

Sous le haut patronage



Avec le soutien



PHOSPHORE DU SOL DISPONIBLE POUR LES PLANTES ET STATUT ACIDO-BASIQUE

Christian MOREL / Pascal DENOROY – INRAE UMR ISPA
Centre Nouvelle Aquitaine Bordeaux

Sous le haut
patronage

P PHYTODISPONIBLE ET pH DU SOL

CONTEXTE & OBJECTIFS DE LA DEMANDE



- (1) Le pH modifie nombre de propriétés du sol.
- (2) Évolution des connaissances sur l'évaluation P phytodisponible du sol : évaluation fonctionnelle, mécaniste, et hiérarchisée.
- (3) Présentation et facteurs dépendant du pH
- (4) La vision « classique »: prélèvement optimal de P à pH de 6,5-7,0
- (5) Controverse récente: prélèvement optimal de P à pH autour de 5,5 ... et contradiction avec les essais pH * P de longue durée
- (6) pH du sol et disponibilité du P de matières fertilisantes
- (7) Conclusion: que retenir? Ces études ne prennent pas en compte tous les indicateurs du statut acido-basique, pH, CEC, Ca^{2+} , Mg^{2+} ...

Sous le haut patronage

LE pH MODIFIE NOMBRE DE PROPRIÉTÉS DU SOL



Source: Pernes et Tessier, 2002	pHeau	CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺
en 1929	6.3	15.3	13.3	1.3	0.2	0
en 1999						
Phosphate d'ammoniaque	3.4	6.2	0.2	0.2	0.1	6.4
Témoin	5.6	8.7	5.1	0.7	0.2	2.2
KCl	6.3	10.2	6.5	0.7	0.3	0.4
Nitrates	6.4	8.5	4.7	0.5	0.3	1.1
Fumier	7.8	18.7	12.4	2.4	3.4	0
CaCO ₃	8.2	13.3	13.1	0.2	0.2	0

Influence du pH sur propriétés des sols (1999): essai de longue durée sol nu des 42 parcelles Versailles (Pernes et Tessier, 2002)

Sous le haut patronage



CEC, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ : capacité d'échange cationique et cations échangeables mesurés à la cobaltihexammine en cmolVkg;
Al³⁺: aluminium échangeable mesuré au KCl en cmolVkg

EVALUATION FONCTIONNELLE, MÉCANISTE, HIÉRARCHISÉE =

Ions P dissous + ions P diffusibles à l'interface solide-solution

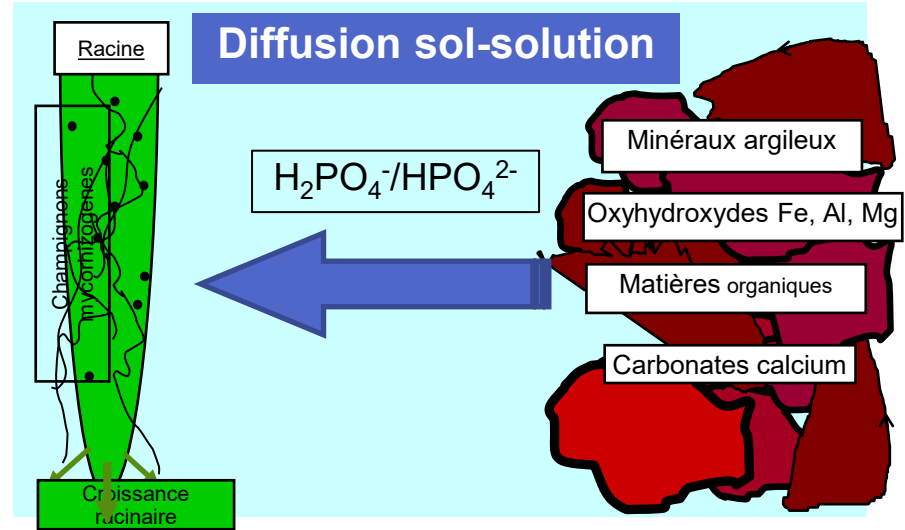


Les racines des plantes absorbent les ions P essentiellement par leur diffusion à l'interface solide-solution grâce au gradient de [] entre le sol et la solution créé par l'absorption d'ions P dissous

La diffusion est le déplacement de molécules ou d'atomes d'une région à forte concentration vers une région à faible concentration.

Cinétique de diffusion des ions oP à l'interface solide-solution est la variable-clé de la disponibilité du P du sol

Mise au point d'une méthode qui associe expériences de laboratoire et modélisation pour reproduire et chiffrer l'action de l'absorption (Li et al. 2019)



PHOSPHORE DU SOL DISPONIBLE POUR LES PLANTES : COMMENT L'ÉVALUER ?



Question ancienne mais toujours d'actualité. Pourquoi ?

Les bases scientifiques des extractions chimiques sont remises en cause:

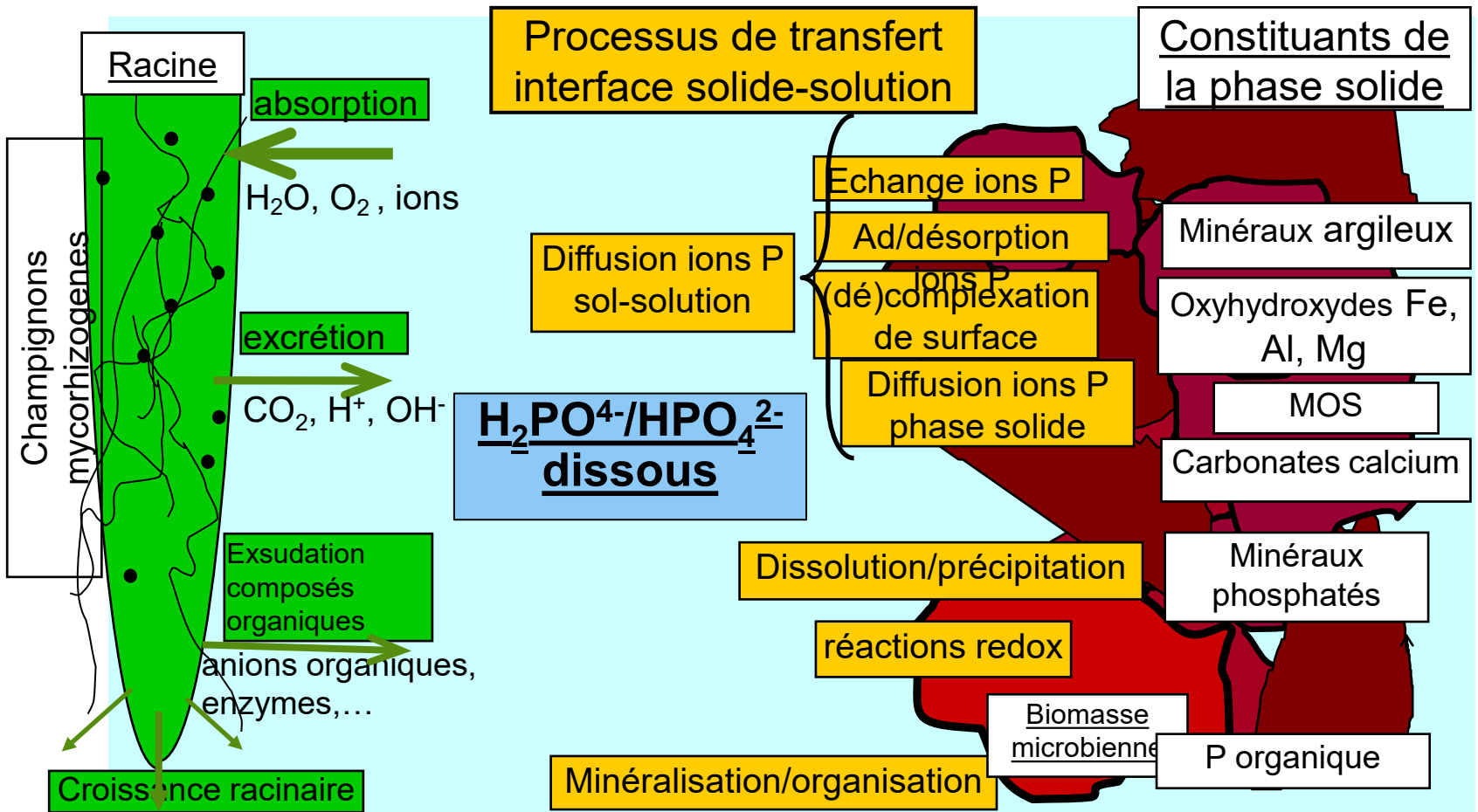
- i) dissolution de formes non-assimilables;
- ii) resorption oP ions pendant l'extraction;
- iii) faible (et variable) proportion du P disponible du sol pris en compte ;
- iv) => corrélations P_plante vs P_extrait_sol non ou peu significatives;
- v) => diagnostics courbe de réponses peu explicatives.

Nouvelles bases théoriques et expérimentales basées sur :

- le fonctionnement biogéochimique du cycle du P dans les agrosystèmes,
- les processus d'absorption des ions oP par les racines dans le contexte des sols cultivés
- Les racines absorbent des ions oP dissous (dans la solution de sol)
- Leur hiérarchisation (importance relative dans le prélèvement): diffusion des ions oP à l'interface solide-solution a un rôle majeur

(Fardeau et al. 1988; Morel et al. 1992; Zehetner et al. 2019)

(Fardeau 1981; Morel et Plenchette, 1994; Frossard et al. 1994; Morel et al. 2020).



EVALUATION FONCTIONNELLE HIÉRARCHISÉE DU P PHYTODISPONIBLE DU SOL:

La quantité d'ions oP diffusibles, transférée entre sol-solution, augmente considérablement avec la durée du transfert (Fardeau 1993)

Illustration avec quelques chiffres en considérant un même concentration d'ions P en solution = 0.5 mg P/L

Sol	Transfert sol-solution des ions P diffusibles pour différentes durées (Pr, mg P kg sol)			
	1 jour	1 semaine	3 mois	1 an
<u>pour $C_p=0.5$ mgP/L</u>				
Sol sableux	12	27	75	132
Sol limono-sableux	21	32	59	82
Sol limoneux	58	87	145	192
Sol argilo-calcaire	90	139	246	335

Pour une durée donnée et à même C_p , le réapprovisionnement de la solution de sol en ions P de la phase solide varie selon le sol

ÉVOLUTION DES CONNAISSANCES SUR L'ÉVALUATION DU P PHYTODISPONIBLE DU SOL

- ❑ Évaluation fonctionnelle, mécaniste, et hiérarchisée: quantité des ions P dissous et diffusibles à l'interface solide-solution
- ❑ Influence du pH sur le transfert par diffusion des ions P à l'interface solide-solution du sol ?

PRINCIPALES ACTIONS POSSIBLES DU pH SUR LE TRANSFERT SOL-SOLUTION DES IONS P DIFFUSIBLES



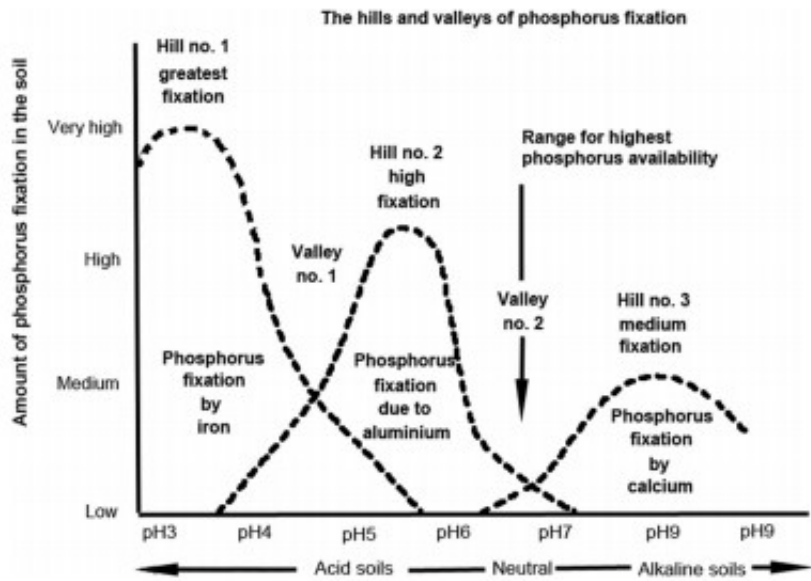
- Proportion $\text{H}_2\text{PO}_4^- / \text{HPO}_4^{2-}$ en solution variable suivant pH. À pH ~ 7.1 , autant de HPO_4^{2-} que de H_2PO_4^-
- pH affecte la charge électrique de surface des constituants du sol (oxyhydroxides de Fe, Al; MOS; minéraux argileux)
- pH affecte la CEC et la charge en cations échangeables (Tessier, 2001; Félix-Faure et al. 2013)

Hors action sur transfert

- Toxicité aluminique (pH < 5-5.5, excès de H^+ et d' Al^{3+} en solution et déficience en Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}) : risque de perte de rendement (Bouthier et Castillon, 2001)

Sous le haut patronage

REPRÉSENTATION “CLASSIQUE” DES EFFETS DU pH SUR LE P DISPONIBLE DU SOL



(repris par Barrow, 2017 ; Penn et Camberato. 2019)

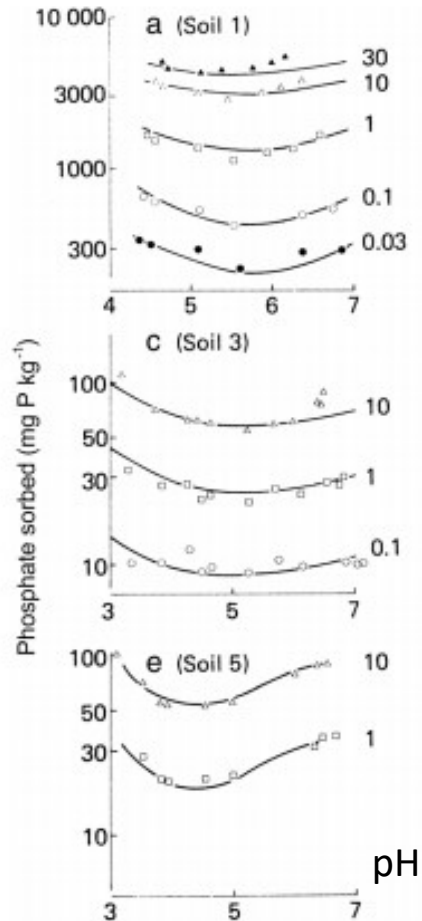
Représentation schématique basée sur les propriétés de rétention du P par sol sur la base de la chimie du P du sol des années 60-70:

Optimum de disponibilité du P du sol quand minimum de “fixation” par Fe, Al et Ca ç.a.d. lorsque le pH est de l’ordre de 6-7

... mais pas de données expérimentales pour étayer cette représentation.

Controverse : cette vision (« croyance ») est fausse

(Barrow, 2017; Barrow *et al.*; 2020)



Maximum de P en solution (↔ minimum sorbé) quand pH vers 5

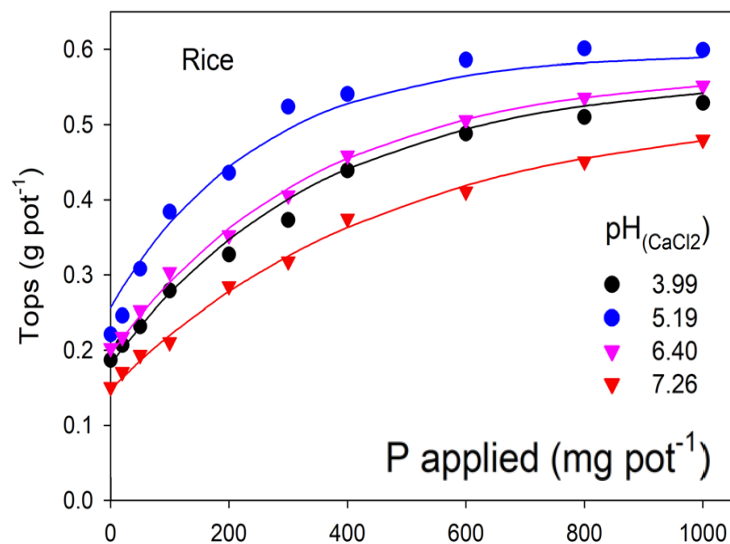
(sols 1 & 3 : sols peu fertilisés P, traité au labo ;
sol 5 : prairie fertilisée)

(Barrow *et al.*, 2017)

Controverse : cette vision (« croyance ») est fausse

(Barrow, 2017; Barrow *et al.*; 2020)

Prélèvement de P en fonction de la dose apportée pour différents pH_{CaCl₂} du sol



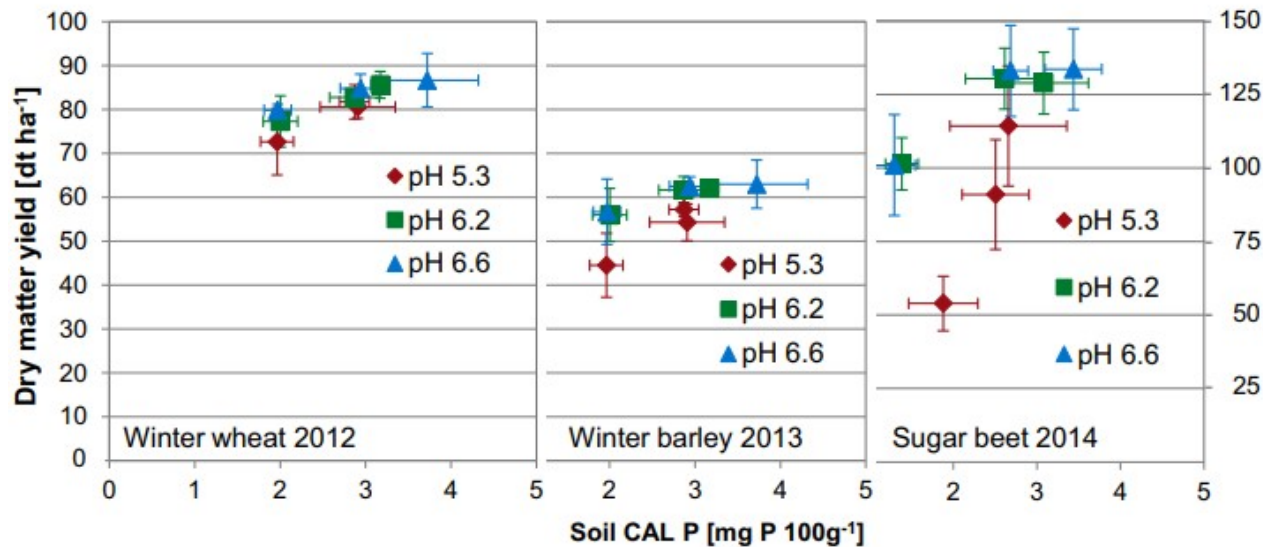
(Barrow *et al.*, 2020)

Sous le haut patronage

- Le rdt est plus élevée à pH_{CaCl₂} = 5.2
- Lorsque pH_{CaCl₂} = 4.0, rdt est plus faible à cause de la toxicité d'Al.
- Lorsque pH_{CaCl₂} = 5.2, le rdt est optimal
- Lorsque le pH_{CaCl₂} est proche de la neutralité (pH_{CaCl₂} = 6.4) voir légèrement basique (pH_{CaCl₂} = 7.3) est proche de la neutralité, rdt est également plus faible.
- Oui mais... **non prise en compte des autres indicateurs du statut acido-basique**

Les essais de longue durée , croisant au champ les facteurs pH et P concluent à une meilleur nutrition P quand le PH augmente (au moins jusqu'à 6.6)

- * Holland et al , 2019 : 2 essais, Angleterre
- * Zicker et al 2018 : 2 essais Allemagne
- * Van Tucher et al, 2018 : 1 essai Allemagne
- * Simonsson et al, 2018 : 4 essais Suède
- * ...



Sol limoneux de Bavière, pH_{CaCl2} initial de l'ordre de 4.7-5.3

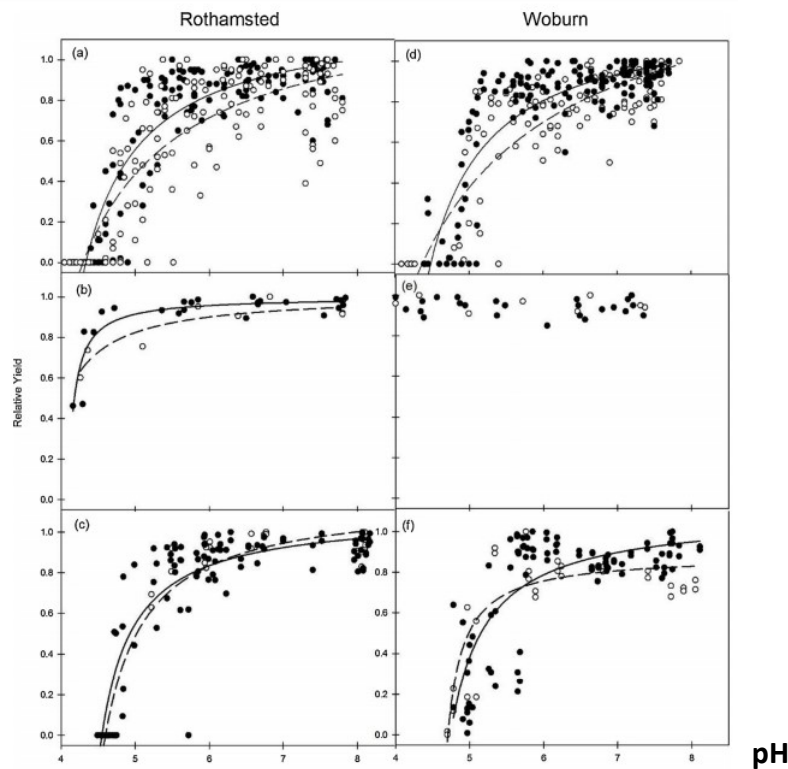
(Van Tucher *et al*, 2018)

Sous le haut patronage

Orge printemps

Triticale hiver

Blé hiver



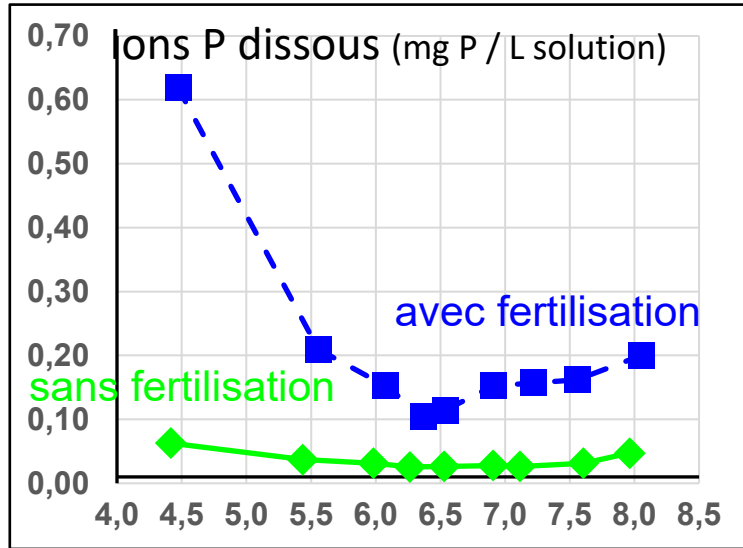
Indice de rendement en fonction du pH, avec (points & courbe trait plein) ou sans (cercle & tiret) fertilisation P, dans deux sites : interaction positive pour l'orge de printemps (haut) pas pour le blé d'hiver (bas)

(Holland *et al.*, 2019)

Fig. 4. Relationship between crop relative yield (RY) and pH with the effect of phosphorus (● +P, ○ -P) for spring barley (a, d), winter triticale (b, e) and winter wheat (c, f) at the Rothamsted (a, b, c) and Woburn (d, e, f) sites; regression fit for + P are given with solid lines, for -P with dashed lines and a single dotted line where there was no difference between + P and -P. For actual crop yield ($t\ ha^{-1}$) refer to Table 6 and 7.

Sous le haut patronage

- ❑ Cette controverse est assez marginale: optimum de pHCaCl_2 à 5.5 ou 6.5 la disponibilité du P du sol varie peu
- ❑ La disponibilité du P varie plus avec fertilisation P



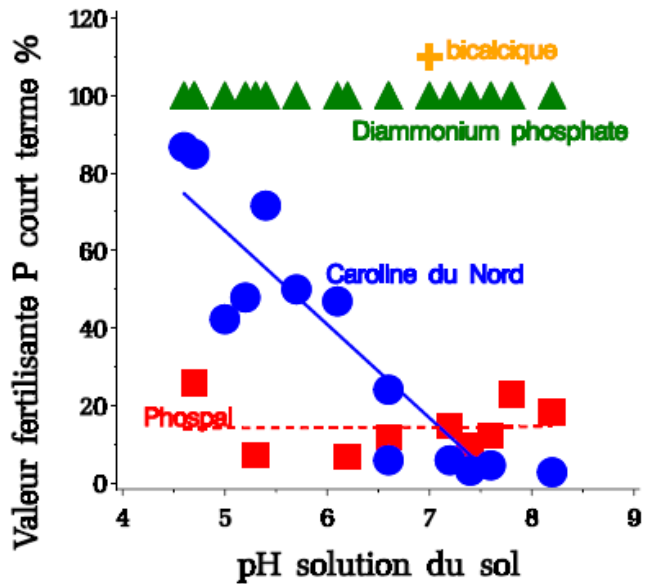
- Concentration ions P dissous varie peu (~ 2) pour gamme de pH compris entre 5.5 et 7.5.
- La fertilisation l'augmente de plus de 5.

(adapté de Devau *et al.* 2011)

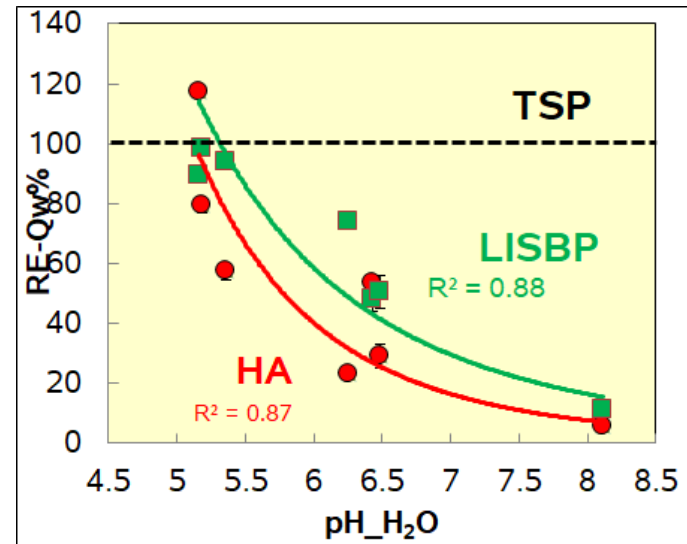
pH DU SOL ET DISPONIBILITÉ DU P DE MATIÈRES FERTILISANTES



À court terme, dissolution/précipitation des minéraux phosphatés dépend du pH

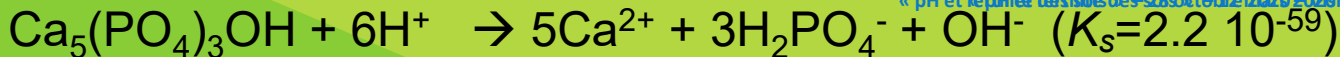


Engrais minéraux insolubles
(adapté de Morel et Fardeau, 1990)



Produits de recyclage: P recyclé,
extrait d'effluents de laiterie
(adapté de Achat et al., 2014)

Dissolution hydroxyapatite



SUR LE LONG-TERME PAS DE DISSOLUTION DU P APATITIQUE DU PHOSPHATE NATUREL EN SOL NEUTRE

Essai au champ de Blesmes (Coll. INRA-Laon). Apport de 100 kg P₂O₅ ha⁻¹ an⁻¹ pendant 15 ans de superphosphate ou de P_Gafsa (P apatitique); témoin non fertilisé. Limon éolien neutre.

Essai Grignon-Folleville (Coll. INRA UEGC Versailles)
 Sole 7, escourgeon 2014
 P2 = 120 kg P₂O₅/ha.an
 pH sol = 8.1 ; Rdt en qx/ha (12.4% eau)
 Après plus de 30 années d'expérimentation

(mg P/kg sol)	Témoin	SuperPhos.	P-Gafsa
P prélevé	15.3	22.2	13.5

	Témoin P0	SuperP P2	Phosnat P2
Rdt_grain	51.6	58.3	49.4
P Olsen mg P2O5/kg	24	115	13

Sur le long terme, baisse de la disponibilité du P du sol en présence de phosphate naturel due la précipitation du P dissous du sol: solubilité du P du sol contrôlée par solubilité du phosphate naturel

QUE RETENIR ?



- À éviter, $\text{pH} < 5.5$. Excès de H^+ et d' Al^{3+} (risques de toxicité) et manques de Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} ... Souvent, peu d'ions P dissous car bcp d'ions P sur phase solide. Utilisation P_apatitique intéressante.
- À rechercher, pH entre 5.5 et 7.5 pour P_dispo_sol. Mais plutôt 5.5 ou 6.5-7? Il y a controverse. De toute façon effet pH faible en regard de l'effet fertilisation.
- $\text{pH} > 8$ des sols carbonatés: plusieurs questions sur P_dispo_sol et la gestion de la fertilisation (y-a-t-il d'autres mécanismes rhizosphériques ? Comment minimiser l'insolubilisation du P apporté?)
- Dans les études pH et dispo_P du sol: non prise en compte des autres composantes (que pH) du statut acido-basique. Or, CEC, Ca^{2+} , Mg^{2+} et CaCO_3 affecte aussi la dispo P sol en modifiant la distribution ions P dissous/ions P diffusibles et la cinétique de diffusion à l'interface solide-solution.

Source: Le Haut

Références

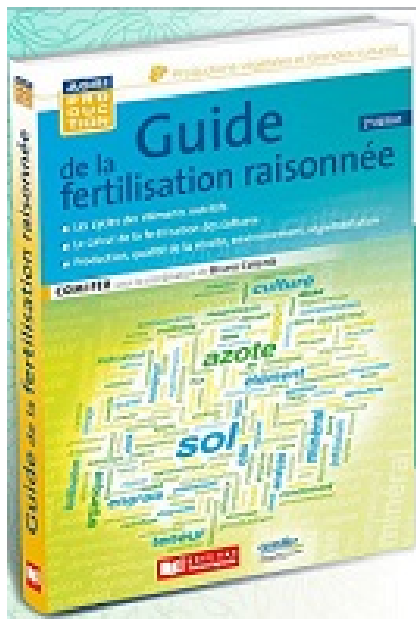
- * Achat DL, Daumer M-L, M Sperandio, A-C Santellani, C Morel 2014. Solubility and mobility of phosphorus recycled from dairy effluents and pig manures in incubated soils with different characteristics. Nutrient cycling in agroecosystems 99, 1-15. DOI 10.1007/s10705-014-9614-0
- * Azeez MO, Christensen JT, Ravnskov S. Heckrath GH, Labouriau, Christensen BT, Rubaek G, 2020. Phosphorus in an arable coarse sandy soil profile after 74 years with different lime and P fertilizer applications. Geoderma <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114555>
- * Barrow, N. J., 2017 The effects of pH on phosphate uptake from the soil. Plant Soil 410:401–410
- * Barrow NJ, Debnath A., Sen A, 2020. Measurement of the effects of pH on phosphate availability. Plant Soil <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04647-5>
- * Bouthier A, Castillon P, 2001. La toxicité aluminique: risque majeur lié à l'acidité dans les sols agricoles. Colloque l'acidification des sols : origine, approche, enjeux et maîtrise. Mai 2001, Versailles, France.
- * Devau, N., Hinsinger, P., Le Cadre, E., Colomb, B., Gérard, F. 2011. Fertilization and pH effects on processes and mechanisms controlling dissolved inorganic phosphorus in soils. Geochimica et Cosmochimica Acta 75, 2980–2996.
- * Fardeau, J.C., 1993. Le phosphore assimilable des sols : sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. Agronomie, EDP Sci. 13 (4), 317–331.
- * Fardeau 1981. Cinétiques de dilution isotopique et phosphore assimilable des sols. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Pierre et Marie Curie, Paris 6..
- * Fardeau J-C, C Morel, R Boniface, 1988. Phosphore assimilable des sols. Quelle méthode choisir en analyse de routine. Agronomie, 8: 577-584
- * Félix-Faure B, Carrière M, Kalt S. 2013. Prendre en compte tous les indicateurs de l'acidité des sols pour l'interprétation et le conseil. 11èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS-Poitiers-Futuroscope 20 et 21 novembre 2013
- * Frossard E, Fardeau J-C, Brossard M, Morel J-L, 1994. Soil isotopically exchangeable phosphorus: a comparison between E and L values. Soil Sci. Soc. Am. J. 58:846-851

Sous le haut patronage



- * Holland, J.E., White, P.J., Glendining, M.J., Goulding, K.W.T., McGrath, S.P., 2019. Yield responses of arable crops to liming – An evaluation of relationships between yields and soil pH from a long-term liming experiment. *European Journal of Agronomy* 105, 176–188. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.016>
- * Li H, Mollier A, Ziadi N, Messiga A., Shi, Y, Pellerin S., Parent L-E, Morel C 2019. Long-term modeling of phosphorus spatial distribution in the no-tilled soil profile. *Soil & Tillage Research* 187 119–134
- * Morel C, Plénet D, Mollier A, 2021. Calibration of maize phosphorus status by plant-available soil P assessed by common and process-based approaches. Is it soil-specific or not. *European Journal of Agronomy* 122, 126174 <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126174>
- * Morel C, Fardeau J-C, 1990. Agronomical evaluation of phosphate fertilizer as a nutrient source of phosphorus for crops: isotopic procedure. *Fertilizer Research* 24: 115-122.
- * Morel C, Plenchette C, 1994. Is the isotopically exchangeable phosphate of a loamy soil the plant-available P? *Plant and Soil*, 158: 287-297
- * Morel C, C Plenchette, J-C Fardeau, 1992. La fertilisation phosphatée raisonnée de la culture du blé. *Agronomie*, 12: 565-579
- * Penn C, Camberato JJ, 2019. A Critical Review on Soil Chemical Processes that control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. *Agriculture* 2019, 9, 120; doi:10.3390/agriculture9060120
- * Pernes-Debuyser A, Tessier D, 2002. Influence du pH sur les propriétés des sols : l'essai de longue durée des 42 parcelles à Versailles. *Revue des sciences de l'eau*, 15, 27–39. <https://doi.org/10.7202/705484ar>
- * Simonsson, M., Östlund, A., Renfjäll, L., Sigtryggsson, C., Börjesson, G., Kätterer, T., 2018. Pools and solubility of soil phosphorus as affected by liming in long-term agricultural field experiments. *Geoderma* 315, 208–219. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.019>
- * Tessier, D. Influence des charges superficielles sur les propriétés physiques des sols. Colloque L'acidification des sols : origine, approche, enjeux et maîtrise. Mai 2001, Versailles, France.
- *von Tucher, S., Hörndl, D., Schmidhalter, U., 2018. Interaction of soil pH and phosphorus efficacy: Long-term effects of P fertilizer and lime applications on wheat, barley, and sugar beet. *Ambio* 47, 41–49. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0970-2>
- * Zehetner F, Wuenscher R, Peticzka R, Unterfrauner H. 2018. Correlation of extractable soil phosphorus (P) with plant P uptake: 14 extraction methods applied to 50 agricultural soils from Central Europe. *Plant Soil and Environment*, 64, 192–201.
- * Zicker, T., von Tucher, S., Kavka, M., Eichler-Löbermann, B., 2018. Soil test phosphorus as affected by phosphorus budgets in two long-term field experiments in Germany. *Field Crops Research* 218, 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.008>

Sous le haut patronage



Comifer, ed. La France Agricole



<https://comifer.asso.fr/fr/publications/les-brochures.html>

Sous le haut patronage

Sous le haut patronage



Avec le soutien

