

# GESTION À LONG TERME DE LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS CULTIVÉS

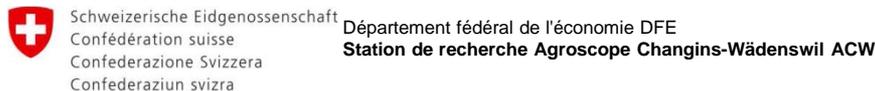
CHRISTIAN MOREL, PASCAL DENROY (INRA, UMR TCEM, BORDEAUX)



FABIENNE BUTLER, PIERRE CASTILLON, LUC CHAMPOLIVIER, RÉMY DUVAL, ANNE SOPHIE KOUASSI, DANIEL HANOCQ, MATHIEU MÉTRAILLE, NINA RABOURDIN, CHRISTIANE RAYNAL, THIERRY SAVOIE (programme CasDAR n° 7152)



ELIZABETH KVARNSTRÖM, AIMÉ MESSIGA, LILIA RABEHARISOA, SOKRAT SINAJ, NOURA ZIADI (programmes internationaux)



Agriculture et Agroalimentaire Canada

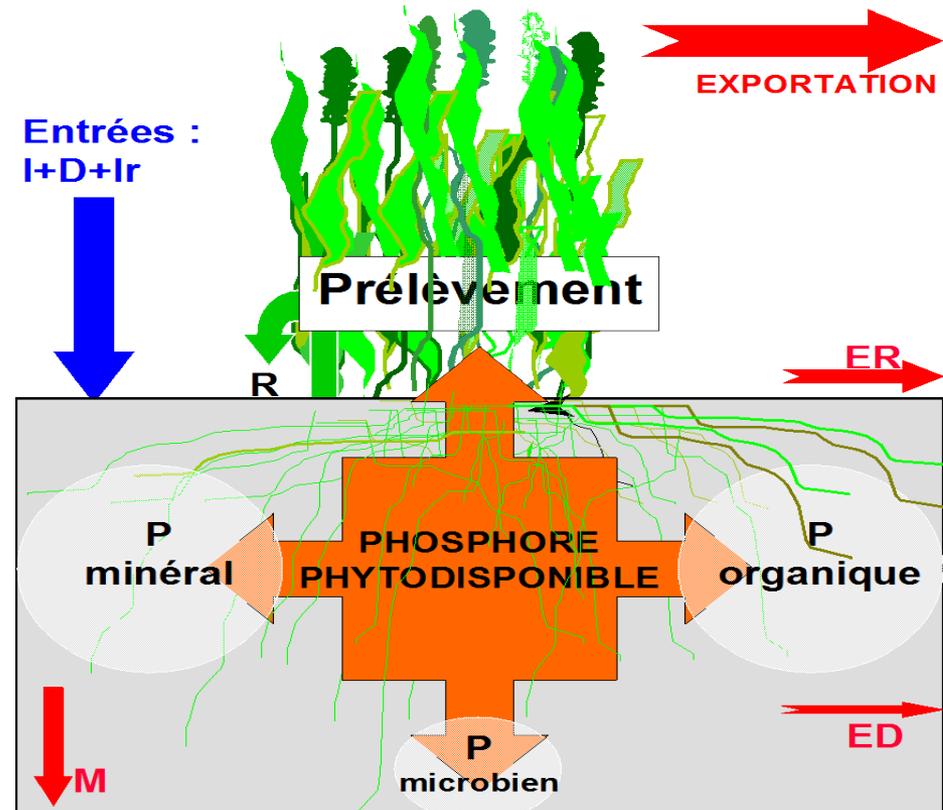
Agriculture and Agri-Food Canada



# Cycle du P dans les écosystèmes cultivés, c'est quoi?

Cycle P: ensemble des flux d'entrées et sorties de P, des processus de transformations et d'évolution des stocks impliqués dans la circulation du P

P phytodisponible:  
fraction du P total  
du sol susceptible  
de participer à la  
nutrition des  
cultures



# Cycle du P dans les écosystèmes cultivés, c'est quoi?

Les entrées et sorties de P : ordres de grandeur

## Flux annuels des sorties

- P exporté récoltes: 25 kg P/ha/an ( $\sim 60$  kg  $P_2O_5$ /ha/an) dans 6-7 t grain MS/ha
- Résidus organiques exportés: 4 kg P/ha/an
- P ruisselé/P lixivié: quelques centaines de grammes mais peut atteindre plusieurs kg dans certains cas

## Flux annuels des entrées

- Intrants: de l'ordre 20-40 kg P /ha/an (mais suivant contraintes, les valeurs pouvaient aller jusqu'à plus de 100 kg /ha/an)
- Dépôts atmosphériques:  $\sim 0.1$  kg/ha/an
- P semis:  $\sim 0.1$  kg/ha/an

# Cycle du P dans les écosystèmes cultivés, c'est quoi?

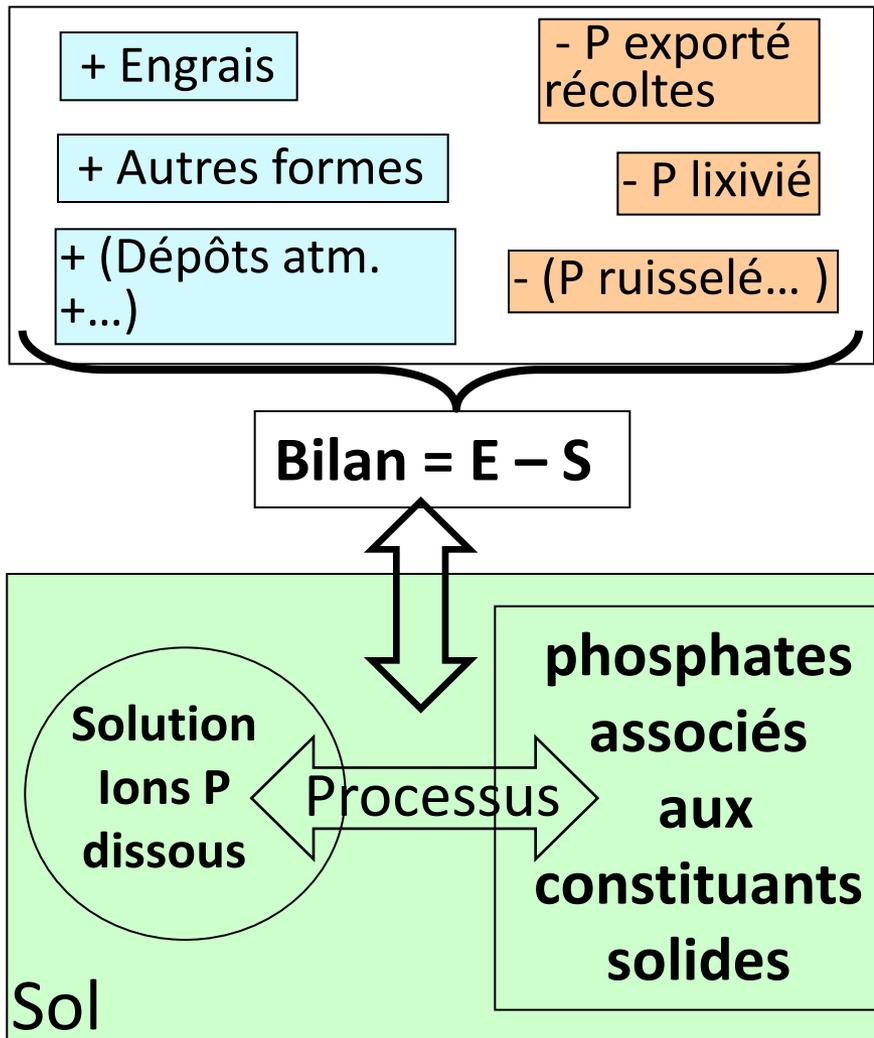
Les stocks de P dans le sol : ordres de grandeur

Stock = teneur × masse de terre fine

## Couche labourée (3750 tonnes de terre /hectare )

P total	2650	kg P/ha	6070 kgP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha
P minéral	2000	kg P/ha	4580 kgP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha
P organique	600	kg P/ha	1370 kgP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha
P microbien	50	kg P/ha	115 kgP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha
P phytodisponible, P-Olsen	75	kg P/ha	170 kgP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha
P phytodisponible, ions P dissous (Qw)	0.2	kg P/ha	0.5 kgP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha
P phytodisponible, ions P diffusibles 1an (Pr <sub>1an</sub> )	500	kg P/ha	1145 kgP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha

# Modélisation du fonctionnement biogéochimique du cycle du P



Bilan des flux d'entrées et de sorties de P à la parcelle

Stock de P phytodisponible du sol: évaluation mécaniste



# Modélisation du fonctionnement biogéochimique du cycle du P

**Etape de hiérarchisation: prendre en compte les flux et les processus les plus importants.**

Dans les parcelles cultivées GC, fertilisées avec engrais minéral (TSP) et labourées :

- Bilan annuel de P = P apporté – P exporté récoltes (- P lixivié couche labourée)
- les racines prélèvent des ions P dans la solution du sol (<1%)
- le principal processus rhizosphérique qui contrôle le transfert des ions P entre la solution et les constituants solides du sol est la diffusion des ions P à l'interface solide-solution: = déplacement suivant le gradient de concentration des zones les plus concentrées vers les zones les moins concentrées.
- Le P phytodisponible est égal à la somme des **ions P dissous et diffusibles à l'interface solide-solution du sol.**

# Modélisation du fonctionnement biogéochimique du cycle du P

## Des outils pour étudier le fonctionnement du cycle du P

### Dispositifs expérimentaux *in situ*

*Mesure et/ou calcul de stocks et flux de P (prélèvement annuel, exportations, restitutions, ions P dissous et diffusibles, minéralisation, lixiviation...)*



### Incubations de sol et cultures en conditions contrôlées et traçage isotopique

### Analyses physico-chimiques d'échantillons de terre

- Ions phosphate ( $P_i$ ) dissous;
- $P_i$  diffusibles à l'interface solide-solution
- Analyses normalisées: extraction Olsen...



# Modélisation du fonctionnement biogéochimique du cycle du P

**Analyses par traçage et dilution isotopique pour quantifier les ions P dissous et le transfert d'ions P à l'interface solide-solution du sol**  
(travaux de J.-C. Fardeau)

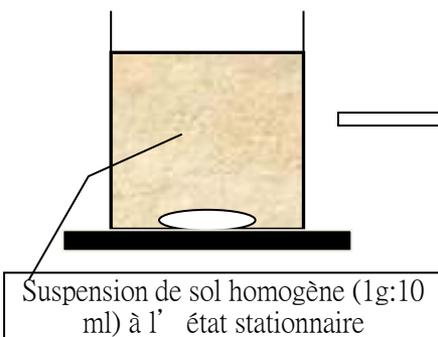
## Ions phosphate ( $P_i$ ) dissous:

concentration ( $C_p$ , mg P/L solution) déterminée au laboratoire après mise en suspension avec biocide, filtration ( $<0.2\mu m$ ) et dosage par une méthode colorimétrique;

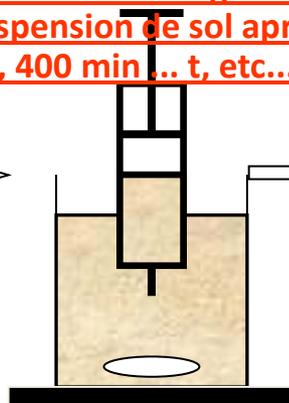
## $P_i$ diffusibles à l'interface solide-solution:

quantité ( $P_r$ , mg P/kg sol) également déterminé au laboratoire en associant des expériences de sorption/désorption et de dilution isotopique;

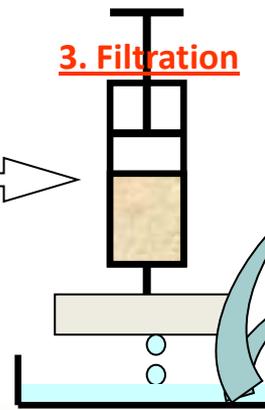
1.  $t=0$ ,  $^{32}PO_4$  ajouté



2. Echantillonnage de la suspension de sol après 4, 40, 400 min ... t, etc...



3. Filtration

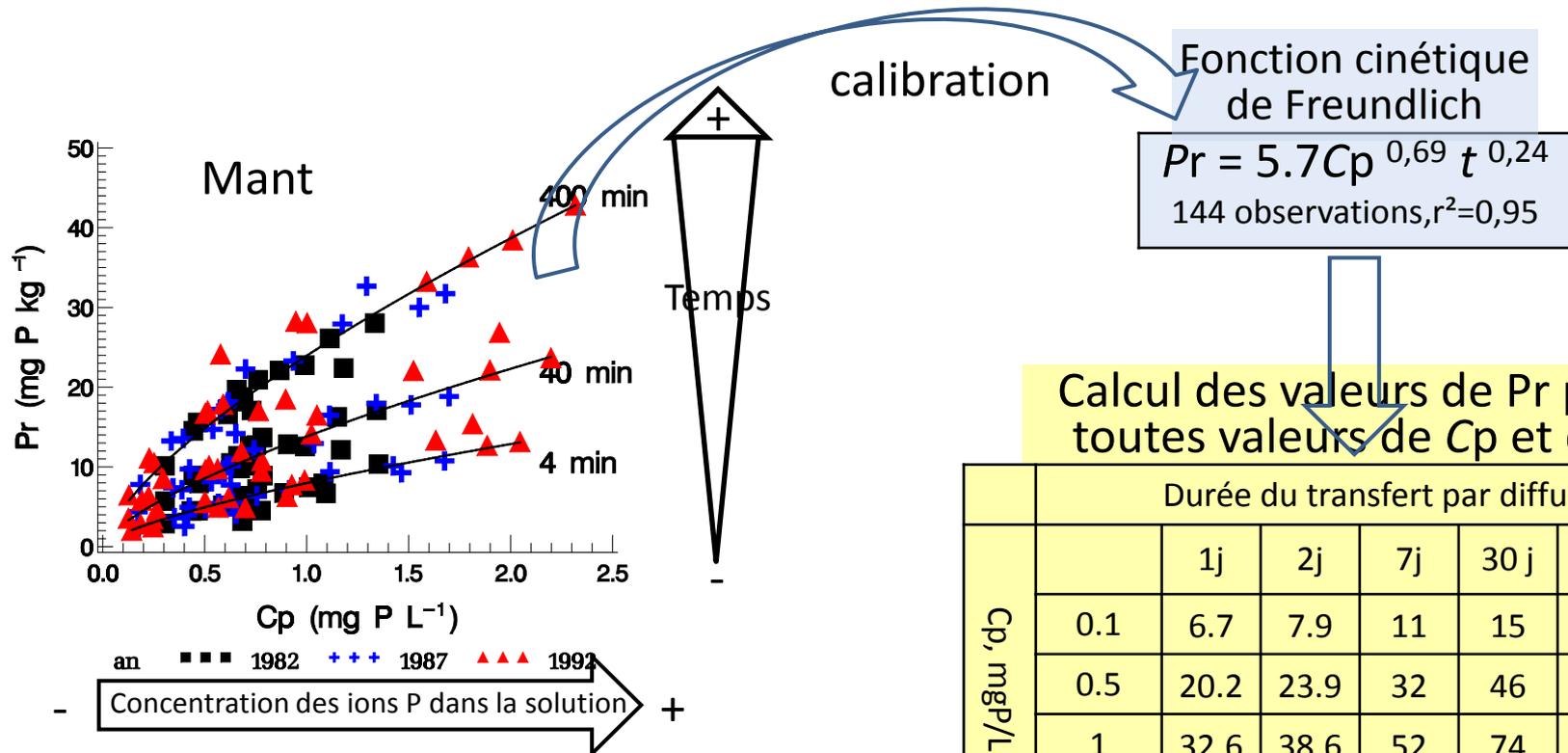


4. Dosage par colorimétrie

4. Comptage radioactivité

# Modélisation du fonctionnement biogéochimique du cycle du P

A l'aide du jeu de données, la dynamique des ions P diffusibles est calibrée en fonction de la concentration des ions P dissous ( $C_p$ ) et des cinétiques



Calcul des valeurs de Pr pour toutes valeurs de  $C_p$  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...

# Modélisation du fonctionnement biogéochimique du cycle du P (CyP)

## Construction du modèle (CyP)

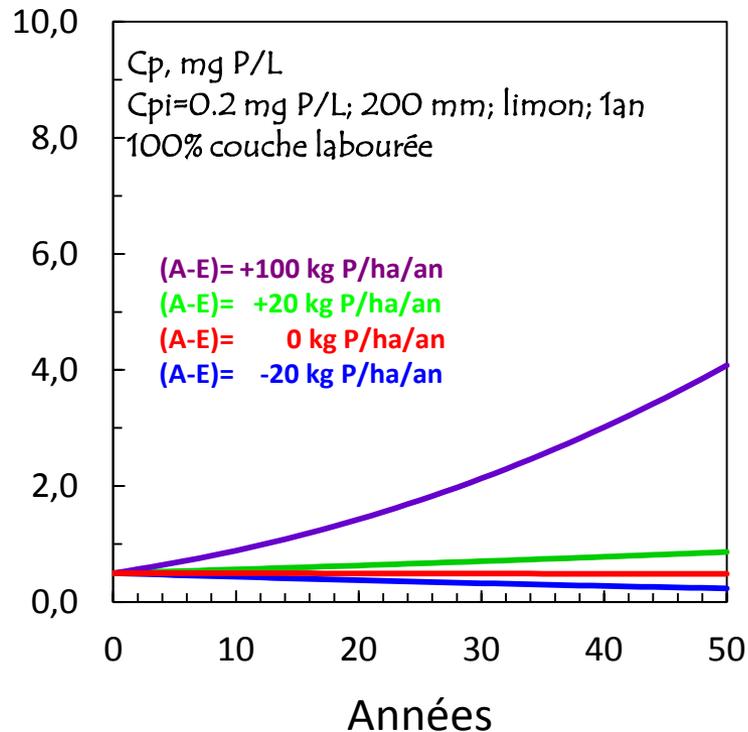
La valeur simulée de  $C_p$  est **calculée** chaque année en appliquant la loi de conservation de la masse de P phytodisponible à la couche labourée de sol :

$$k_c(\text{Pi dissous+diffusibles})_i = \pm \text{Bilan annuel} + k_c(\text{Pi dissous+diffusibles})_{i+1\text{an}}$$

- Ions phosphate (Pi) dissous;
- Pi diffusibles à l'interface solide-solution;
- $k_c$  = coefficient de conversion de (Qw+Pr) de mg P/kg sol en kg P/ha de couche labourée

# Modélisation du fonctionnement biogéochimique du cycle du P

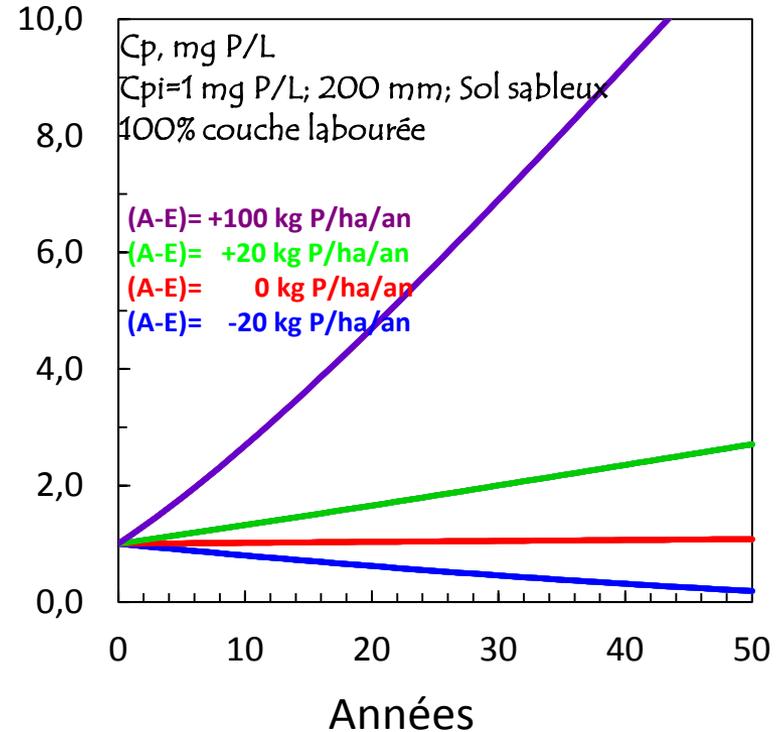
## Exemple de simulations produites par le modèle



Limons (Bignan)

(v,w,p)= (16.1, 0.33, 0.34)

Pr(1mg P/L, 1an)=5860 kg P/ha



Sol sableux (Tartas)

(v,w,p)= (1.5, 0.68, 0.38)

Pr(1mg P/L, 1an)=1022 kg P/ha



## Evaluation sur le long terme du modèle de fonctionnement biogéochimique du cycle du P

**Question: quelle est la capacité du modèle à prévoir les évolutions du P phytodisponible au champ sur le long terme ?**

Contexte: sols cultivés de longue date sous grandes cultures; sols labourés et fertilisés avec des niveaux différents de fertilisation minérale (TSP)

Sélection de 11 sites expérimentaux de longue durée pour couvrir une gamme large de situations pédo-climatiques (France, Suisse, Suède, Madagascar)

- 11 sites analysés 1 à 2 fois après 1 à 2 décennies
- quelques sites analysés en continue sur plusieurs décennies

# Evaluation sur le long terme du modèle de fonctionnement biogéochimique du cycle du P

## Les dispositifs: propriétés du sol (couche labourée)

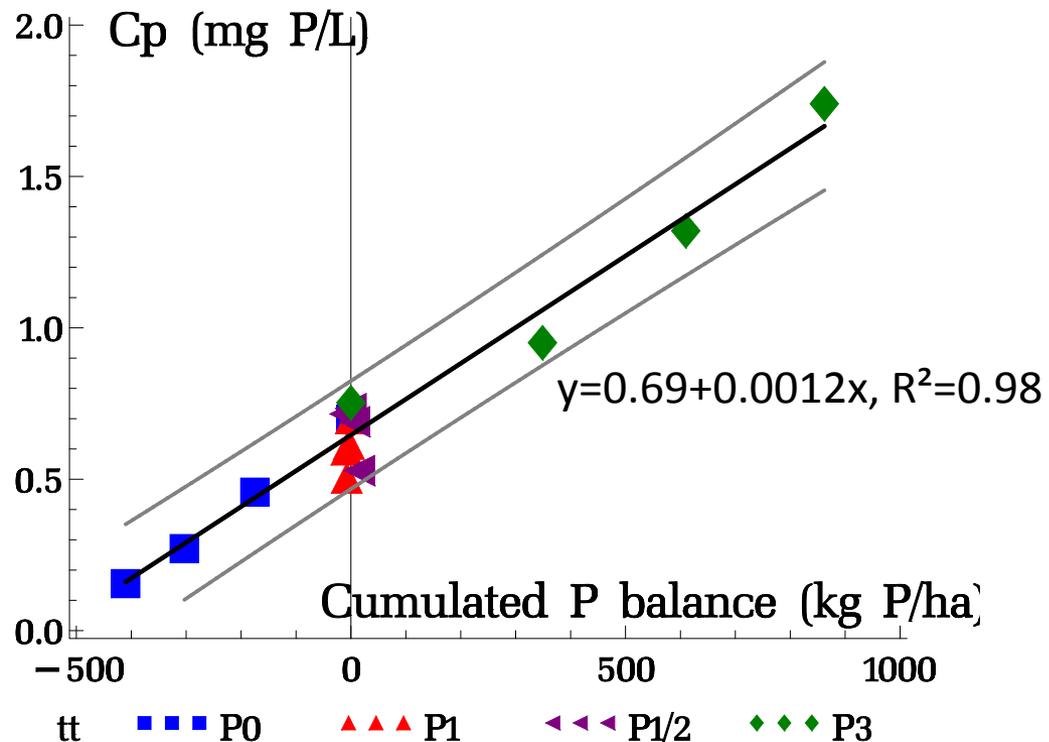
### Sols non carbonatés

Pays	Site (abbreviation)	Argile <sup>..</sup> %	pH	Corg %	(Al+Fe)Tamm mmol/kg	CEC cm+/kg
Fr	Pierroton (FR-PIE)	<b>5</b>	5.8	2.2	<b>36</b>	3.9
Fr	Presly (FR-PRE)	6	5.8	<b>0.6</b>	56	<b>1.9</b>
Fr	Tartas (FR-TAR)	6	5.9	1.0	nd	nd
Fr	Theze (FR-THE)	19	5.8	1.8	nd	8.0
Fr	Mant (FR-MAN)	12	<b>7.3</b>	0.9	98	5.9
Fr	Janvilliers (FR-JAN)	21	<b>7.3</b>	1.2	240	13.2
Fr	Bignan (FR-BIG)	18	5.7	2.2	452	5.6
Ch	Changins (CH-CHA)	54	6.7	2.5	nd	<b>31</b>
Se	Umea (SE-UME)	10	5.7	2.8	167	11
Mg	Andranomanelatra (MG-AND)	50	4.8	<b>3.1</b>	<b>519</b>	4.6
Mg	Bemasoandro (MG-BEM)	<b>71</b>	<b>4.4</b>	2.7	326	5.6

# Evaluation sur le long terme du modèle de fonctionnement biogéochimique du cycle du P

Evolution de  $C_p$  **au champ** avec le bilan cumulé (A-E) de P

Cas d'un seul site: Essai  
Mant  
(Messiga et al. 2010)



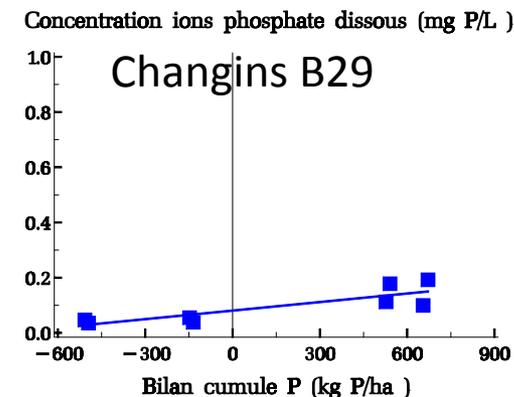
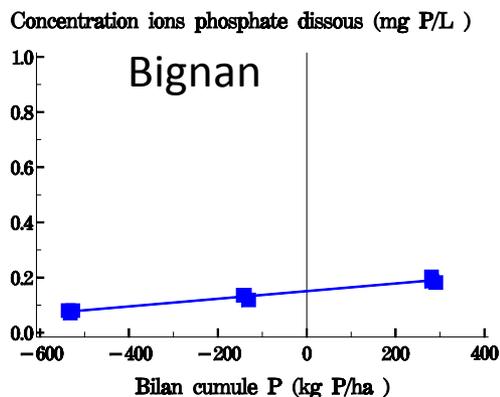
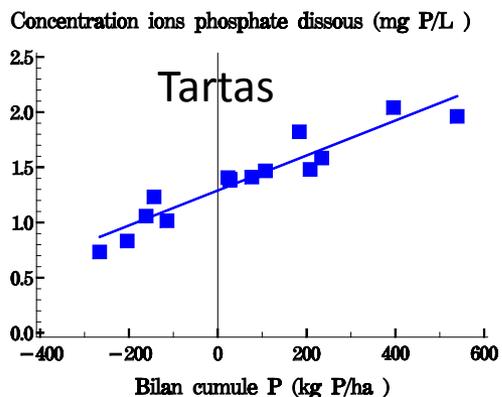
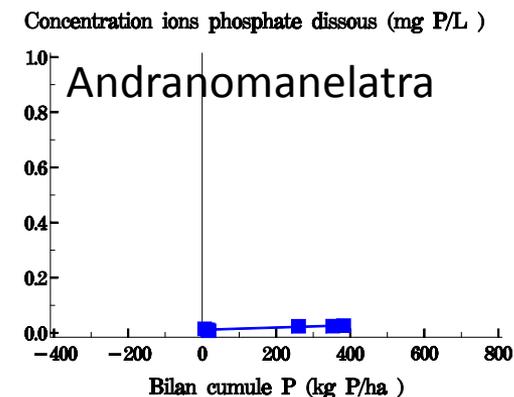
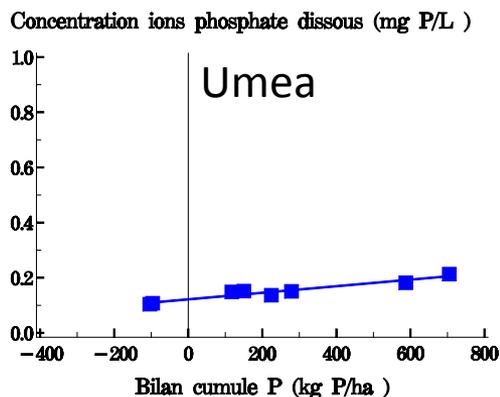
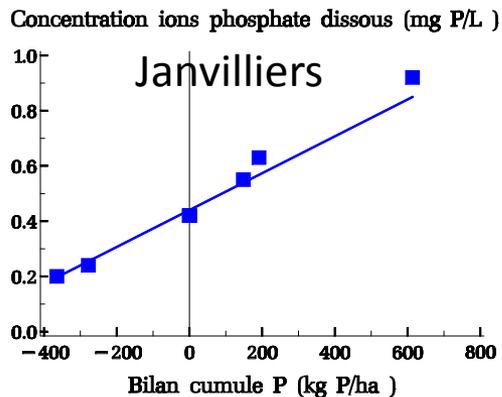
Même droite de régression pour bilan P positif et négatif

Coefficients invariants avec la durée d'expérimentation.

Pour  $\pm 100$  kg P/ha, il y a  $\pm 0.12$  mg P/L solution

# Evaluation sur le long terme du modèle de fonctionnement biogéochimique du cycle du P

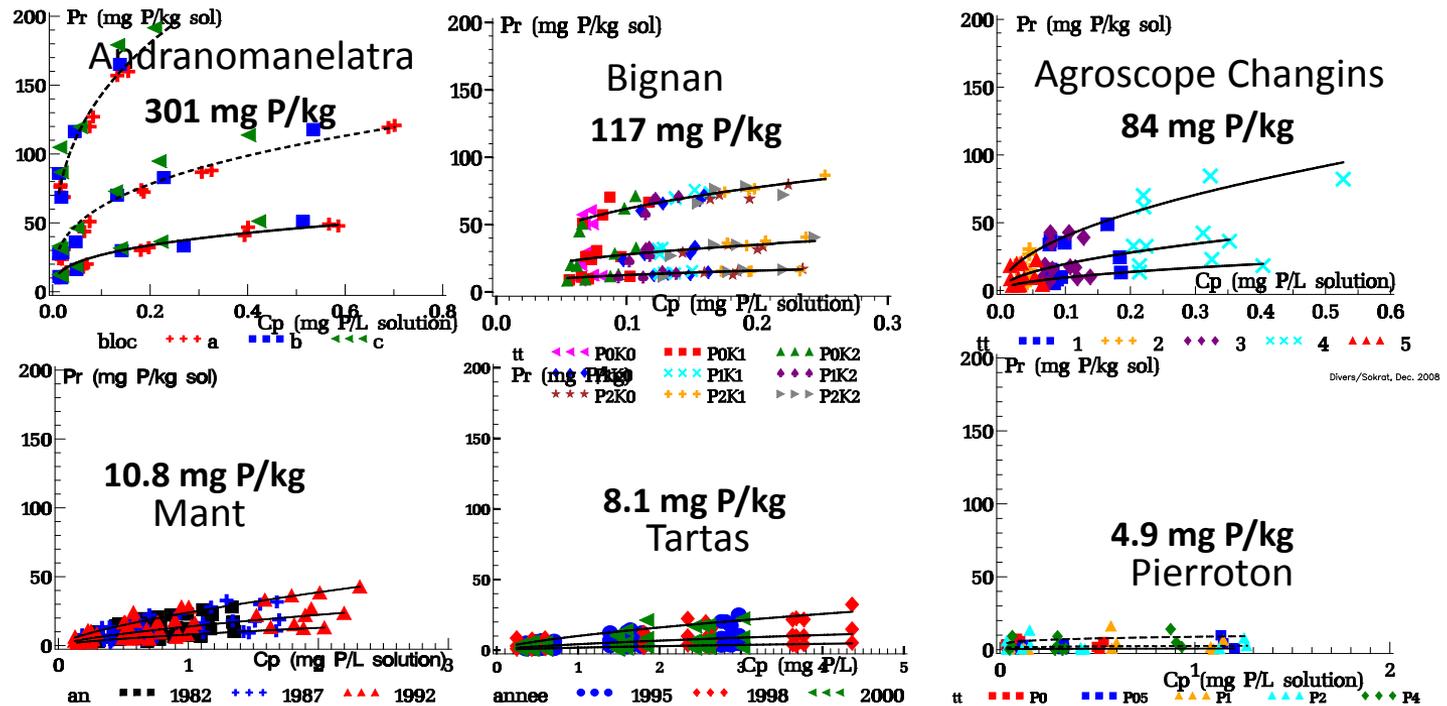
Evolution de  $C_p$  **au champ** avec le bilan cumulé (A-E) de P: généralisation



Les coefficients de régression de la droite varient entre sites

# Evaluation sur le long terme du modèle de fonctionnement biogéochimique du cycle du P

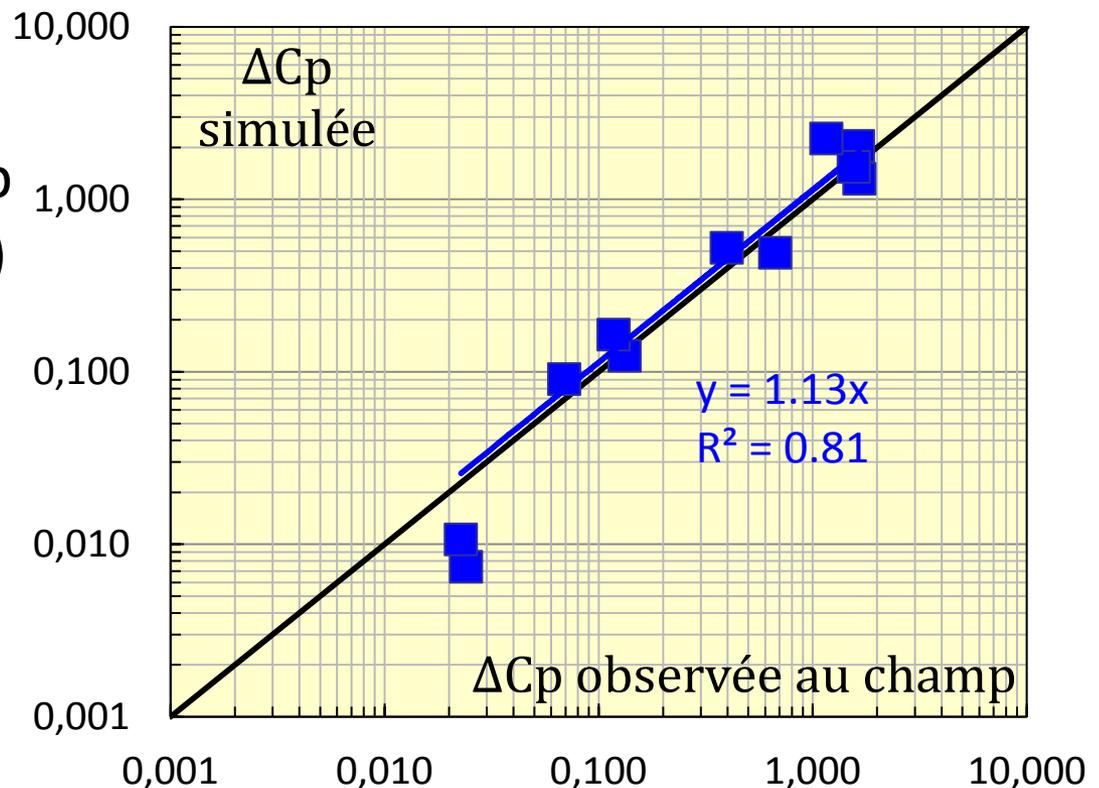
**Au laboratoire**, calibration de la dynamique des ions P diffusibles à l'interface solide-solution: détermination des coefficients de la fonction cinétique de Freundlich



La dynamique  $Pr=f(Cp,t)$  varie significativement entre les différents sites

# Evaluation sur le long terme du modèle de fonctionnement biogéochimique du cycle du P

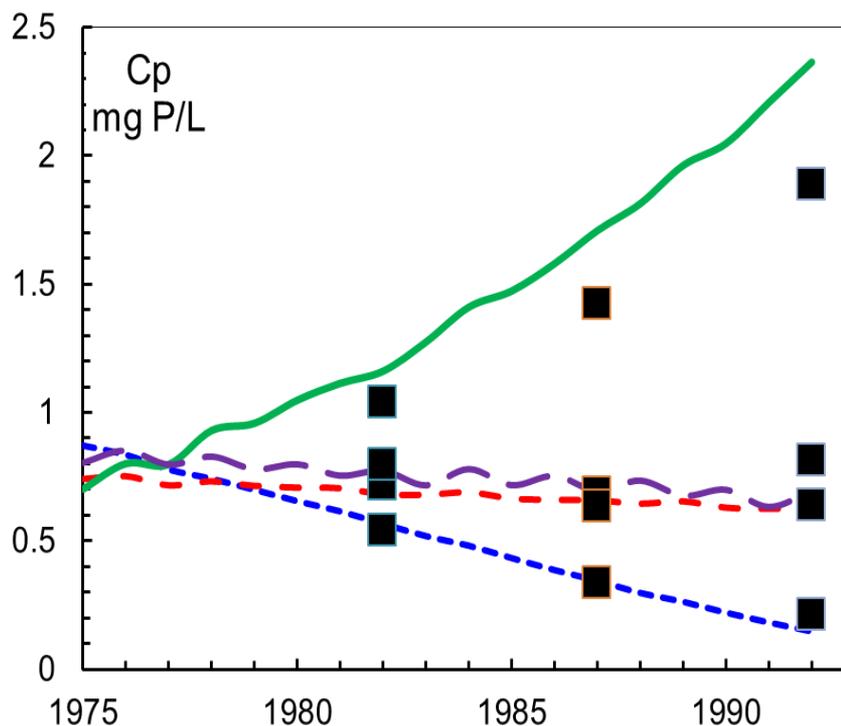
Comparaison  $\Delta C_p$ -simulées et  $\Delta C_p$ -observées au champ (( $\mu\text{g P/L}$  solution)/( $\text{kg P/ha}$ ))



Le modèle simule correctement les différents ordres de grandeur des  $\Delta C_p$  observées au champ pour les différentes situations

# Evaluation sur le long terme du modèle de fonctionnement biogéochimique du cycle du P

Comparaison  $C_p$ -simulées (lignes) et  $C_p$ -observées (symboles) au champ pendant 17 années



Les simulations prédisent les évolutions de  $C_p$  sur près de 2 décennies pour P0, P27 et P52/2, mais surestiment pour P79

# Conclusions

- Construction d'un modèle décrivant le fonctionnement du cycle du P dans les écosystèmes cultivés :  $\Delta\text{stock}(\text{P phytodisponible}) = \text{Bilan P}$
- Il simule correctement les évolutions de  $C_p$  sur plusieurs décennies pour la couche labourée de:
  - i) différents types de sol;
  - ii) différents régimes de fertilisation phosphatée.
- Plusieurs hypothèses pour expliquer les écarts entre observations et simulations en régime d'excédents:
  1. la durée limite de l'équilibre ions P dissous et diffusibles,
  2. la contribution de la couche labourée à la nutrition phosphatée,
  3. la quantité de P lixivié
  4. la profondeur de labour,
  5. la densité apparente de la couche labourée,
  6. ...

# Perspectives

- Associer un référentiel de diagnostic pour les indicateurs  $Q_w + P_r$  (Présentation de Denoroy et al.) pour élaborer un outil de gestion de la fertilisation P
- Evaluation du modèle CyP sur d'autres situations: sols carbonatés; épandage de PRO...
- Tester certaines hypothèses pour améliorer le modèle (ex: la contribution de la couche sous labour à la nutrition phosphatée)
- Améliorer la détermination des paramètres (v,w,p): étudier les relations entre ces coefficients et les propriétés physico-chimiques du sol qui déterminent les réactions entre les ions P

