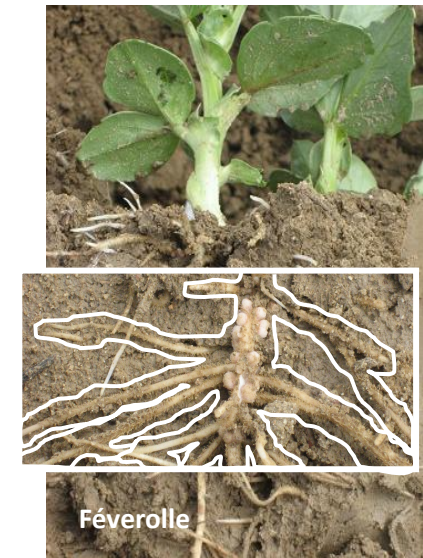
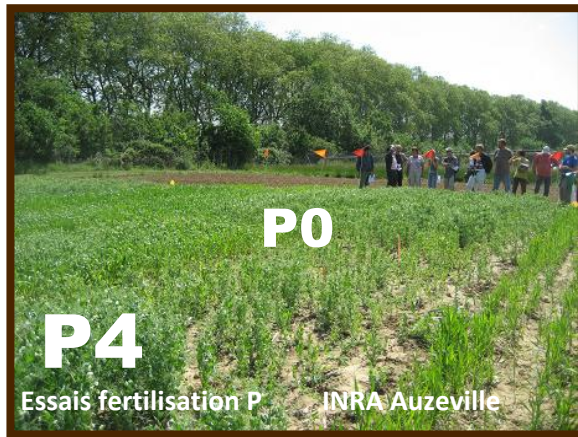


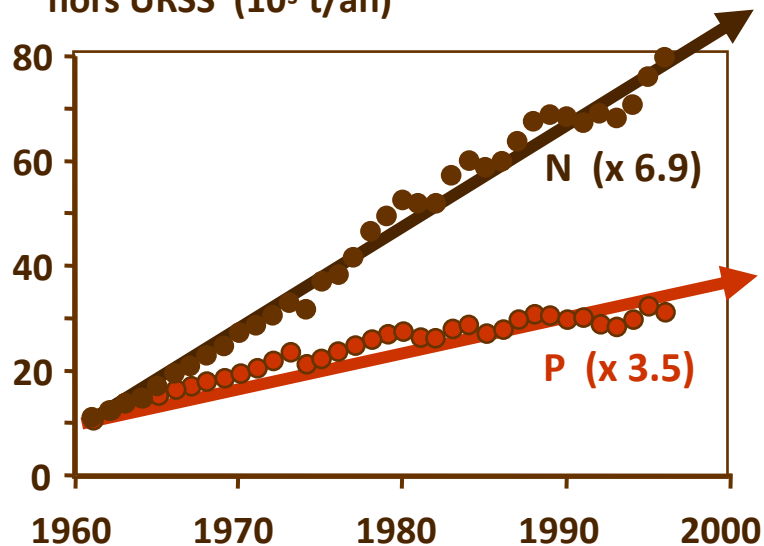
Production végétale et nutrition phosphatée : quels sont les leviers mobilisables pour optimiser la biodisponibilité du Phosphore en agriculture ?



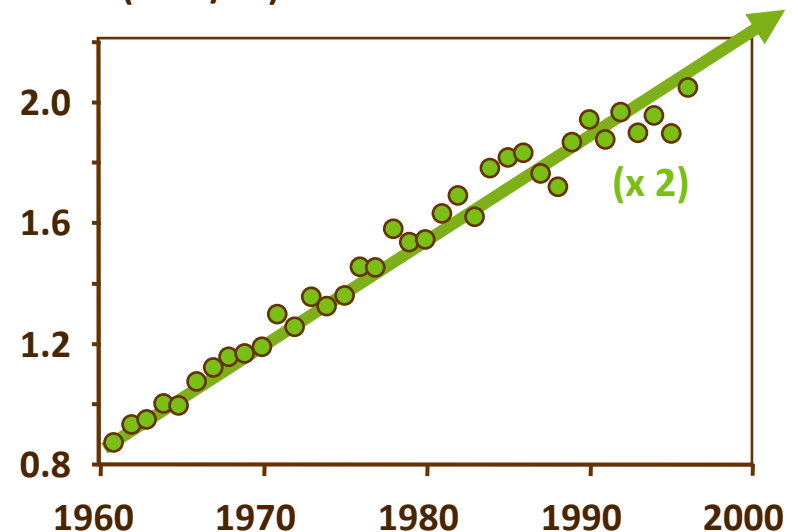
Claude Plassard et Philippe Hinsinger
UMR Eco&Sols, Montpellier

Utilisation des engrais N et P en agriculture

Utilisation mondiale fertilisants N et P
hors URSS (10^6 t/an)



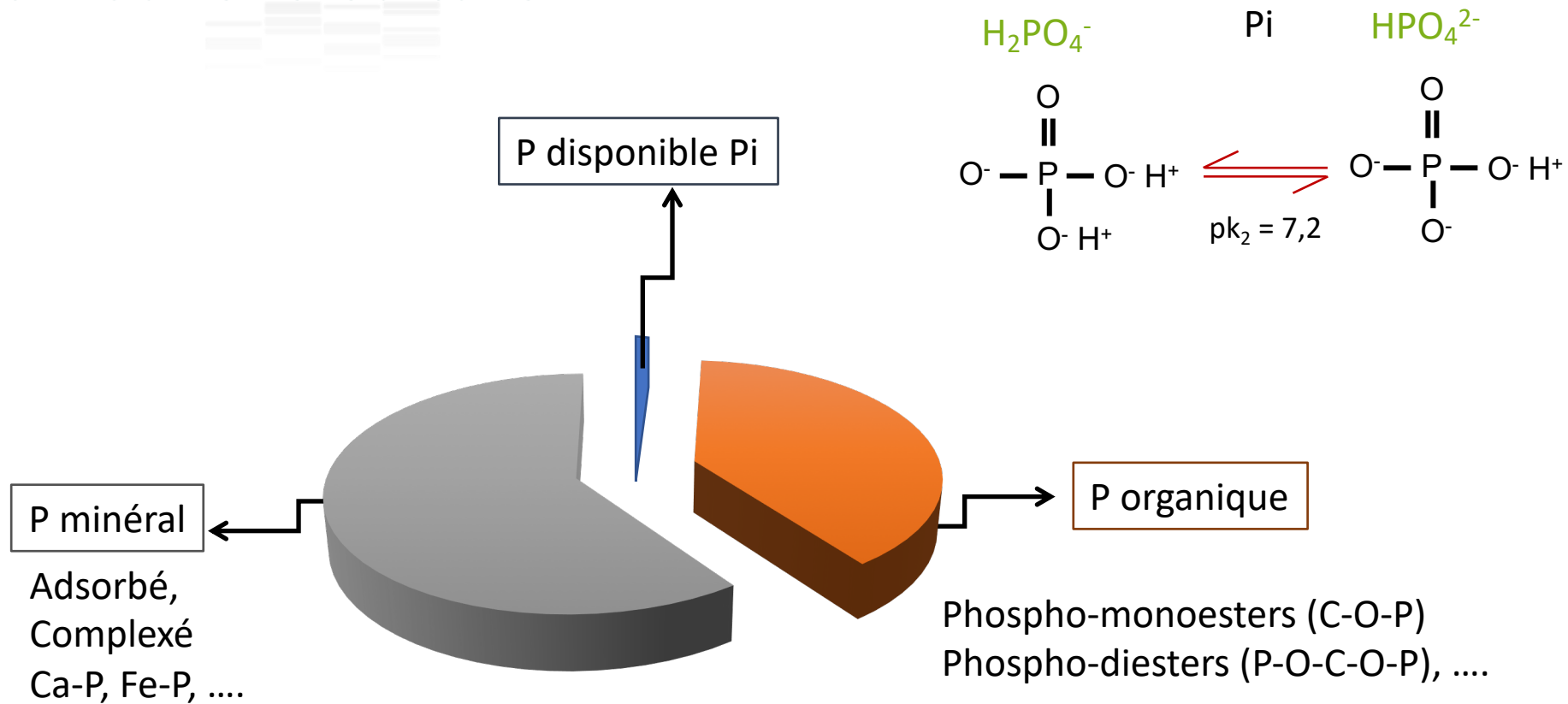
Production mondiale céréales
hors URSS (10^9 t/an)



→ **Diminution des efficacités d'utilisation de N et P**

→ **Révolution verte ou eutrophisation ???**

Comment savoir si le P du sol est suffisant pour la nouvelle culture ?



→ **Que disent les analyses de terre ?**

Que nous indiquent les analyses de terre ?

3 analyses couramment pratiquées :

- Méthode Olsen (NaHCO_3 0.5 M, pH 8,5)
- Méthode JORET-HEBERT (oxalate d'ammonium $((\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4)$ 0,1 M)
- Méthode DYER (acide citrique 1% à 2 %)

} Dosage Pi

Forme du phosphore	en % du P du sol	en quantité par ha	Mobilité pour la plante	Pouvoir extractif		
				Olsen	Joret	Dyer
Dissous dans la solution du sol (Pi)	0,02 %	2 kg	directe	●	●	●
Adsorbé sur le complexe argilo-humique	5 %	500 kg	échangeable et assimilable	○	●	●
			lentement disponible		○	●
Lié au calcium (pH > 7) À l'aluminium (pH < 6) Au fer (tous pH)	95 %	10 tonnes	bloqué			○
						●

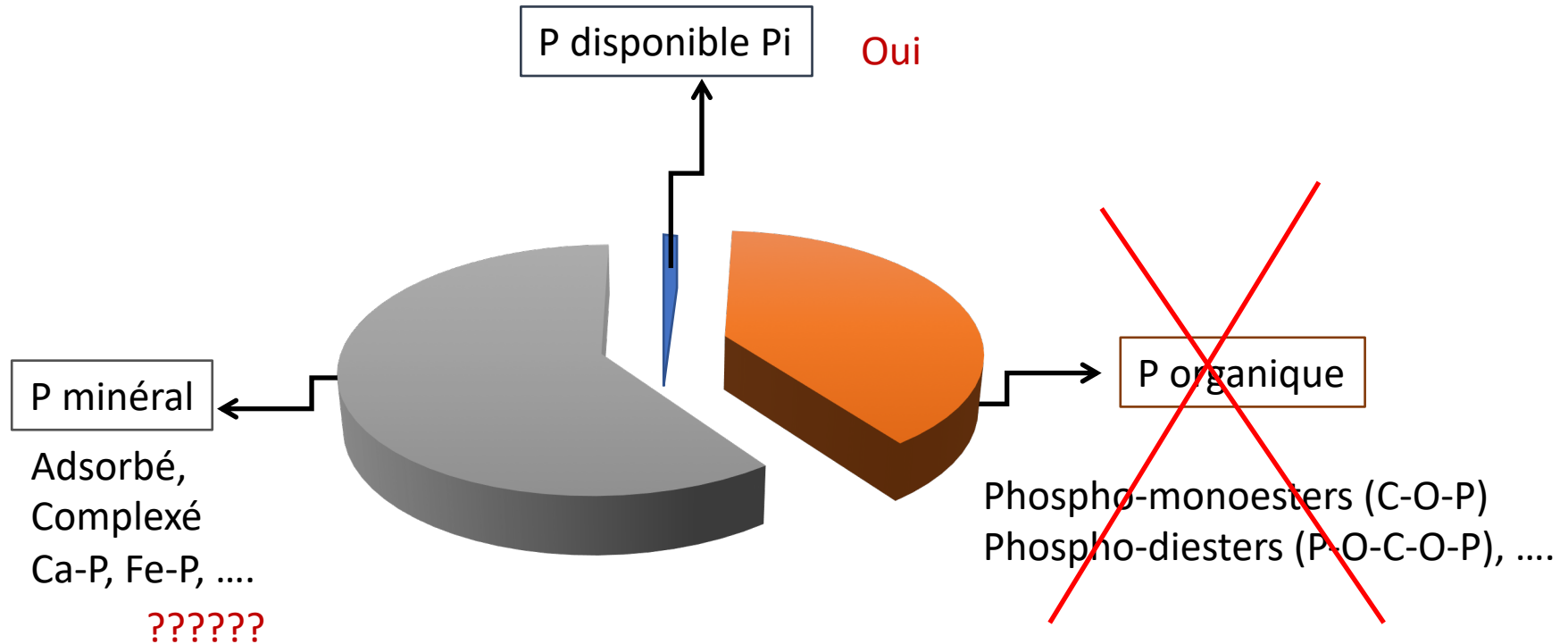
D'après F. MERELLE – EUROPE-SOLS 1991 -GEMAS

Que nous indiquent les analyses de terre ?

3 analyses couramment pratiquées :

- Méthode Olsen (NaHCO_3 0.5 M, pH 8,5)
- Méthode JORET-HEBERT (oxalate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$) 0,1 M)
- Méthode DYER (acide citrique 1% à 2 %)

Dosage P_i



→ **Analyses de terre = P_i réellement vu par la plante ?**

Non, à cause de la « boîte à outils » racines ...

Source : Kuchera

Morphologie

**Exploration &
surface
d'échange**

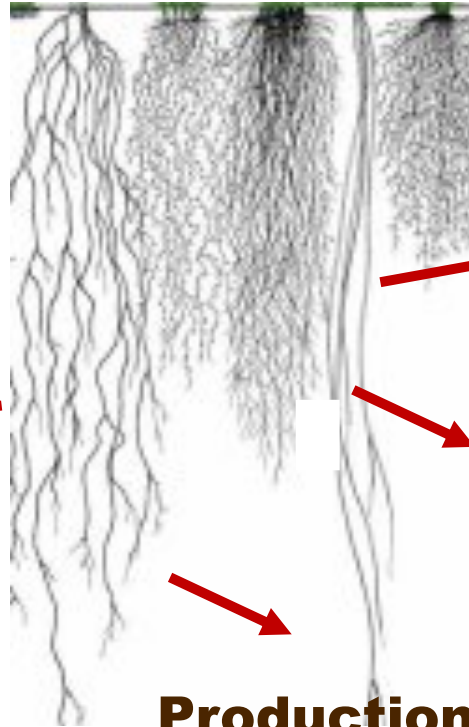
**Acidification
Alcalinisation**

**Production
de ligands**

**Production
d'enzymes**

**Bactéries
solubilisatrices/
minéralisatrices**

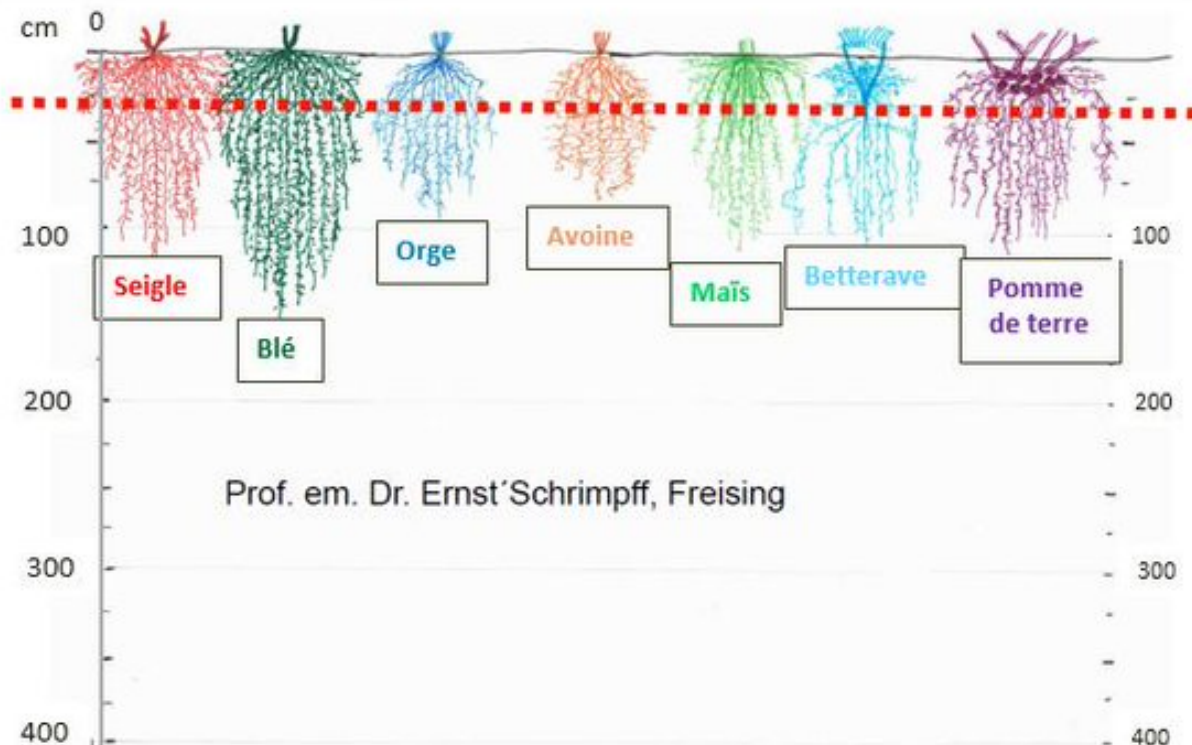
**Champignons
mycorhiziens**



Toutes ces propriétés **modulent** la « biodisponibilité » de P

Variabilité de la morphologie racinaire

Espèces de grande culture



Système fasciculé
très performant

-> le blé

Fertilisation P faible

Système à tubercules
Moins performant

-> P de terre

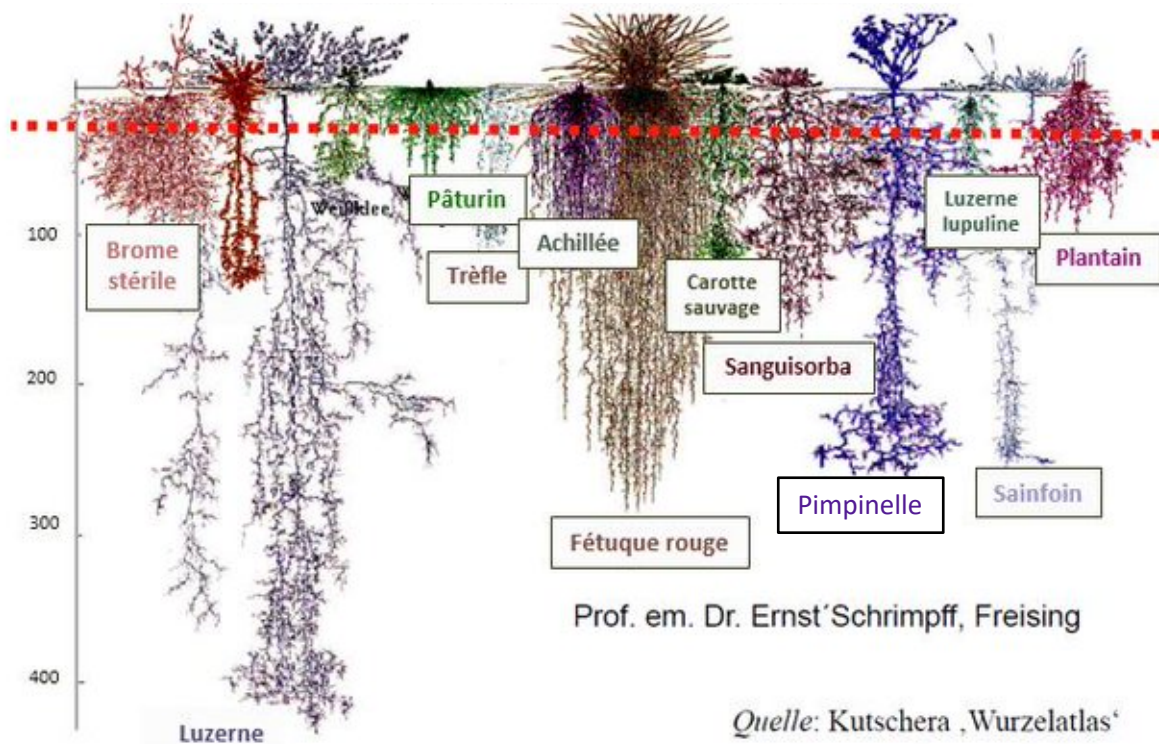
Betterave

Fertilisation P plus forte

→ **Morphologie du système racinaire influence la capacité de prélèvement, et donc la fertilisation P**

Variabilité de la morphologie racinaire

Espèces prairiales



-> **Diversité système racinaire +++**
Profondeur ++++

-> **Exploration très forte du sol**

Fertilisation P

Prairies << cultures

De plus, il y a la rhizosphère ...

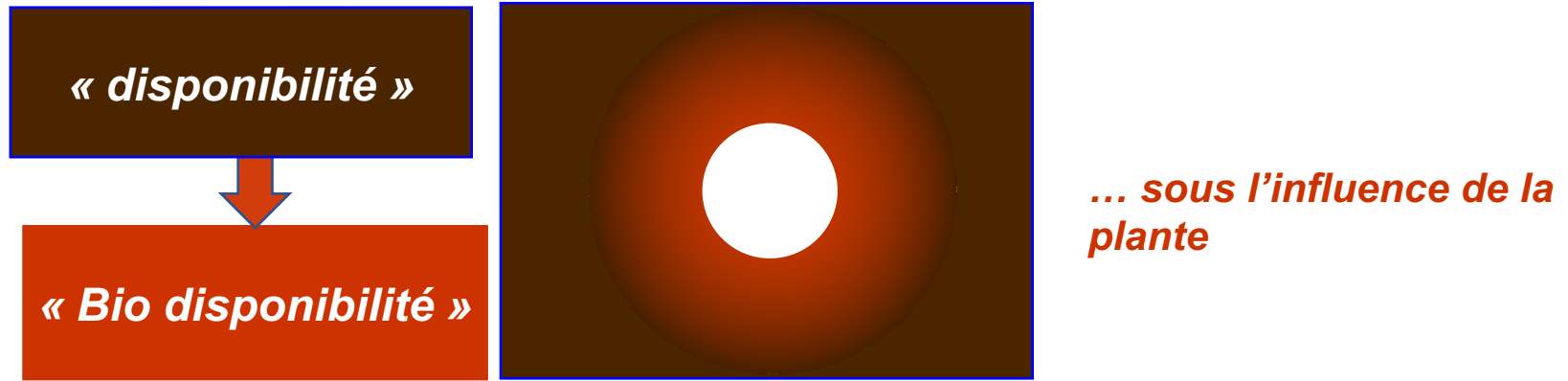
Racine

La racine modifie le sol autour d'elle

en créant la rhizosphère !

... un endroit unique très différent du reste du sol !
(Hinsinger, Bengough, Vetterlein & Young, 2009 – Plant Soil 321)

Elle influence la disponibilité des éléments minéraux

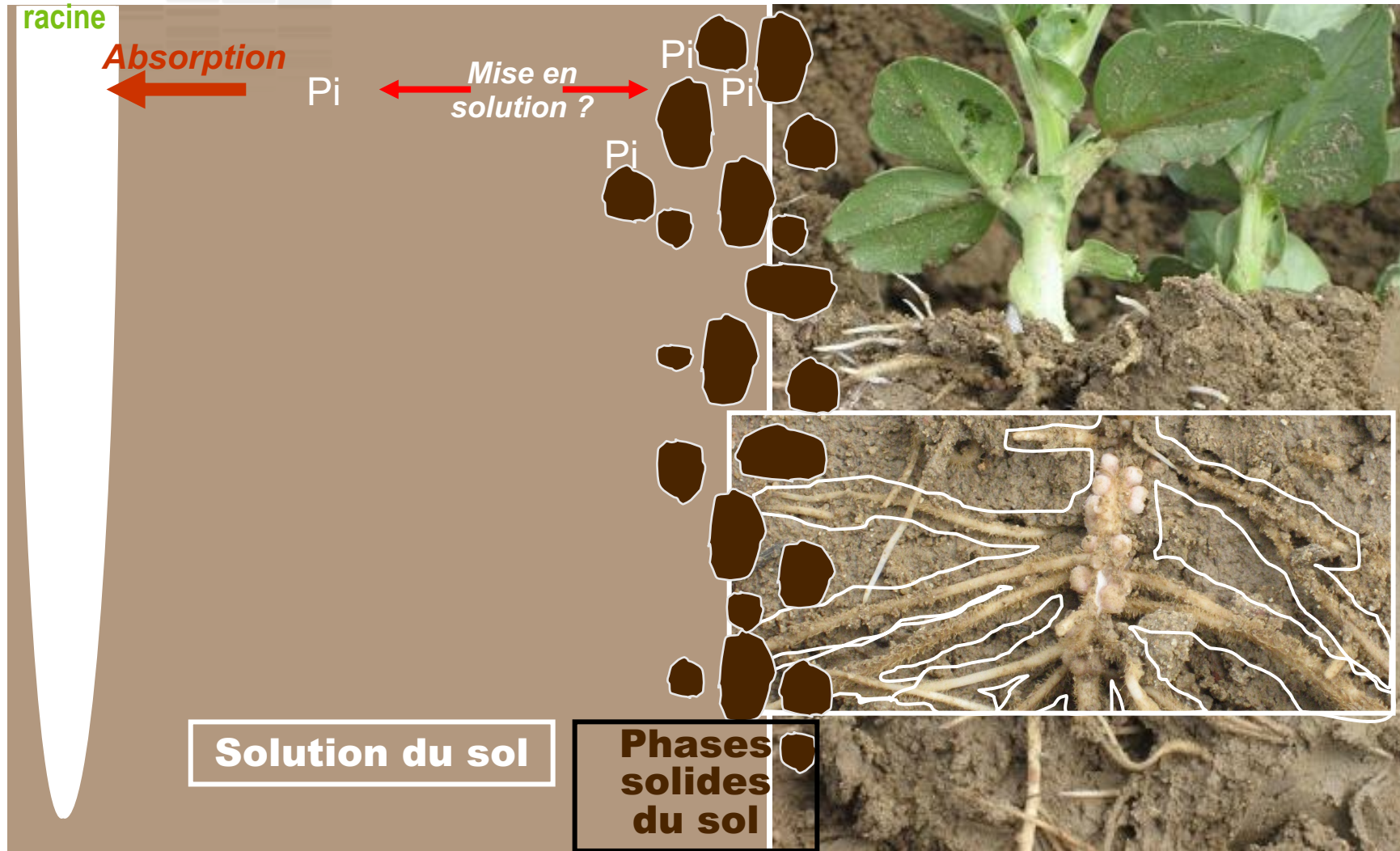


→ « la rhizosphère » correspond **au sol entourant la racine et avec lequel elle interagit**

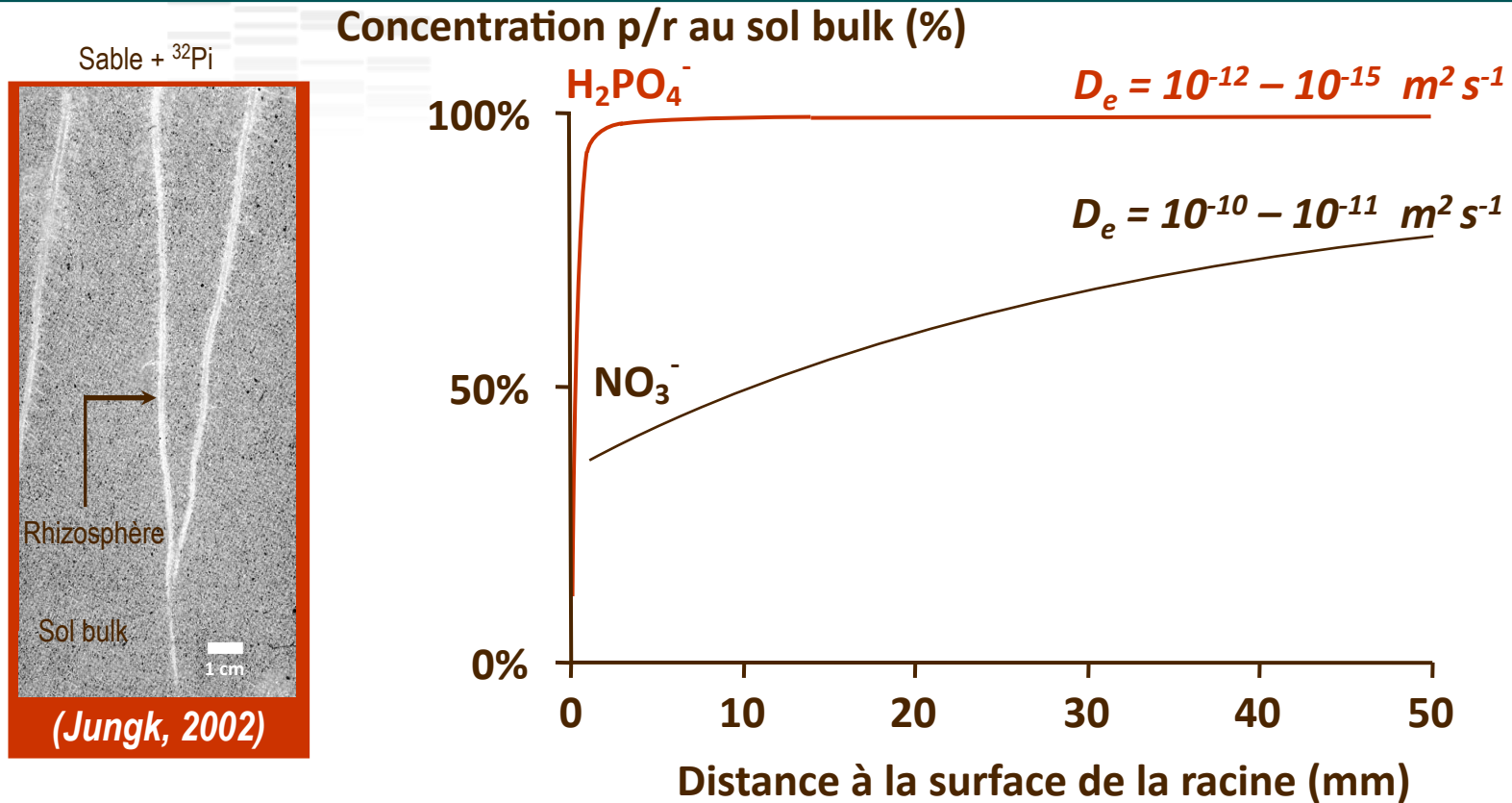
Les facteurs qui influencent cette zone **dépendent des propriétés de l'espèce à modifier le pH, à produire des exudats et des enzymes**

→ En conséquence, **la bio-disponibilité des éléments minéraux** dans la rhizosphère peut **varier selon l'espèce végétale**

Absorption de Pi et pool de Pi rhizosphérique



Absorption de Pi et pool de Pi rhizosphérique



→ **Pi épuisé autour de la racine**

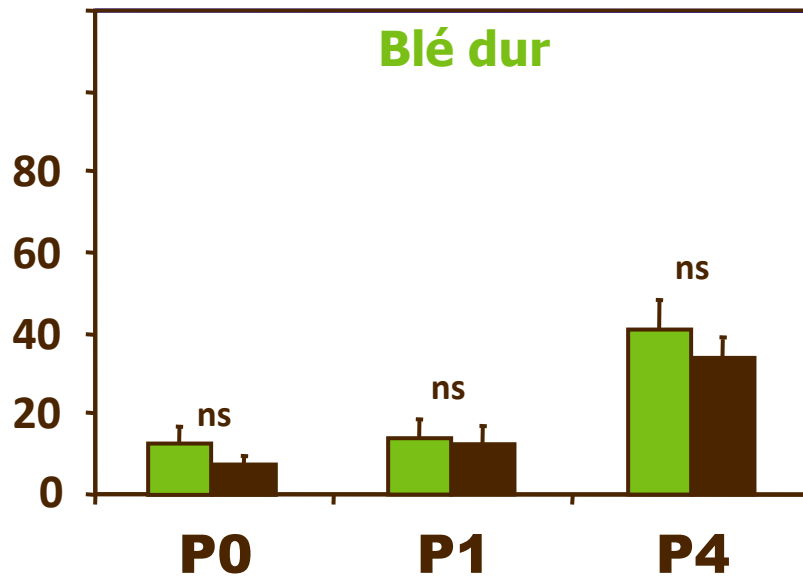
→ **Seul processus pris en compte dans les modèles de prédiction de la biodisponibilité**

Et le pool de Pi rhizosphérique dans la vraie vie ?



Essai longue durée
INRAE Toulouse-Auzeville

P Olsen (mg kg⁻¹)



**Au champ, pas de déplétion du P disponible (P Olsen)
dans la rhizosphère du blé dur**

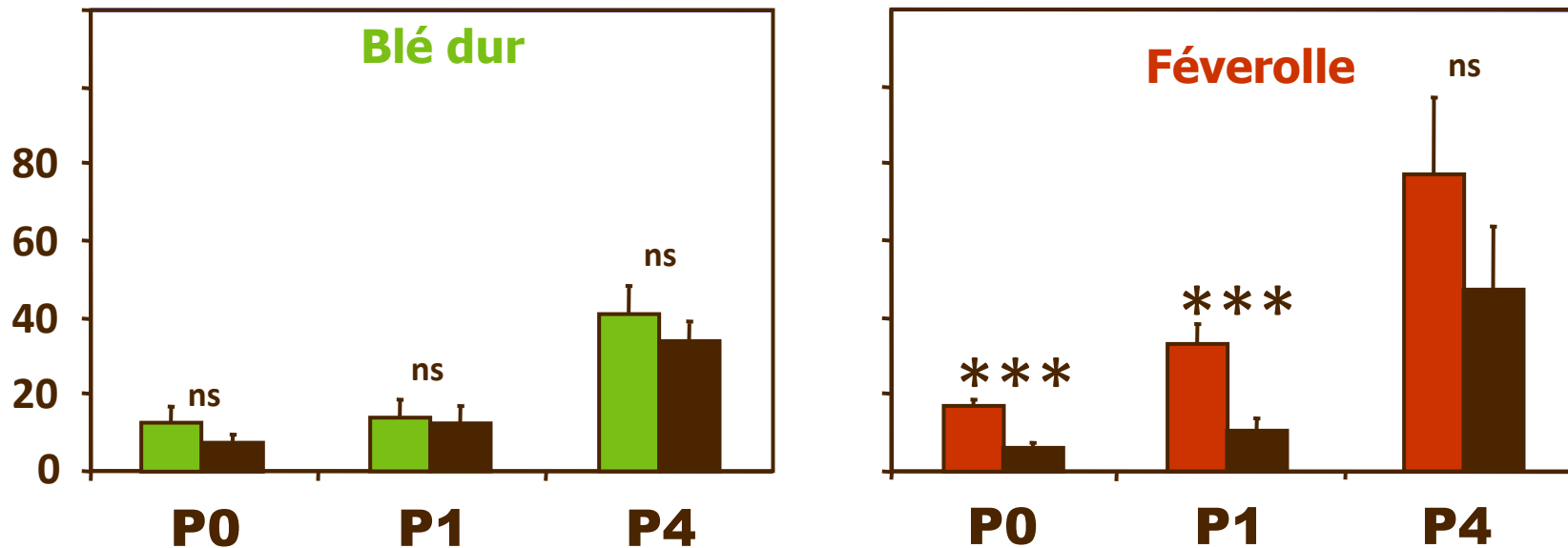
(Betencourt et al non publié)

Et le pool de Pi rhizosphérique dans la vraie vie ?



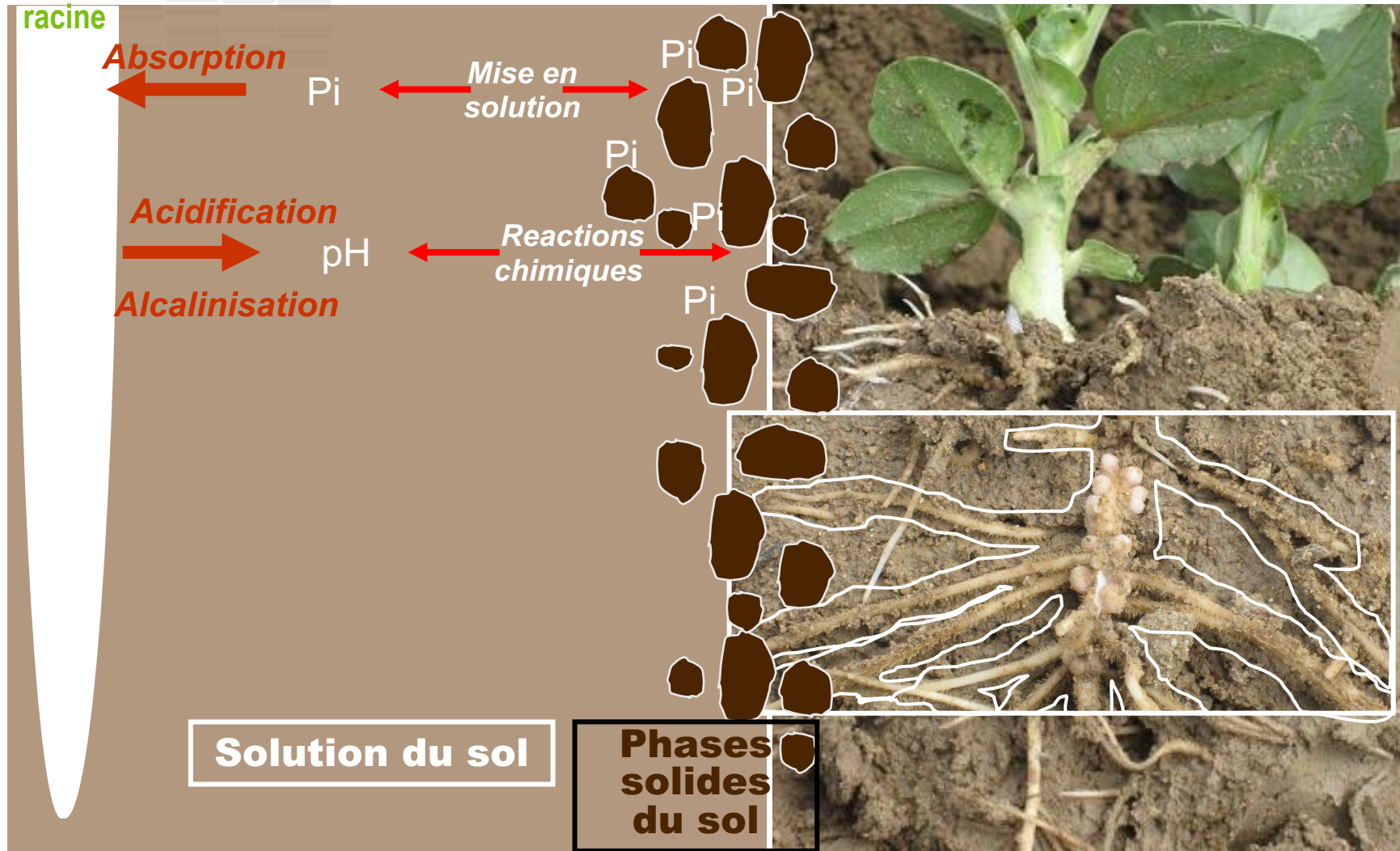
Essai longue durée
INRAE Toulouse-Auzeville

P Olsen (mg kg^{-1})



Conclusion : la solution autour de la racine est capable de se « remplir » en Pi, ce qui éviterait les carences prédites en milieu très simplifié

Action des racines pour modifier le sol



Variation du pH rhizosphérique

racine

absorption

← C⁺ Cations (K⁺, NH₄⁺, Ca²⁺, ...)

→ H⁺

← A⁻ Anions (NO₃⁻, H₂PO₄⁻, ...)

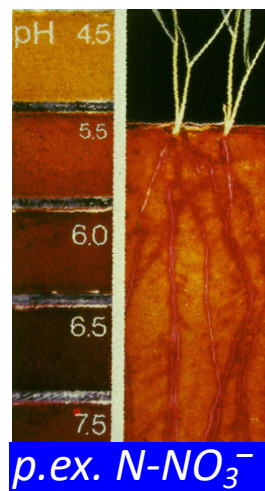
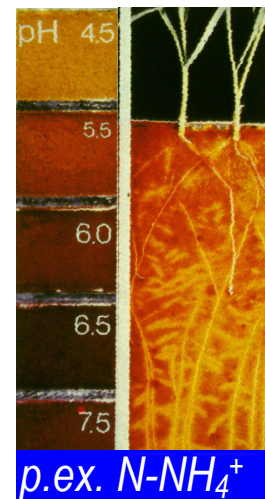
→ OH⁻

Le pH change
dans la rhizosphère
du blé

(Römheld, 1986)

si $\Sigma C^+ > \Sigma A^-$

si $\Sigma C^+ < \Sigma A^-$



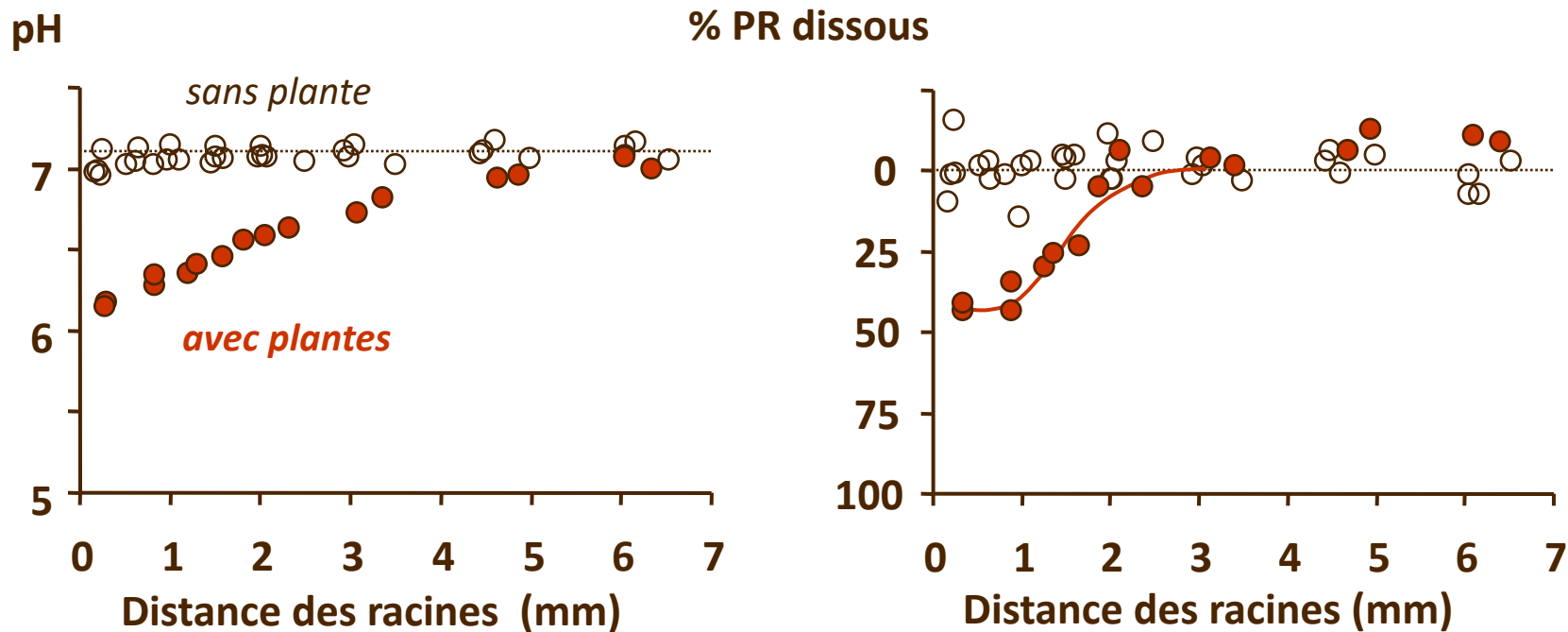
Balance Anions-Cations → changements de pH dans la rhizosphère

Formes d'azote (NH₄ vs NO₃) = facteur essentiel !

(Hinsinger, Plassard, Tang & Jaillard, 2003 - Plant Soil 248)

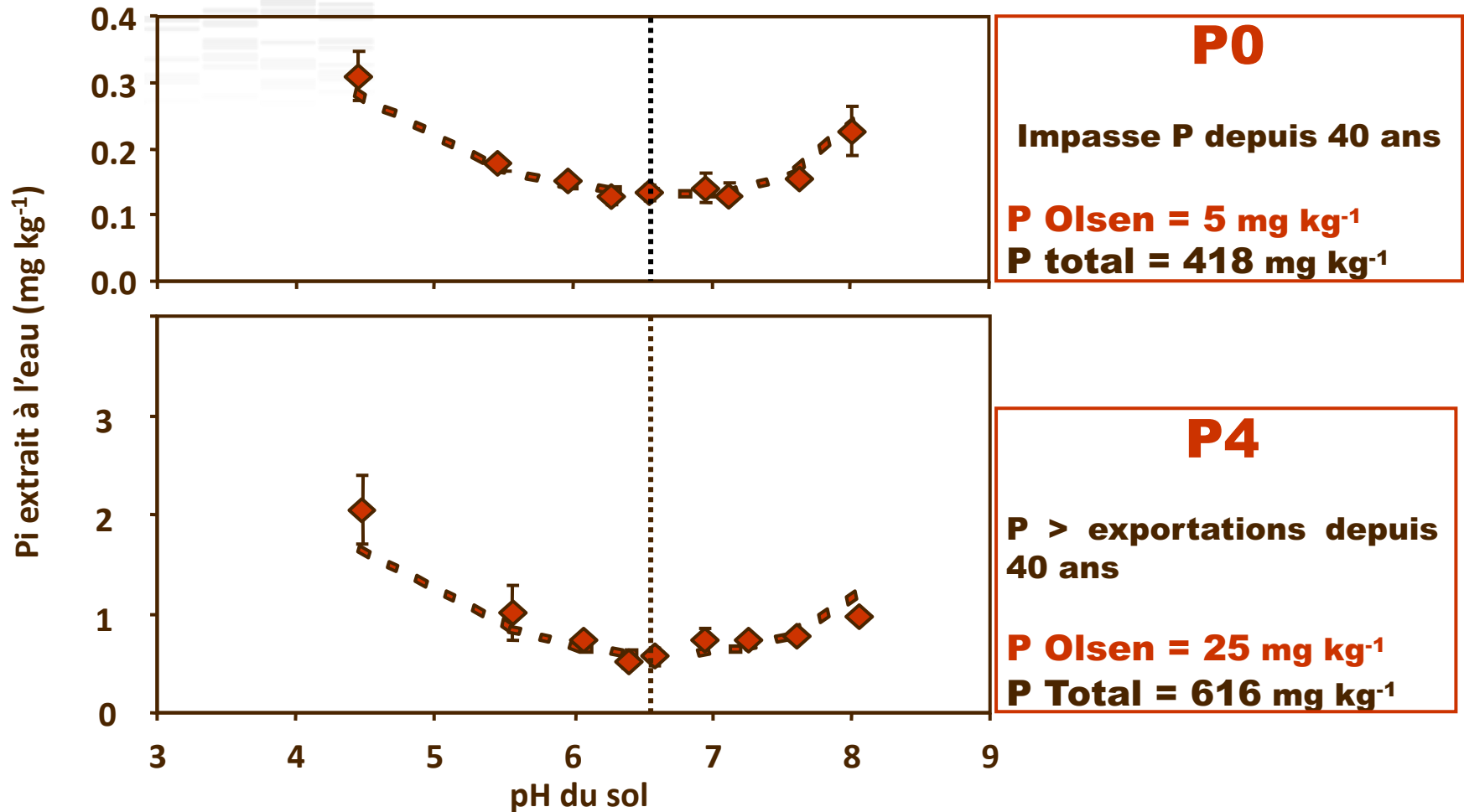
Variation du pH rhizosphérique

Ray-gras alimenté en ammonium et phosphate de roche (PR)



→ L'**acidification** des racines est bien capable de **dissoudre** le phosphate de roche
(Hinsinger & Gilkes, 1996 – Eur. J. Soil Sci. 47)

Disponibilité Pi et pH du sol

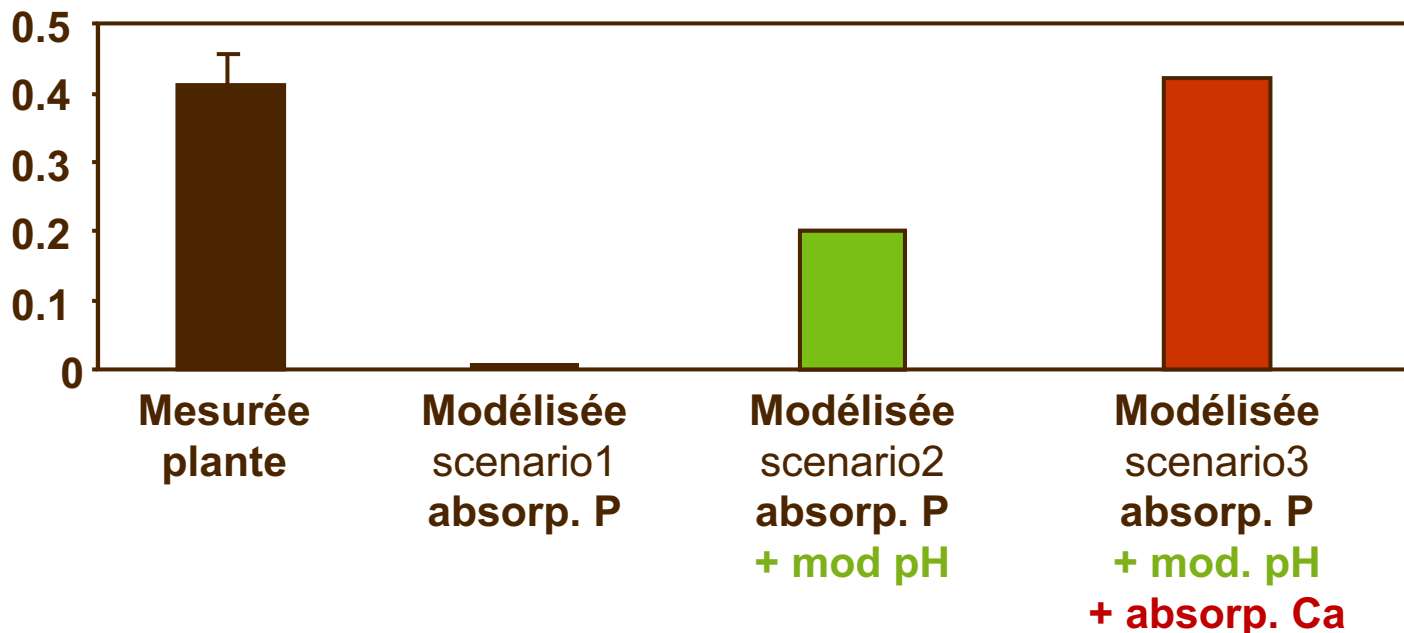


Valeurs mesurées (◆) ou simulées (- -) du Pi extrait à l'eau dans le sol de Toulouse
(Devau et al 2011– GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA, 75 : 2980-2996)

Pouvons-nous prédire la biodisponibilité de P ?

Biodisponibilité en P
(mg pot⁻¹)

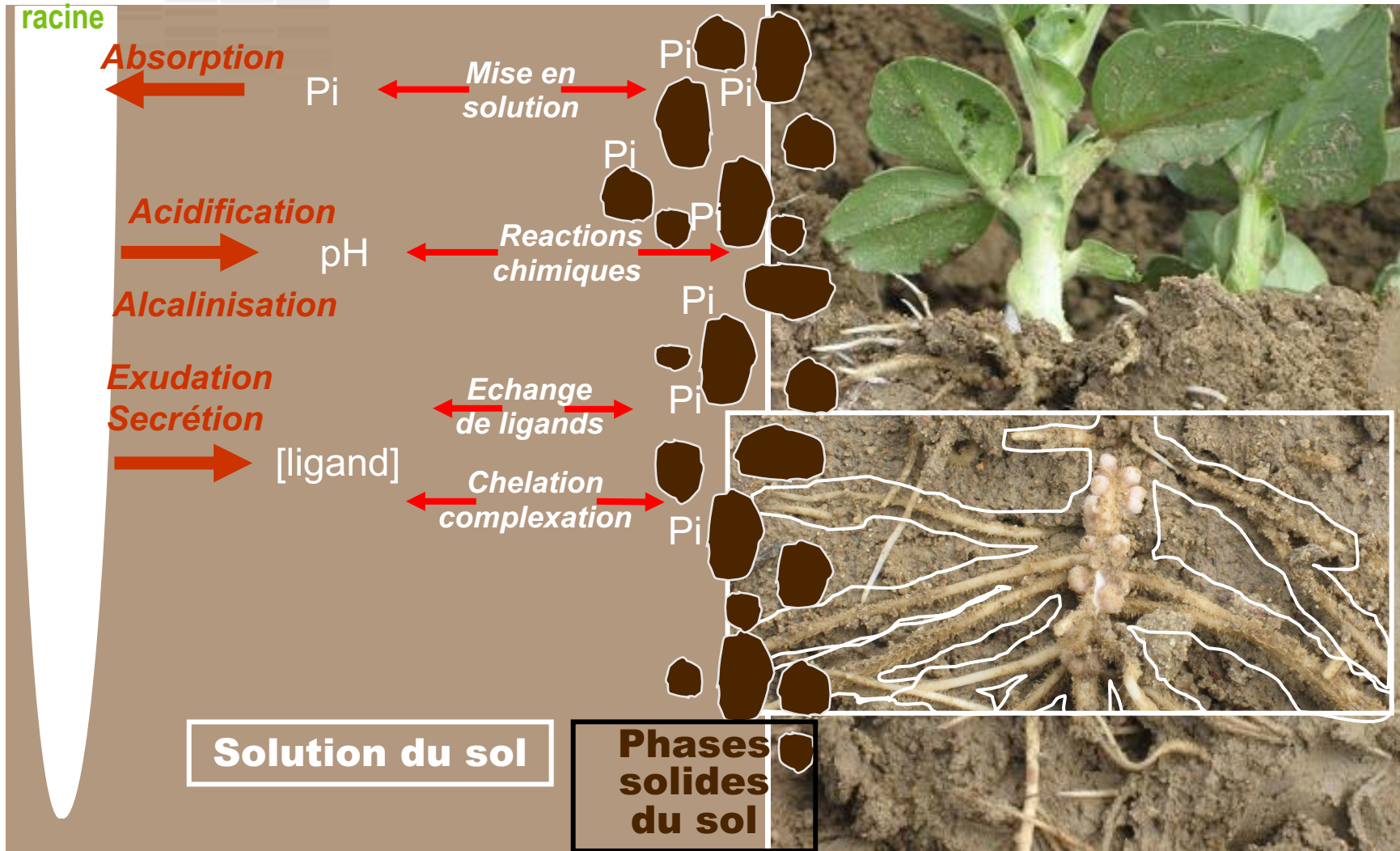
Expérience en rhizobox sur blé dur



Oui, **si le effets** des **changements de pH** et de **l'absorption de Ca** sont pris en compte **en plus** de ceux de l'absorption de Pi dans un modèle mécanistique* d'adsorption du Pi sur la phase solide du sol

* modèle de Devau, Le Cadre, Hinsinger & Gérard, 2009 – *Annals Bot.* 105

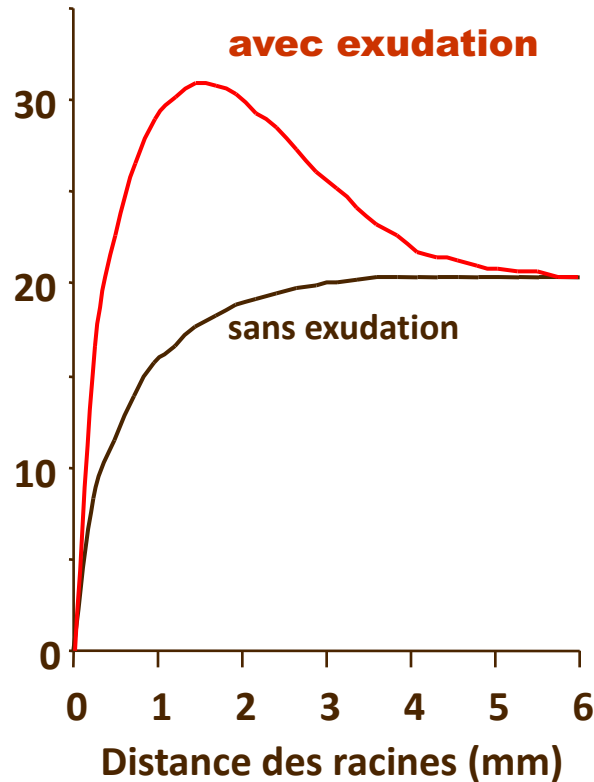
Production de ligands



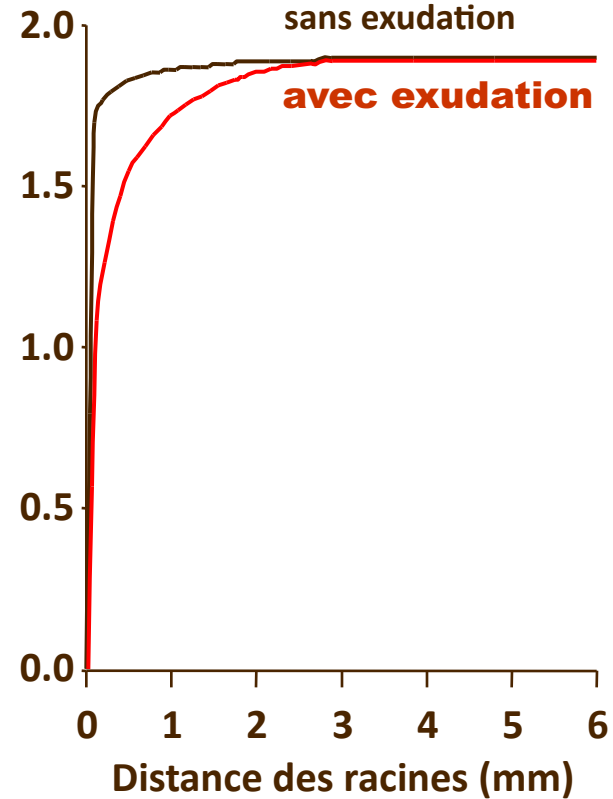
Production de ligands : citrate, oxalate

Effet modélisé du citrate produit par le maïs sur le Pi

[P]_{solution} (μM)

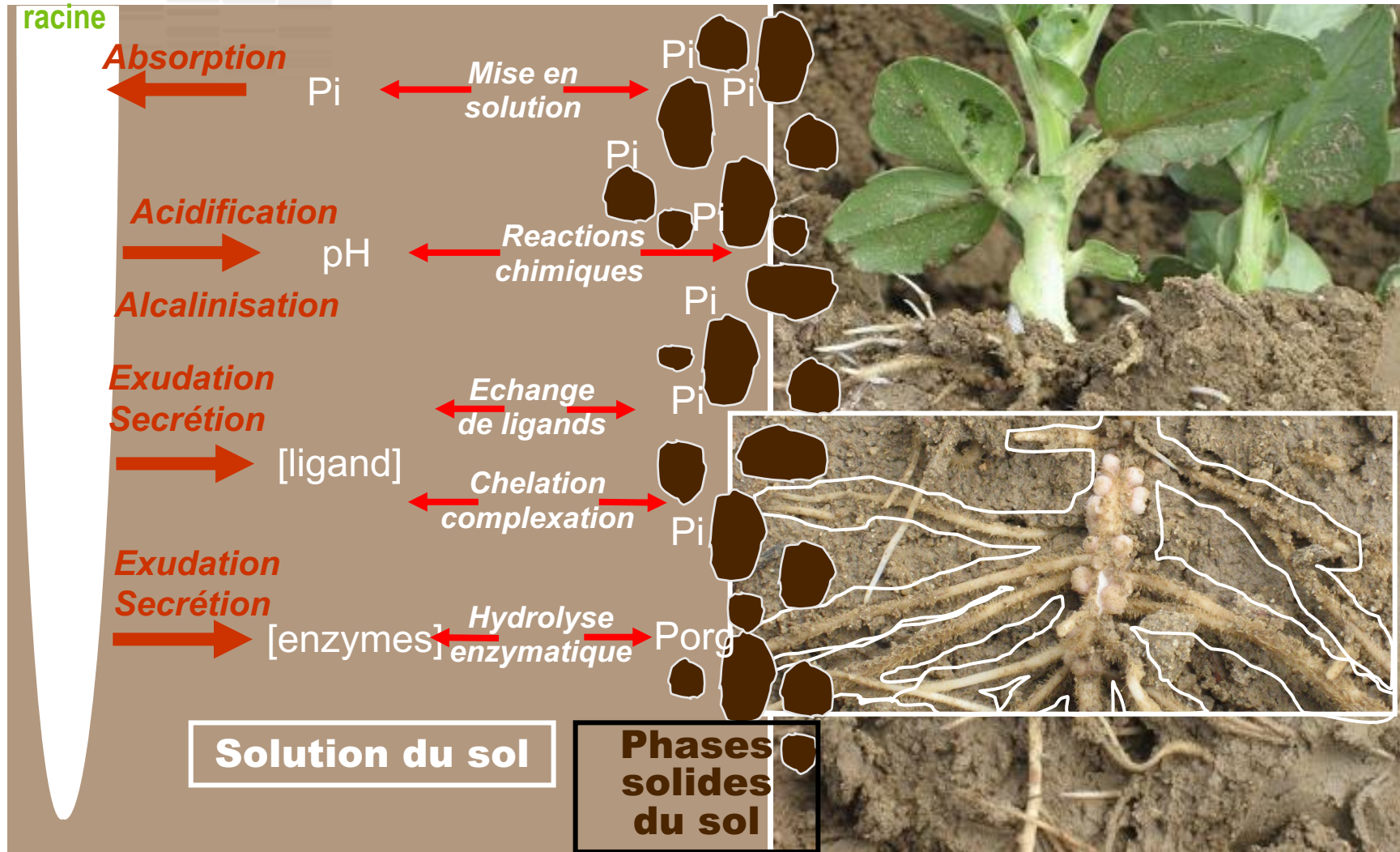


P adsorbé (μmol m⁻²)

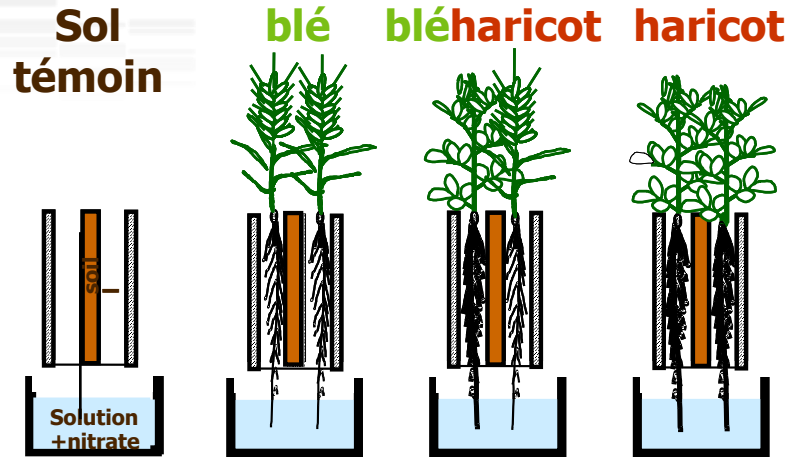


Effets majeurs du citrate : **augmentation** du Pi libre ET **diminution** du Pi adsorbé

Action des racines pour modifier le sol

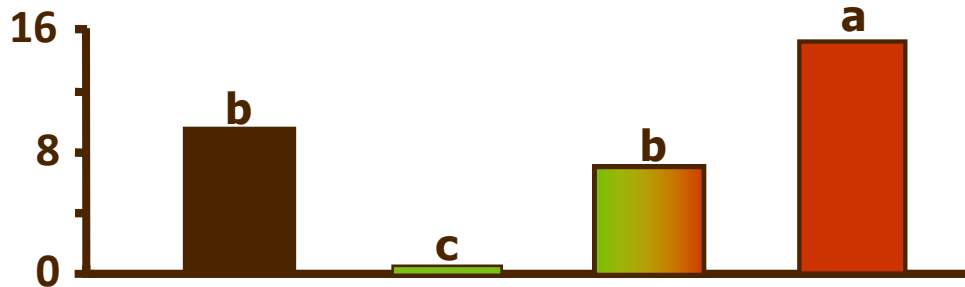


Et le P organique ?



(Li et al 2008)

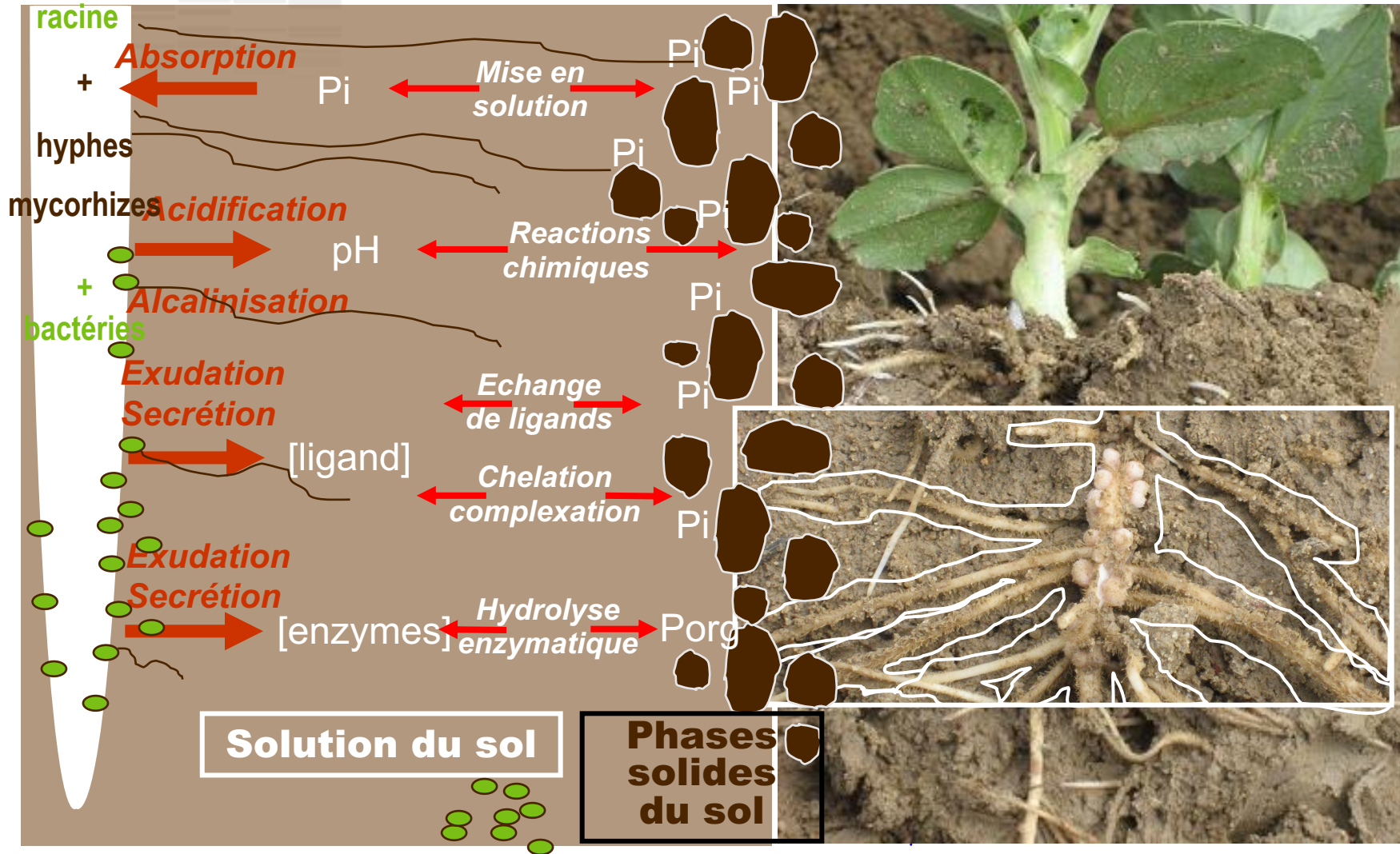
Porg-Olsen
(mg kg⁻¹)



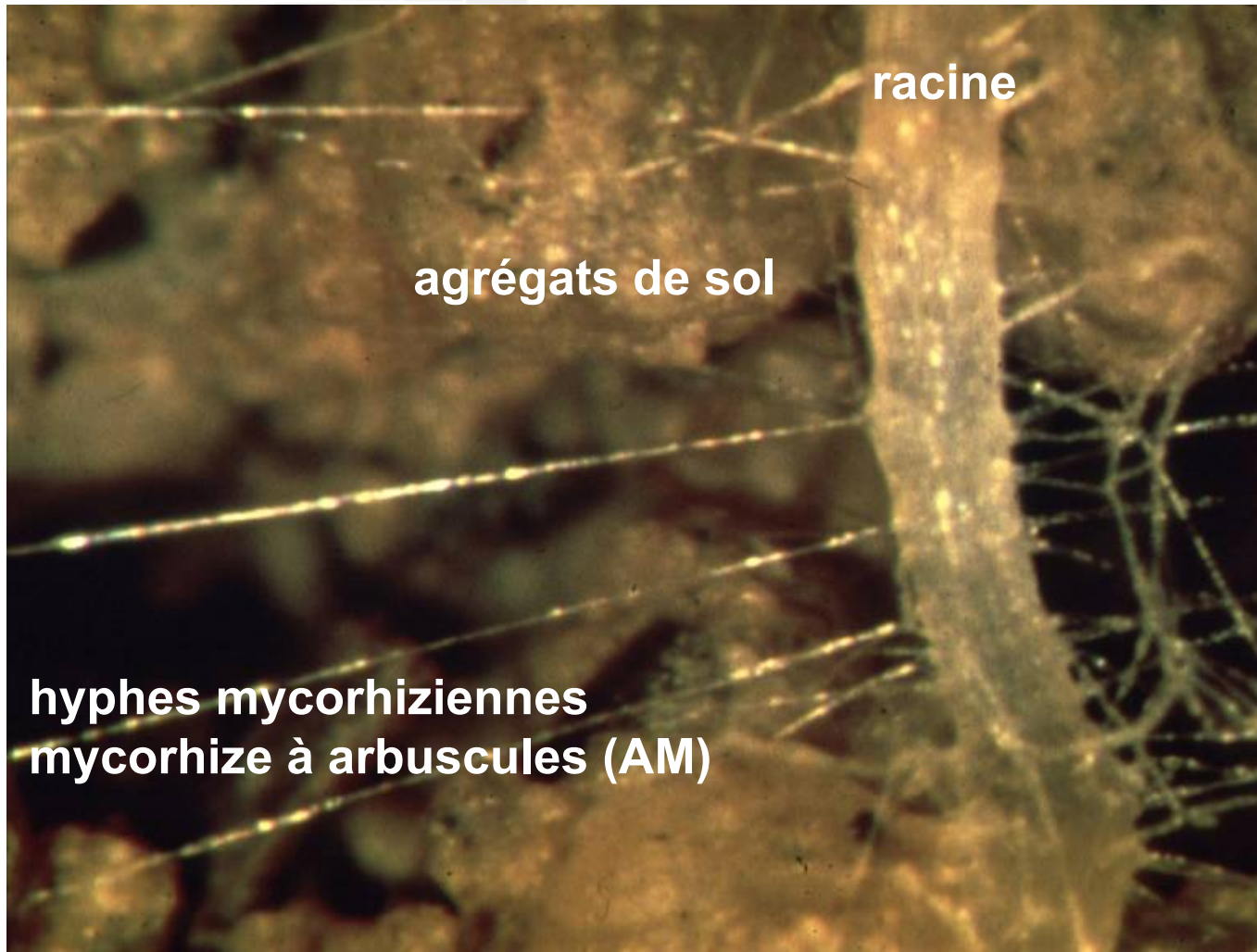
- **blé épuise le P org.**
- **alors que le haricot l'augmente**

Effet spécifique très fort !

Les racines ne sont pas seules !

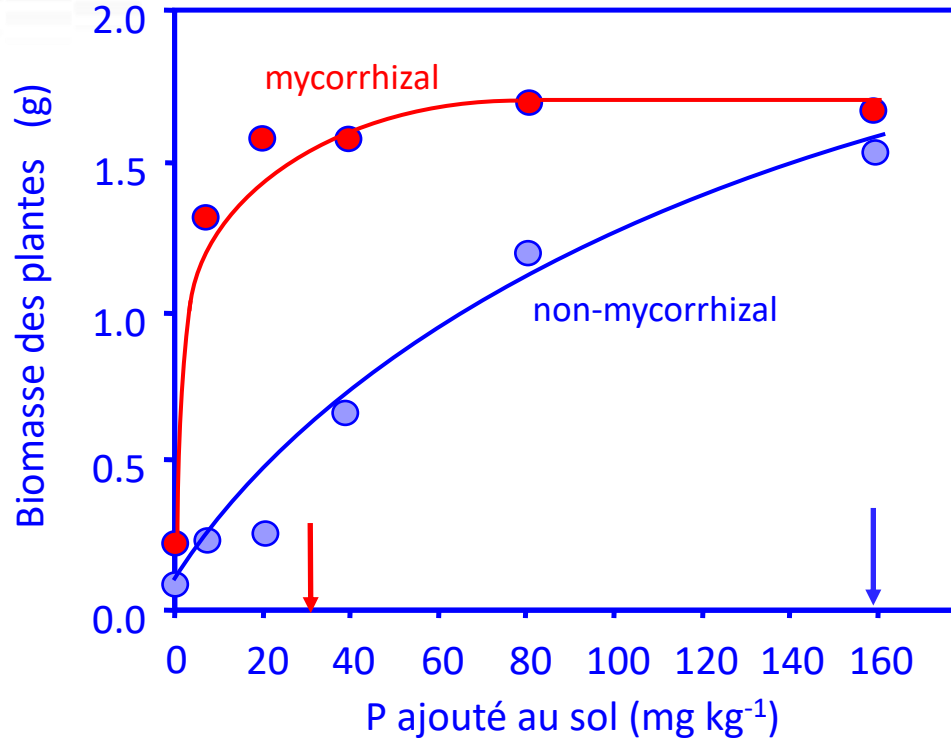


Les endomycorhizes sont des alliées de poids !



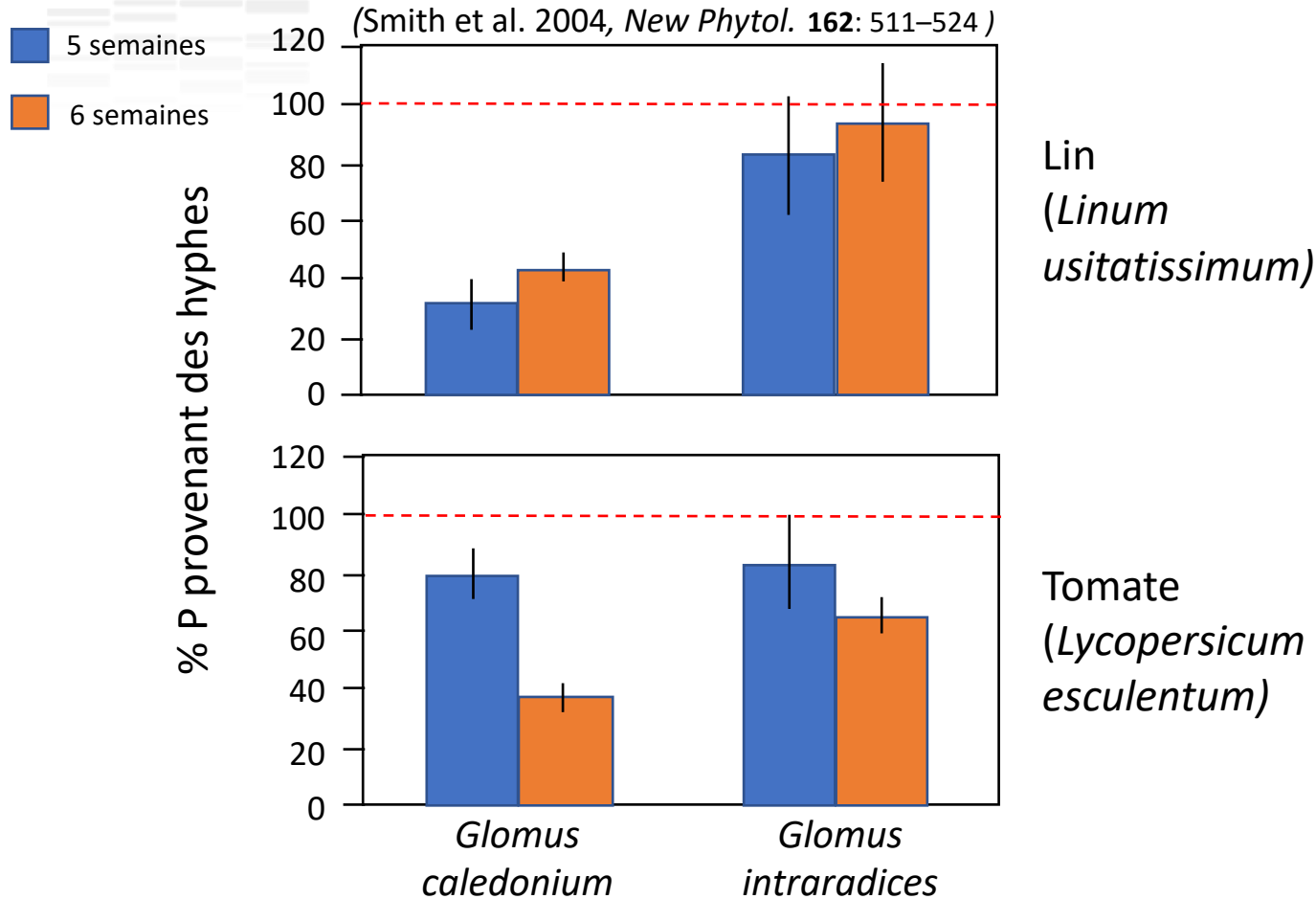
Les **hyphes** des endomycorhizes **explorent** un volume de sol considérable : **100 m/cm³ de sol**

Les endomycorhizes vont chercher P pour la plante !



Symbiose AM -> croissance max pour des niveaux très faibles de P apporté

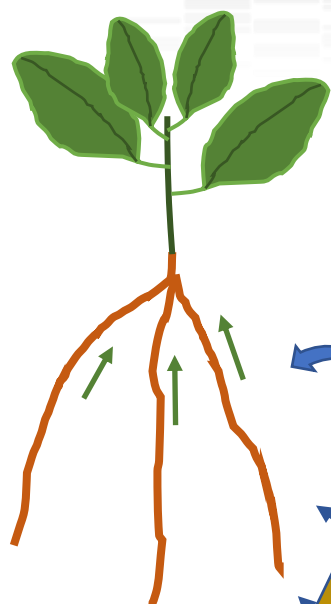
Les endomycorhizes vont chercher P pour la plante !



Symbiose AM ->

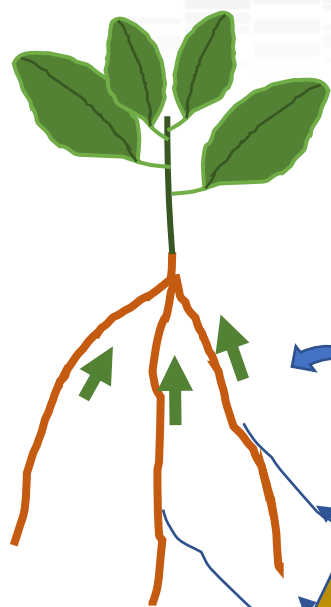
Les hyphes peuvent absorber la quasi-totalité du P de la plante !

Points de conclusion :



Forme du phosphore	en % du P du sol	en quantité par ha	Mobilité pour la plante	Pouvoir extractif		
				Olsen	Joret	Dyer
Dissous dans la solution du sol (Pi)	0,02 %	2 kg	directe	●	●	●
Adsorbé sur le complexe argilo-humique	5 %	500 kg	échangeable et assimilable	●	●	●
			lentement disponible	○	●	●
Citrate, .. Lié au calcium (pH > 7) À l'aluminium (pH < 6) Au fer (tous pH)	95 %	10 tonnes	bloqué		○	○
					●	●

Points de conclusion :



Forme du phosphore	en % du P du sol	en quantité par ha	Mobilité pour la plante	Pouvoir extractif		
				Olsen	Joret	Dyer
Dissous dans la solution du sol (Pi)	0,02 %	2 kg	directe	●	●	●
Adsorbé sur le complexe argilo-humique	5 %	500 kg	échangeable et assimilable	●	●	●
			lentement disponible	○	●	●
Lié au calcium (pH > 7) À l'aluminium (pH < 6) Au fer (tous pH) Citrate, ..	95 %	10 tonnes	bloqué		○	○

Les mécanismes rhizosphériques sont maintenant mieux connus

Quels leviers pour optimiser la biodisponibilité de P ?

Leviers agronomiques à mettre en œuvre (du + simple au + complexe ...)

Favoriser l'exploration racinaire

Préserver le potentiel des endomycorhizes

pour aller chercher le P du sol

Techniques culturales appropriées

(effets du labour, pesticides, sols pas trop riches en P ...)

Utiliser la fertilisation azotée pour induire soit

Une acidité en sol calcaire (ammonium) -> dissolution des P-Ca

Une alcalinisation en sol acide (nitrate) -> dissolution des P-Fe

Prendre en compte les propriétés spécifiques des cultures

Aptitude à sécréter **des ligands**, des **enzymes**, etc

Les mélanger pour maximiser l'utilisation de différentes formes de P

-> Nécessaire de généraliser nos connaissances

Quels leviers pour optimiser la biodisponibilité de P ?

Nouveaux critères de sélection des variétés ?

Sur sols déficients en P ?

Pour produire autant avec moins de P?

Sélection sur la morphologie, l'architecture racinaire ?

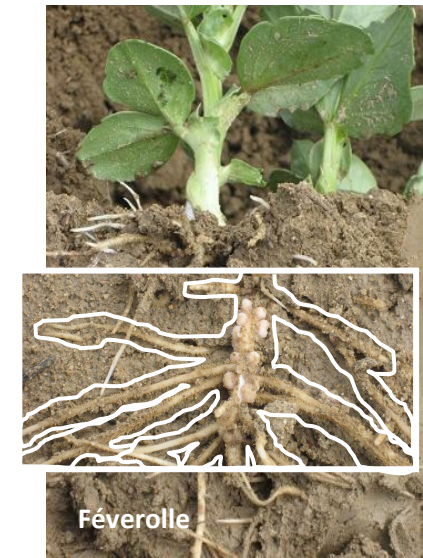
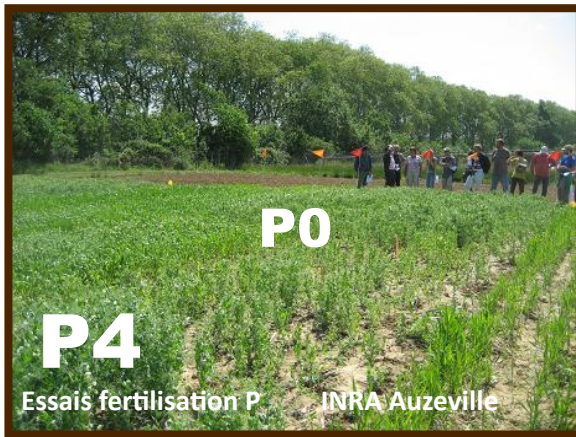
Sélection sur la bonne efficacité d'utilisation de P ?

Sélection de variétés avec moins de phytate ?

déjà développé pour le riz et le maïs par croisement

Le soja par OGM + croisement

Merci pour votre attention



Des questions ?