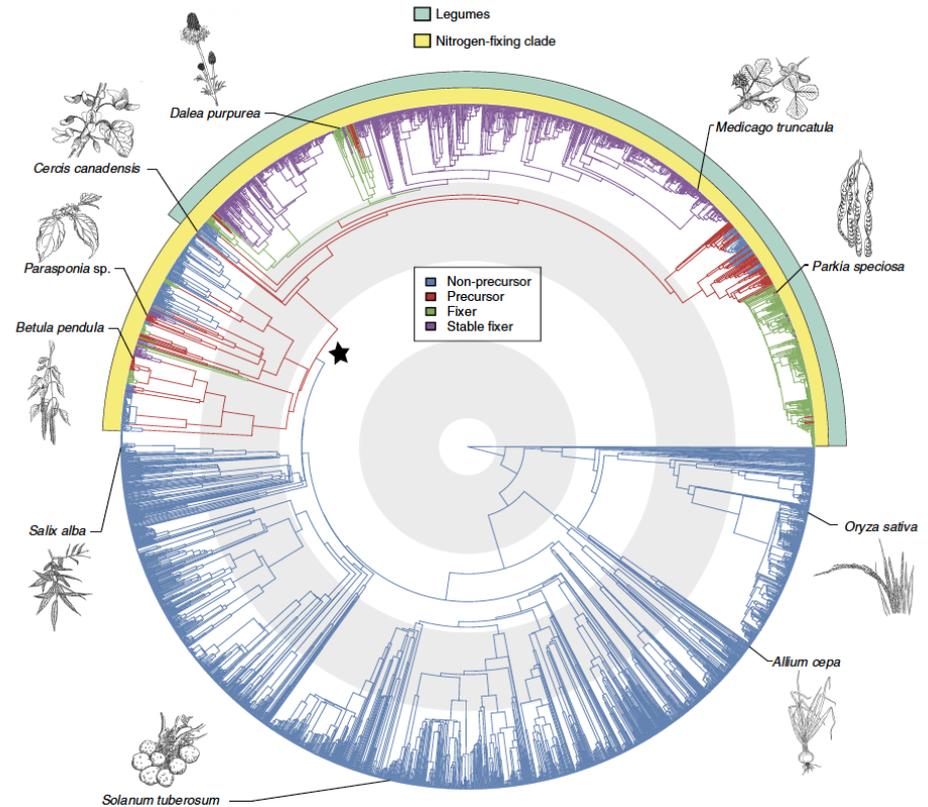
OPEN

A single evolutionary innovation drives the deep evolution of symbiotic N<sub>2</sub>-fixation in angiosperms

Gijsbert D.A. Werner<sup>1</sup>, William K. Cornwell<sup>1,†</sup>, Janet I. Sprent<sup>2</sup>, Jens Kattge<sup>3,4</sup> & E. Toby Kiers<sup>1</sup>

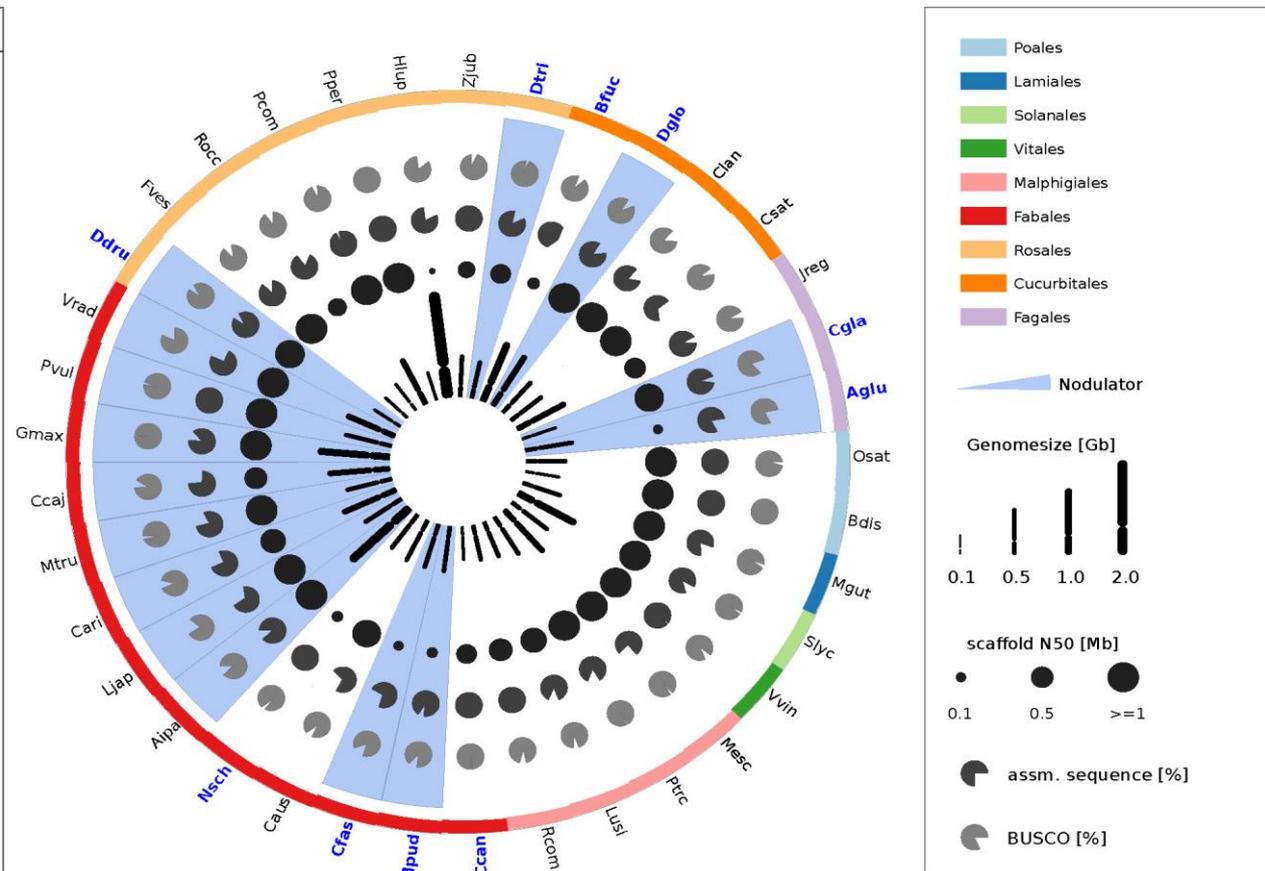


Werner *et al.*, 2014

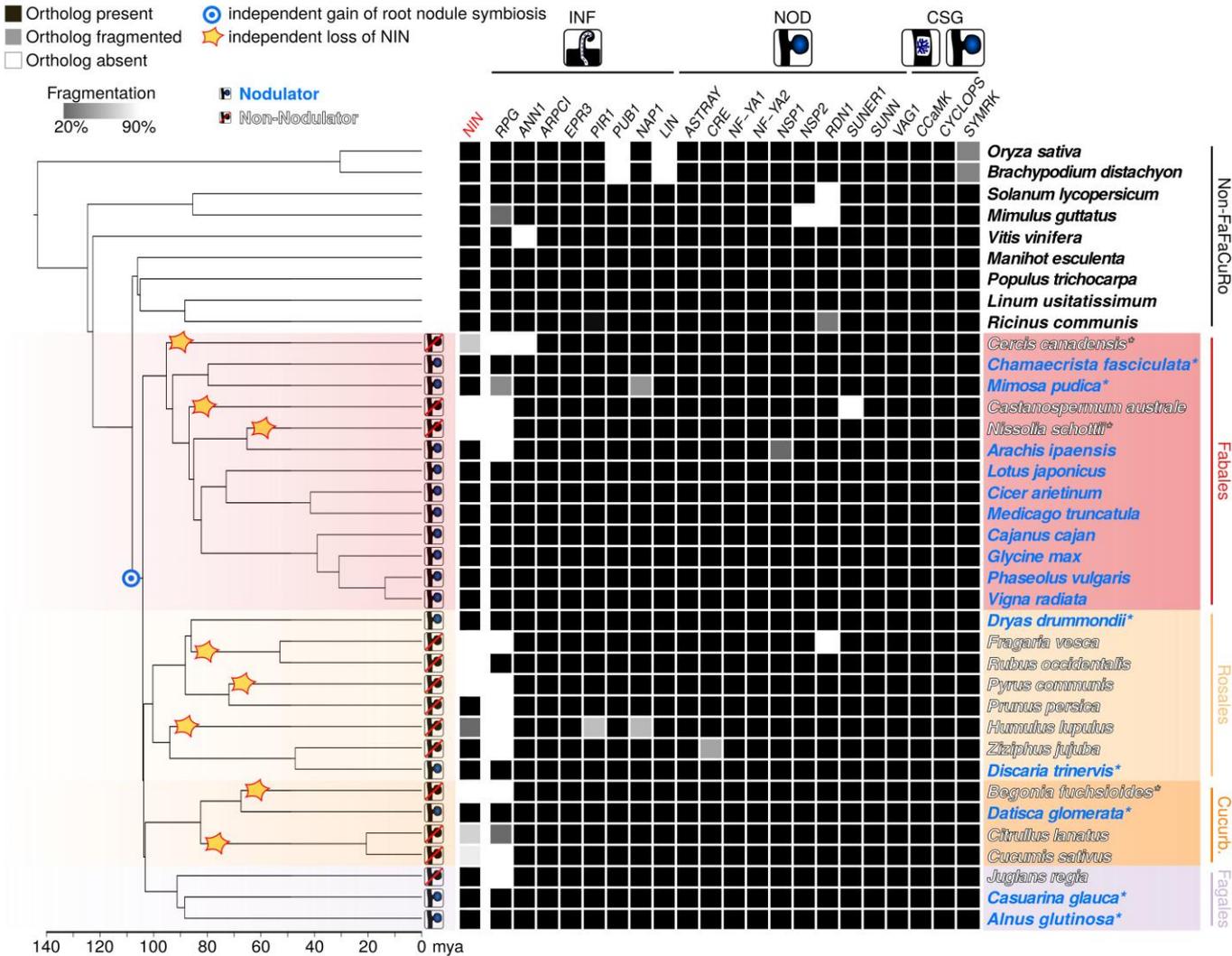


# Séquençage de nouveaux génomes dans la clade FaFaCuRo

Species abbreviation	
Osat	Oryza sativa
Bdis	Brachypodium distachyon
Mgut	Mimulus guttatus
Slyc	Solanum lycopersicum
Vvin	Vitis vinifera
Mesc	Manihot esculenta
Ptrc	Populus trichocarpa
Lusi	Linum usitatissimum
Rcom	Ricinus communis
Ccan	<b>Cercis canadensis</b>
Mpud	<b>Mimosa pudica</b>
Cfas	<b>Chamaecrista fasciculata</b>
Caus	Castanospermum australe
Nsch	<b>Nissolia schottii</b>
Aipa	Arachis ipaensis
Ljap	Lotus japonica
Cari	Cicer arietinum
Mtru	Medicago truncatula
Ccaj	Cajanus cajan
Gmax	Glycine max
Pvul	Phaseolus vulgaris
Vrad	Vigna radiata
Ddru	<b>Dryas drummondii</b>
Fves	Fragaria vesca
Rocc	Rubus occidentalis
Pcom	Pyrus communis
Pper	Prunus persica
Hlup	Humulus lupulus
Zjub	Ziziphus jujuba
Dtri	<b>Discaria trinervis</b>
Bfuc	<b>Begonia fuchsoides</b>
Dglo	<b>Datisca glomerata</b>
Clan	Citrullus lanatus
Csat	Cucumis sativus
Jreg	Juglans regia
Cgla	<b>Casuarina glauca</b>
Aglu	<b>Alnus glutinosa</b>

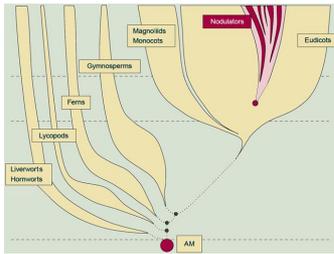


# Pertes répétées de *NIN* et *RPG* dans les espèces non-nodulatrices de la clade FaFaCuRo





## Mécanismes d'établissement des symbioses

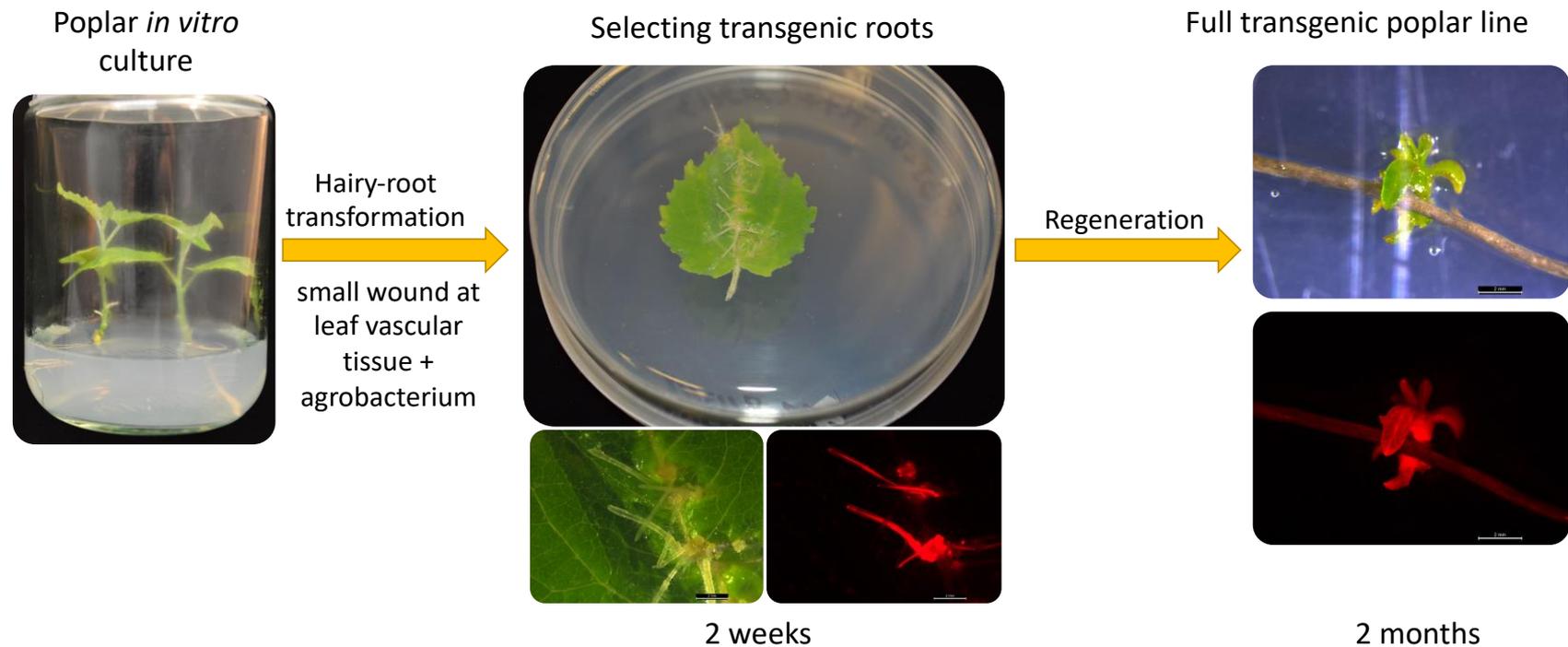


## Evolution de la symbiose rhizobium-légumineuses

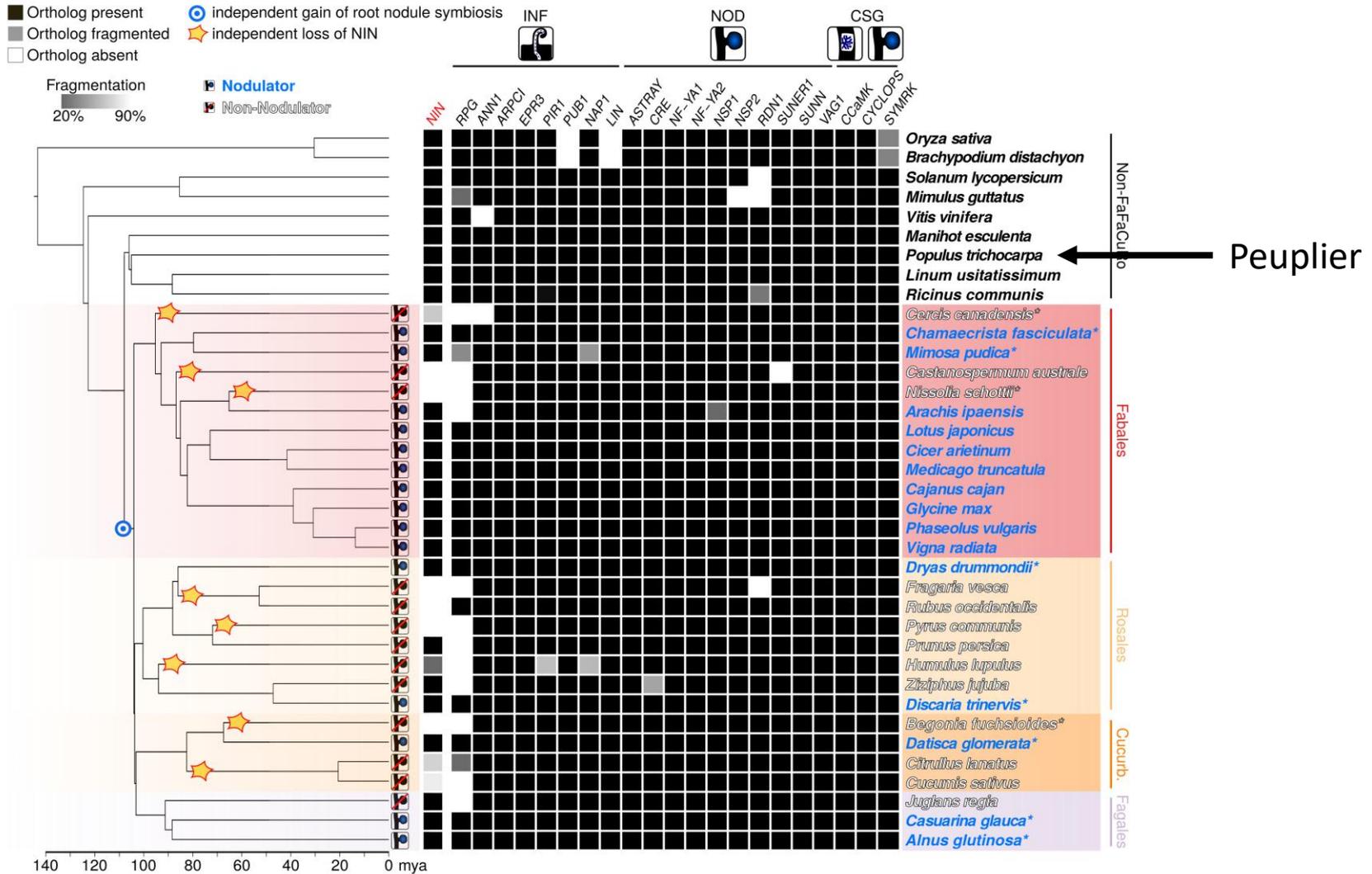


## Développement de nouvelles symbioses

# Le peuplier comme modèle génétique



# Le peuplier contient tous les gènes connus requis pour la nodulation



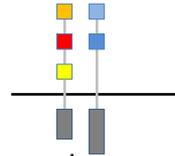
### Symbiose mycorhizienne à arbuscules



Facteurs Myc  
(LCOs et COs)

Reconnaissance

Récepteurs  
facteurs Myc



Colonisation

Voie  
Symbiotique  
Commune



Corécepteur NORK  
Oscillations calciques



Décodeur CCaMK  
Facteurs de  
transcription

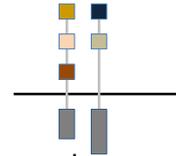
Peuplier

### Symbiose rhizobium - légumineuses

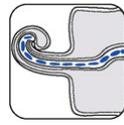


Facteurs Nod  
(LCOs)

Récepteurs  
facteurs Nod



Voie  
Symbiotique  
Commune



Corécepteur NORK  
Oscillations calciques



Décodeur CCaMK  
Facteurs de  
transcription

Peuplier

### Développement de racines latérales

Organogénèse

Homologues de NIN (NLP)



Récepteurs LHK  
Expression génique  
Organogénèse

Peuplier

### Symbiose mycorhizienne à arbuscules

### Symbiose rhizobium - légumineuses

### Développement de racines latérales

Reconnaissance

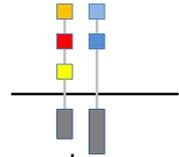


Facteurs Myc (LCOs et COs)

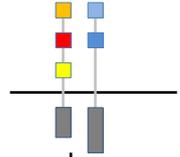


Facteurs Myc (LCOs)

Récepteurs facteurs Myc



Récepteurs facteurs Myc



Colonisation

Voie Symbiotique Commune

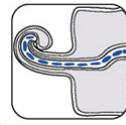


Corécepteur NORK  
Oscillations calciques



Décodeur CCaMK  
Facteurs de transcription

Voie Symbiotique Commune



Corécepteur NORK  
Oscillations calciques



Décodeur CCaMK  
Facteurs de transcription

Organogénèse

Homologues de NIN (NLP)

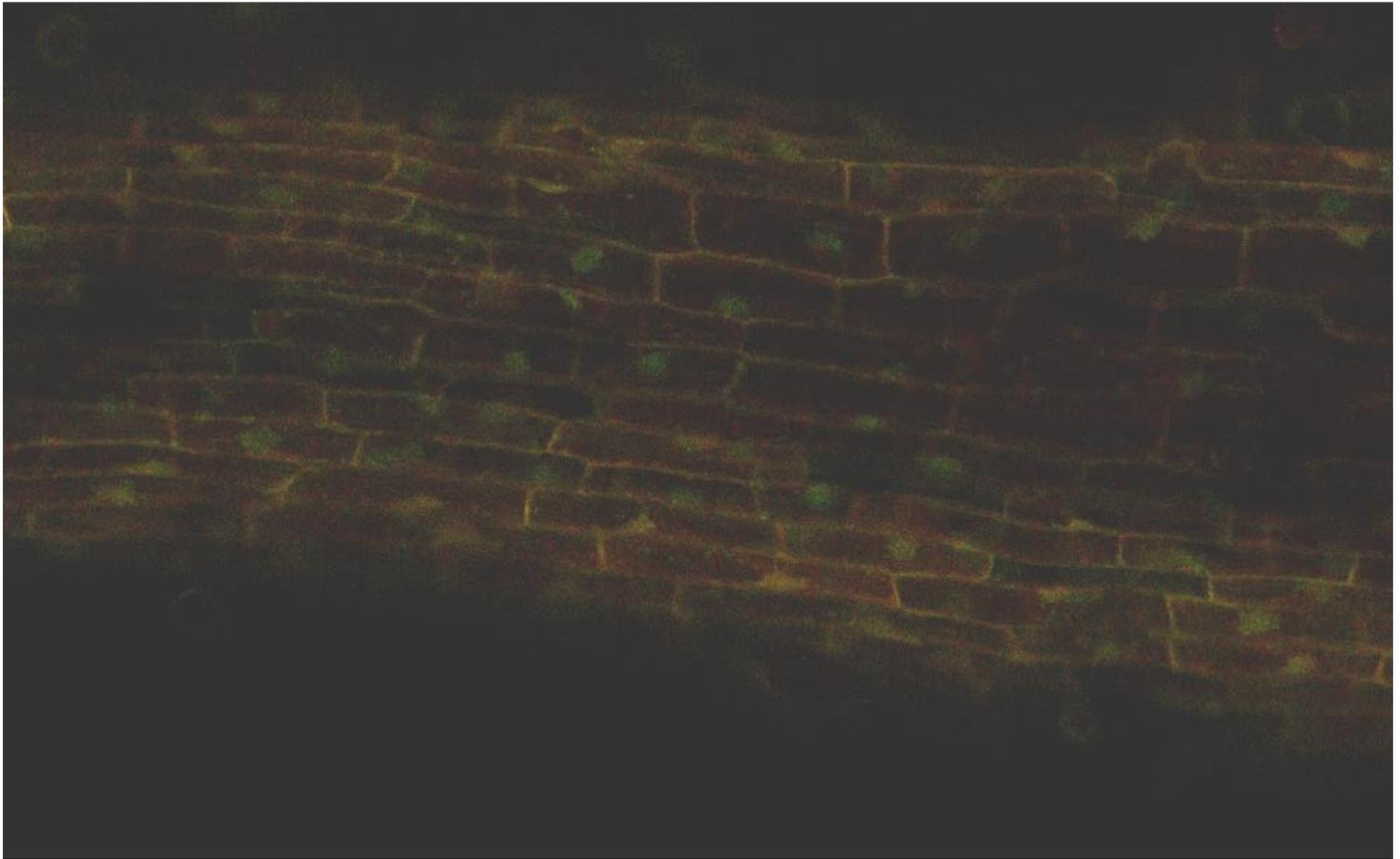


Récepteurs LHK  
Expression génique  
Organogénèse

Peuplier

Peuplier

Peuplier



Racines de *Populus tremula x alba* exprimant un senseur NLS-G-GECO et inoculée avec *Rhizobium* sp. IRBG74 sur-exprimant *nodD2*

### Symbiose mycorhizienne à arbuscules

### Symbiose rhizobium - légumineuses

### Développement de racines latérales

Reconnaissance

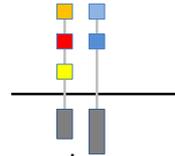


Facteurs Myc (LCOs et COs)

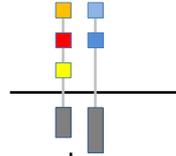


Facteurs Myc (LCOs)

Récepteurs facteurs Myc



Récepteurs facteurs Myc



Colonisation

Voie Symbiotique Commune

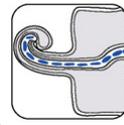


Corécepteur NORK  
Oscillations calciques



Décodeur CCaMK  
Facteurs de transcription

Voie Symbiotique Commune



Corécepteur NORK  
Oscillations calciques



Décodeur CCaMK  
Facteurs de transcription

Organogénèse

Homologues de NIN (NLP)



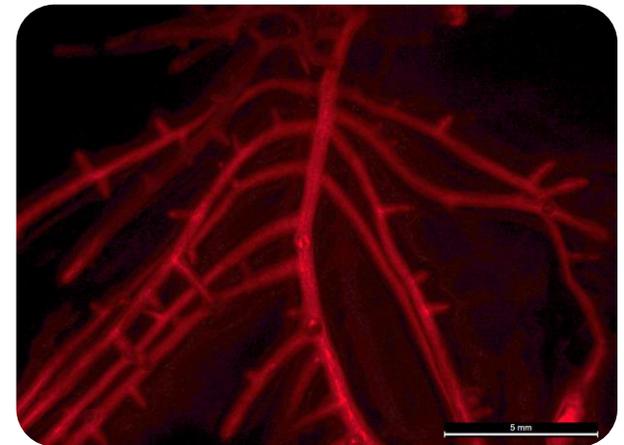
Récepteurs LHK  
Expression génique  
Organogénèse

Peuplier

Peuplier

Peuplier

# *PtNIN2b* contrôle la formation d'organes racinaires latéraux chez le peuplier



Racines transgéniques de peuplier exprimant des facteurs de transcription NIN sous contrôle du promoteur *AtUbi10* d'*Arabidopsis thaliana*

### Symbiose mycorhizienne à arbuscules

### Symbiose rhizobium - légumineuses

### Développement de racines latérales

Reconnaissance

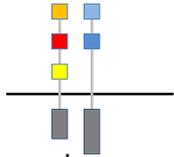


Facteurs Myc (LCOs et COs)

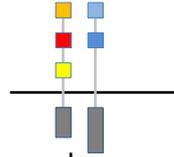


Facteurs Myc (LCOs)

Récepteurs facteurs Myc



Récepteurs facteurs Myc



Colonisation

Voie Symbiotique Commune

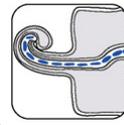


Corécepteur NORK  
Oscillations calciques



Décodeur CCaMK  
Facteurs de transcription

Voie Symbiotique Commune



Corécepteur NORK  
Oscillations calciques



Décodeur CCaMK  
Facteurs de transcription

Organogénèse

NIN



Récepteur LHK1  
Expression génique Organogénèse

Homologues de NIN (NLP)

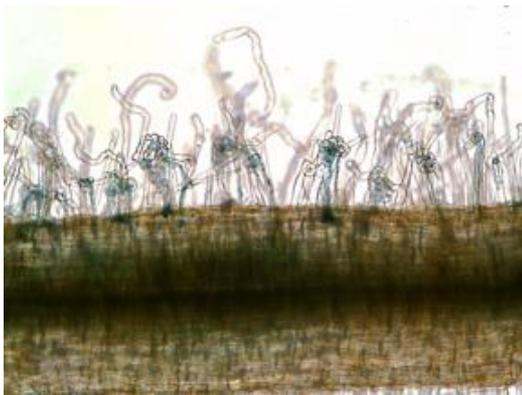


Récepteurs LHK  
Expression génique Organogénèse

Peuplier

Peuplier

Peuplier



# Recherche en cours

**Colonisation intracellulaire du peuplier**

**Organogénèse de nodosités chez le peuplier**

**Transfer de la symbiose rhizobium-légumineuses chez les céréales**

# Remerciements

<http://anelab.wisc.edu/>

## Equipe Ané

(Matthew Crook)

Dhileepkumar Jayaraman

Vânia Pankievicz

Junko Maeda

Shane Bernard

Michelle Keller-Pearson

Marian Lund

Anthony Bortolazzo

Zachary Keyser

Kevin Cope

Thomas Irving

Lucas Maia

Devanshi Khokhani

Lindsay Chamberlain

Tomás Rush

Shivangi Vayla

Sanhita Chakraborty

Bailey Kleven



## Collaborateurs pour les projets présentés

Matias Kirst, Université de Floride

Pam and Doug Soltis, Université de Floride

Rob Guralnick, Université de Floride

Pierre-Marc Delaux, CNRS, Toulouse, France

Ryan Folk, Université de Floride

Sushmita Roy, Université du Wisconsin - Madison

Cécile Ané, Université du Wisconsin - Madison

