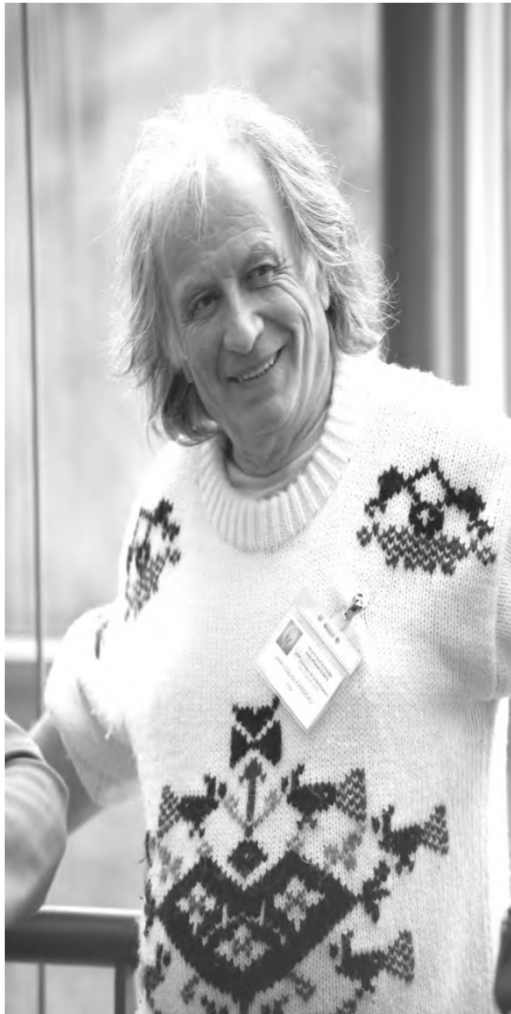


# Biodisponibilité et dynamique à long terme du P dans des sols cultivés

Christian MOREL, INRA



# Sur les traces de JCF...

## Cycle biogéochimique du phosphore à l'échelle de la parcelle cultivée

Biodisponibilité et dynamique à long terme du P dans des sols cultivés

Morel C., P. Denoroy, E. Frossard, J.-L.

Morel, A. Oberson, L. Rabeharisoa, S.

2001. Lauréat de la Médaille d'OR de l'académie d'Agriculture de France pour l'ensemble des travaux de **Jean-Claude FARDEAU** sur le cycle du phosphore, la

dynamique de ses transferts dans le sol et du sol aux plantes.

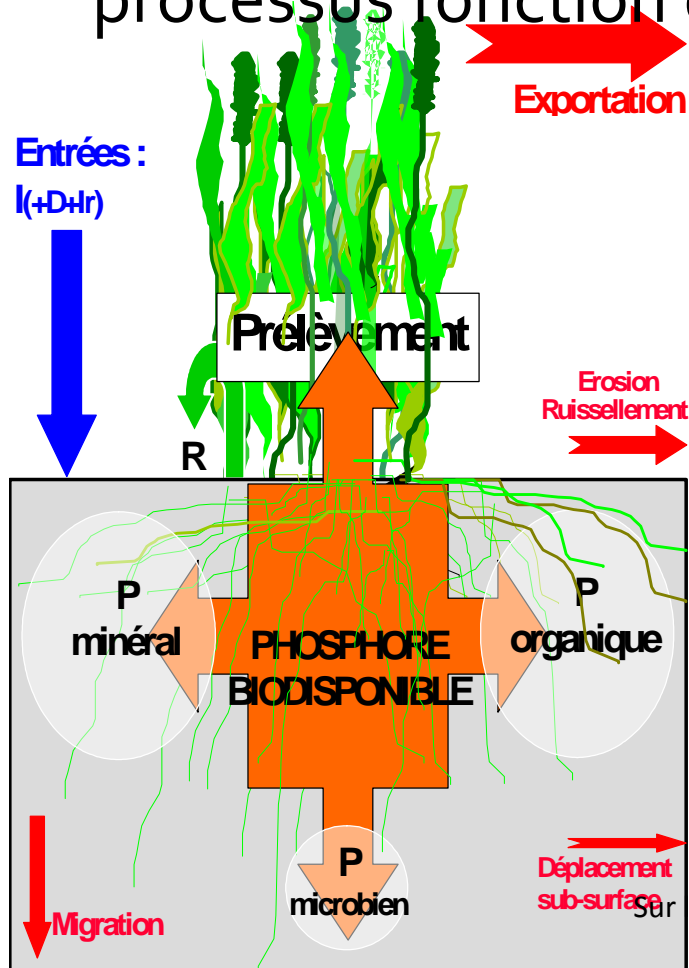
Sur les traces de Jean-Claude FARDEAU, 13  
avril 2015

# Sur les traces de JCF... en 1 diapo

- Identification/mise en équation du compartiment du P du sol qui contrôle la nutrition phosphatée des plantes cultivées sur des bases fonctionnelles et mécanistes: ions phosphate; processus et cinétiques de transferts à l'interface solide-solution
- Limites conceptuelles des méthodes actuelles d'extraction chimique utilisées pour faire un diagnostic de la fertilité phosphatée des sols et élaborer un conseil de fertilisation phosphatée
- Modélisation du fonctionnement à long terme (décennies) du cycle biogéochimique P; circulation/trébuchement de la dynamique du P

# Cycle biogéochimique du P à l'échelle de la parcelle cultivée

Ensemble des stocks de P dans le sol, des flux E et S et des transferts entre stocks suivant différents processus fonction de la spéciation du P

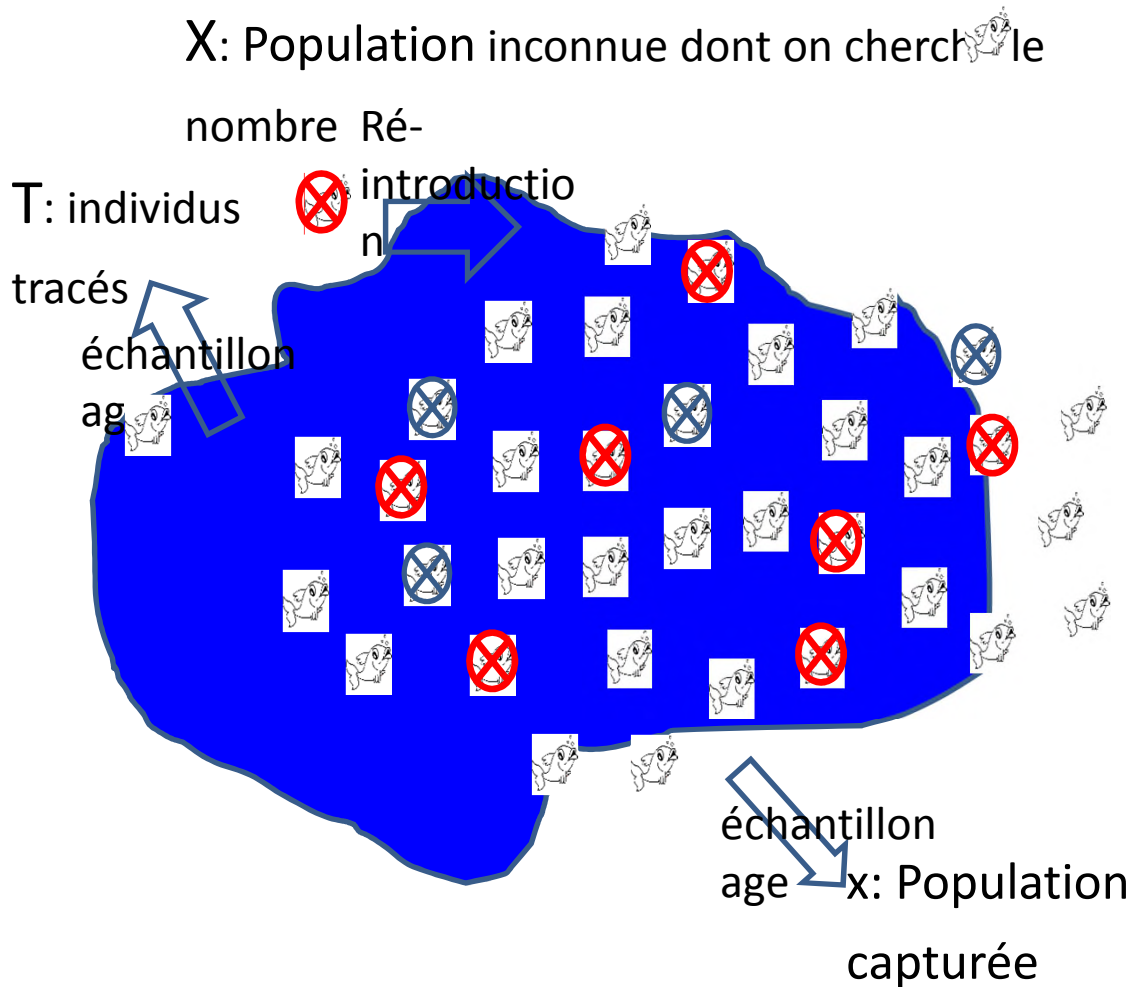


Le concept de **phytodisponibilité** est au centre du fonctionnement du **cycle biogéochimique** du P des agro-écosystèmes. Le compartiment de P phytodisponible du sol conditionne à la fois la **nutrition des plantes** et la **fertilité phosphatée** des sols.

# Les méthodes de quantification des transferts

sur les traces de Jean-Claude FARDEAU, 13  
avril 2015

# Le dosage par marquage/traçage/dilution pour dénombrer une population inconnue. Principes.



Application de la règle des proportions pour calculer la population totale inconnue X

$$T/X = t/x,$$

où

$$t/T = x/X$$

# Le dosage par marquage/traçage/dilution. Application à la détermination des valeurs L (transfert sol-plante) et E (transfert solide-solution)

**Valeur L (Larsen, 1955):** détermination de la quantité de phosphore du sol disponible pour la plante (études en pots de cultures)

i) Avoir des ions phosphate marqués avec un isotope radioactif du P, i.e.  $^{32}\text{PO}_4$  ou  $^{33}\text{PO}_4$

ii) Introduire ces ions radioactifs pour tracer le comportement des ions phosphate (non marqués) du sol

iii) Analyser la quantité de P prélevé et la dilution isotopique (rapport du  $^{32}\text{P}/^{31}\text{P}$ ) pour en déduire par la règle des proportions la valeur L = le P phytodisponible du sol

# Le dosage par marquage/traçage/dilution. Application à la détermination des valeurs L (transfert sol-plante) et E (transfert solide-solution)

**Valeur E:** détermination de la quantité d'ions phosphate isotopiquement diluables dans des suspensions de terre à l'état stationnaire:

- i) Avoir des ions phosphate marqués avec un isotope radioactif du P.
- ii) Introduire des ions marqués pour tracer le comportement des ions phosphate dans la solution de sol d'une suspension à l'état stationnaire (biocide).
- iii) analyser la quantité ( $Q_w$ ) et la dilution isotopique (DI) des ions phosphate dans la solution de sol et calculer la valeur E, i.e. ensemble des ions P dissous et diffusibles (mobilisés par un gradient de  $\Pi$  entre les deux phases

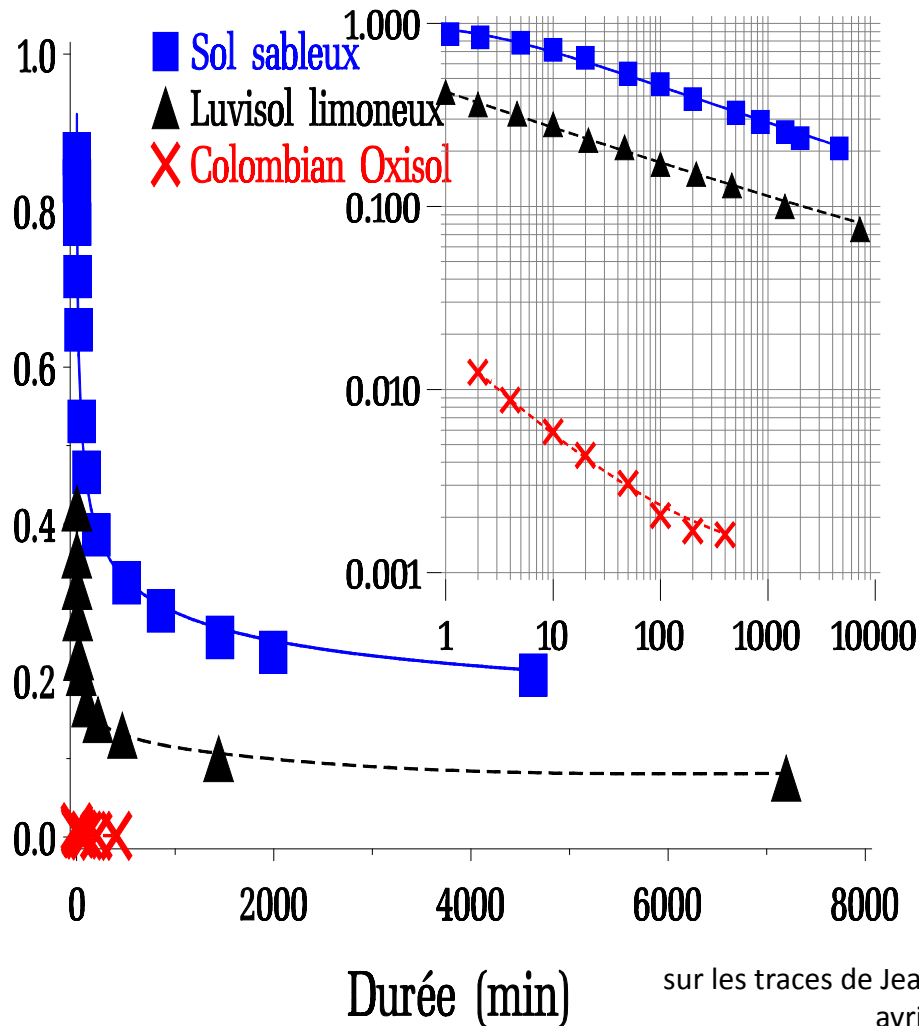


# Sélection de résultats marquants

- Cinétique de DI et phosphore assimilable des sols
- Valeur E = Valeur L
- Modélisation de la dynamique à long terme du P dans les sols cultivés en fonction de pratiques de fertilisation

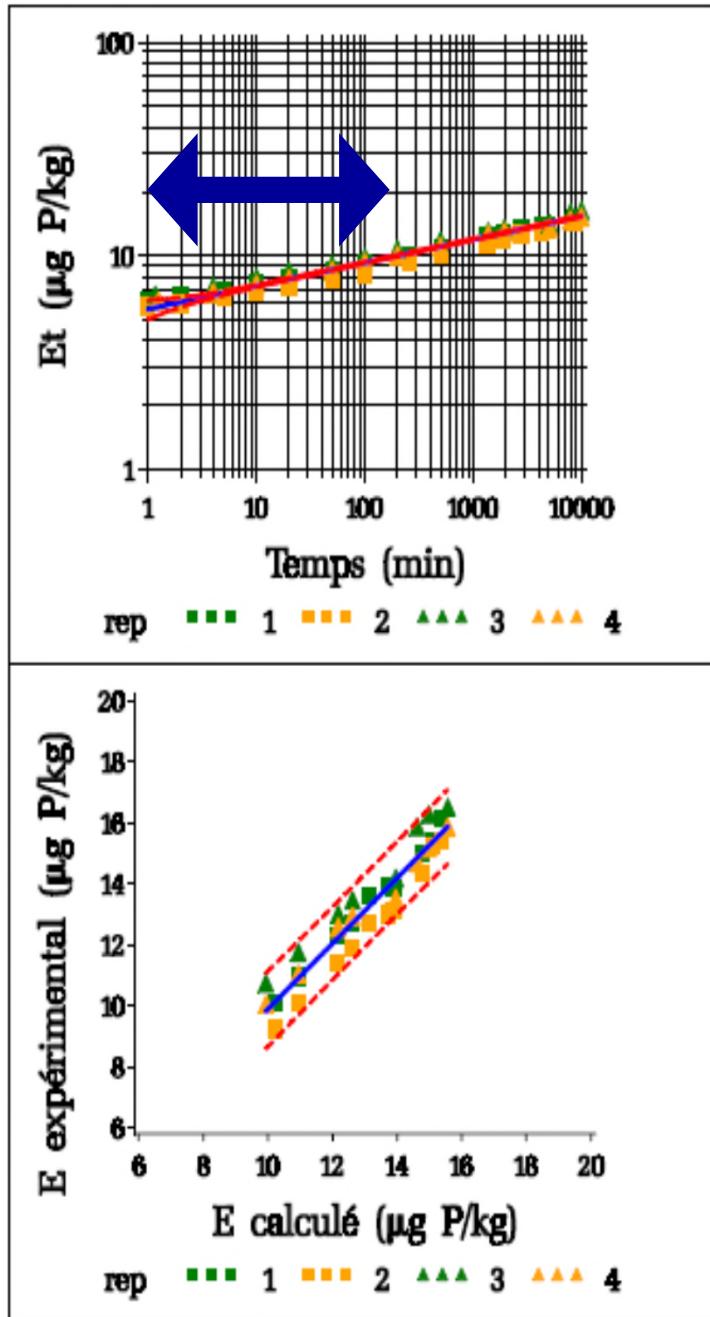
# La cinétique de transfert de la phase solide à la phase liquide (solide $\leftrightarrow$ liquide) pour une terre donnée pour une valeur de concentration ions P en solution

Dilution isotopique des ions P en solution



Deux types de réactions:

1. **Réactions rapides** des ions phosphates avec la surface des constituants du sol
2. **Réactions lentes** de diffusion dans la porosité des constituants du sol et dans la phase solide pendant plusieurs jours semaines, mois (voire année).
3. Dans les sols cultivés, il est **impossible** d'atteindre expérimentalement l'équilibre isotopique. On borne la  $D_i$  par le P inorganique du sol



$$E = E_{1\text{min}} t^n,$$

avec  $E$  borné par une valeur limite inconnue

Comment paramétrer cette fonction ?

Détermination de  $E_{1\text{min}}$  et  $n$  sur des temps courts (quelques heures) en considérant les deux/trois premiers ordres de grandeur du temps

Extrapolation sur temps longs

Pas de différence significative entre les valeurs expérimentales et extrapolées de  $E$  sur les temps longs

# Le poids du temps...

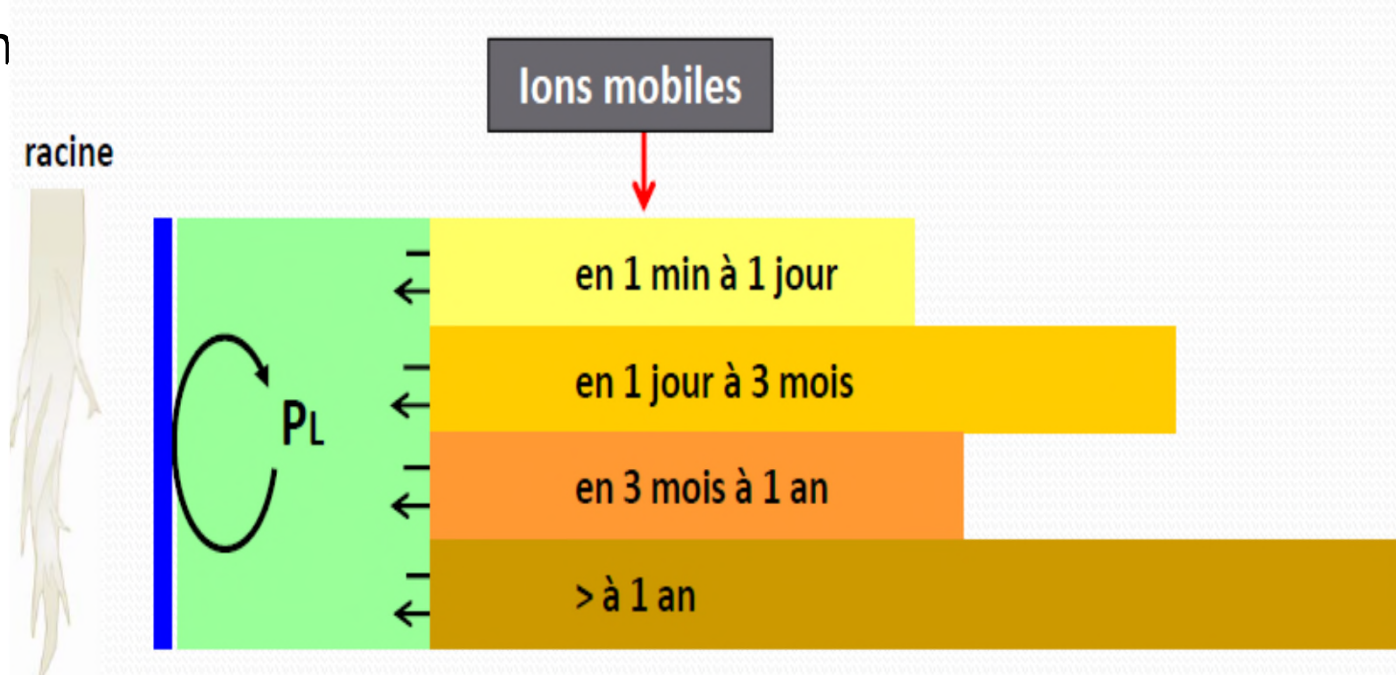
Durée du tran	Durée du transfert		n=0	n=0.5		
	ordres de grandeur	rapport	$10^n$	$10^n$		
	1					
	10	$E_{10\text{min}}/E_{1\text{min}}$	1.0	3.2	17%	17%
	100	$E_{100\text{min}}/E_{10\text{min}}$	1.0	3.2	17%	33%
	1000	$E_{1000\text{min}}/E_{100\text{min}}$	1.0	3.2	17%	50%
1s	10000	$E_{10000\text{min}}/E_{1000\text{min}}$	1.0	3.2	17%	67%
2,5mois	100000	$E_{100000\text{min}}/E_{10000\text{min}}$	1.0	3.2	17%	83%
2ans	1000000	$E_{1000000\text{min}}/E_{100000\text{min}}$	1.0	3.2	17%	100%

Dans la littérature, la contribution des cinétiques lentes n'est pas prise en compte dans le transfert solide-solution. Hypothèse: l'équilibre est atteint après une journée.

Or, les réactions lentes se prolongent pendant plusieurs ordres de grandeurs du temps à des vitesses différentes suivant les sols.

Barbier G., J.C. Fardeau et P. Marini, 1971. Sur la diffusibilité des ions phosphate du sol. Annales Agronomiques 22, 309-342

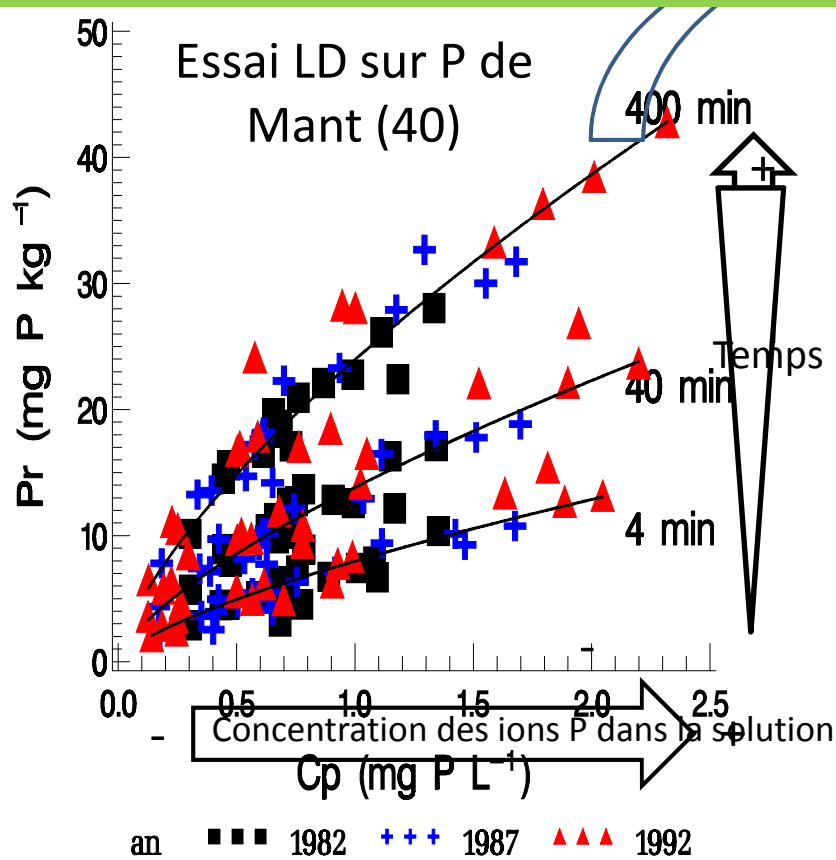
J.C. Fardeau. Le phosphore assimilable des sols : sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. Agronomie, EDP Scien



Ions phosphates dans la solution

Ions phosphates associés aux constituants solides du sol et

# Généralisation: équation de la cinétique de transfert de la phase solide à la phase liquide (solide ↔ liquide) pour une terre donnée pour toutes valeurs de la concentration



Calibration généralisée

Fonction cinétique de Freundlich

$$Pr = 5.7 C_p^{0,69} t^{0,24}$$

144 observations, r<sup>2</sup>=0,95

Calcul des valeurs de Pr pour toutes valeurs de Cp et de t

		Durée du transfert par diffusion					
		1j	2j	7j	30 j	Etc...	365j
Cp, mgP/L	0.1	6.7	7.9	11	15	etc..	27
	0.5	20.2	23.9	32	46	etc..	83
	1	32.6	38.6	52	74	etc..	135
	etc...	etc...	etc...	etc...	etc...	etc...	etc...

# Une connaissance de base pour obtenir beaucoup d'informations

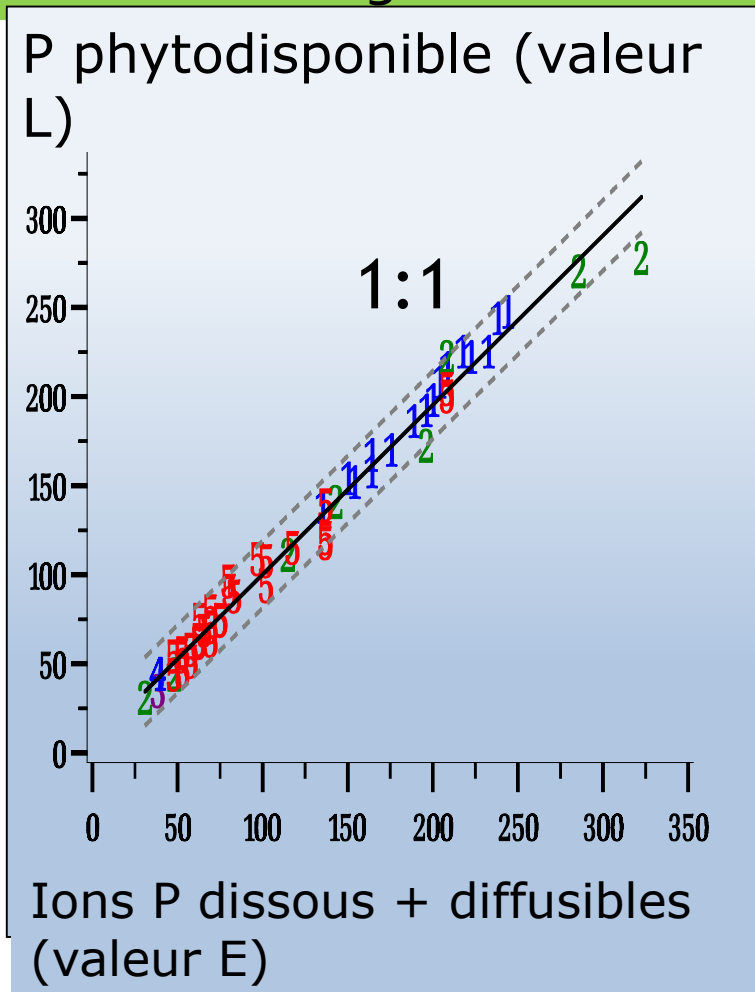
De nombreuses variables périphériques, indicatrices du comportement des ions P dans le système sol-solution, peuvent être déduites de cette description mathématique généralisée pour toutes  $C_p$  et durées de transfert:

**La quantité/flux ( $\Delta Q$ ) nette de P libéré** lorsque la suspension de sol passe d'un état initial de concentration  $C_{p_i}$  à un état final  $C_{p_f}$  pendant une période donnée  $t$  de désorption (Schneider et Morel, 2000):  $\Delta Q = vC_{p_i}^w t^p - vC_{p_f}^w t^p$

**Le pouvoir tampon du sol vis-à-vis des ions P** qui rend compte de la capacité du sol à tamponner la concentration en solution. L'expression de PT :  $PT = \delta Pr / \delta C_p$ . Le PT est utilisé dans la modélisation de prélèvement de P par la plante (Mollier et al. 2007).

**Le pouvoir de sorption (fixateur) du sol (PF) vis-à-vis des ions P**, concept utilisé pour estimer la perte de mobilité du P apporté.

# Un résultat fondamental: pas de différence entre valeur L et E dans sols cultivés de longue date



Identification de la fraction  
phytodisponible du P du  
sol

Le P phytodisponible du sol  
cultivé est majoritairement  
**l'ensemble des ions  
phosphate dissous et  
diffusibles à l'interface  
solide-solution du sol.**

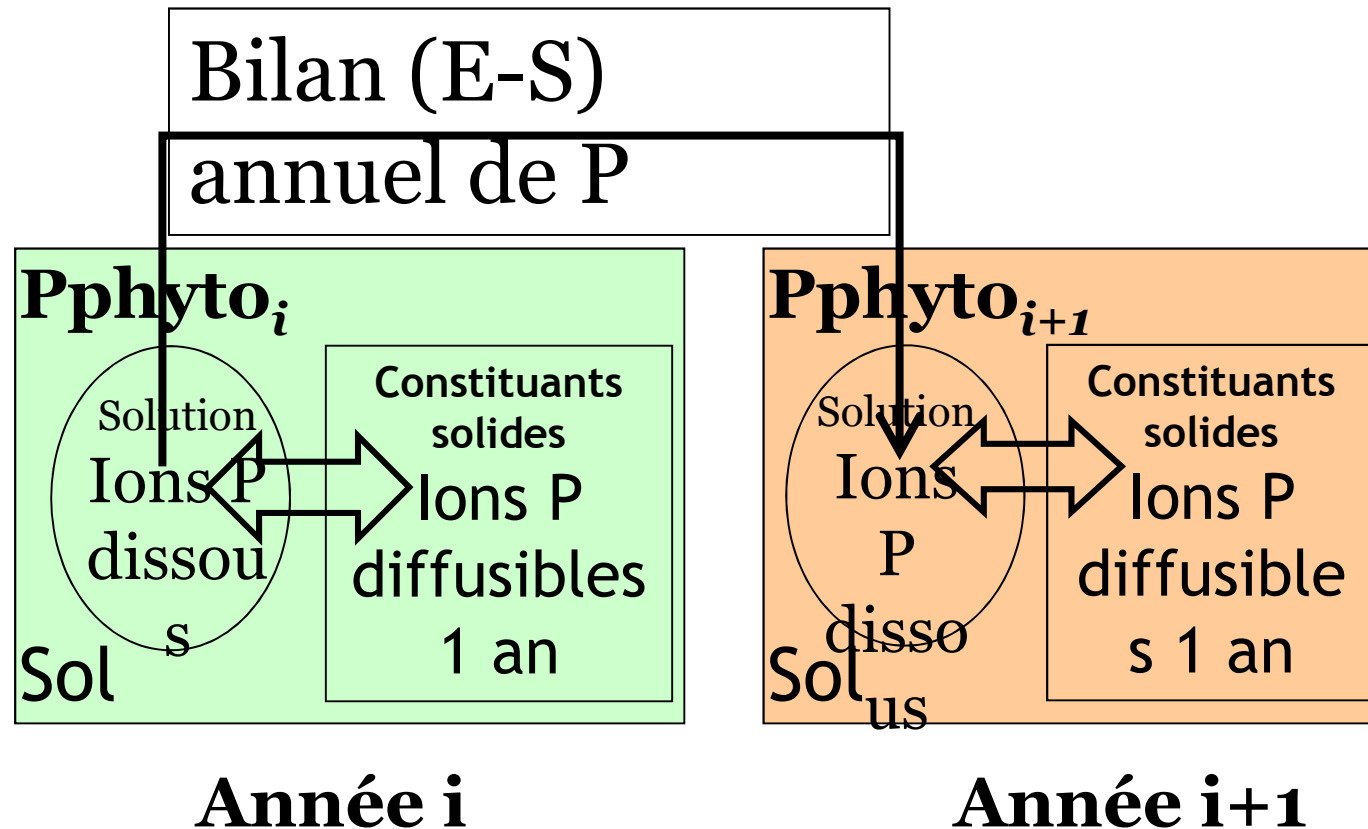
Le processus-clé de  
réapprovisionnement est le  
gradient de [] entre solution et  
constituants solides du sol.



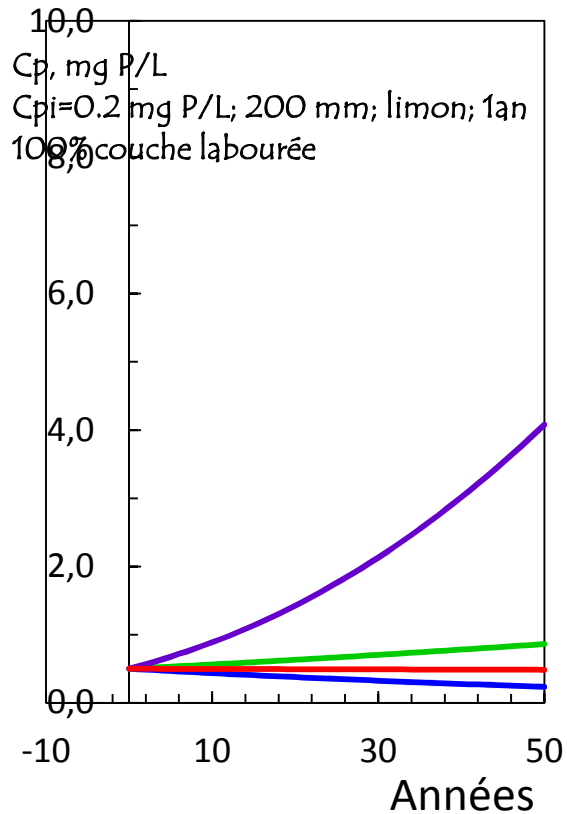
# Intégration des connaissances sur le fonctionnement du cycle P par la modélisation

# Fonctionnement du cycle du P dans la parcelle cultivée

Modèle construit sur une équation de conservation de la masse de phosphore à la couche labourée de sol



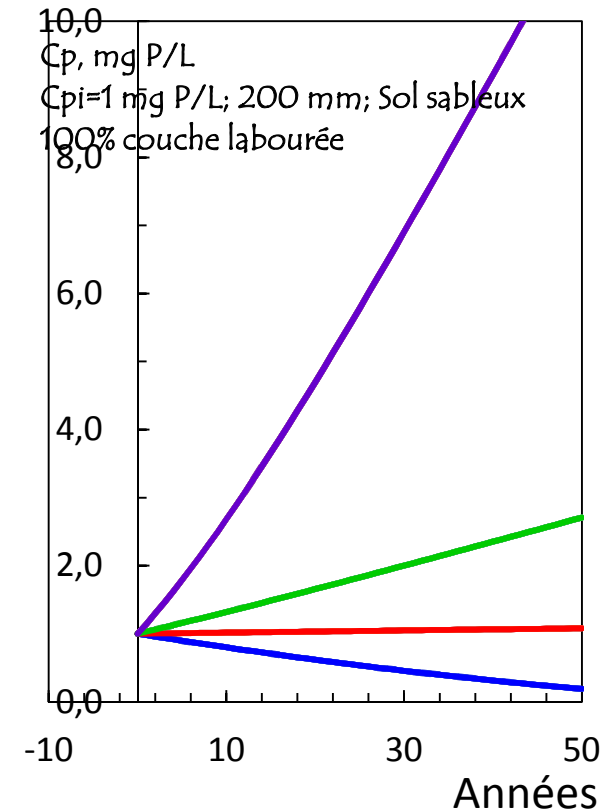
# Modélisation du fonctionnement biogéochimique à long terme du cycle du P



Limon (Bignan, 29; Coll. CRAB)  
(v,w,p)= (16.1, 0.33, 0.34)  
Pr(1mg P/L, 1an)=5860 kg P/ha

Exemples  
de  
simulations  
produites  
par le  
modèle

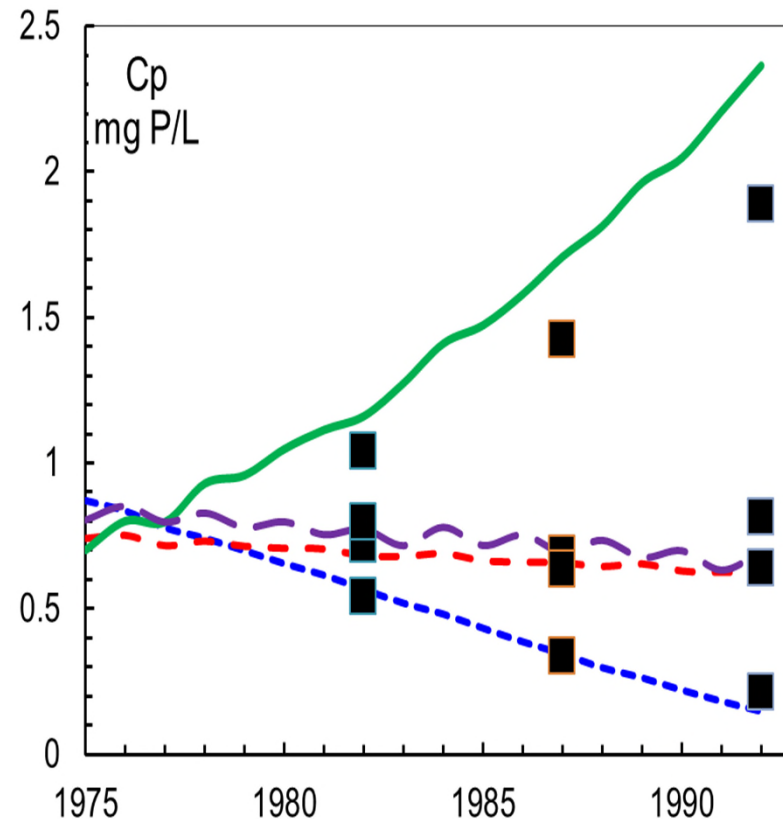
(A-E)= +100 kg  
P/ha/an  
(A-E)= +20 kg  
P/ha/an  
(A-E)= 0 kg  
P/ha/an  
(A-E)= -20 kg  
P/ha/an



Sol sableux (Tartas, 40)  
(v,w,p)= (1.5, 0.68, 0.38)  
Pr(1mg P/L, 1an)=1022 kg P/ha

# Modélisation du fonctionnement biogéochimique à long terme du cycle du P

Un exemple de  
confrontation de  
Cp-simulées  
(lignes) avec Cp-  
observées  
(symboles) au  
champ pendant  
17 années



Les simulations prédisent les évolutions de Cp sur  
près de 2 décennies pour P0, P27 et P52/2, mais

**surestiment pour P79**

sur les traces de Jean-Claude HARDEAU, 12  
avril 2015

Pendant près de 50 ans, JCF a influencé la recherche et le développement sur la fertilité et la fertilisation phosphatée des cultures. Ses travaux ont fait date et sont reconnus. Ses approches scientifiques et méthodologiques ont été reprises, utilisées et développées par une nouvelle génération de chercheurs.

J'ai eu la très bonne fortune de le rencontrer en avril 1982. Cette rencontre a déterminé mon orientation et ma carrière professionnelle. Il a été mon Directeur de Thèse. Il était dans mon jury de recrutement à l'INRA (1991) et dans mon jury HDR (2002).

C'était un expérimentateur ingénieux, enthousiaste. Un esprit brillant et engagé avec une personnalité charismatique, haute en couleur, drôle et attachante. Une voix forte et écoutée. J'ai eu la chance de beaucoup apprendre à ses côtés. Il a été pendant plus de 30 ans un ange





sur les traces de Jean-Claude FARDEAU, 13  
avril 2015

Barbier G., J.C. Fardeau et P.  
Marini, 1971. Sur la diffusibilité  
des ions P du sol. Annales  
Agronomiques 22, 309-342

Cinétiques de dilution isotopique et phosphore  
assimilable des sols

Fardeau J-C.

THÈSE DE DOCTORAT D'ETAT

4 juin 1981. Université P. et M. Curie, Paris 198p.

*Agronomie* (1991) 11, 787-797  
© Elsevier/INRA

787

Science du sol

C. R. Acad. Sc. Paris, t. 300, Série III, n° 8, 1985



371

**Cinétiques de transfert des ions phosphate du sol  
vers la solution du sol : paramètres caractéristiques**

AGRONOMIE. — *Cinétique d'échange des ions phosphate dans les systèmes sol-solution.*  
*Vérification expérimentale de l'équation théorique.* Note de **Jean-Claude Fardeau**, **Christian**  
**Morel** et **Jocelyne Jappe**, présentée par Georges Millot.

JC Fardeau <sup>1</sup>, C Morel <sup>1</sup>, R Boniface <sup>2</sup>