



Leviers génétiques pour optimiser les interactions positives plantes-microorganismes

Jacques Le Gouis

UMR INRA/UCA Génétique, diversité et écophysiologie des céréales, Clermont-Ferrand

Benoit Lefebvre (LIPM Toulouse), Philippe Lemanceau (Agro-Ecologie Dijon), Yvan Moenne-Loccoz (EM Lyon)



Journée scientifique de l'association des sélectionneurs français

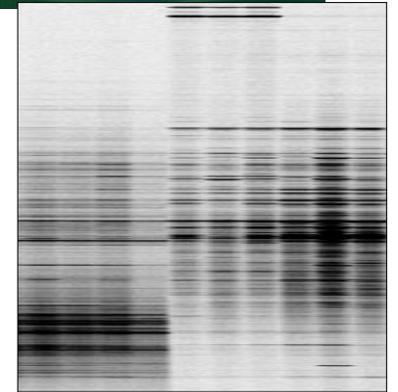
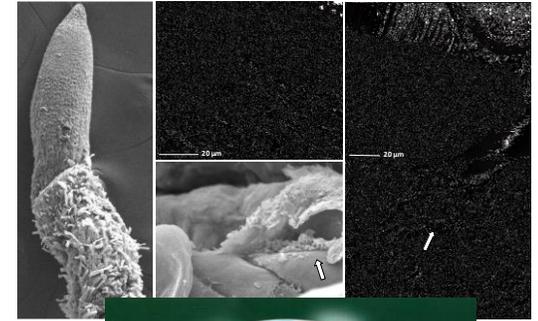
Le système racinaire et la rhizosphère en amélioration des plantes

- Compréhension et valorisation des interactions entre plantes et microorganismes telluriques : Un enjeu majeur en agroécologie - Philippe Lemanceau (INRA, Dijon)
- Application du phénotypage haut débit à l'étude des interactions plante x microorganismes en conditions de stress - Christophe Salon (INRA, Dijon)
- Recherche des meilleurs couples pois-rhizobia. Premiers résultats et perspectives - Virginie Bourion (INRA, Dijon)
- Interactions racines x rhizobactéries et leur variabilité génétique chez le blé - Yvan Moenne-Loccoz (Lyon) & Jacques Le Gouis (INRA, Clermont-Ferrand)
- Variabilité génétique pour le bénéfice de la symbiose mycorhizienne chez les graminées ; possibilités de sélection chez le blé - Benoît Lefebvre (INRA, Toulouse)

Versailles, 7 février 2019

Les sols, principal réservoir de biodiversité des agroécosystèmes!

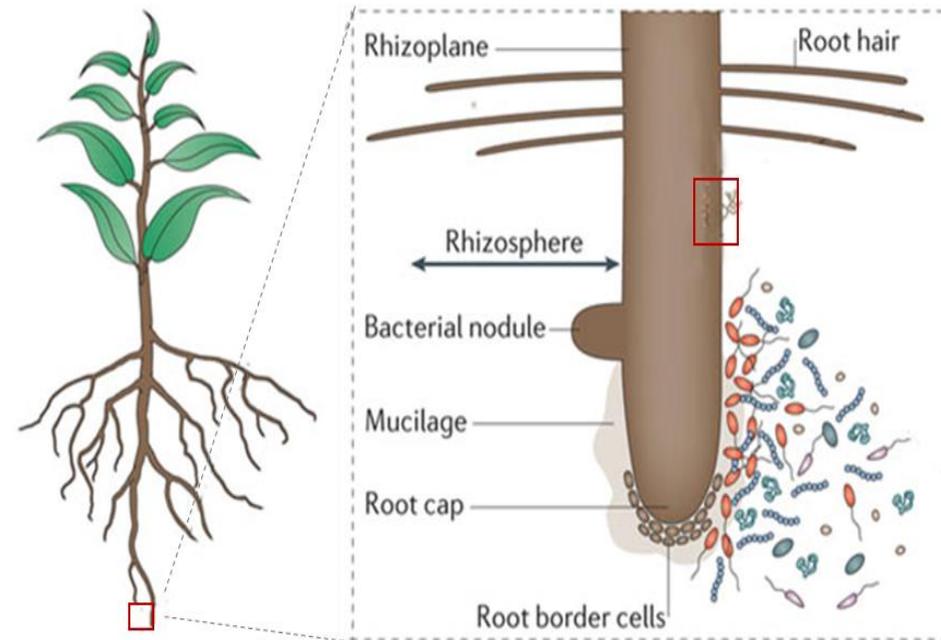
- Foisonnement d'organismes
 - ✓ Faune : 1-5 T/ha
 - ✓ Champignons : 3,5 T/ha
 - ✓ Bactéries : 1,5 T/ha
- Gigantesque biodiversité!
 - ✓ Jusqu'à un passé récent, uniquement accès aux microorganismes cultivables
 - ✓ Progrès méthodologiques
 - ✓ possibilité d'extraire l'ADN du sol
 - ✓ $10^4 - 10^6$ génotypes bactériens / g sol



(P. Lemanceau)

La rhizosphère, une vie intense...

- Rhizosphère : fraction de sol qui est contact avec les racines
- Les plantes libèrent ~ 20% de leurs photosynthétats au niveau des racines
- Ces rhizodépôts constituent une source majeure de composés organiques pour les microorganismes telluriques qui sont essentiellement hétérotrophes voire biotrophes
- Forte colonisation : $\sim 10^8$ à 10^9 bactéries par g de rhizosphère et 1.0 à 1.5 m de filament fongique par cm^2 de surface racinaire (Moënne-Loccoz et al. 2014)



Philippot et al. (2013)

(P. Lemanceau)

Effets phytobénéfiques

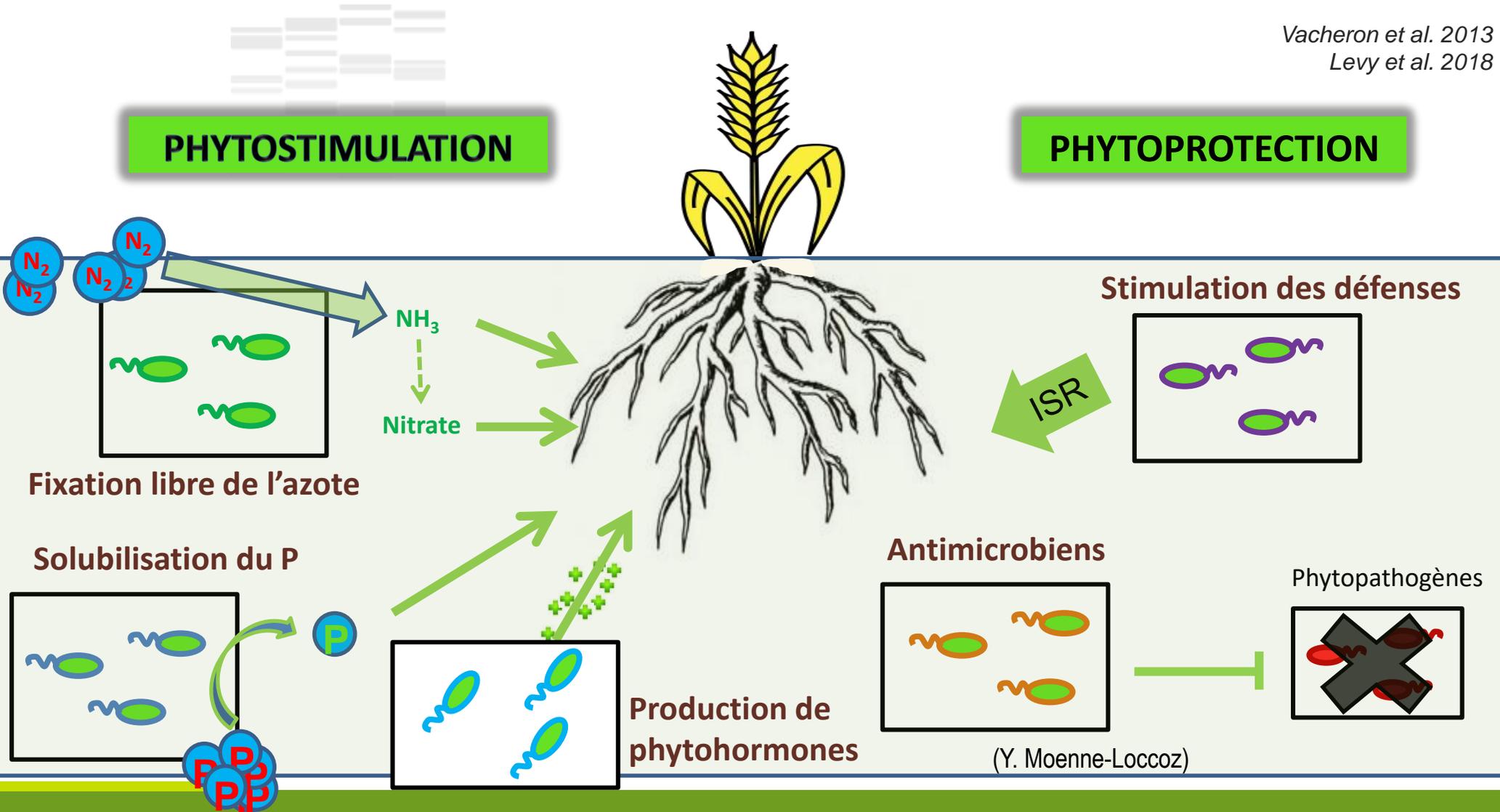
- Champignons et bactéries
- Le terme PGPR désigne des bactéries présentes dans la rhizosphère et qui exercent un effet bénéfique sur la croissance des plantes
- Colonisent à la fois le sol rhizosphérique, la surface racinaire (rhizoplane) ou l'intérieur des racines dans les espaces intercellulaires et les cellules
- Seulement 1 à 2% des bactéries rhizosphériques promouvraient la croissance des plantes
- Grand nombre de genres bactériens : *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azospirillum*, *Agrobacterium*, *Azotobacter*, *Arthrobacter*, *Alcaligenes*, *Serratia*, *Rhizobium*, *Enterobacter*, *Burkholderia*, *Beijerinckia*, *Klebsiella*, *Clostridium*, *Vario-vovax*, *Xanthomonas* et *Phyllobacterium* (Barneix et al, 2002)

Plusieurs modes d'action

Vacheron et al. 2013
Levy et al. 2018

PHYTOSTIMULATION

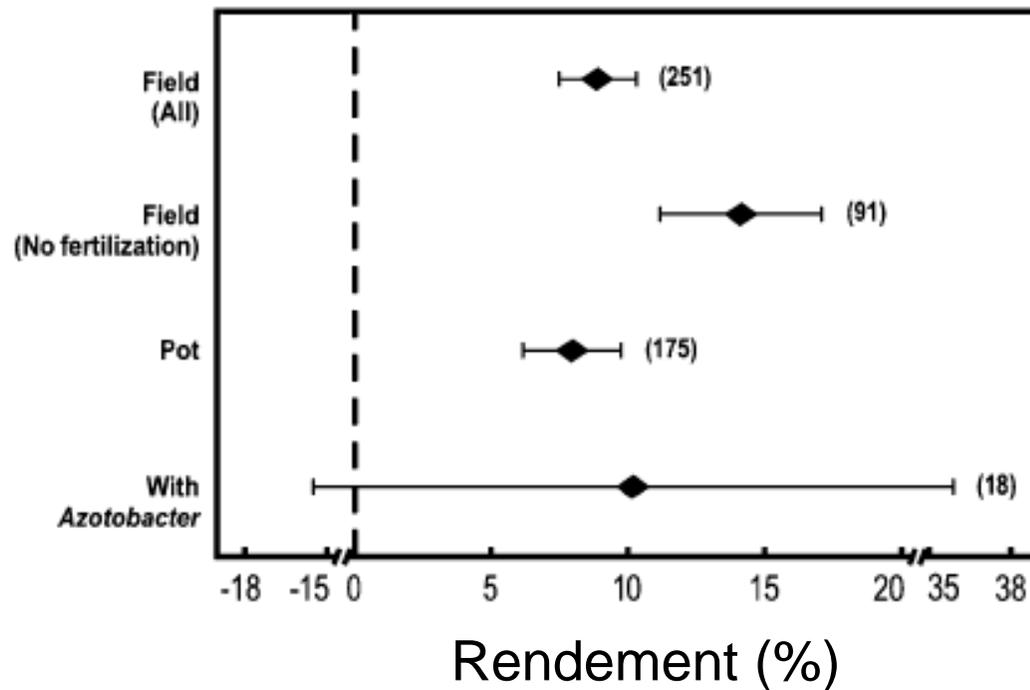
PHYTOPROTECTION





Effet PGPR - Blé

Moyenne

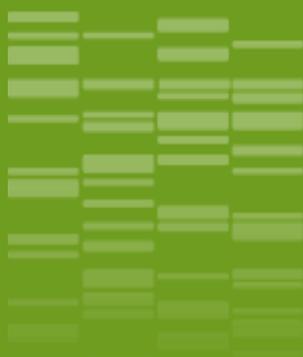


Effet *Azospirillum*

- + 10 % en moyenne
- Effet plus marqué à faible niveau d'azote

Meta-analyse de 59 études 1981 – 2008 (480 essais)

(Veseroglou & Menexes, 2010)

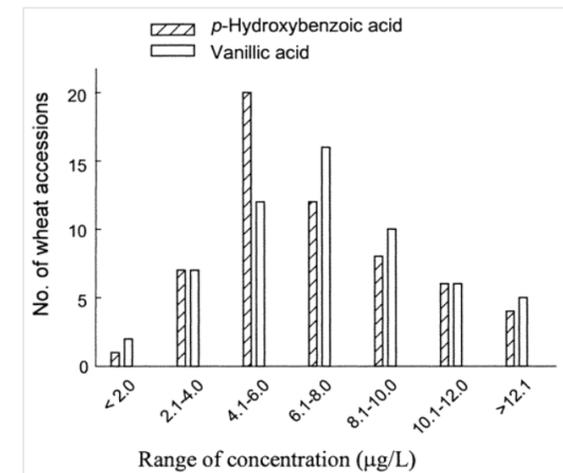
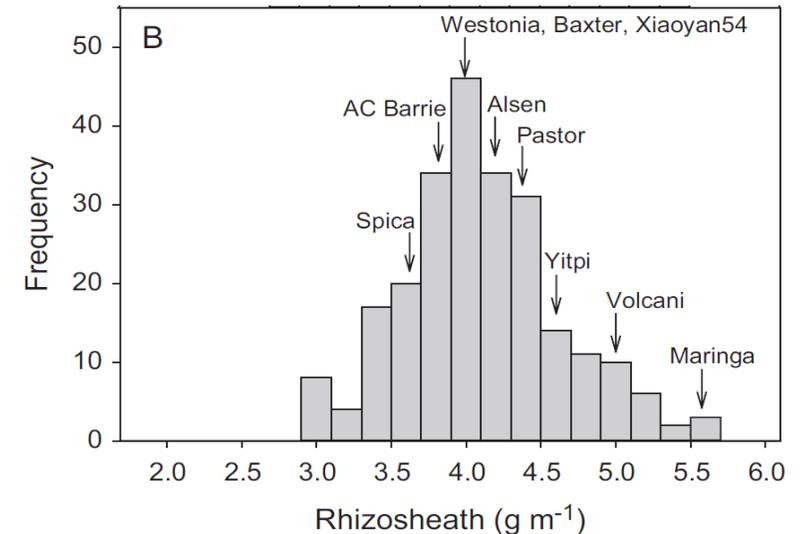


Variabilité génétique



Effets génétiques : taille rhizosphère

- Variabilité pour la taille de la rhizosphère (rhizosheath) : sol agrégé aux racines / lié à la taille des poils absorbants (Delhaize et al. 2015)
- Variabilité pour la quantité et la qualité des exsudats racinaires (Wu et al. 2001, allelopathie)
- Effet sur la diversité des bactéries recrutées (e.g. Venieraki et al. 2011 sur *Azospirillum*)



Effets génétiques : taille des populations

Densité (cfu / g de racine) des populations de *Pseudomonas* dans la rhizosphère de 5 variétés de blé cultivées dans 3 sols

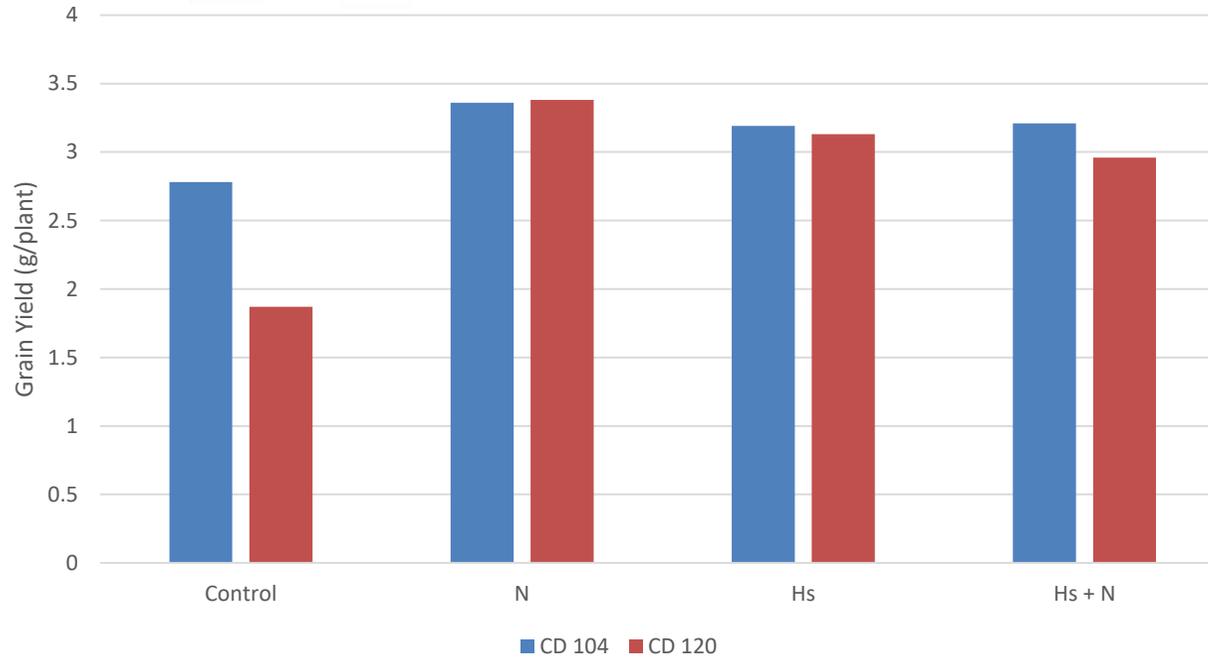
<i>Wheat cultivar</i>	<i>CV</i>	<i>WVC-A</i>	<i>WVC-SS</i>
Eltan	ND	ND	ND
Hill-81	2.09×10^4 a ^y	ND	ND
Lewjain	2.15×10^5 b	2.75×10^5 a	12,500
Madsen	3.63×10^4 a	ND	ND
Penawawa	4.80×10^4 ab	3.20×10^5 a	ND

ND = non détecté

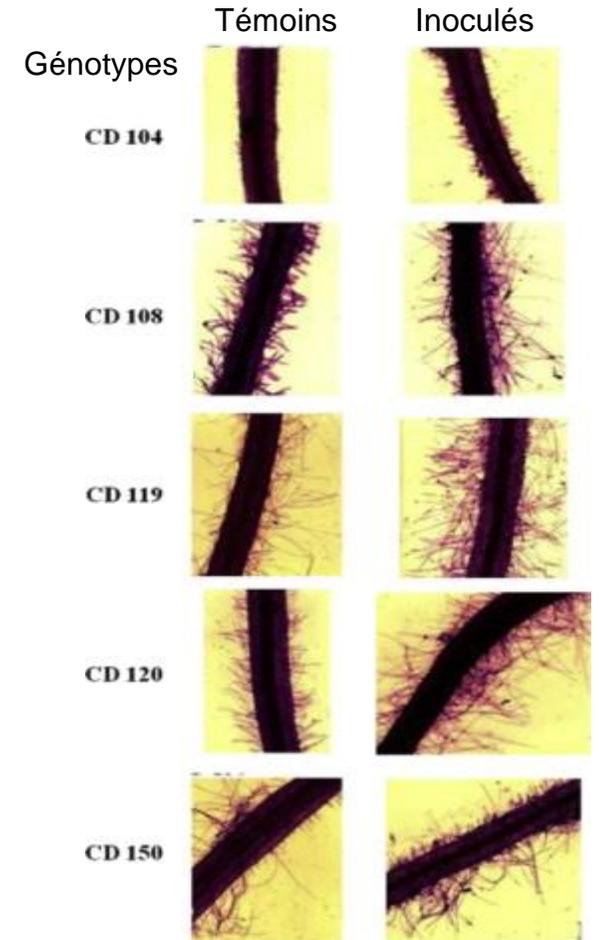
Mazzola et al. (2004)

Effets génétiques : réponse de la plante

Modification de sa morphologie ou de sa croissance



Herbaspirillum seropedicae



(Neiverth et al. 2014)

Effets génétiques

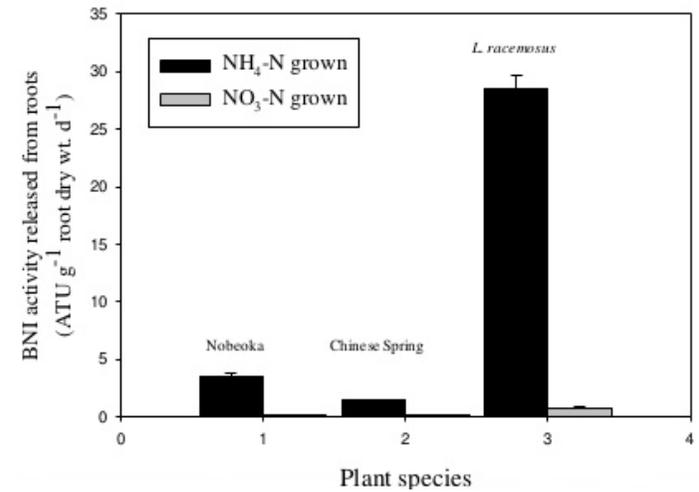
Blé inhibiteurs de nitrification (BNI)

Idée : limiter la nitrification biologique

Ammoniac -> nitrites -> nitrates

Moyen : L'espèce sauvage *Leymus racemosus* exsude des produits limitant ou inhibant *Nitrosomonas* (Subbarao et al. 2009)

Travaux en cours : Introduction de chromosomes de *Leymus* dans des lignées de blé (CIMMYT et JIRCAS, Japon)



(Subbarao et al. 2015)





Analyses génétiques



Analyses génétiques de l'interaction



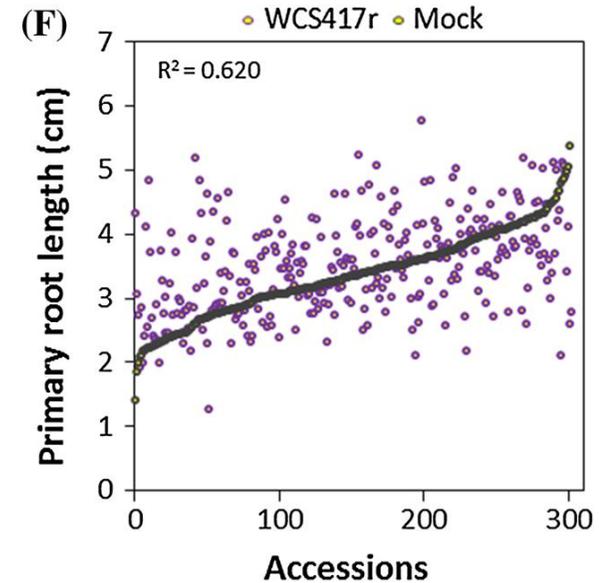
- Population magic à 4 parents : variation de la taille de la rhizosphère – 6 loci majeurs sur les chromosomes 2B, 4D, 5A, 5B, 6A and 7A qui expliquent 42% de la variation (Delhaize et al. 2015)
- Population ITMI : capacité d'adhésion *Azospirillum brasilense* sur les racines - six QTL détectés sur 4 (majeur sur le 1A) (De Leon et al. 2015)



Delhaize et al. 2015

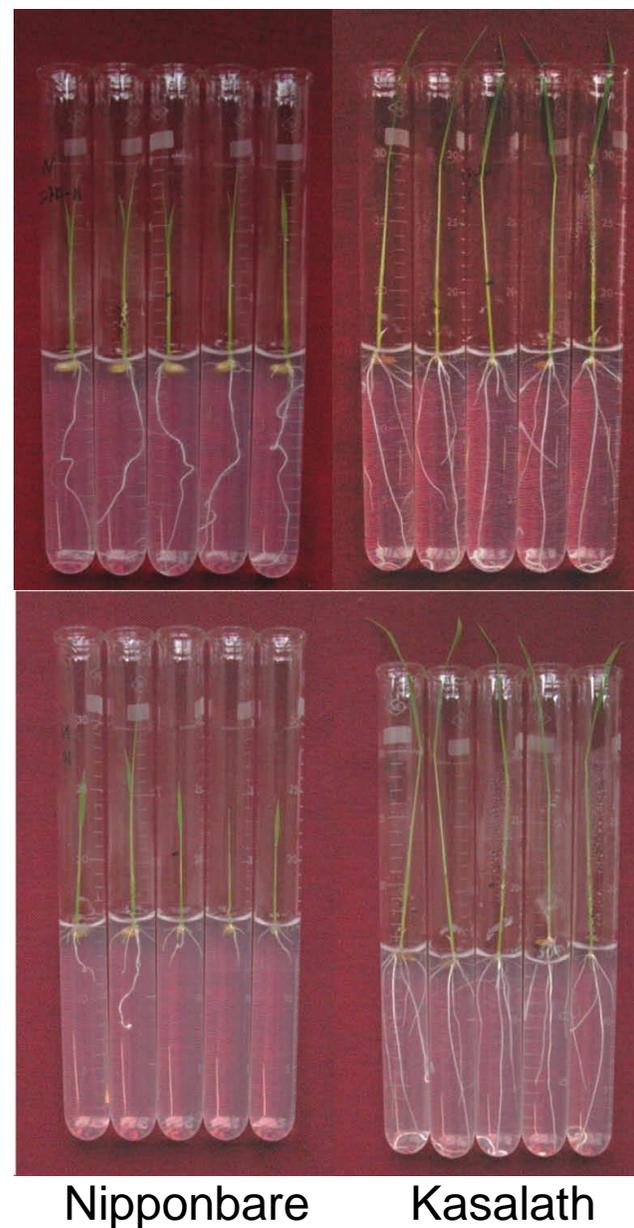
Analyses génétiques de l'interaction

- Réponse de croissance racinaire à l'inoculation avec *Pseudomonas* chez *Arabidopsis* (Wintermans et al. 2016)
- Croissance des racines et ramifications: ↑ du poids frais, du nombre de racines latérales
- 10 QTL identifiés



Analyses génétiques de l'interaction

- Réponse de croissance racinaire à l'inoculation avec *Azospirillum* chez le riz (Masuda et al. 2018)
- Croissance des racines de Nipponbare inhibée par *Azospirillum*.
- Trois QTL sur les chromosomes 6 (× 2) et chromosome 7



Témoin

Azospirillum

Nipponbare

Kasalath

Analyses dans le cadre du projet ANR BacterBlé

- Phénotypage d'une Core-Collection de 196 accessions
- Génétique d'association (GWAS)
- Pour les inoculations avec
 - *Pseudomonas kilonensis* F113
 - *Azospirillum brasilense* Sp245
- Pour les caractères
 - Colonisation racinaire
 - Expression des gènes bactériens

Données de génotypage de PIA BreedWheat

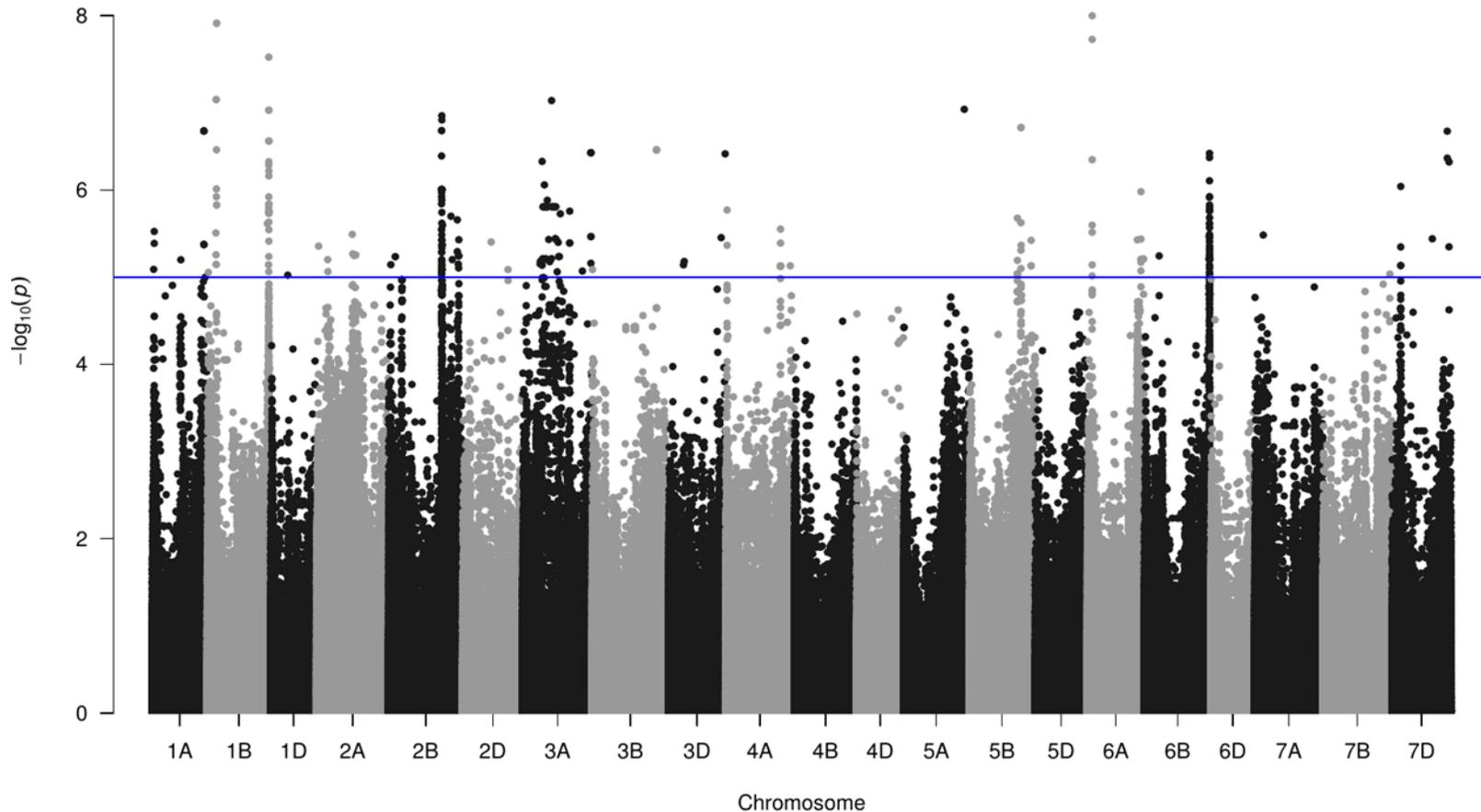


ANR BacterBlé
(ANR-14-CE19-0017)



Des régions génétiques sont identifiées

LOD > 5 → 302 SNP associés à au moins 1 caractère





Prise en compte en sélection



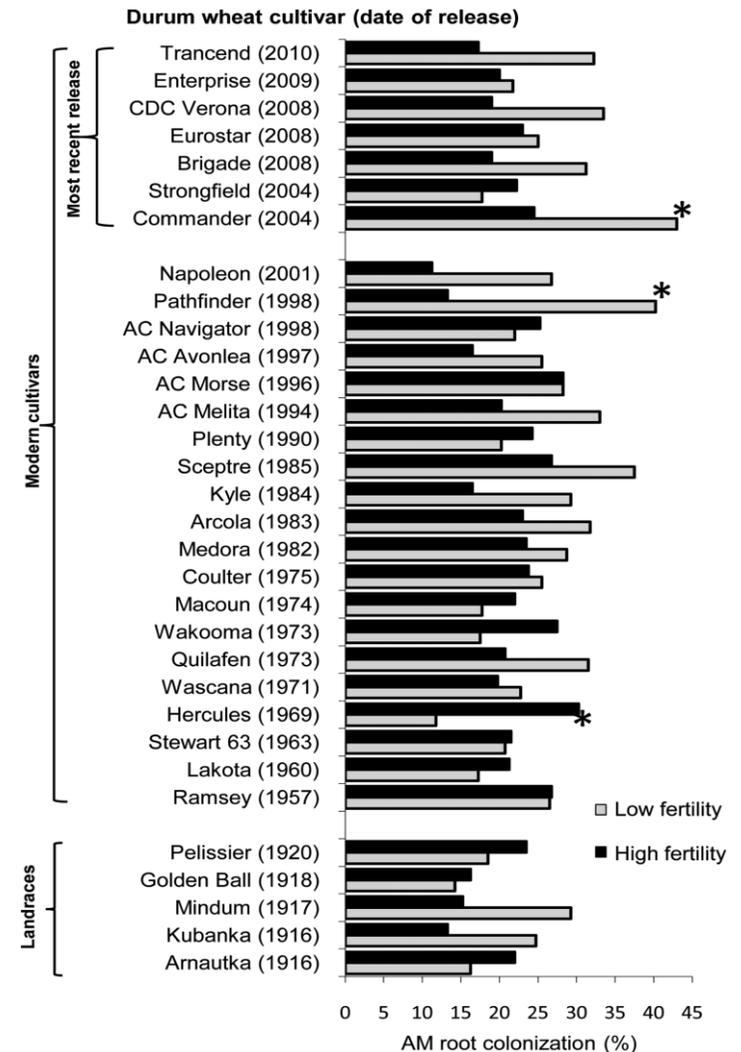
Effet de la domestication et de la sélection moderne ?

- Pas de sélection ciblée pour ces interactions bénéfiques
- Contre-sélection ?
 - ✓ Dans des conditions à fort niveau d'intrant
 - ✓ Coûts associés à l'association
 - ✓ Modification du système racinaire
 - ✓ Effet indirect de la sélection pour la résistance aux maladies

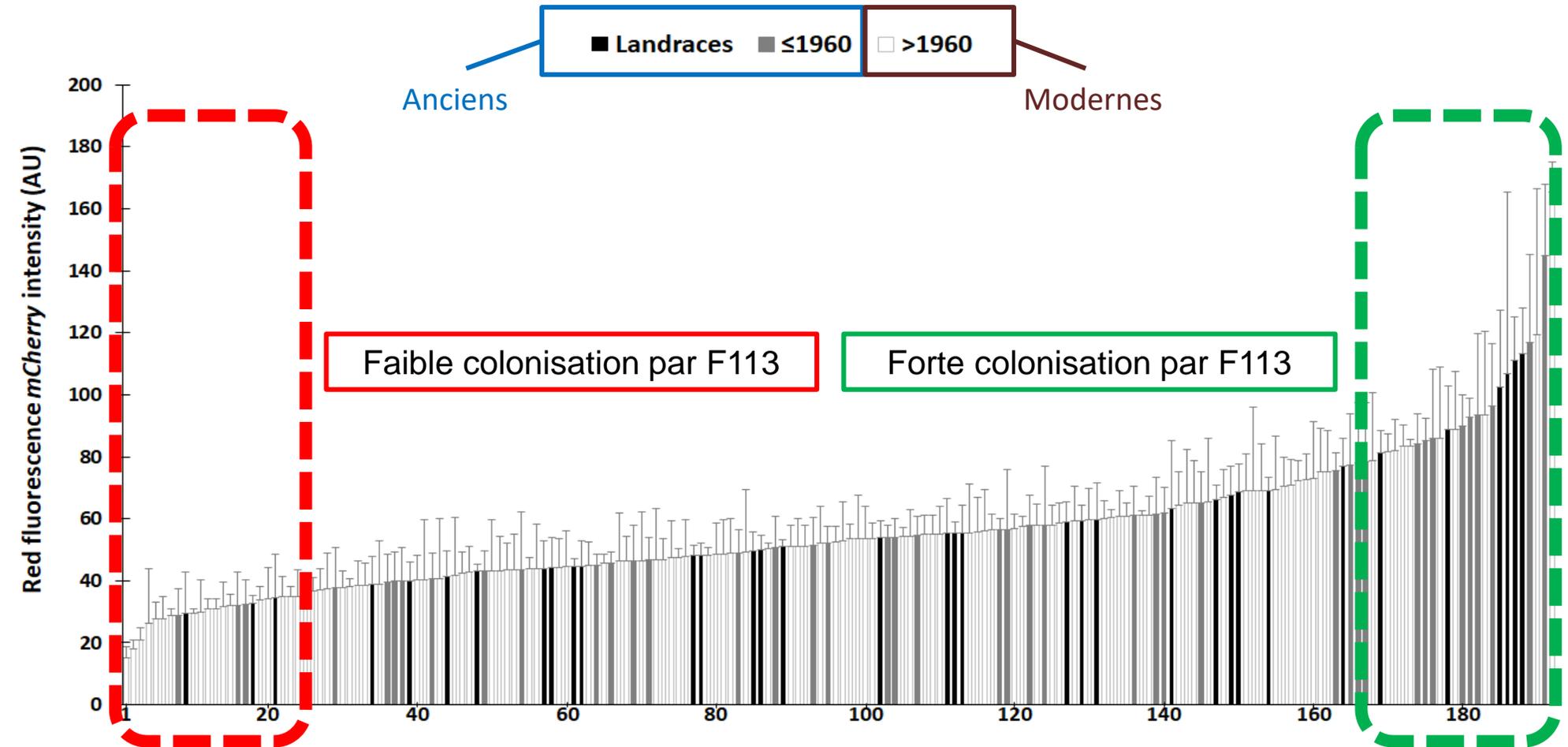
Effet de la domestication et de la sélection moderne ?

Exemple : des résultats contrastés pour les symbioses mycorhiziennes

- ✓ Ancêtres, variétés anciennes et de pays plus interactives que variétés modernes de blé (Hetrick et al 1992)
- ✓ Variétés récentes moins colonisées mais répondent plus (Lehman et al 2012, méta-analyse de 39 articles / 320 génotypes)
- ✓ Variétés récentes de blé dur plus colonisées (27% contre 21% pour des variétés de pays) et pas de différence significative pour la réponse (Ellouze et al 2016)



Colonisation des racines par *Pseudomonas*



(J. Valente, Y. Moenne-Loccoz, C. Prigent-Combaret)

Projets et réseaux

Champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) et rhizobia

⇒ Projets financés par la fondation B&M Gates – Objectifs : Transfert de gènes permettant l'organogenèse et la colonisation par des rhizobia / Transfert de gènes codant la nitrogénase (G. Oldroyd, JIC)

WHEATSYM (2017-2020) LIPM / IPS2 / Biogemma - Objectifs: Identifier et modifier l'expression des récepteurs de signaux symbiotiques chez le blé / Effet sur l'interaction avec des CMA & des rhizobia / Effet des signaux symbiotiques sur l'architecture racinaire

(B. Lefebvre)

Réseaux INRA:

- SymbiFix : favoriser les interactions entre les communautés de recherche sur la fixation symbiotique de l'azote et sur les céréales
- AgroSym : intensifier, généraliser et élargir les services rendus par les symbioses et les associations mutualistes

Conclusions

De nombreux micro-organismes bénéfiques peuvent interagir avec les racines des plantes

De nombreux projets de recherche en France et à l'étranger

Effet du génotype

- Sur la taille de la rhizosphère / les populations et la diversité microbienne
- Sur la réponse de la plante aux interactions

Déterminisme génétique

- Encore très peu d'analyses génétiques
- En systèmes très simplifiés (*in vitro*)
- Des régions associées sont détectées

Sélection

- Effet de la sélection non ciblée ?
- Comment sélectionner ces interactions ?



Merci pour votre attention

