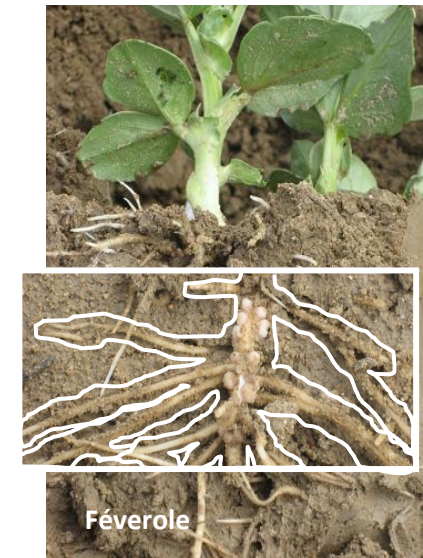
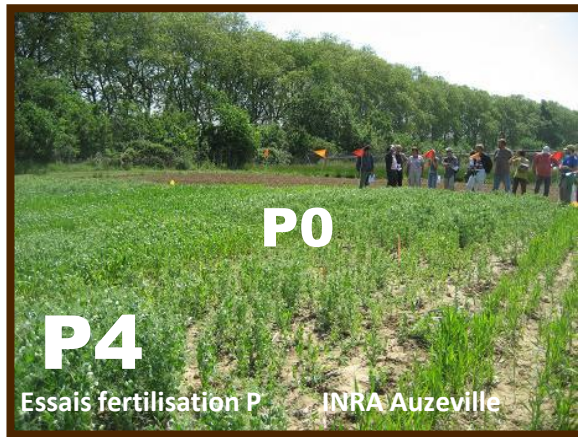
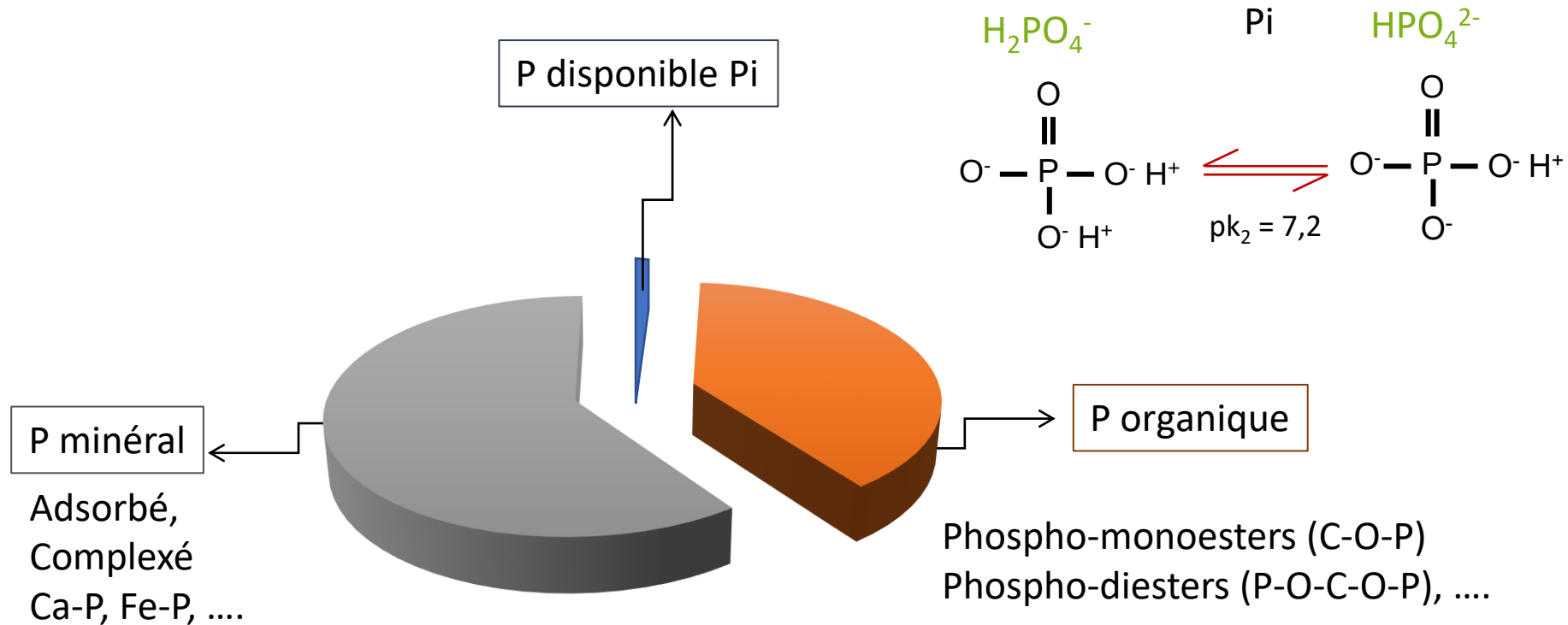


Production végétale et nutrition phosphatée : quels sont les leviers mobilisables pour optimiser la biodisponibilité du Phosphore en agriculture ?



Claude Plassard et Philippe Hinsinger
UMR Eco&Sols, Montpellier

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

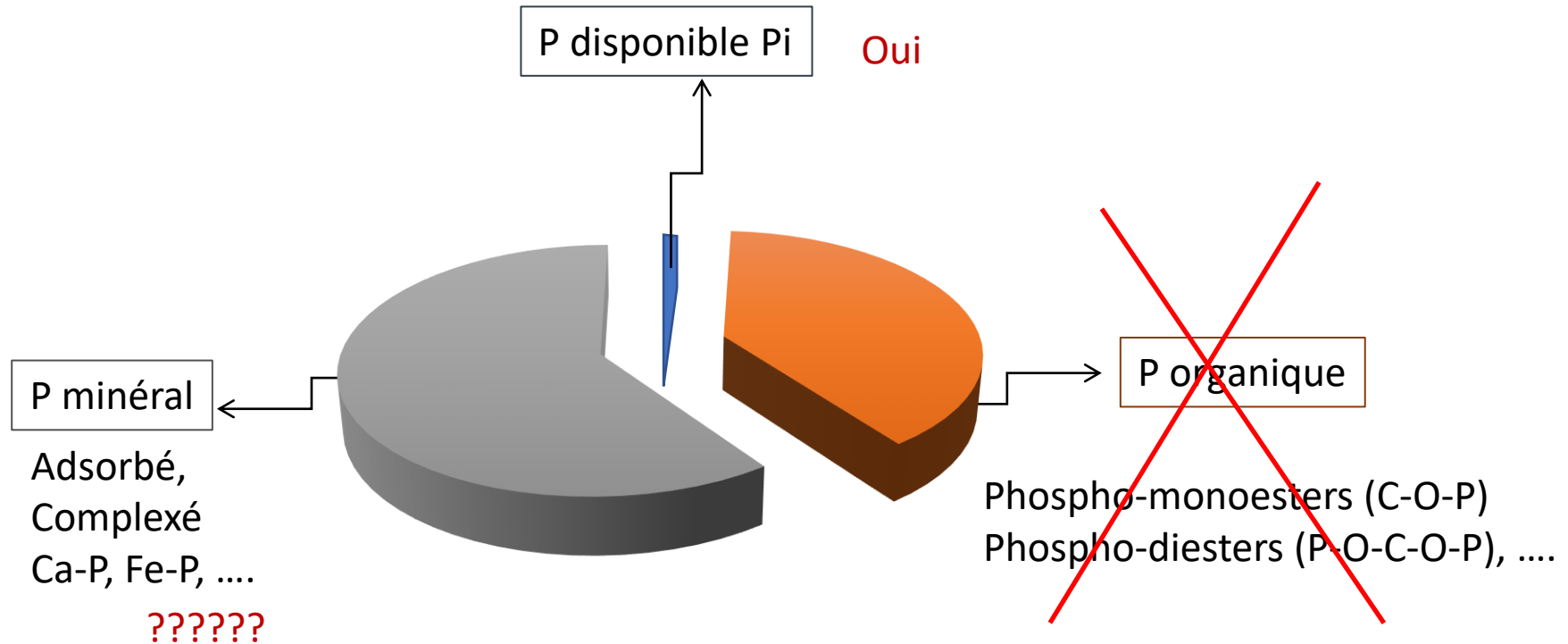
Forme du phosphore	en % du P du sol	en quantité par ha	Mobilité pour la plante	Pouvoir extractif		
				Olsen	Joret	Dyer
Dissous dans la solution du sol (Pi)	0,02 %	2 kg	directe	●	●	●
Adsorbé sur le complexe argilo-humique	5 %	500 kg	échangeable et assimilable	●	●	●
			lentement disponible		●	●
Lié au 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 : Kutschera

Morphologie

**Exploration &
surface
d'échange**

**Acidification
Alcalinisation**

**Production
de ligands**

**Production
d'enzymes**

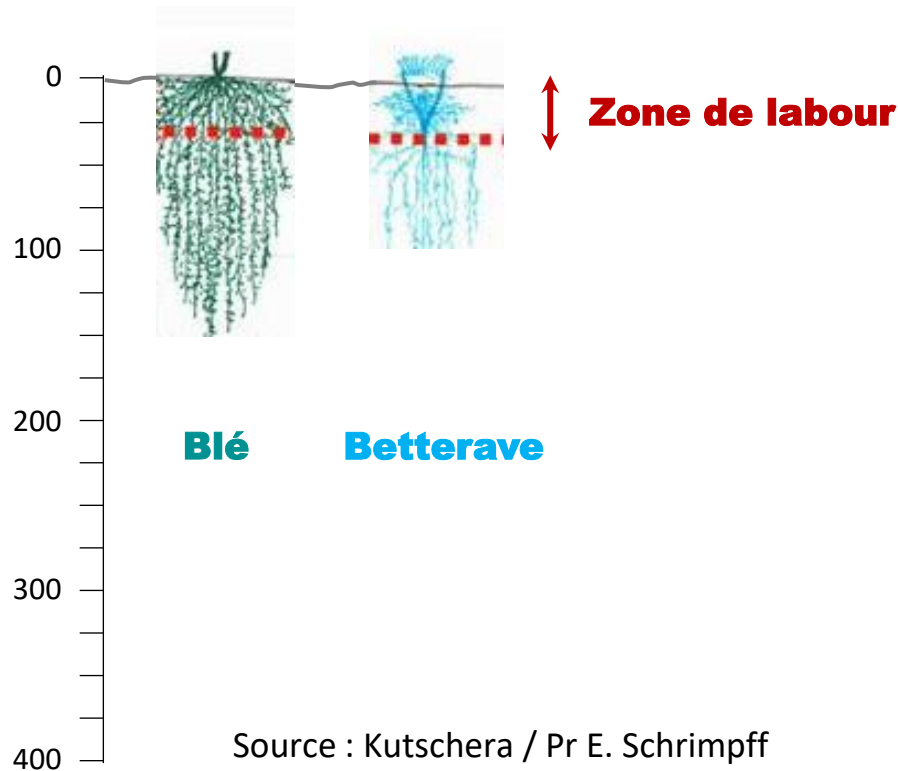
**Bactéries
solubilisatrices/
minéralisatrices**

**Champignons
mycorhiziens**

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

Importance 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

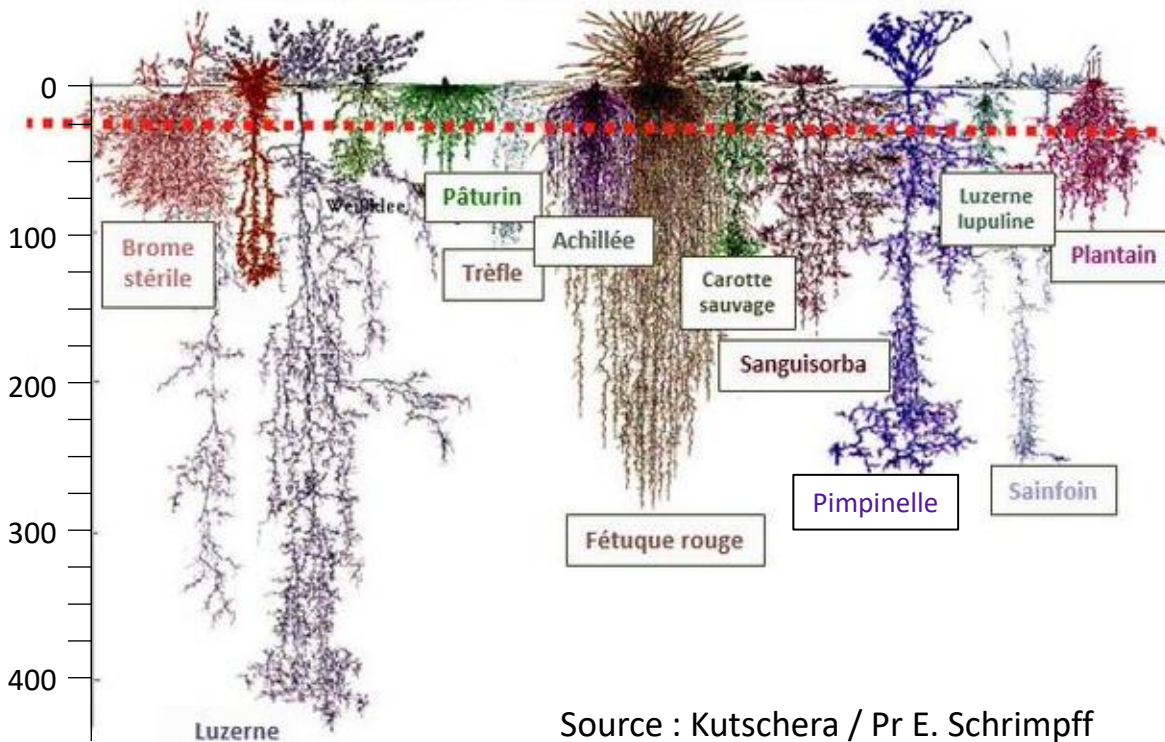
Betterave

Fertilisation P plus forte

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

Importance de la morphologie racinaire

Espèces prairiales



Source : Kutschera / Pr E. Schrimpff

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

-> **Exploration très forte du sol**

Fertilisation P

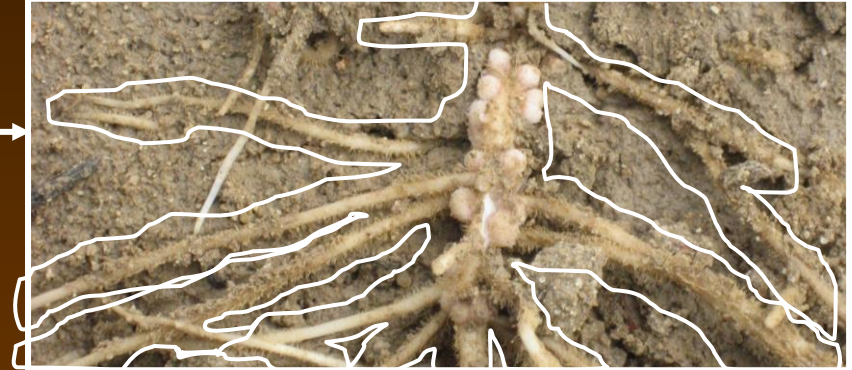
Prairies << cultures

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 détermine la disponibilité du phosphore

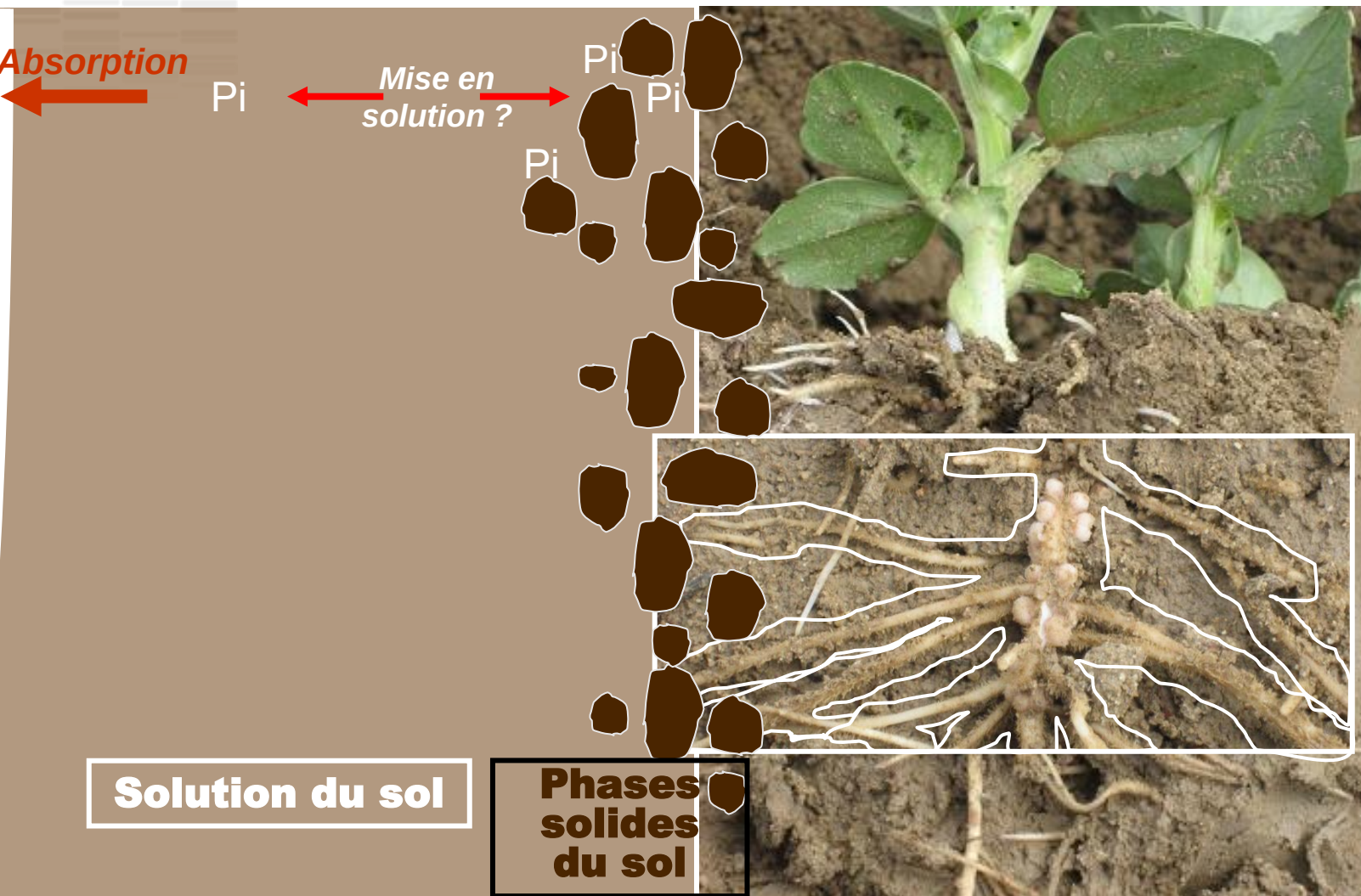


→ la disponibilité du phosphore dans la rhizosphère est influencée par les processus mis en jeu par les racines.

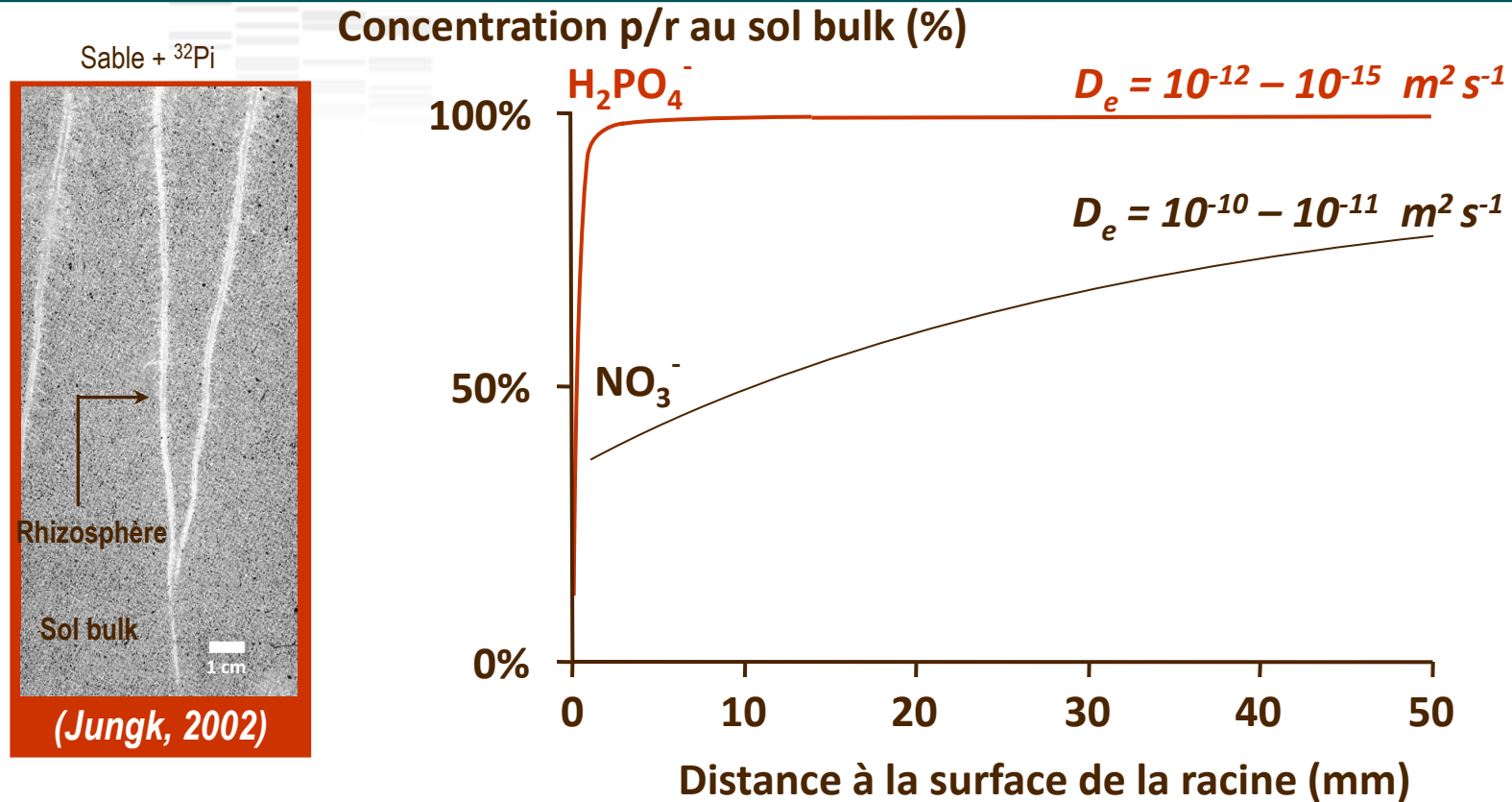
Les facteurs qui influencent cette zone **dépendent des propriétés de l'espèce à modifier le pH, à produire des exudats et des enzymes**

→ En conséquence, la biodisponibilité du phosphore peut varier selon l'espèce végétale

ction de



Absorption de Pi et pool de Pi rhizosphérique



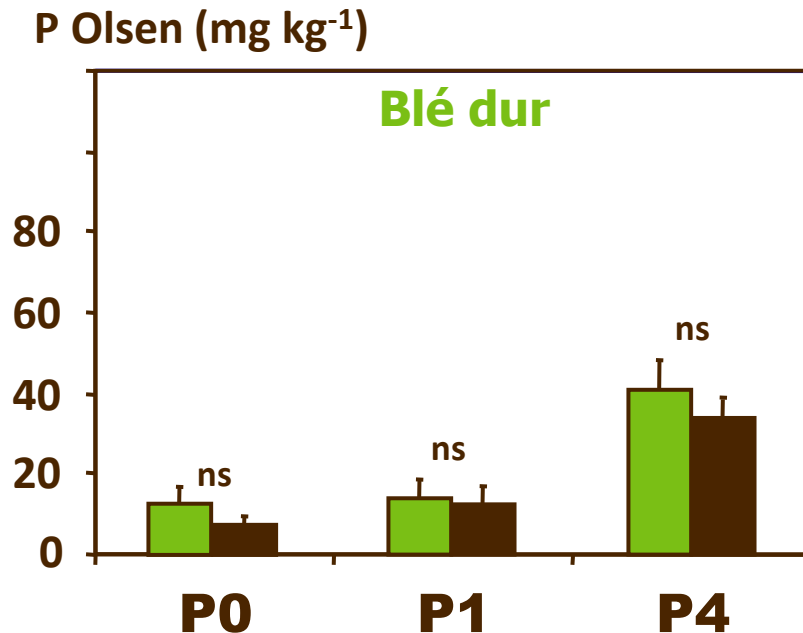
→ **Pi est appauvri autour de la racine**

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

Et le pool de Pi rhizosphérique dans la vrai vie ?

rhizosphère
sol bulk

Essai longue durée
INRAE Toulouse-Auzeville



**Au champ, pas d'appauvrissement du P disponible (P Olsen)
dans la rhizosphère du blé dur**

(Betencourt et al non publié)

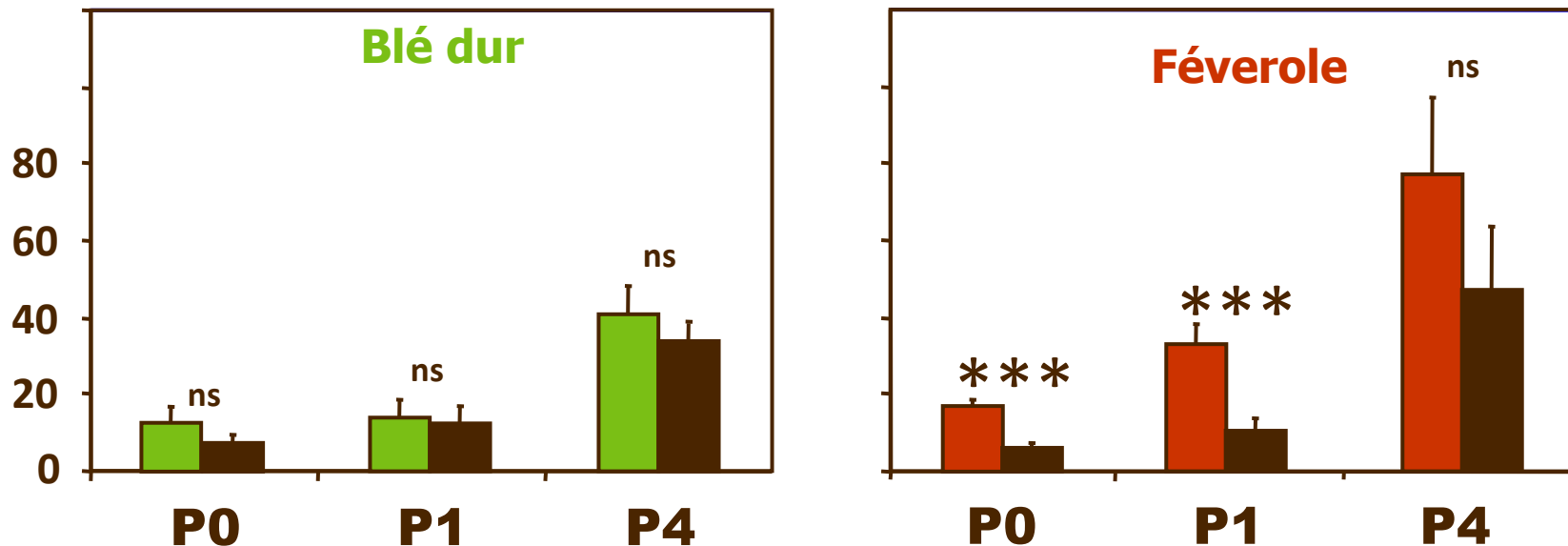
Et le pool de Pi rhizosphérique dans la vraie vie ?

rhizosphère

sol bulk

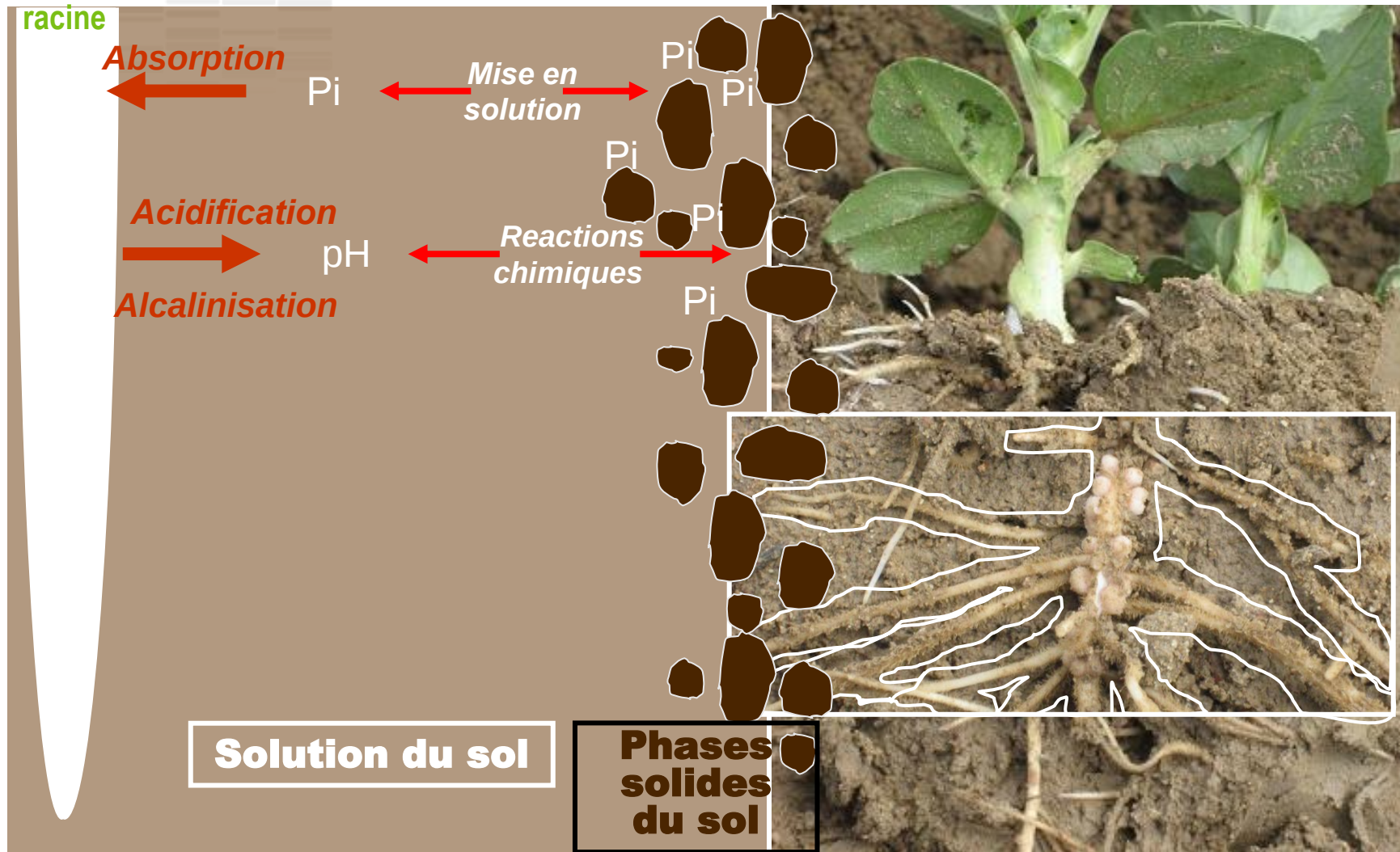
Essai longue durée
INRAE Toulouse-Auzeville

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

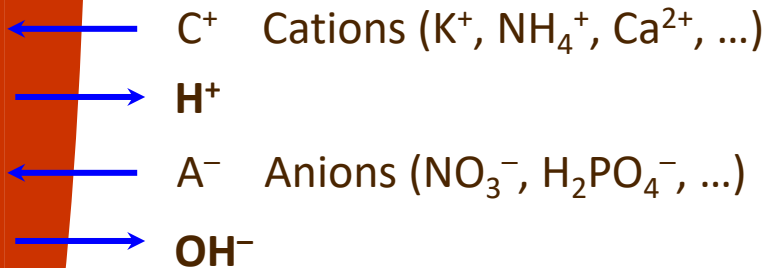
Action des racines pour modifier le sol



Variation du pH rhizosphérique

racine

absorption

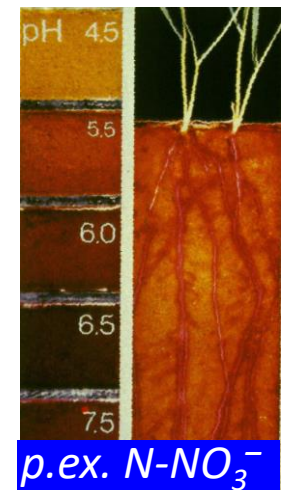
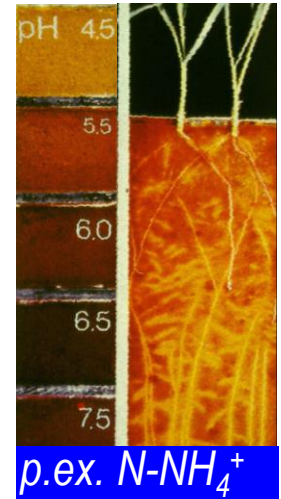


Le pH change
dans la rhizosphère
du blé

(Römheld, 1986)

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

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



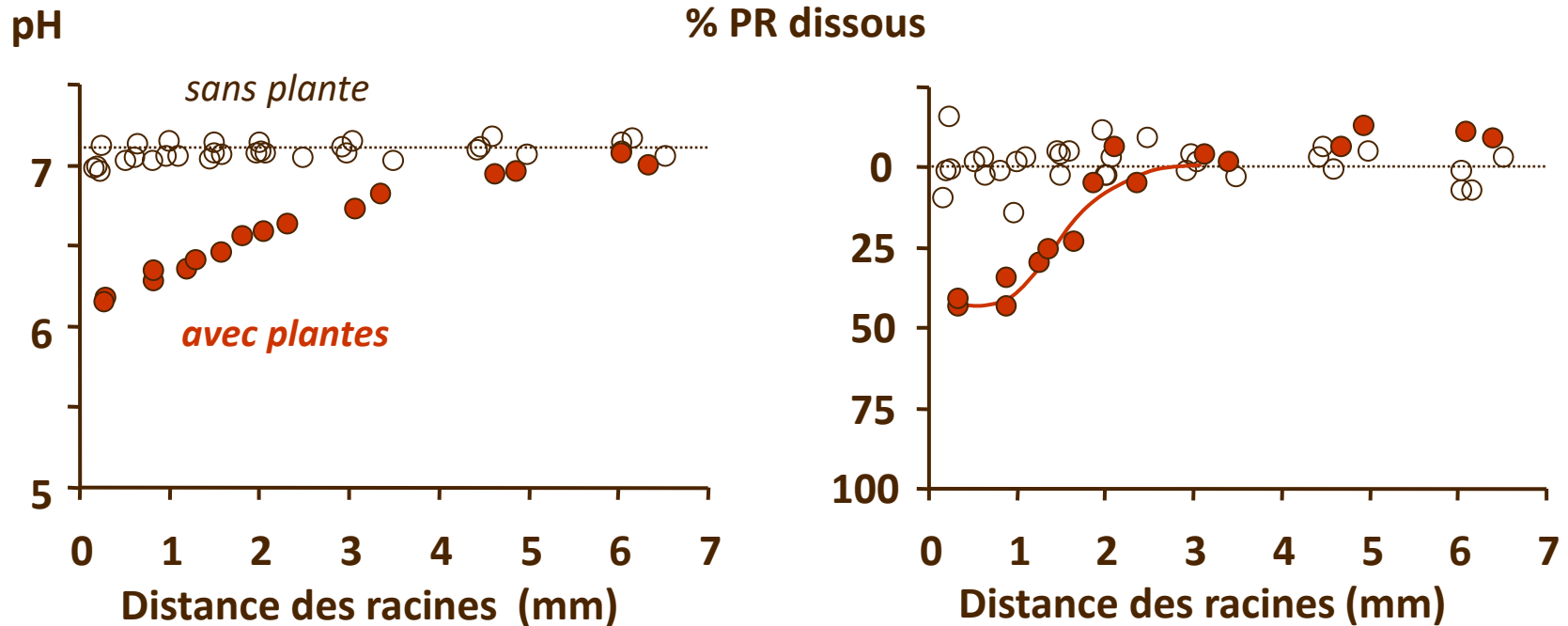
Bilan Anions-Cations → changements de pH dans la rhizosphère

Formes d'azote (NH_4 vs NO_3) = facteur essentiel !

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

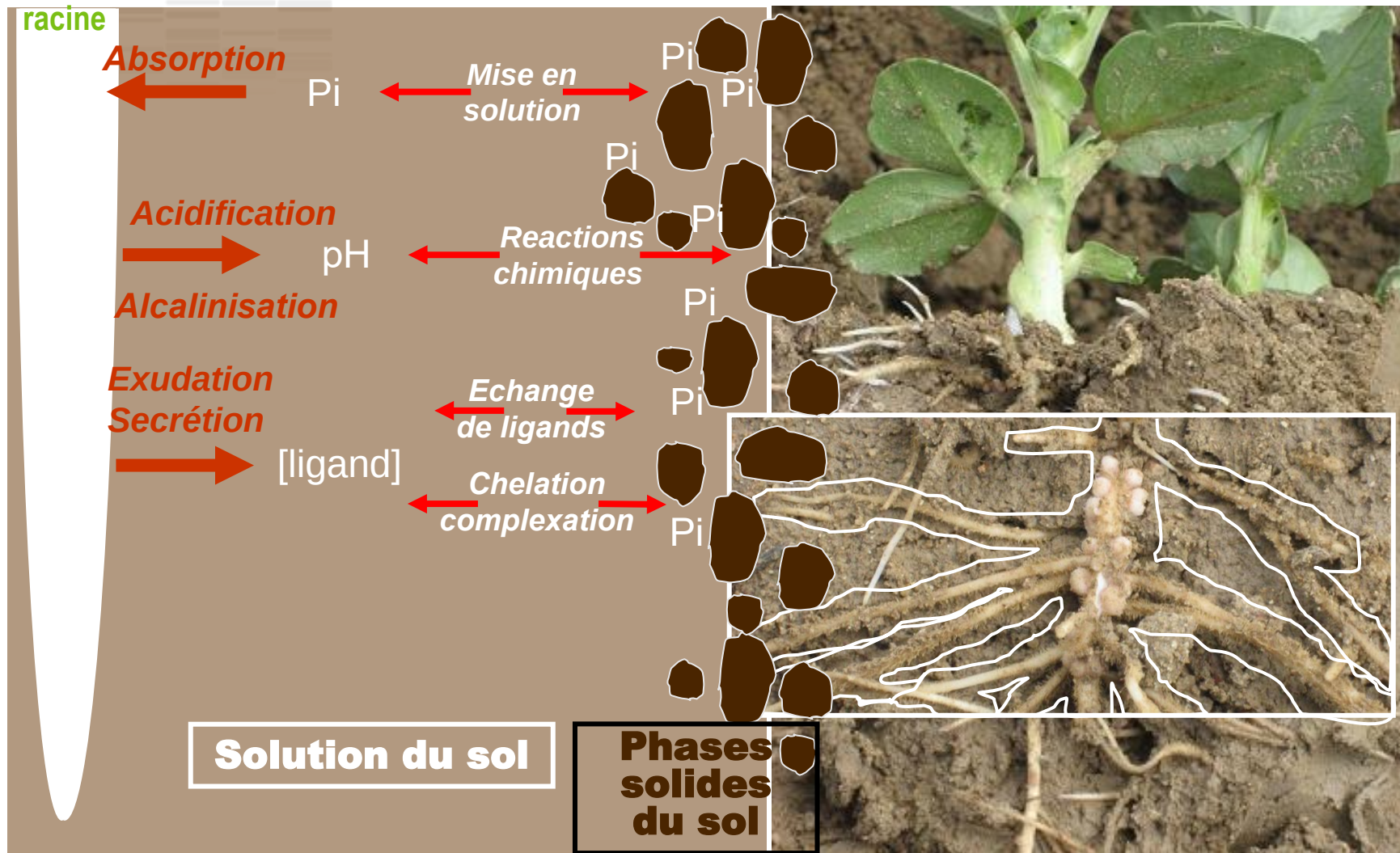
Variation du pH rhizosphérique

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



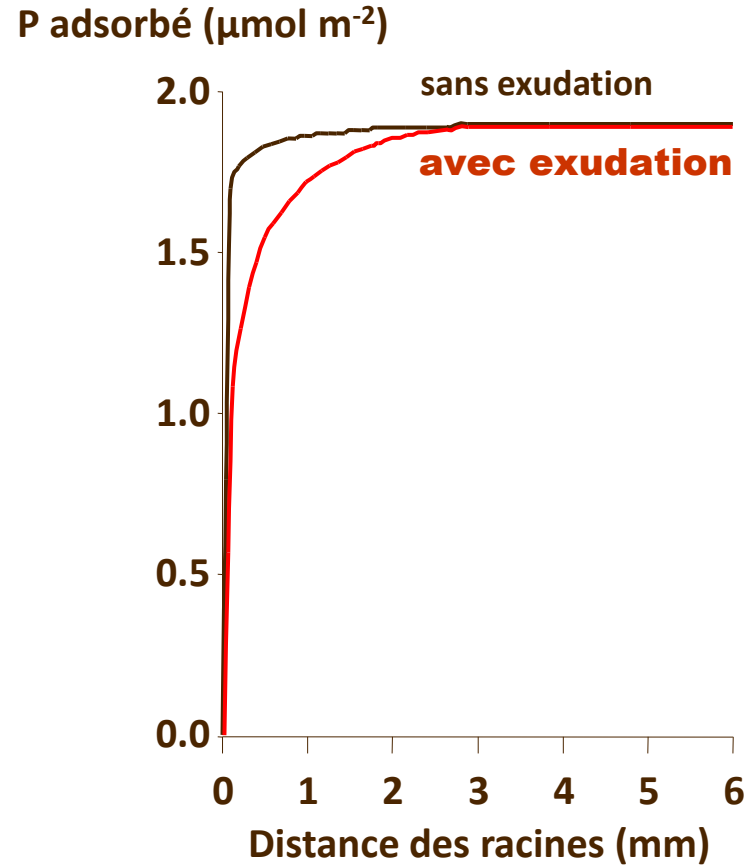
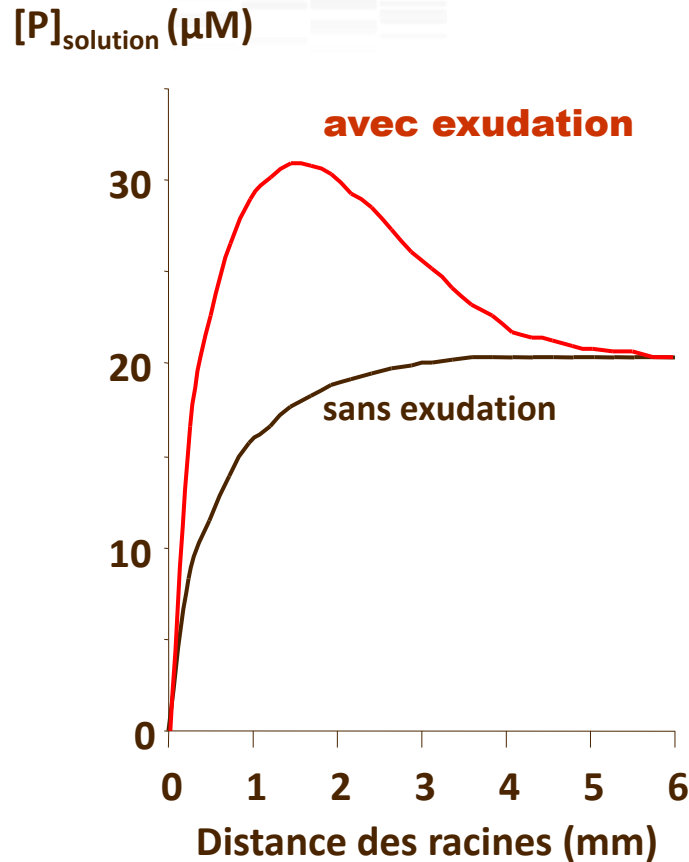
→ L'**acidification** des racines est bien capable de **dissoudre** le phosphate de roche
(Hinsinger & Gilkes, 1996 – Eur. J. Soil Sci. 47)

Production de ligands



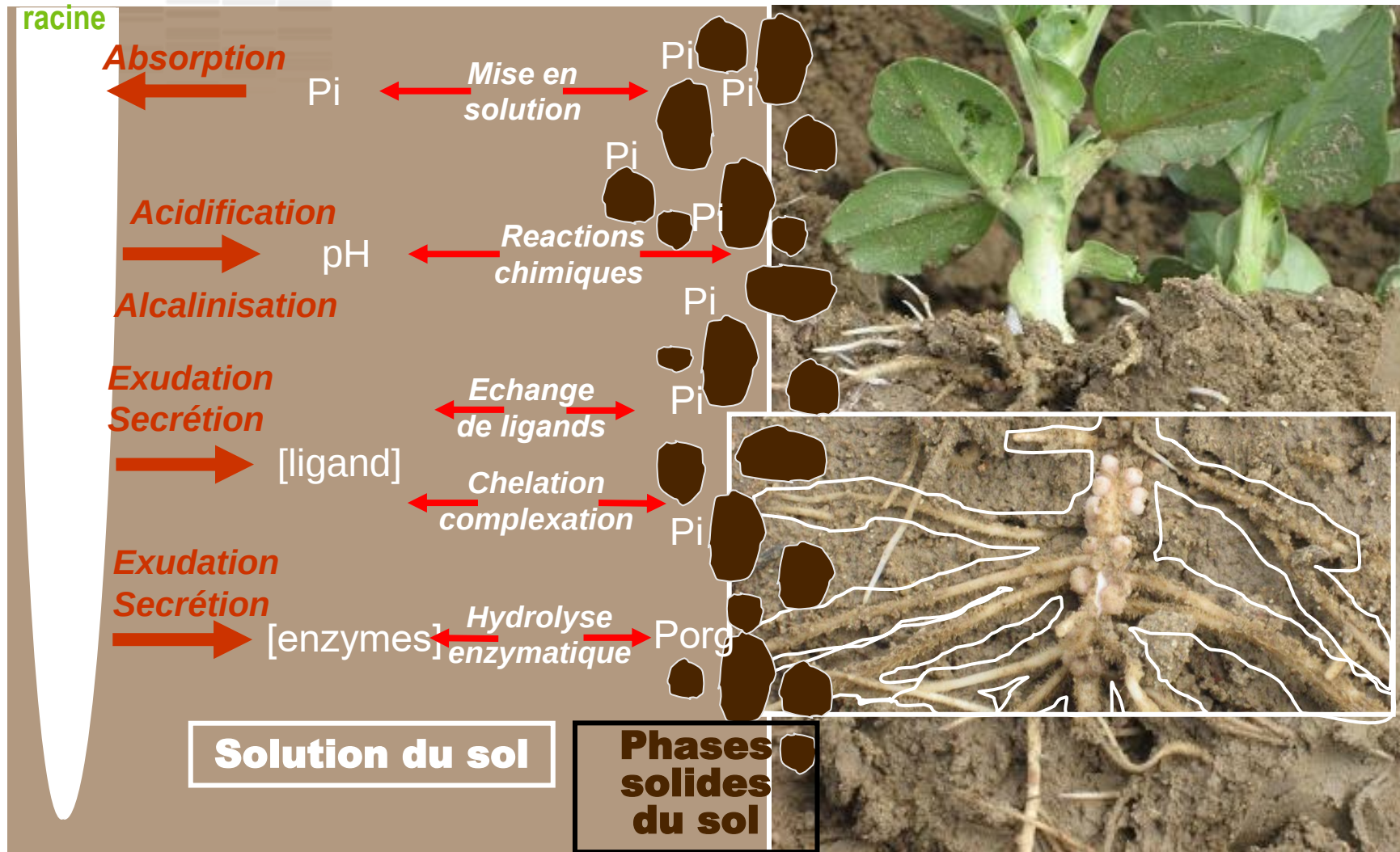
Production de ligands : citrate, oxalate

Effet modélisé du citrate produit par le maïs sur le Pi



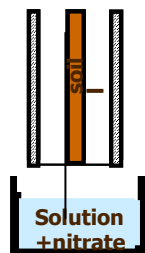
Effets majeurs du citrate : **augmentation** du Pi libre ET **diminution** du Pi adsorbé

Action des racines pour modifier le sol

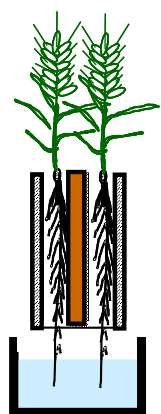


Et le P organique ?

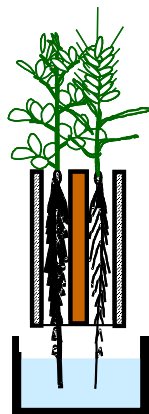
**Sol
témoin**



blé



bléharicot

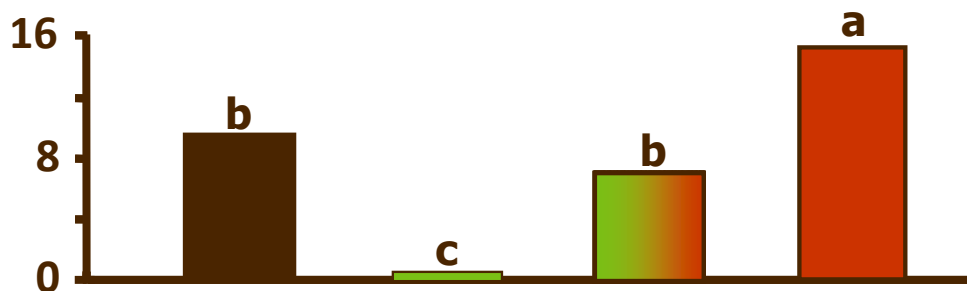


haricot



(Li et al 2008)

**Porg-Olsen
(mg kg⁻¹)**

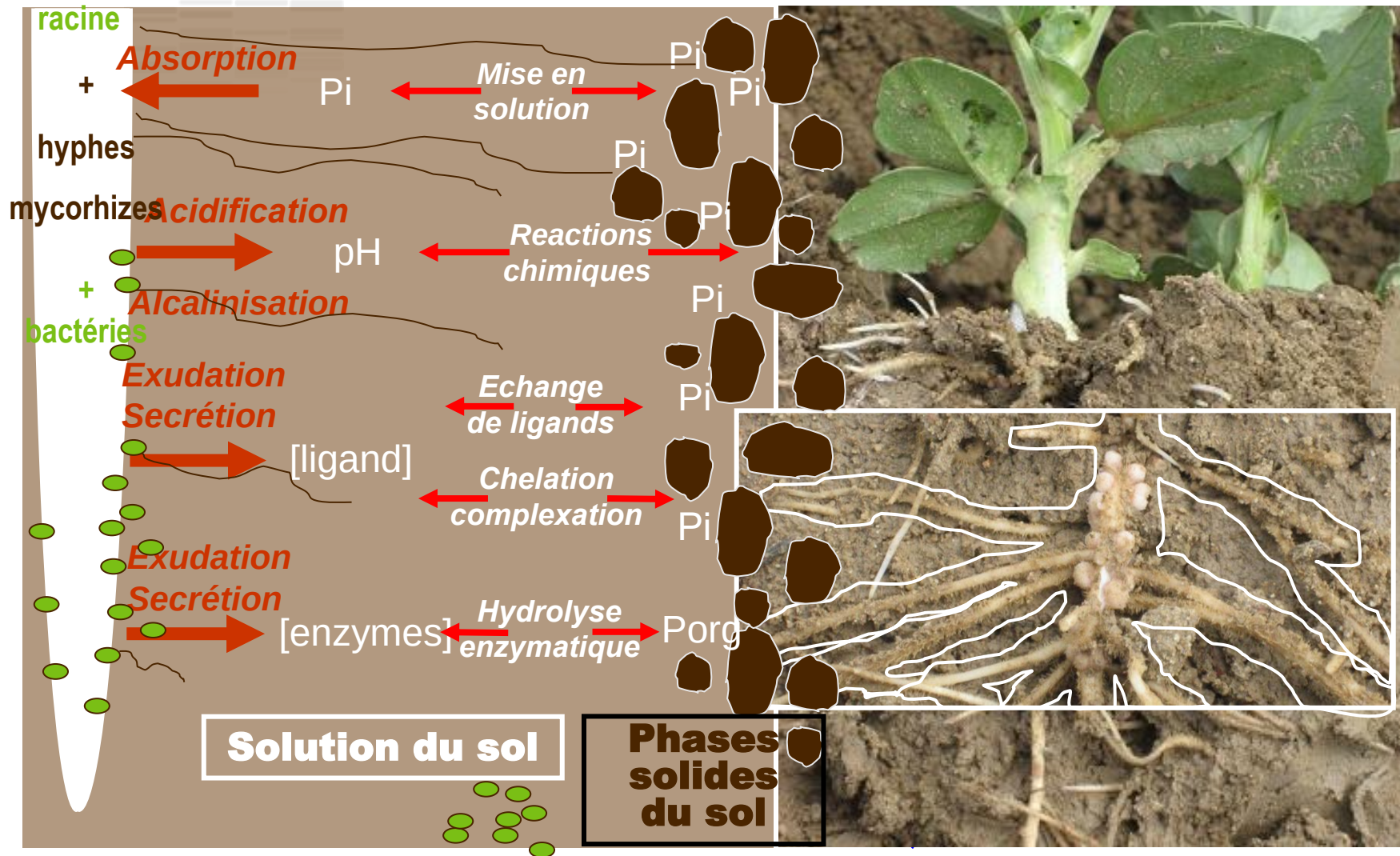


→ **blé épuise le P org.**

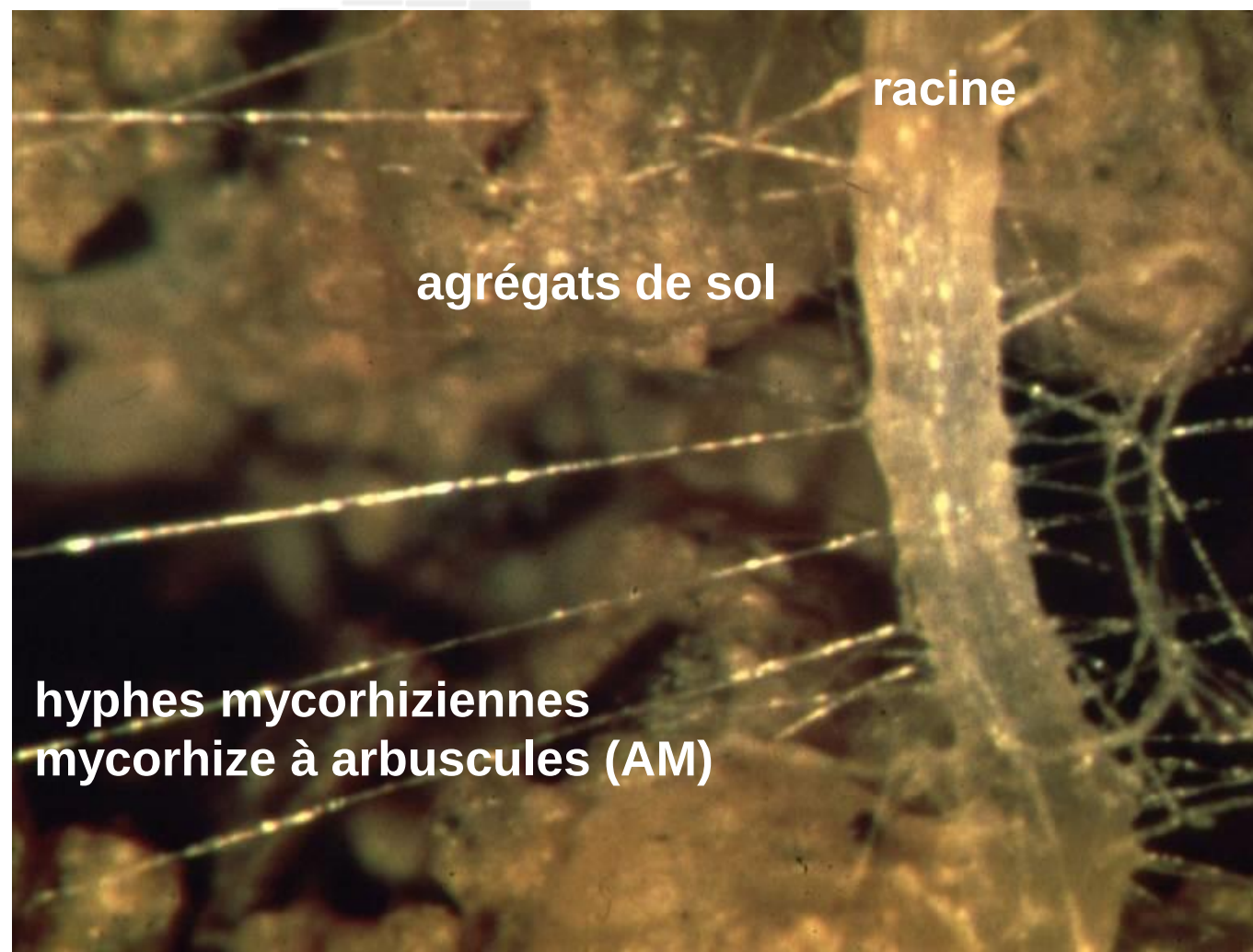
→ **alors que le haricot l'augmente**

Effet spécifique très fort !

Les racines ne sont pas seules !

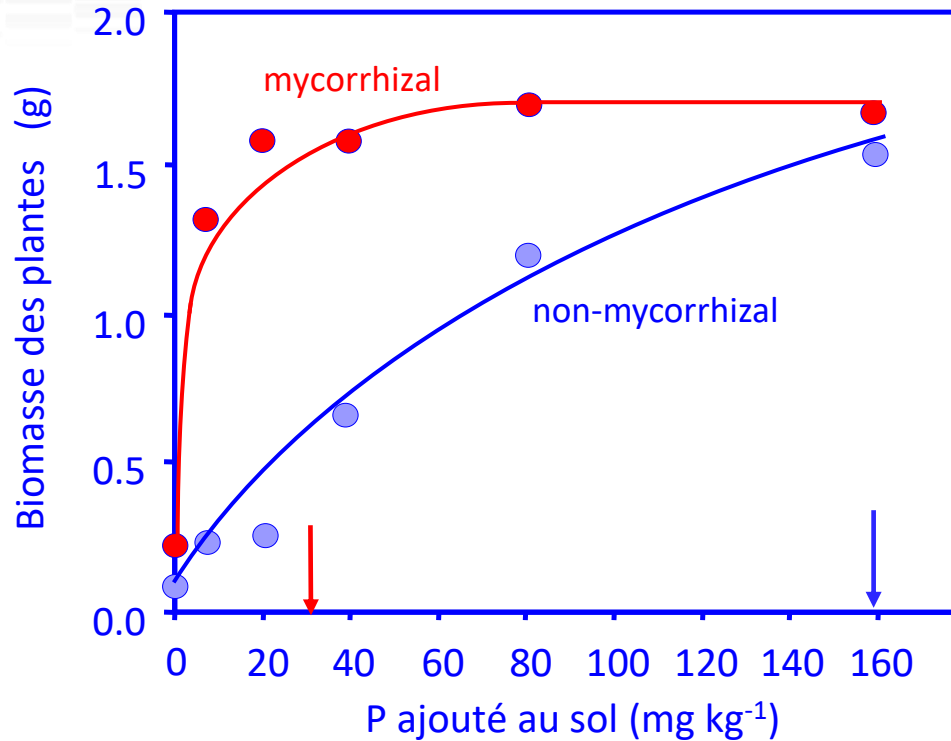


Les endomycorhizes sont des alliées de poids !



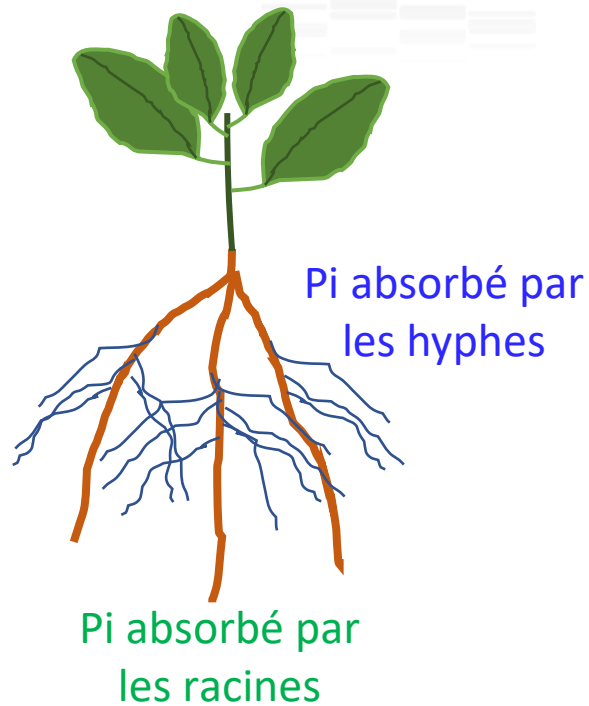
Les **hyphes** des endomycorhizes **explorent** un volume de sol considérable : **100 m/cm³ de sol**

Les endomycorhizes vont chercher P pour la plante !

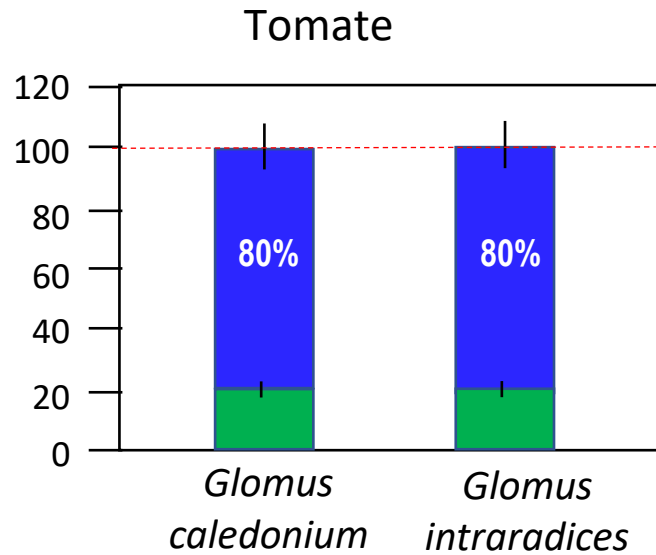


**Symbiose AM ->
croissance max pour des niveaux très faibles de P apporté**

Les endomycorhizes vont chercher P pour la plante !



- % P provenant des hyphes
- % P provenant des racines

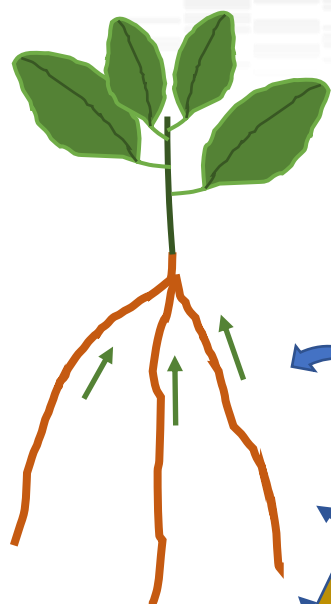


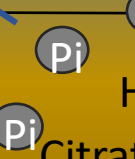
(Smith et al. 2004, *New Phytol.* **162**: 511–524)

Symbiose AM ->

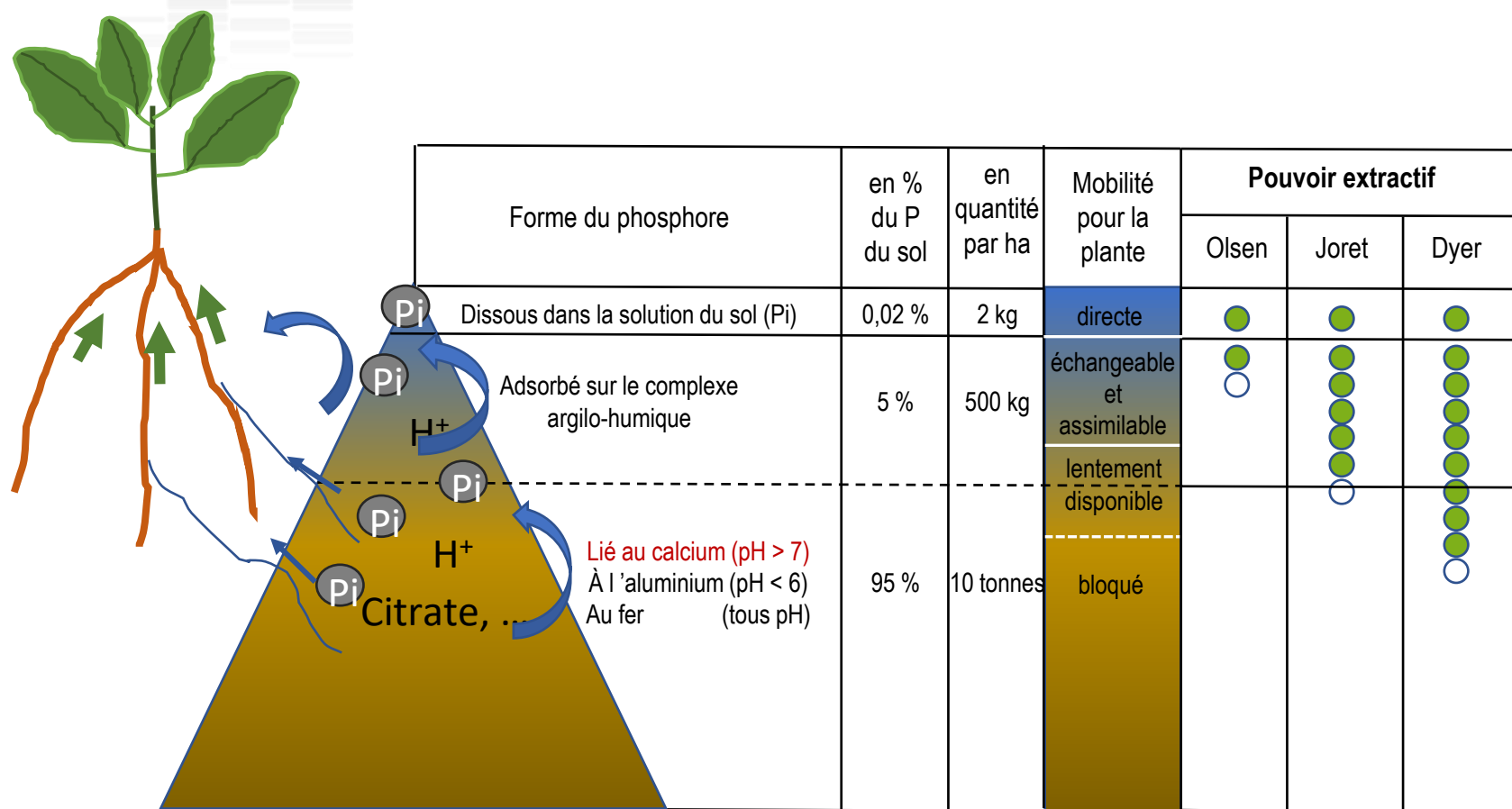
Les hyphes peuvent absorber la quasi-totalité du P de la plante !

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	 	    	    
 Lié au calcium (pH > 7) À l'aluminium (pH < 6) Au fer (tous pH)	95 %	10 tonnes	lentement disponible bloqué			     

Points de conclusion :



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 ...)

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

Augmenter l'exploration du sol par les espèces par les racines elles-mêmes et/ou par les champignons endomycorhiziens

Techniques culturales favorisant l'enracinement et les mycorhizes
-> effets du labour, des pesticides, du niveau de fertilisation P ...

Quels leviers pour optimiser la biodisponibilité de P ?

Utiliser les propriétés spécifiques des cultures

- **Céréales** : système racinaire très ramifié, très efficace pour absorber P
- **Légumineuses** : système racinaire moins étendu mais capable de produire des ligands et des enzymes et d'augmenter la biodisponibilité de P

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 à faible niveau de disponibilité en P ?
Pour produire autant de biomasse
avec moins de P?**

Sélection sur la morphologie, l'architecture racinaire ?

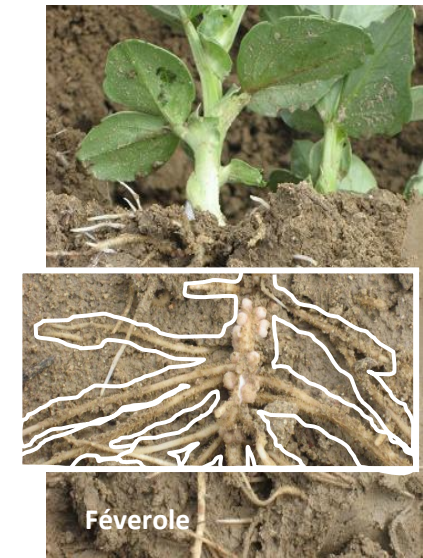
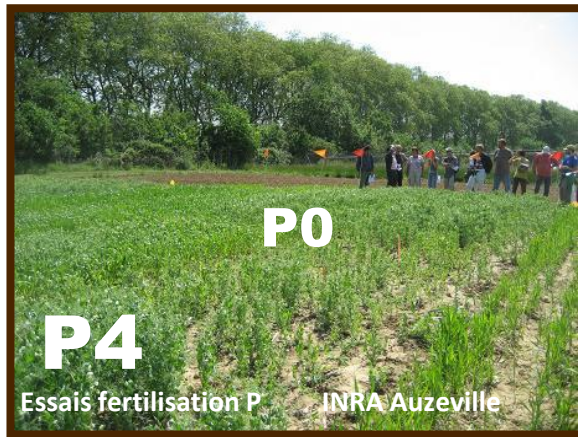
**Sélection sur des critères
d'efficacité d'absorption de P ?
d'utilisation de P ?**

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 ?