

Gestion des sols - Comment utiliser le phosphore des sols ?

annonmonament

PÔLE SOLS

Philippe Hinsinger Chef de Département AgroEcoSystem



Conférence organisée et modérée par Blandine Rosiès et Laetitia Fourrié







Gestion des sols – Comment utiliser le Phosphore des sols ?

→ un exposé en 4 parties:

Les grands enjeux du cycle du Phosphore

Disponibilité du Phosphore dans les sols

Biodisponibilité du Phosphore pour les plantes

Conclusions: Leviers agroécologiques pour utiliser le Phosphore





Gestion des sols – Les grands enjeux du cycle du Phosphore

– des perturbations au-delà des limites planétaires

- des usages inégaux et mal répartis: trop ou trop peu

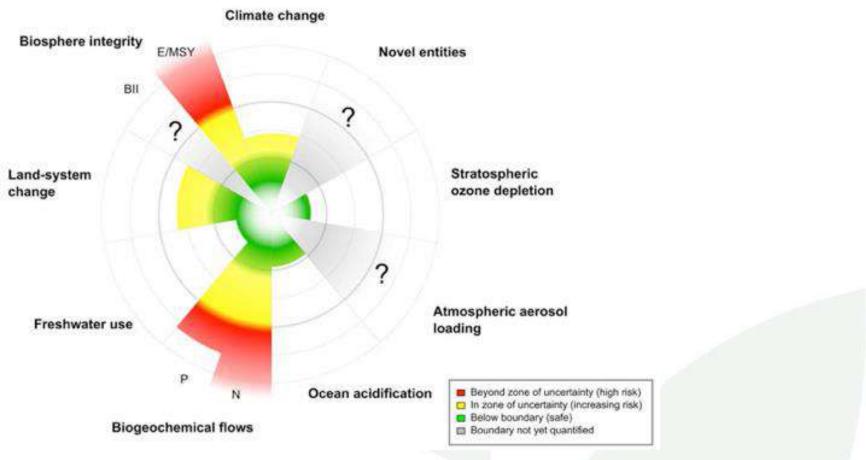
- les phosphates naturels : une ressource limitée et gaspillée





Les activités humaines ont fortement perturbé l'intégrité de la biosphère (érosion de la biodiversité) et les cycles biogéochimiques du Phosphore et de l'Azote

(Steffen et al. 2015 - Science + Le Monde 17 janvier 2015)



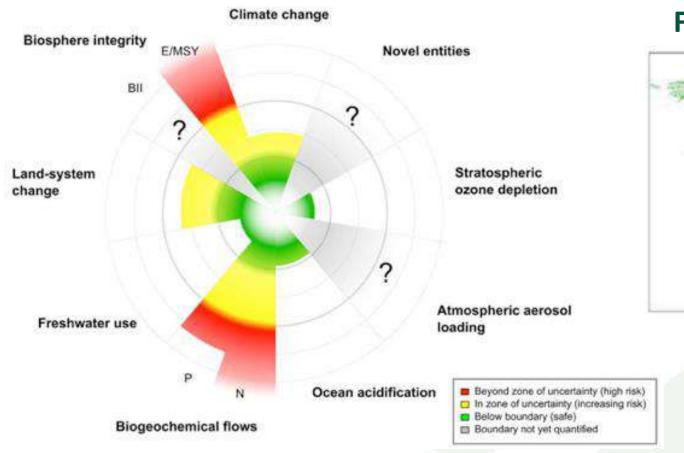


→ dépassement des limites planétaires

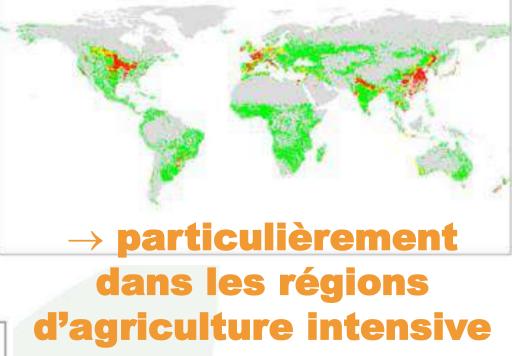


Les activités humaines ont fortement perturbé l'intégrité de la biosphère (érosion de la biodiversité) et les cycles biogéochimiques du Phosphore et de l'Azote

(Steffen et al. 2015 – Science + Le Monde 17 janvier 2015)



Flux de P en excès (surfertilisation)



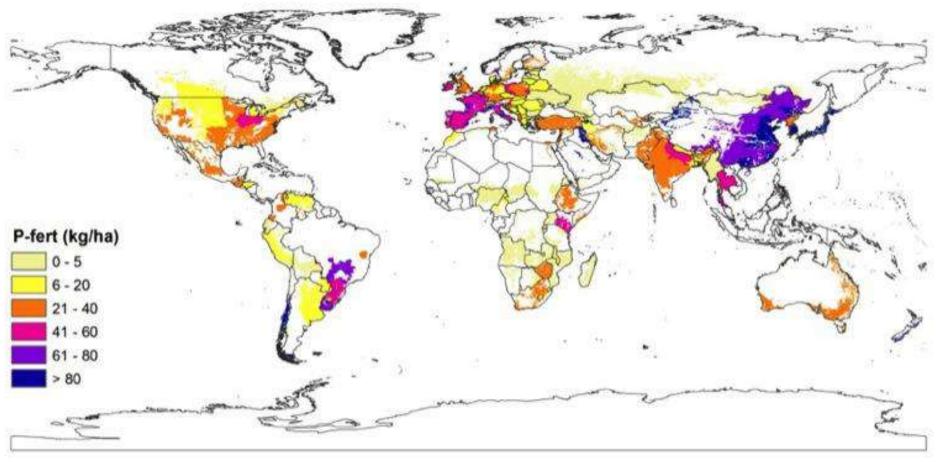
→ dépassement des limites planétaires





Doses de fertilisants phosphatés appliquées sur le blé dans le monde (kg P ha⁻¹)

(Mueller et al. 2012)



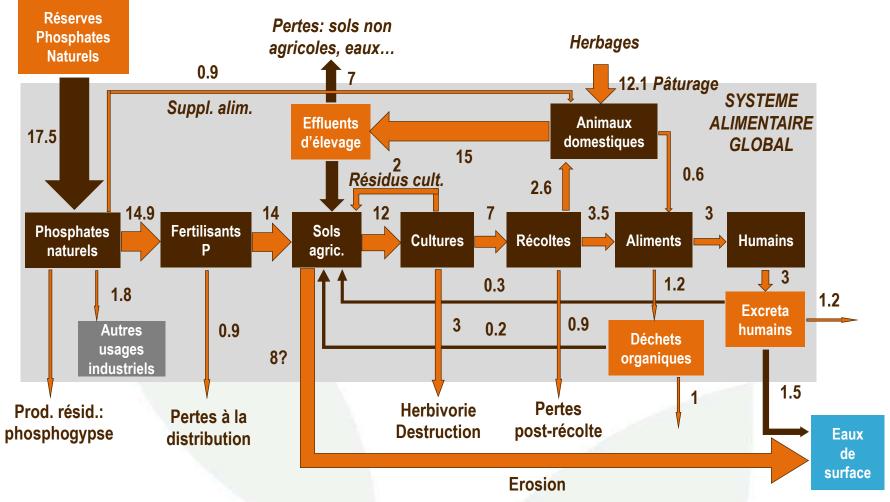
N.B. 50 q blé $ha^{-1} = 14 \text{ kg P } ha^{-1}$





Des pertes importantes tout au long du cycle de vie du Phosphore (Tg P an⁻¹)

(Cordell, Dangert & White 2009 – Global Environ. Change 10)

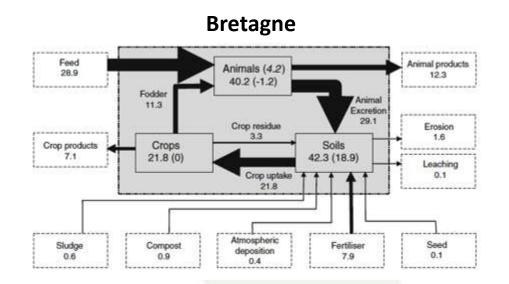


Des pertes par érosion multipliées par un facteur 3-4 au cours des dernières décennies

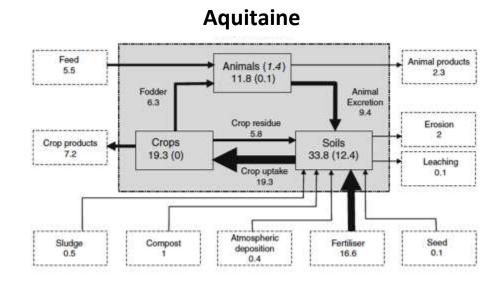
(Penuelas et al. 2013 - Nature Communications 4)

→ inefficience et gaspillage de la ressource

Stocks et flux (et bilan) de phosphore (kg ha⁻¹ an⁻¹) dans 2 régions agricoles en France à fort excédent (Senthilkumar, Nesme, Mollier & Pellerin 2012 – Nutr. Cycl. Agroecosyst. 92)



entrées >> sorties (38,8) (21,1)



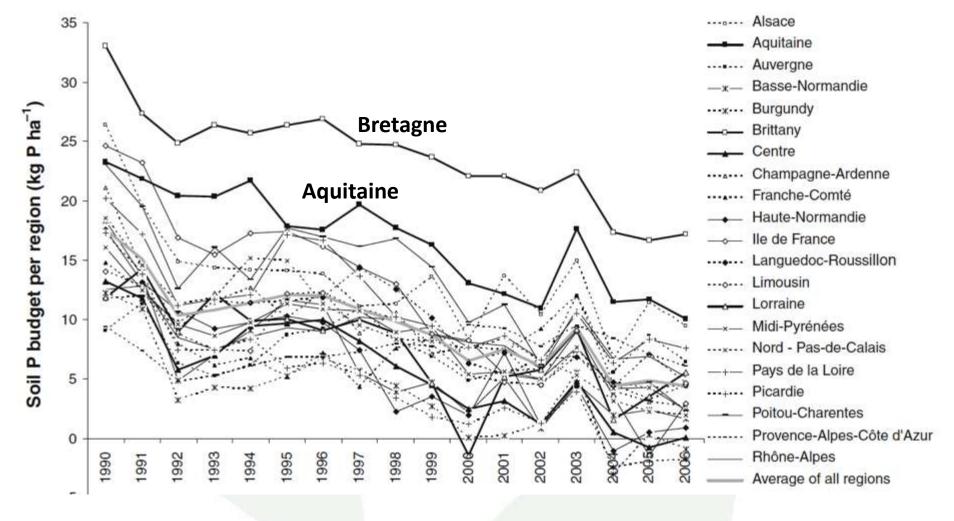
entrées >> sorties (24,1) (11,6)

ightarrow un faible bouclage du cycle au niveau régional, quel que soit le niveau de spécialisation de l'agriculture



Evolution du bilan entrées-sorties de phosphore dans les sols (kg ha⁻¹) en France

(Senthilkumar, Nesme, Mollier & Pellerin 2012 – Nutr. Cycl. Agroecosyst. 92)



→ une diminution de l'excédent de phosphore progressivement dans toutes les régions françaises





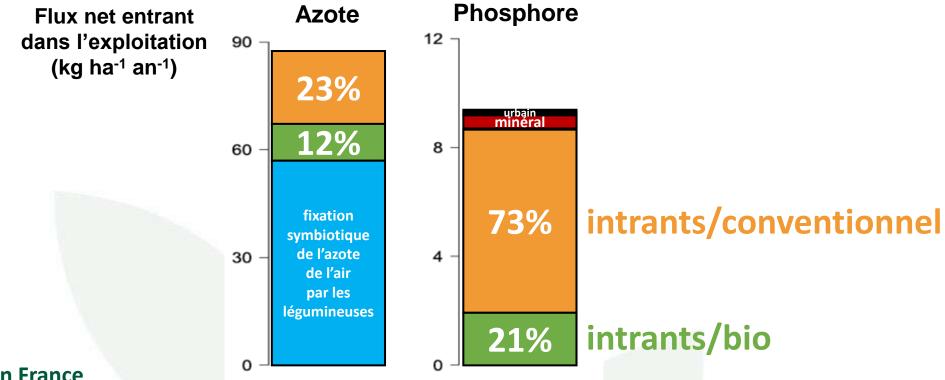
Evolution de la proportion de sols de « fertilité faible ou forte » en phosphore (P Olsen) dans les petites régions agricoles de France (source BDAT)

(Saby, Gouny, Lemercier, Denoroy & Eveillard 2016 – hal-01581567)

1994-2004 2004-2014 « fertilité faible » → augmentation dans le SE en phosphore « fertilité forte » ightarrow réduction dans le NW en phosphore

→ une réduction de la fertilisation phosphatée T&B et une évolution de la fertilité des sols français Origine des flux entrants d'azote et de phosphore dans 63 exploitations bio en France

(Nowak, Nesme, David & Pellerin 2013 – Environ. Res. Lett. 8)



63 exploitations bio en France

céréales	mixte	bovin laiti	er
7/25	14/17	20/21	expl. avec élevage
86%	17%	11%	% surface céréales
12%	82%	87%	% surface fourrages



ightarrow forte dépendance indirecte des fertilisants P en bio



Gestion des sols – Disponibilité du Phosphore dans les sols

- des formes de phosphore multiples, liées au type du sol

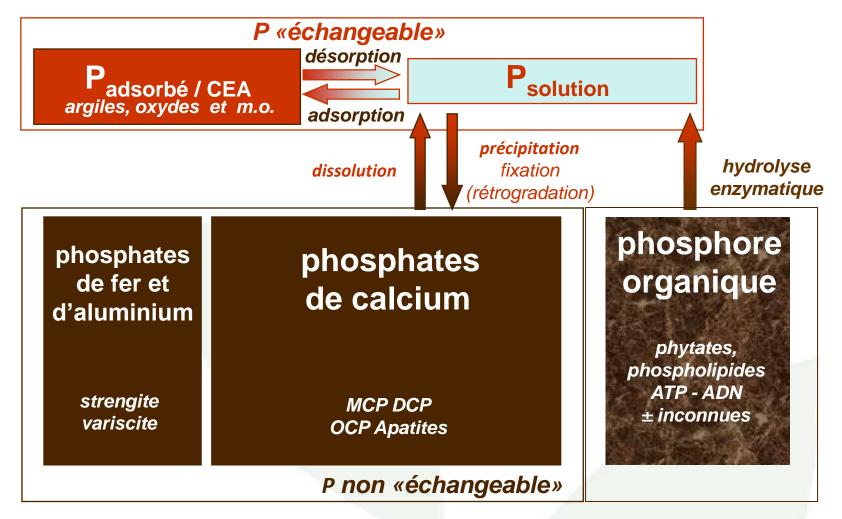
– de multiples processus biogéochimiques, tous influencés par le pH

– des méthodes d'estimation assez inadaptées aux enjeux actuels





Des formes de phosphore inorganique et organique multiples dans le sol régulées par des processus biogéochimiques différents



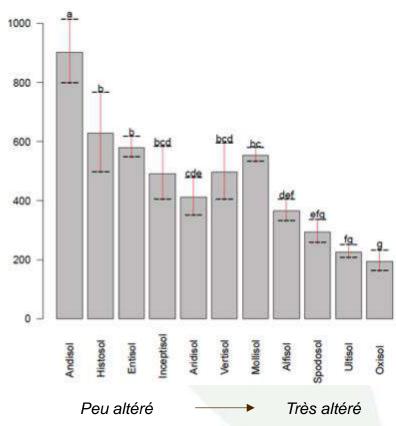




Des teneurs et des formes de phosphore liées au type de sol

(Yang & Post 2011 – Biogeosciences 8)

Teneur en P total (mg P kg⁻¹)



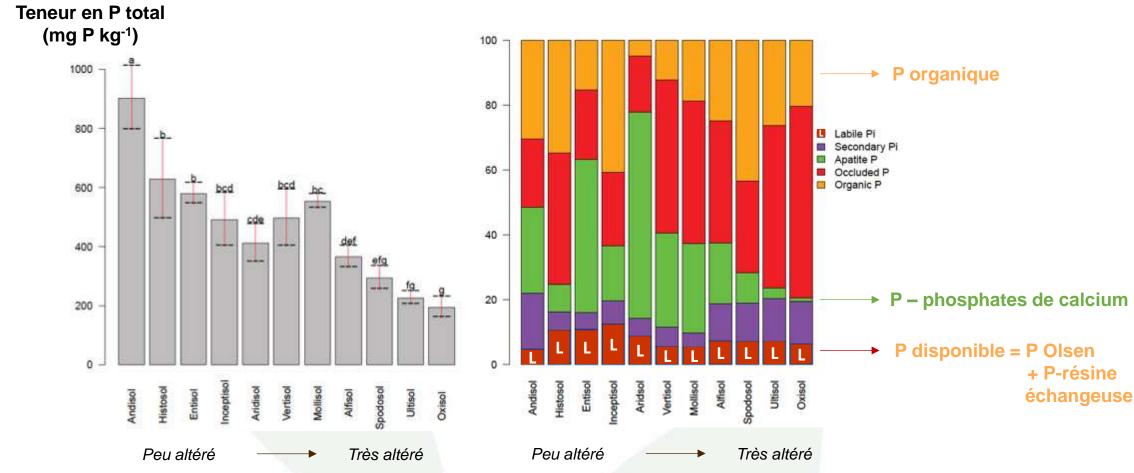
→ les sols les plus anciens (altérés) sont les plus appauvris en phosphore





Des teneurs et des formes de phosphore liées au type de sol

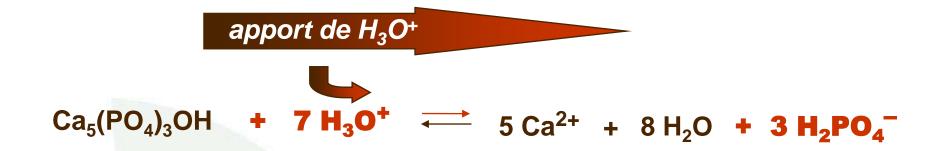
(Yang & Post 2011 – Biogeosciences 8)



→ quel que soit le type de sol (son degré d'altération), 78 la part de P disponible est toujours faible (qques %)



Equilibre de dissolution/précipitation d'un phosphate de calcium (hydroxyapatite)

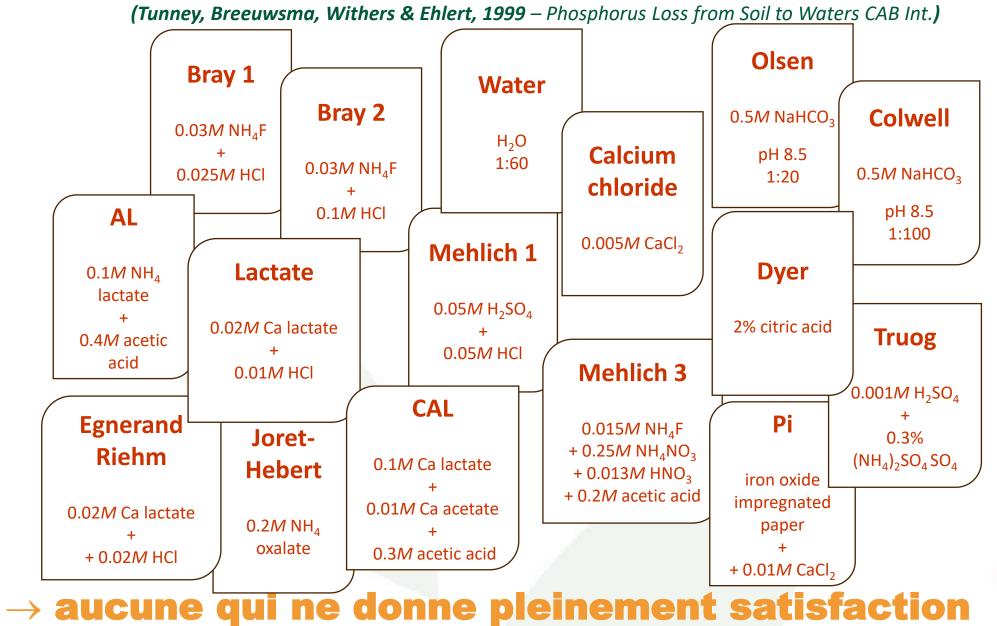


→ le pH du sol joue un rôle déterminant: un pH acide favorise la dissolution des phosphates de calcium





17 méthodes utilisées pour déterminer la disponibilité du phosphore en Europe

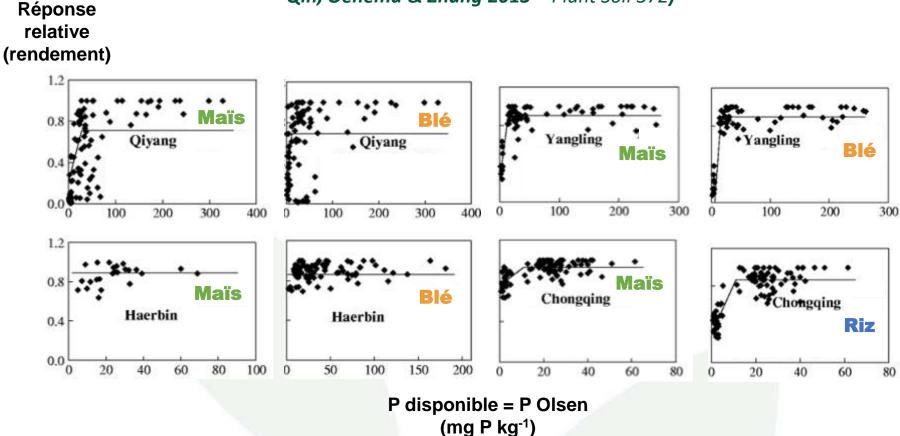






Réponse en rendement de diverses céréales à la disponibilité du phosphore dans diverses provinces chinoises

(Bai, Li, Yang, Zhou, Shi, Wang, Li, Shen, Chen, Qin, Oenema & Zhang 2013 – Plant Soil 372)



→ de piètres relations, même pour une plante cultivée donnée, qui varient avec le type de sol Valeur seuil de disponibilité du phosphore d'après la réponse en termes de rendement de diverses cultures dans l'essai de fertilisation de longue durée d'Auzeville (INRAE)

(Colomb, Debaecke, Jouany & Nolot 2007 – Eur. J. Agron. 26)

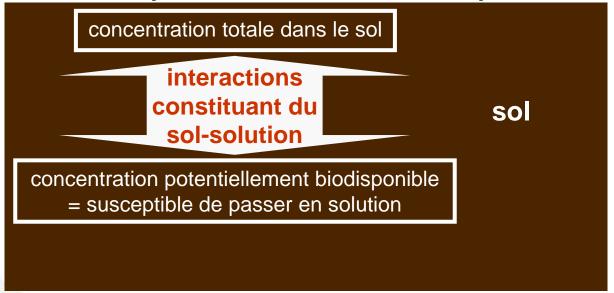
	Espèce cultivée	Valeur seuil P Olsen (mg P kg ⁻¹)
Plus efficiente moins exigeante	Maïs	3.9
	Soja	4.8
	Blé	4.9
	Sorgho	5.4
Moins efficiente plus exigeante	Tournesol	7.5

→ les plantes diffèrent selon leur exigence, certaines sont encore moins efficientes (colza, pomme de terre, etc.)



La disponibilité est une caractéristique intrinsèque du sol, déterminée par des méthodes chimiques

Disponibilité



(Harmsen et al., 2005Land Contamination and Degradation 13)

ightarrow la disponibilité du phosphore dans le sol rend compte de l'aptitude des ions phosphates à passer en solution

quelle que soit la méthode, c'est un piètre indicateur de la biodisponibilité du phosphore pour les plantes





Gestion des sols – Biodisponibilité du Phosphore pour les plantes

– des déterminants multiples, en fonction de la culture considérée

 un rôle important du volume de la rhizosphère et des processus et traits qui le déterminent (racines, poils racinaires, mycorhizes)

 un rôle important de l'aptitude des racines à modifier la disponibilité du phosphore dans la rhizophère (pH, exsudats, etc...)





La biodisponibilité, contrairement à la disponibilité, varie pour un sol donné en fonction de l'organisme vivant considéré, la culture par exemple

Disponibilité

concentration totale dans le sol interactions constituant du sol sol-solution concentration potentiellement biodisponible = susceptible de passer en solution absorption membrane organisme

(Harmsen et al., 2005

- Land Contamination
and Degradation 13)

Biodisponibilité

... dépend de l'organisme considéré en fonction de ses capacités à absorber

T&B

vivant

→ un concept pertinent pour comprendre et gérer



La biodisponibilité, contrairement à la disponibilité, varie pour un sol donné en fonction de l'organisme vivant considéré, la culture par exemple

Disponibilité

concentration totale dans le sol interactions constituant du sol sol-solution concentration potentiellement biodisponible = susceptible de passer en solution zone bio-influencée absorption membrane organisme vivant

(Harmsen et al., 2005

- Land Contamination
and Degradation 13)

Biodisponibilité

I'organisme considéré
en fonction
de ses capacités
à absorber et à
modifier les propriétés
du sol environnant

T&B

→ un concept pertinent pour comprendre et gérer



La rhizosphère, la portion du sol où se joue la biodisponibilité du phosphore

(Hinsinger, 2001 - Plant Soil 237)

(Hinsinger, Bengough, Vetterlein & Young, 2009 – Plant Soil 321)

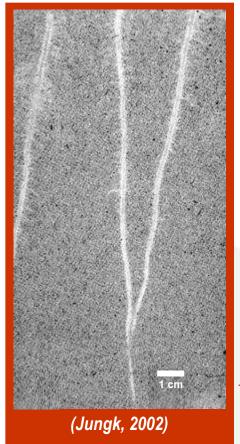


ightarrow les plantes diffèrent dans leur capacité à utiliser les ressources du sol et à modifier leur disponibilité





Appauvrissement en phosphore dans la rhizosphère du maïs mise en évidence par autoradiographie du phosphore marqué



(Barber, 1995 – In : Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach ; Jungk, 2002 — In : Plant Roots The Hidden Half ; Hinsinger, Brauman, Devau, Gérard, Jourdan, Laclau, Le Cadre, Jaillard & Plassard 2011 — Plant Soil 348))

ightarrow zone d'appauvrissement en phosphore très étroite

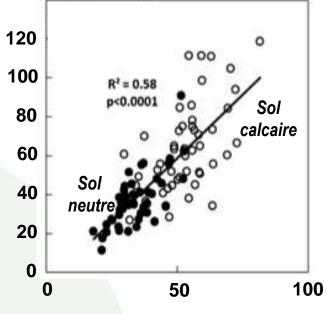
ightarrow les ions phosphate sont très peu mobiles dans le sol T&B ightarrow les plantes doivent développer leur surface d'absorption



Surface développée du système racinaire: un déterminant de la biodisponibilité du phosphore en conditions de faible disponibilité (témoin PO - INRAE Auzeville) gamme de 23 variétés de maïs – stade floraison – EURoot 2013

P biodisponible (mg plante⁻¹)





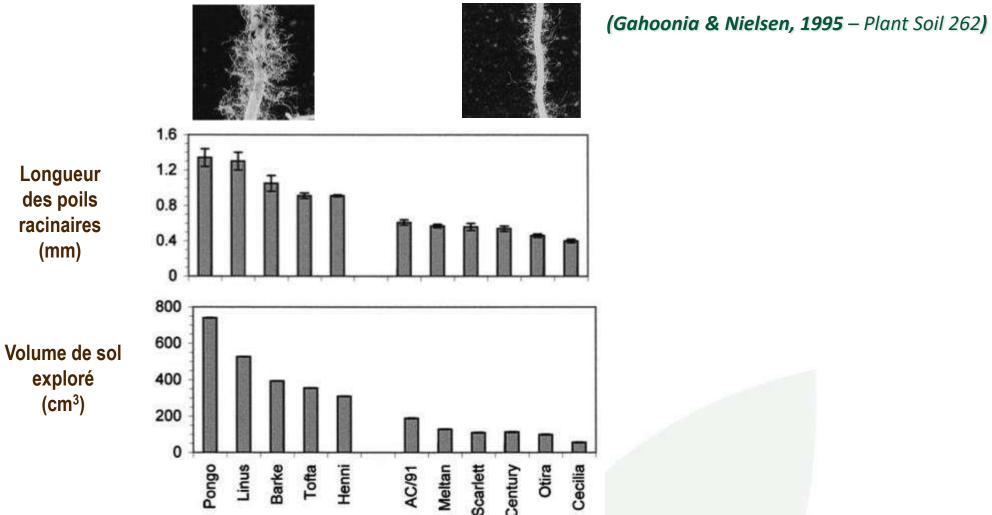
Surface développée des racines (cm²)

(Erel, Bérard, Capowiez, Doussan, Arnal, Souche, Gavaland, Fritz, Visser, Salvi, Le Marié, Hund, Hinsinger, 2017 – Plant Soil)

ightarrow les ions phosphate sont très peu mobiles dans le sol Tobbe ightarrow les plantes doivent développer leur surface d'absorption



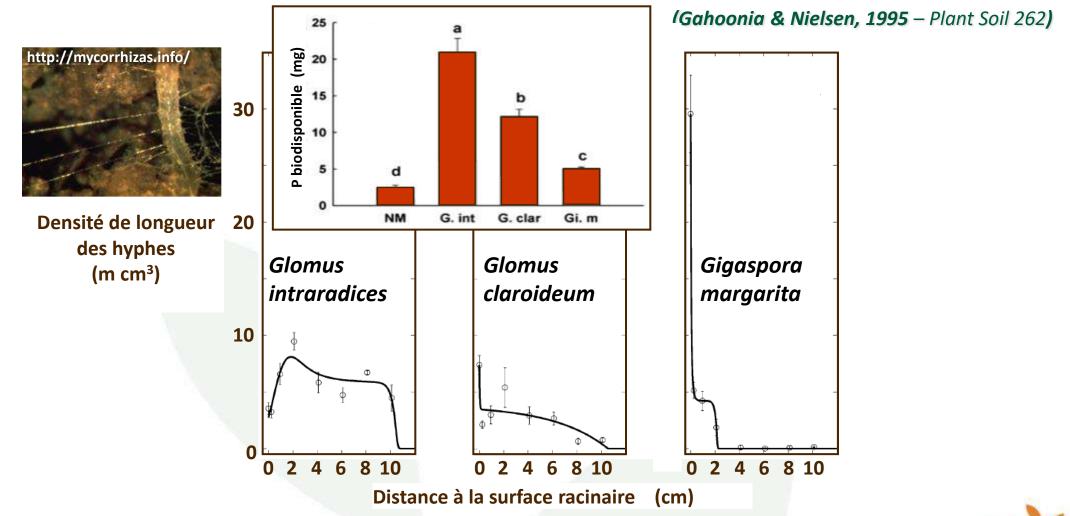
Longueur des poils racinaires: un déterminant du volume de sol exploré chez des variétés d'orge cultivées en sol pauvre en P



→ les ions phosphate sont très peu mobiles dans le sol Teles plantes doivent développer leur surface d'absorption



Les champignons mycorhiziens : un déterminant majeur du volume de sol exploré chez une luzerne annuelle cultivée en sol pauvre en P

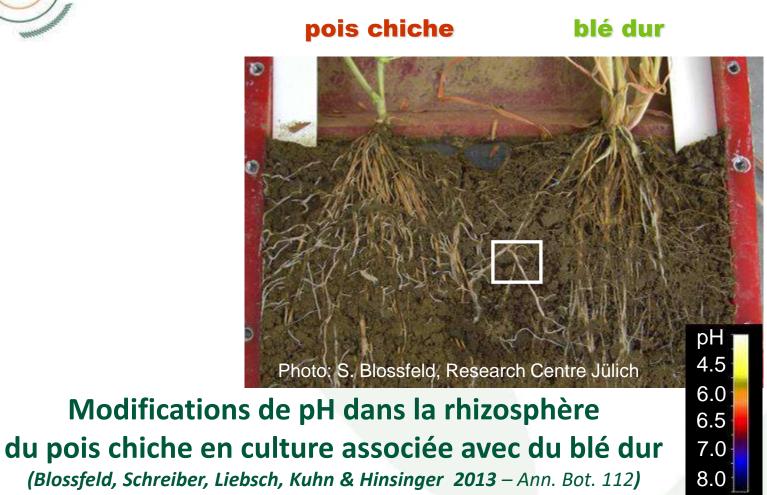


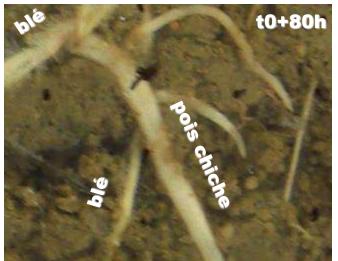
ightarrow les ions phosphate sont très peu mobiles dans le sol T& ightarrow les plantes doivent développer leur surface d'absorption

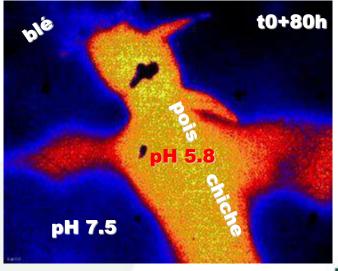


Modifications de pH dans la rhizosphère du pois chiche associé au blé dur

(Blossfeld, Schreiber, Liebsch, Kuhn & Hinsinger 2013 – Ann. Bot. 112)







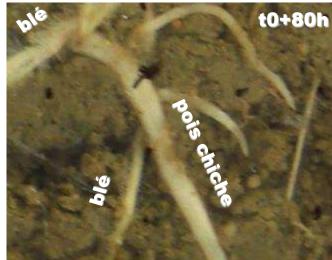
→ les plantes modifient leur rhizosphère

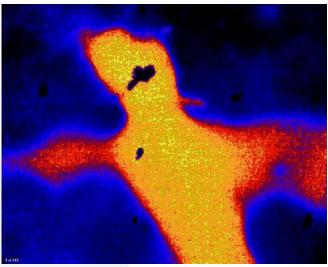


Modifications de pH dans la rhizosphère du pois chiche associé au blé dur

(Blossfeld, Schreiber, Liebsch, Kuhn & Hinsinger 2013 – Ann. Bot. 112)





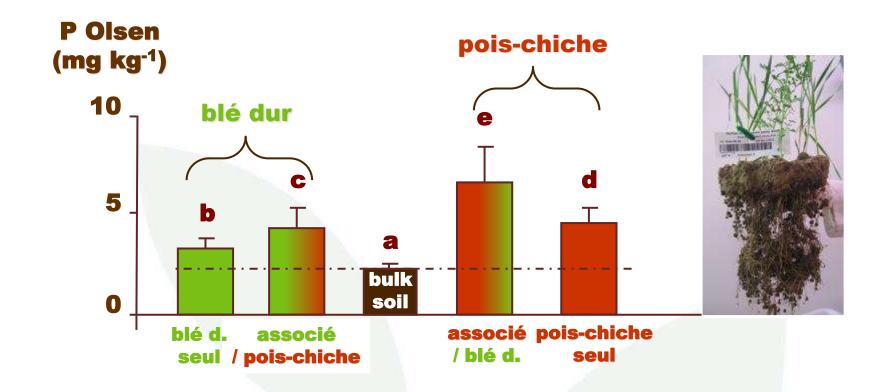


→ les plantes modifient leur rhizosphère



Augmentation de la disponibilité du phosphore dans la rhizosphère du pois-chiche, encore plus lorsqu'il est associé au blé dur dans un sol non fertilisé (témoin PO - INRAE Auzeville)

(Betencourt, Duputel, Colomb, Desclaux & Hinsinger 2012 - Soil Biol. Biochem. 46)



ightarrow les plantes diffèrent dans leur capacité à utiliser les ressources du sol et à modifier leur disponibilité





Gestion des sols – Leviers agroécologiques pour utiliser le phosphore

des espèces et variétés plus efficientes / frugales / rustiques

des associations ou rotations qui mobilisent mieux la biodiversité
 (diversité des organismes du sol qui contribuent au cycle du phosphore)
 et la diversité des formes de phosphore contenues dans le sol

 des inoculants microbiens (à éprouver) et une gestion des sols qui valorise les fonctions assurées par une diversité d'organismes du sol





Stratégies racinaires

- Croissance / développement
- Architecture
- Morphologie (poils racinaires)
- Symbiose mycorhizienne / PGPR
 + stimulants de croissance

Stratégies rhizosphériques

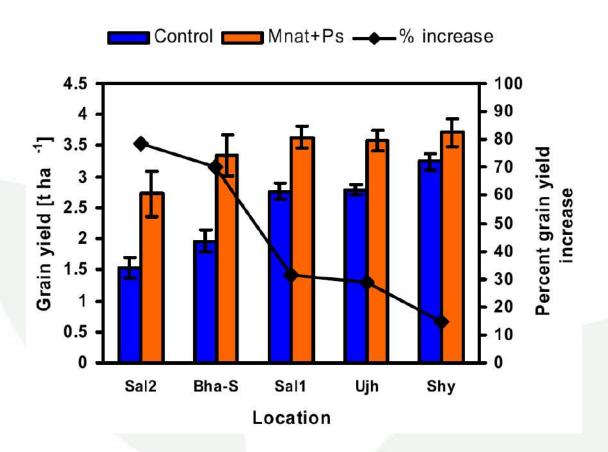
- Acidification
- Exsudation racinaire (citrate, etc...)
- Sécrétion de phosphatases
- Stimulation comm. microbiennes





Rendement du blé en sol pauvre en P en Inde, avec et sans apport d'inoculants microbiens (champignons mycorhiziens + bactéries Pseudomonas)

(Mäder et al., 2011 – Soil Biol. Biochem. 43)

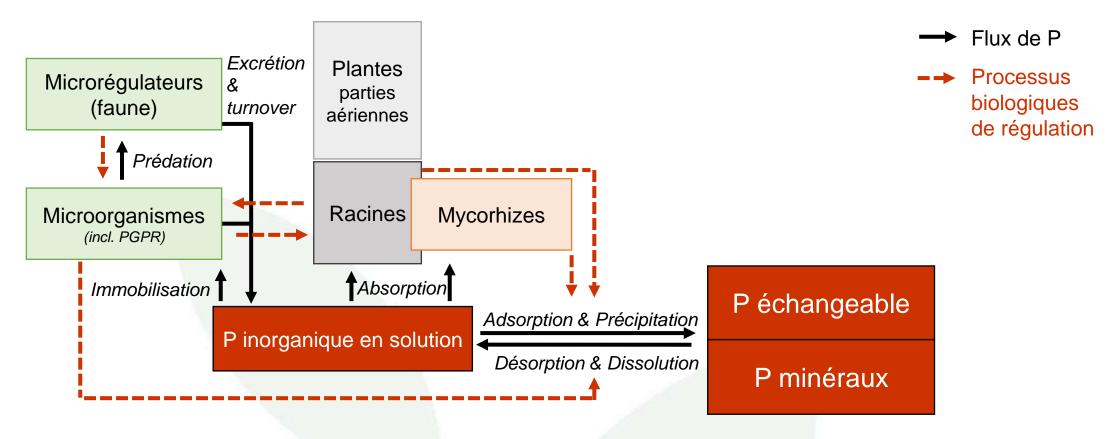


ightarrow les communautés microbiennes et mycorhiziennes du sol jouent également un rôle important pour le phosphore



Rôle des organismes vivants dans la régulation de la disponibilité du phosphore inorganique dans les sols

(Hinsinger, Herrmann, Lesueur, Robin, Trap, Waithaisong & Plassard 2015 – Ann. Plant Rev. 48)



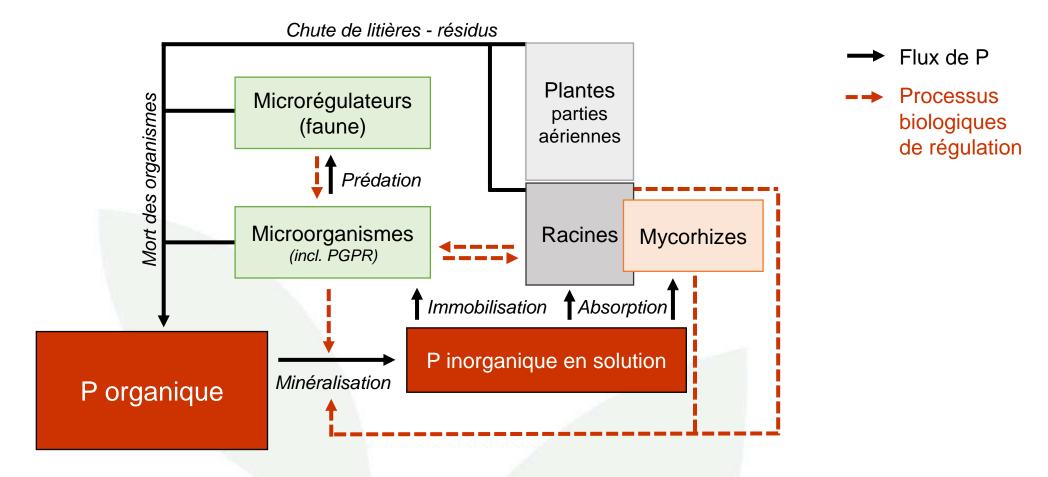
→ outre les plantes, de nombreux organismes régulent le cycle du phosphore dans le sol





Rôle des organismes vivants dans la régulation de la disponibilité du phosphore organique dans les sols

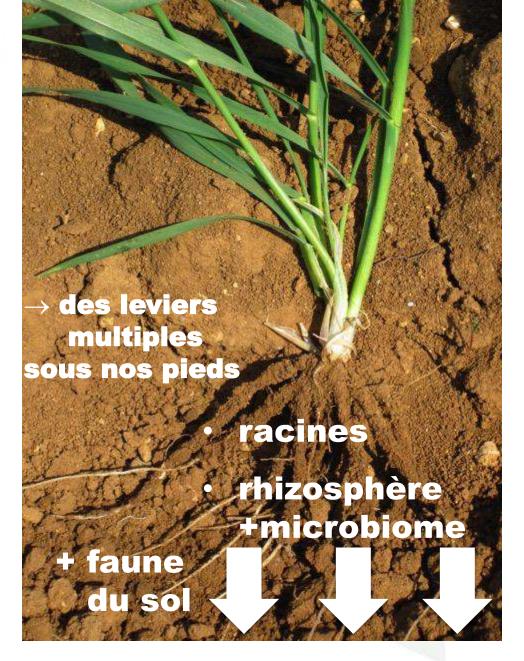
(Hinsinger, Herrmann, Lesueur, Robin, Trap, Waithaisong & Plassard 2015 – Ann. Plant Rev. 48)



→ outre les plantes, de nombreux organismes régulent le cycle du phosphore dans le sol







des explorations et innovations souterraines

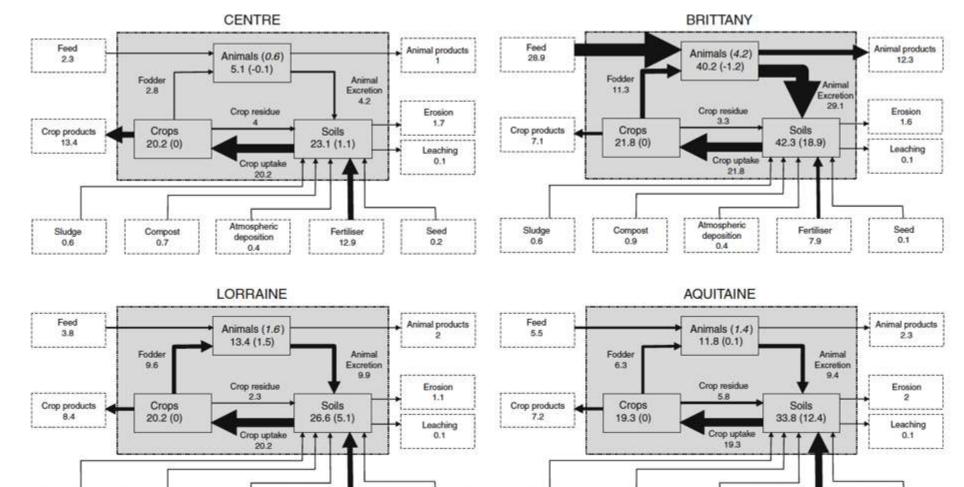
→ au-delà de l'horizon « cultivé »
 à poursuivre...
 (avec vous !)
 ... et approfondir





Stocks et flux (et bilan) de phosphore (kg ha-1 an-1) dans 4 régions agricoles en France

(Senthilkumar, Nesme, Mollier & Pellerin 2012 – Nutr. Cycl. Agroecosyst. 92)



→ un faible bouclage du cycle au niveau régional, quelle que soit le niveau de spécialisation de l'agriculture

Sludge

0.5

Seed

0.2

Atmospheric

deposition

0.4

Fertiliser

16.6

Seed

0.1

Compost

Atmospheric

deposition

Fertiliser

12.1

Compost

Sludge

0.8

Equilibre de désorption/adsorption d'ions phosphates en présence de bicarbonate = processus d'échange de ligand sur une surface minérale chargée positivement

→ des ions (ici bicarbonate, mais aussi citrate, etc...) peuvent désorber les ions phosphates adsorbés





Minéralisation de composés de P organique par hydrolyse enzymatique des liaisons esters phosphoriques

phosphatase (enzyme de type phosphomonoesterase)

$$MOS + H_2PO_4 + 2 H_2O \rightarrow MOS - OH + H_3O^+ + H_2PO_4^-$$

→ le pH joue encore un rôle déterminant : phosphatases dont l'optimum varie avec le pH

