



**HAL**  
open science

## La modélisation des relations sol-plante

Alain Mollier, Sylvain S. Pellerin

► **To cite this version:**

Alain Mollier, Sylvain S. Pellerin. La modélisation des relations sol-plante. Séminaire du RMT : 5. journée prospective du RMT Fertilisation et Environnement, Jan 2011, Paris, France. hal-02802967

**HAL Id: hal-02802967**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02802967v1>**

Submitted on 5 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# La modélisation des relations sol-plante

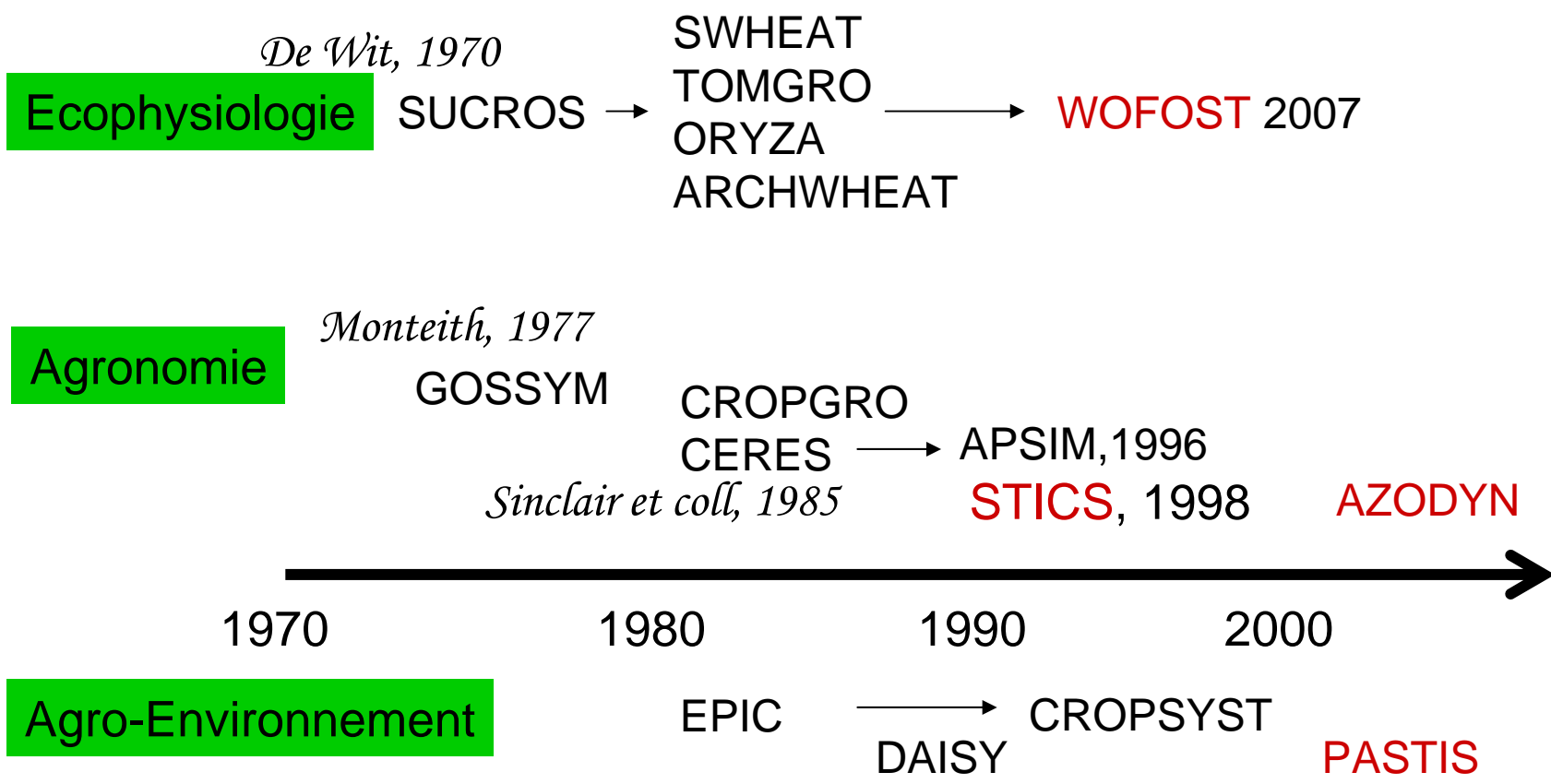
*A Mollier et S Pellerin*  
UMR TCEM INRA-Bordeaux

## Plan

- I. Les modèles de croissance des cultures
- II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore
- III. Les modèles de transfert sol-plante: intérêt et limites pour le diagnostic et le raisonnement de la fertilisation

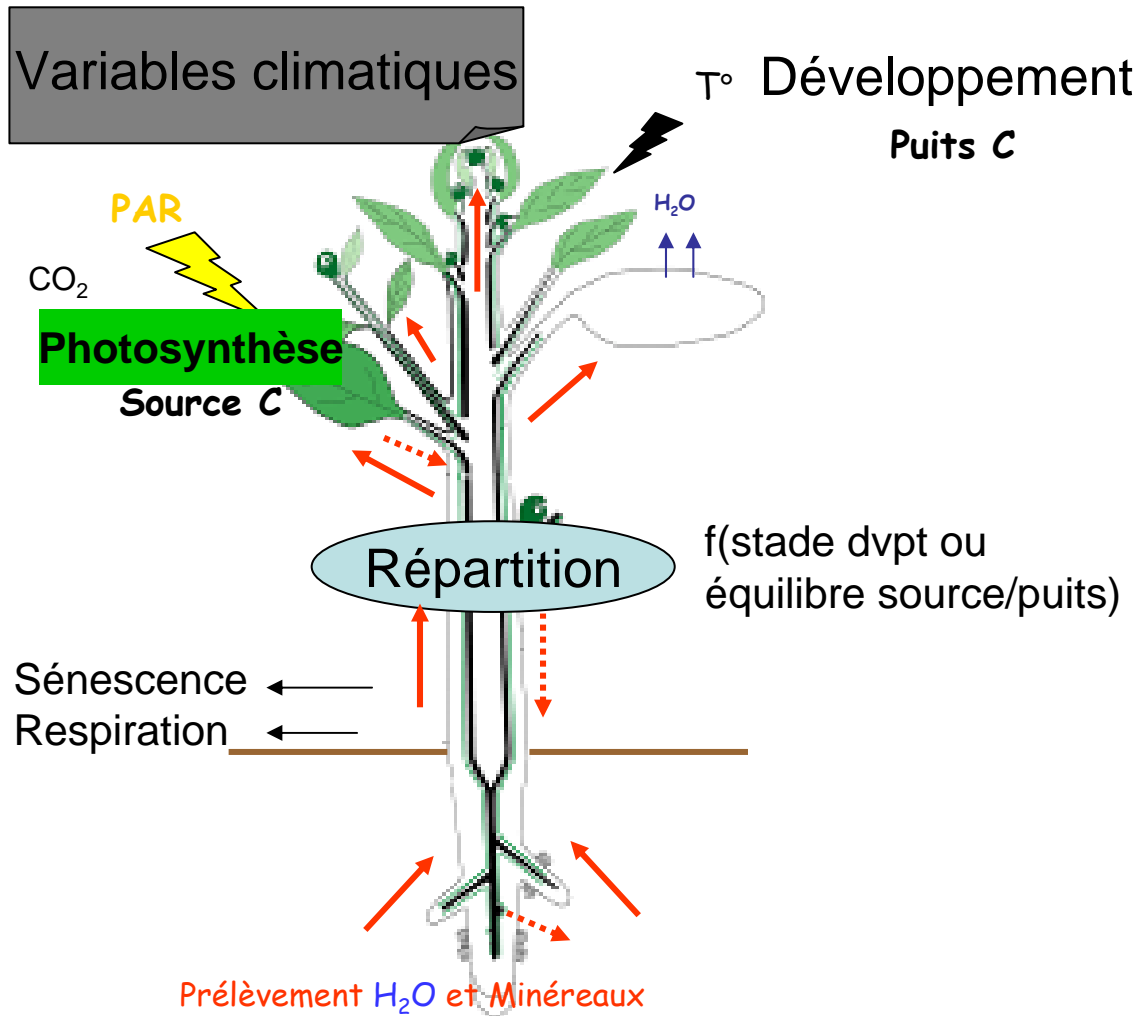
# I. Les modèles de croissance des cultures

- Historique



*Adapté d'après Brisson, 2009*

# Principe de fonctionnement



Prédiction de la croissance & rendement potentiels

Prédiction des besoins en eau & éléments minéraux (N)

# Complexité variable

- **Modèles « simples »** fondés sur des relations empiriques qui intègrent de nombreux processus (nombre de paramètres et variables réduit)
- **Modèles mécanistes complexes:** intègrent les processus biologiques, physico-chimiques élémentaires et leur dynamique (très couteux en paramètres)
- **Modèles « intermédiaires »:** hétérogénéité du degré de complexité des processus modélisés
  - Cible de ces modèles?
  - Degré de connaissance scientifique?

## II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

## II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

### •Objectif:

•Prédire le prélèvement de P et la croissance des plantes

•**Moyens:** Elaborer un **modèle mécaniste** mettant en relation la **biodisponibilité** du phosphore dans le sol, le **prélèvement** par le système racinaire et **la réponse de la plante**

### • Espèces et éléments modèles

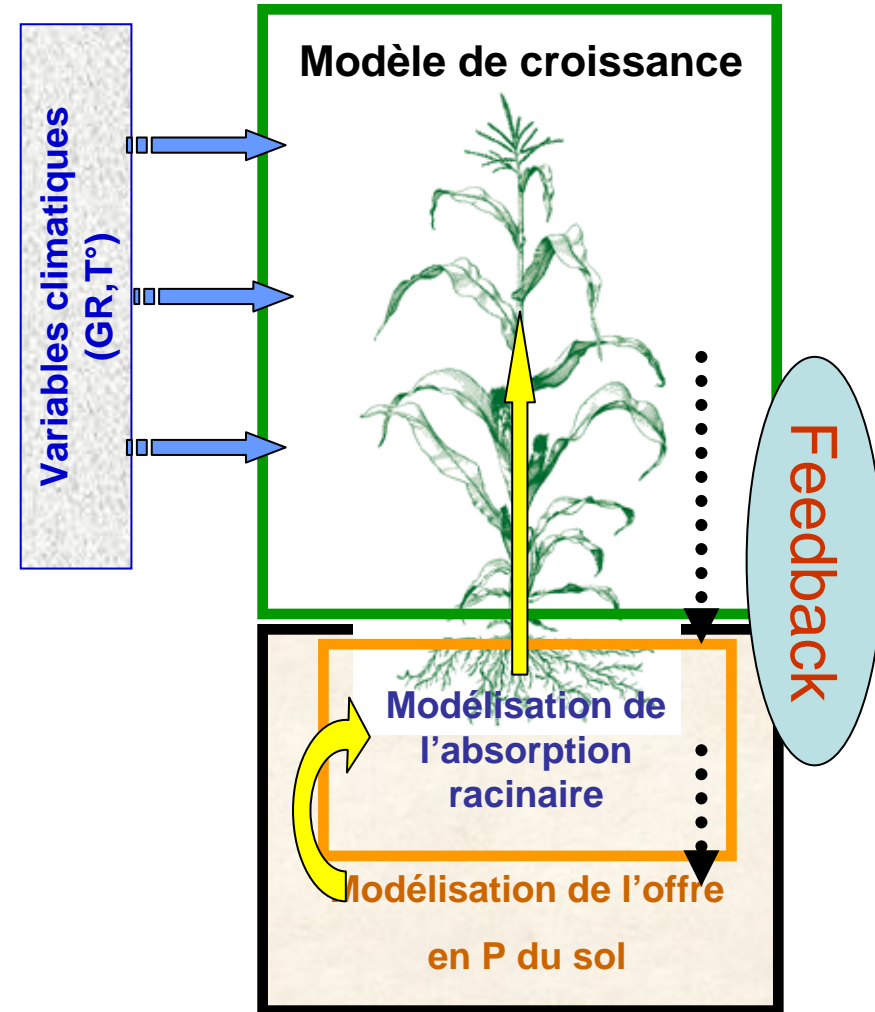
- Maïs
- P

### • Échelle d'espace et de temps:

- Plante en peuplement
- Durée du cycle avec un pas de temps journalier

### • Cahier des charges:

- Prise en compte du caractère hautement interactif du système sol-plante (Rétro-effets)
- Gamme d'offre du sol allant de suffisant à légèrement déficient





# II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

## Processus modélisés

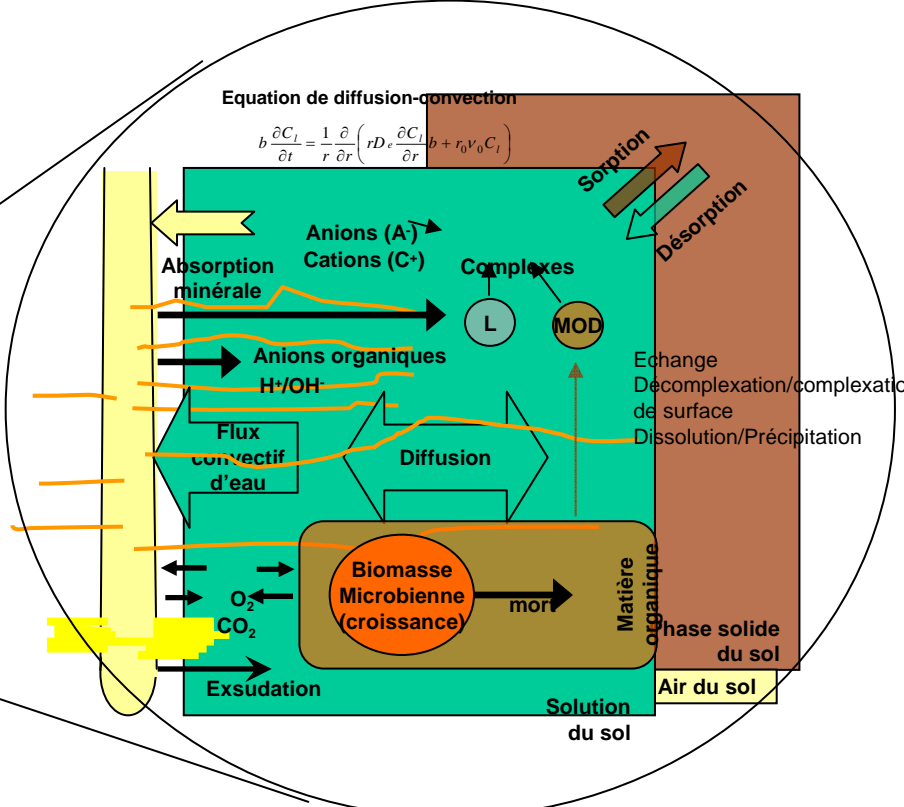
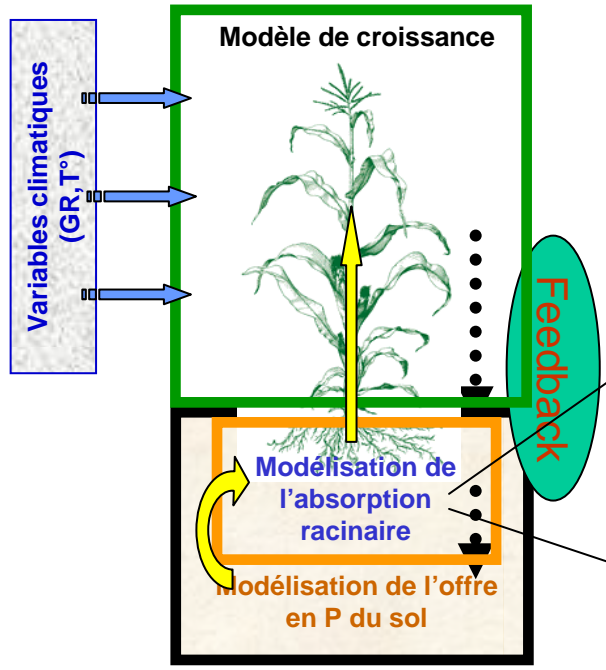
⇒ Intégration de 2 échelles

Le système sol-plante intégré  
(m<sup>3</sup> de sol et peuplement, t=durée du cycle)

**Ecophysiologie plante entière**  
(Assimilation-Gestion C - Big Leaf/Root)

Le système local sol-solution de sol-racine  
(cm<sup>3</sup>, t=jours, décades)

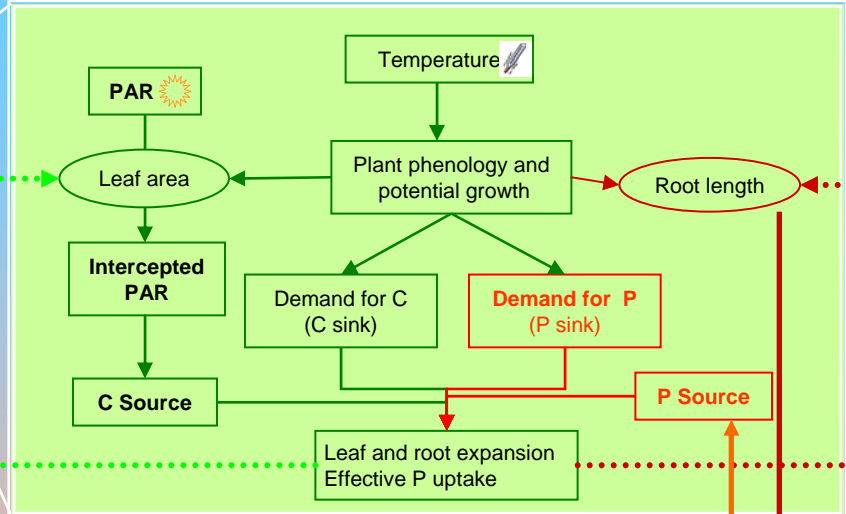
**Géochimie + transfert réactif local**



(Mollier et al., 2008)

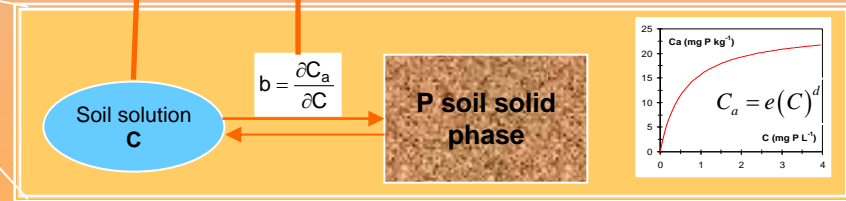
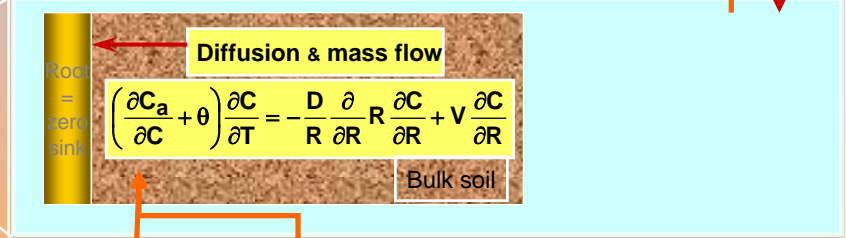
## Modélisation intégrée du transfert sol-plante

Integration and feedback



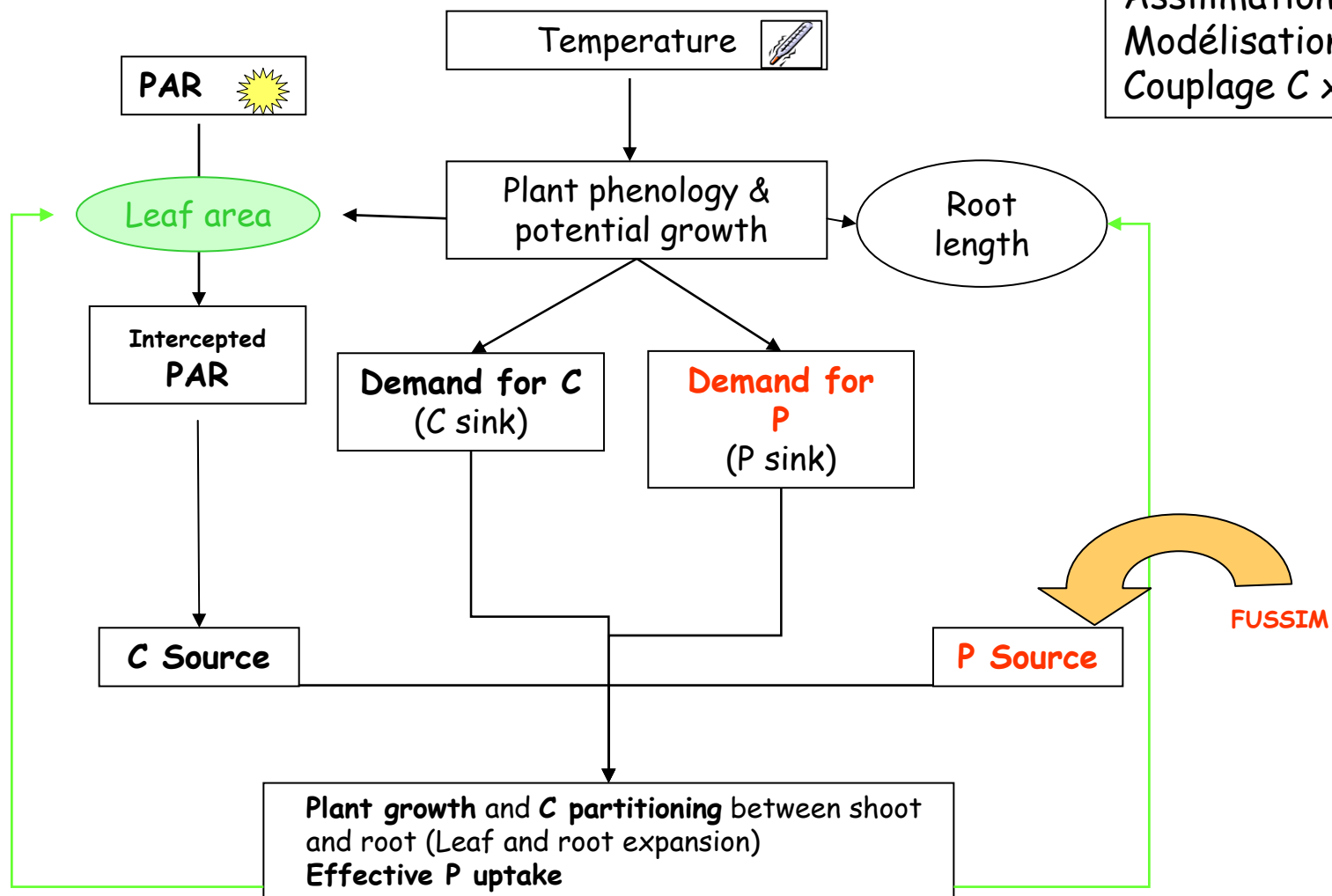
**Modèle numérique**

**Evaluation modulaire et globale**



## II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

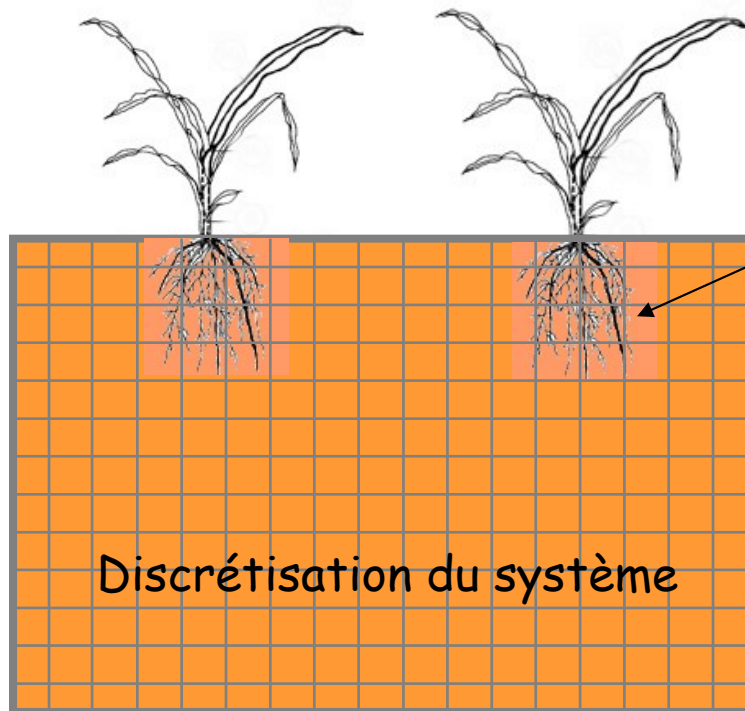
### Modélisation de la croissance



Processus:  
Assimilation et Gestion C  
Modélisation de la demande P  
Couplage C x P

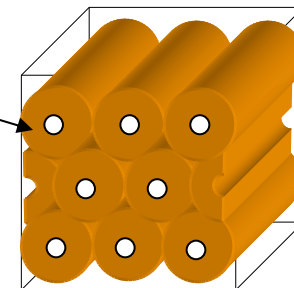
## II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

### Discrétisation du volume de sol exploré par le système racinaire

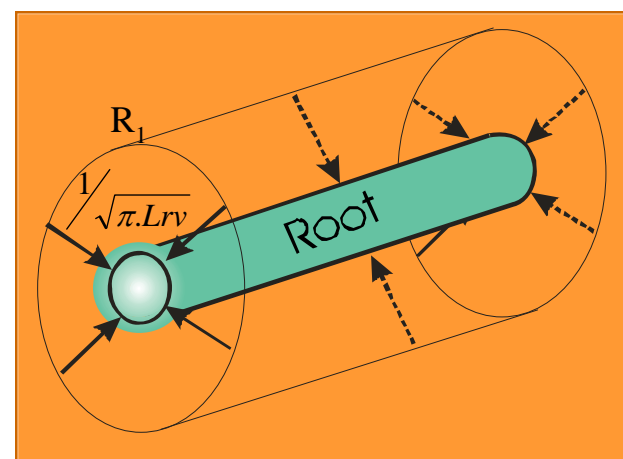


Volume  
élémentaire  
'Control volume'

$Lrv_{i,j}$



Segment de racine

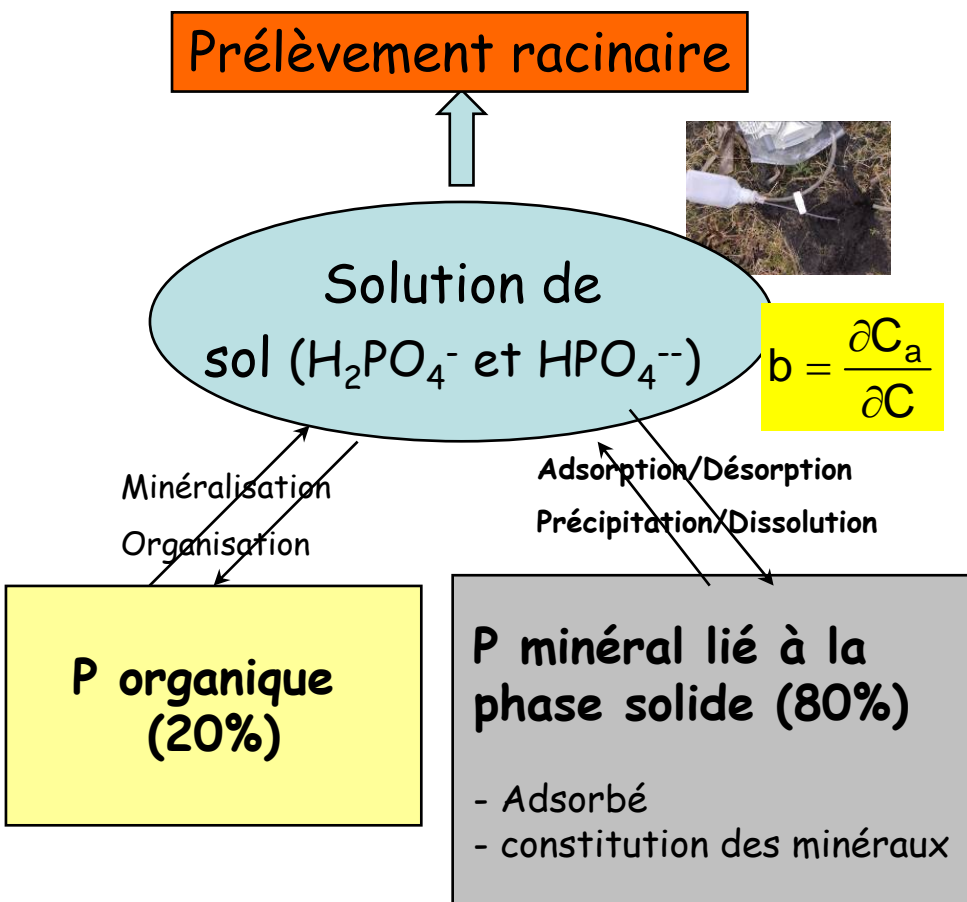


- $R_0$ : rayon racinaire (cm)
- $R_1$ : mi-distance moy. entre racines (cm)
- $Lrv$ : longueur de racine par unité de volume de sol ( $\text{cm cm}^{-3}$ )

## II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

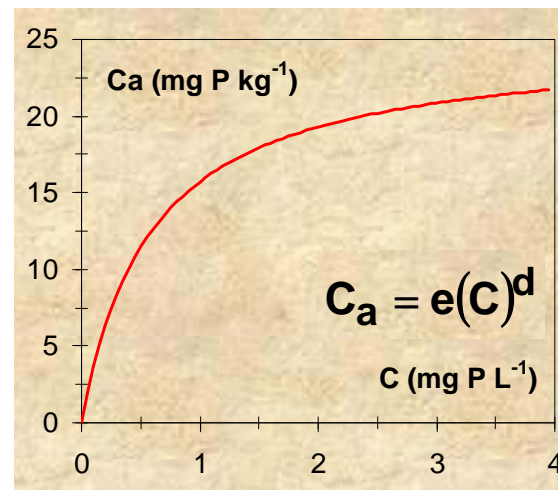
### Modélisation de la phytodisponibilité de P

#### Spéciation et compartimentation du P dans les sols



-La concentration en P dans la solution du sol est supposée en équilibre avec la quantité de P adsorbée sur la phase solide du sol.

-Le transfert de P entre la phase solide du sol et la solution du sol est décrit par une équation de type Freundlich, et est supposé instantané.



## II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

### Formalisation à l'échelle du segment de racine, puis intégration à l'échelle du système racinaire entier

#### Processus sol

Concentration et pouvoir tampon  
Diffusion et convection

$$b \frac{\partial C_l}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_e \frac{\partial C_l}{\partial r} b + r_0 v_0 C_l \right)$$

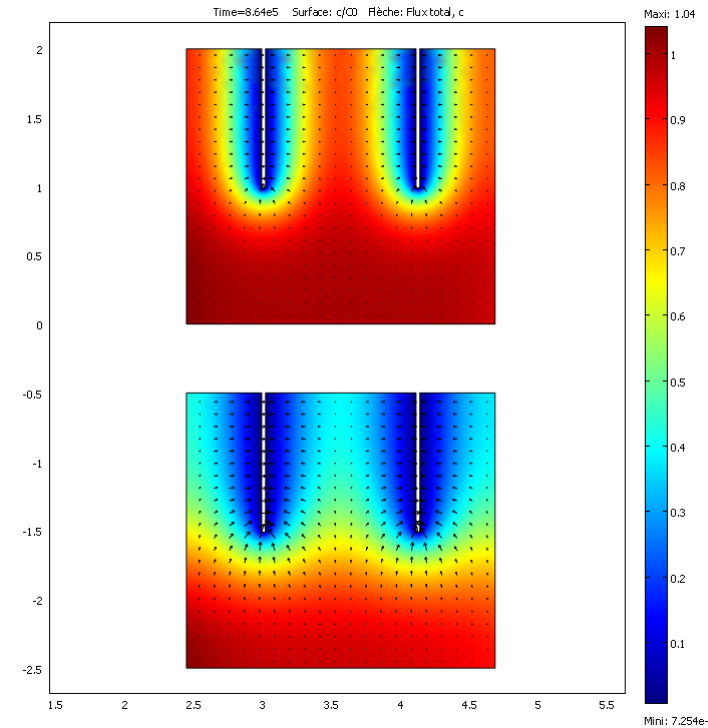
#### Racines

Propriétés d'absorption (cst, MM)  
Géométrie – compétition  
Elongation racinaire

$$I_n = \frac{I_{\max} (C_l - C_{\min})}{K_m + (C_l - C_{\min})}$$

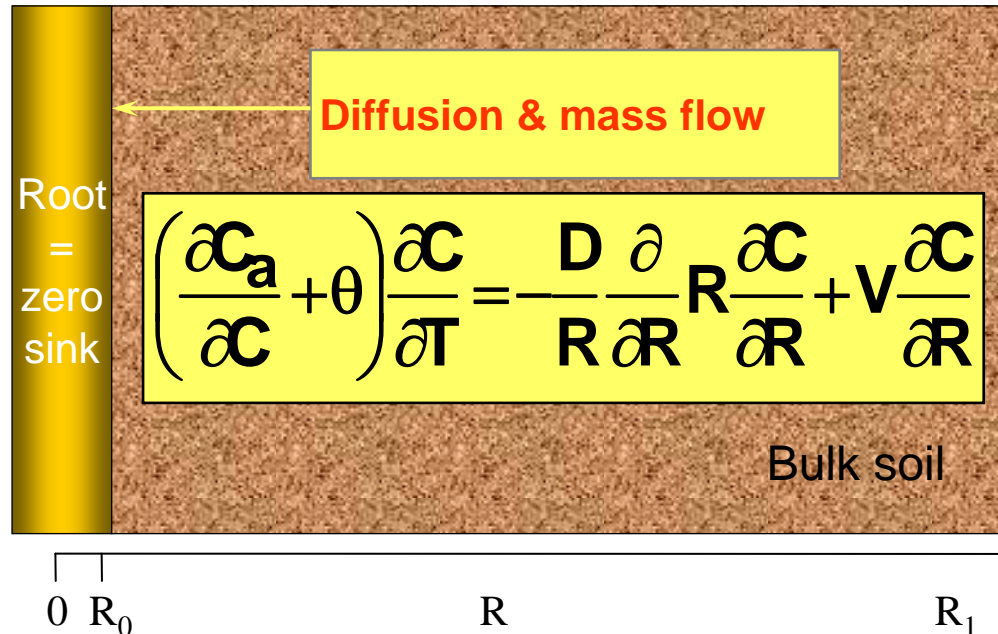
*Bouldin; Nye Marriott; Barber Claassen; Willigen; Greenwood....*

1960      1970      1980      1990      2000      2010



## II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

### Modélisation du transport et du prélèvement



Le flux maximal arrivant aux racines est calculé sous l'hypothèse "zero sink", i.e.  $R=R_0 \Rightarrow C_L=0$

(de Willigen & van Noordwijk, 1994).

$$A_{\max} = \pi \Delta Z L_{rv} D \bar{C} \frac{(\rho^2 - 1)}{G(\rho, \sigma)}$$

**Prélèvement effectif**

=  
Min. (Demande, Offre potentielle)

## II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

### Principales entrées

#### Général

Discrétisation spatiale et temporelle  
Conditions initiales et aux limites

#### Croissance de la plante

Climat  
Croissance potentielle aérienne  
Paramètres Monteith  
Caractéristiques racinaires  
Relations allométriques  
Demande en P

#### Biodisponibilité et transport de P

P Conc. + sorption/desorption paramètres  
Prop. Diffusion ( $D_w$ ,  $f$ ,  $\theta$ )  
Demande en P

#### Prélèvement racinaire (NU)

$C_{min}$ , conc. minimale pour l'absorption racinaire

### Prédictions

#### Prélèvement de P

Prélèvement cumulé  $f(\text{temps})$   
Localisation zones prélèvement dans le sol

#### Croissance

Croissance en biomasse aérienne et racinaire  
LAI  
Root length density

#### Sol

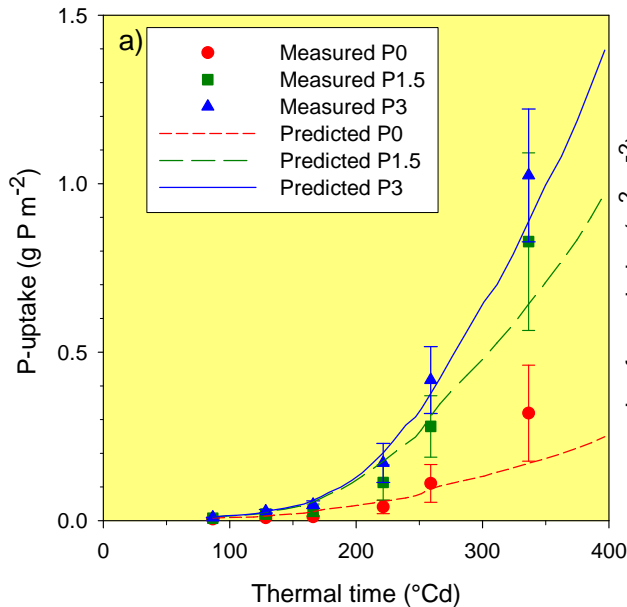
Evolution de la biodisponibilité globale et locale en P dans le sol



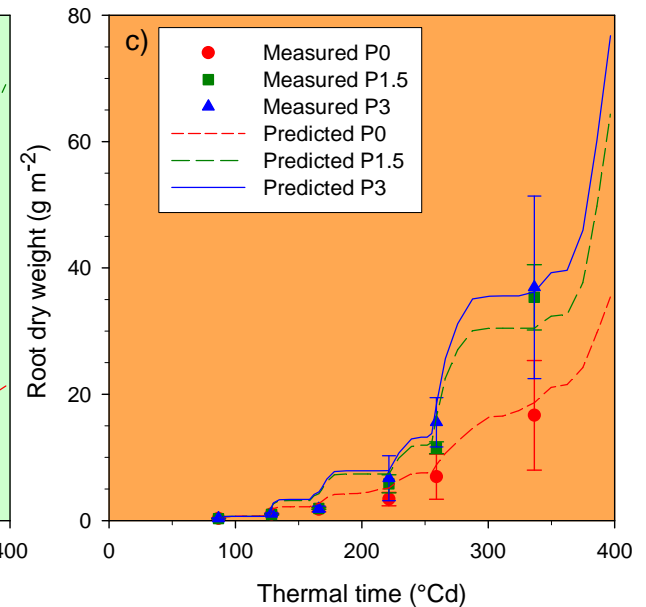
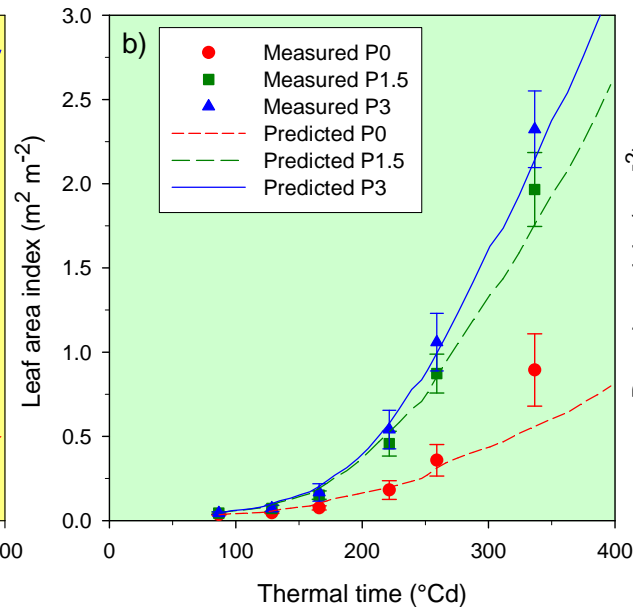
# II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

Field evaluation: Comparison of predicted and observed variables

## P-uptake



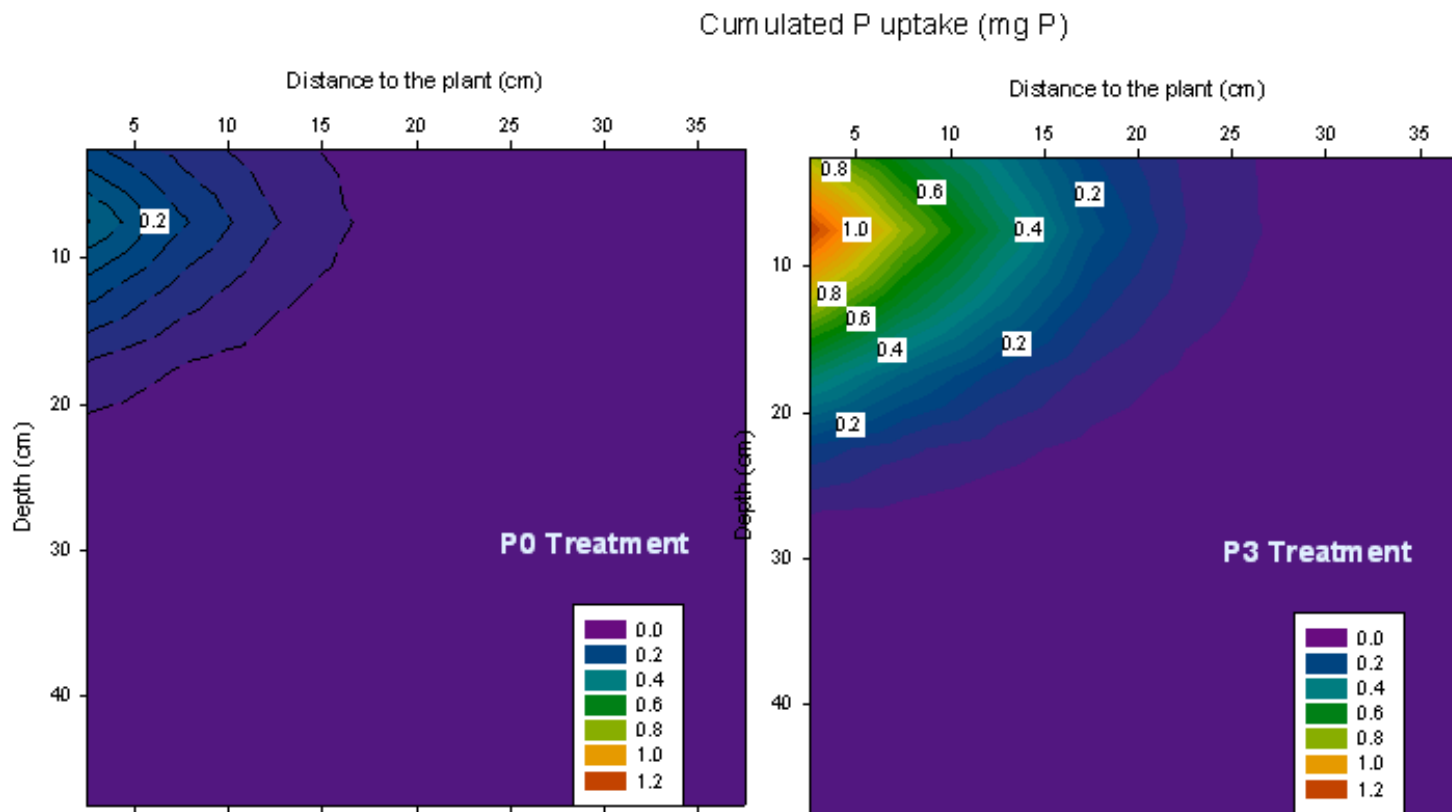
## Shoot and Root growth



(Mollier et al., 2008; Faget, 2006; Maire, 2005)

## II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

### Simulation of localization of P-uptake in soil profile

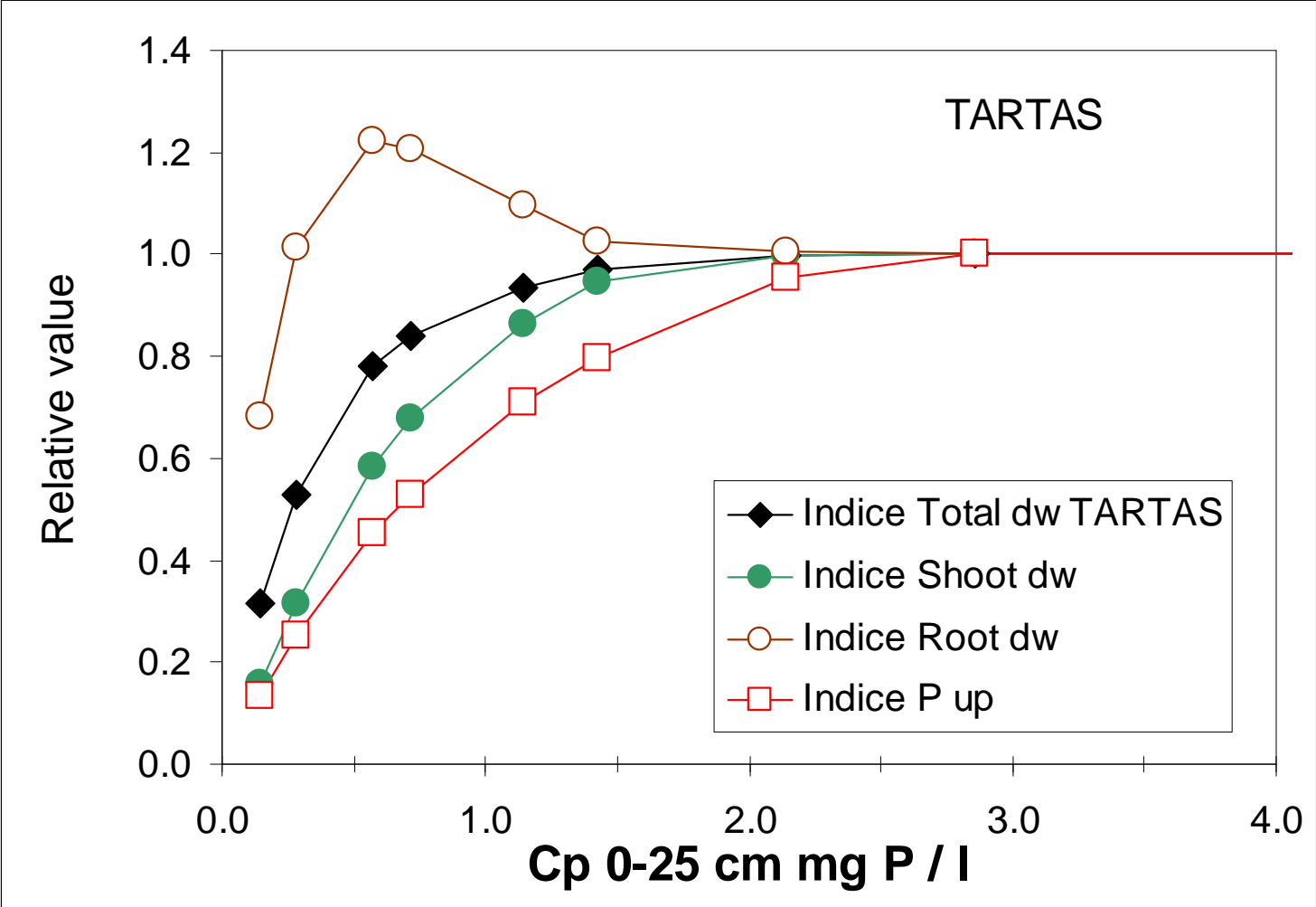


Localisation of cumulated P-uptake after 50 days

# Exemples d'utilisations du modèle intégré de transfert sol-plante de P

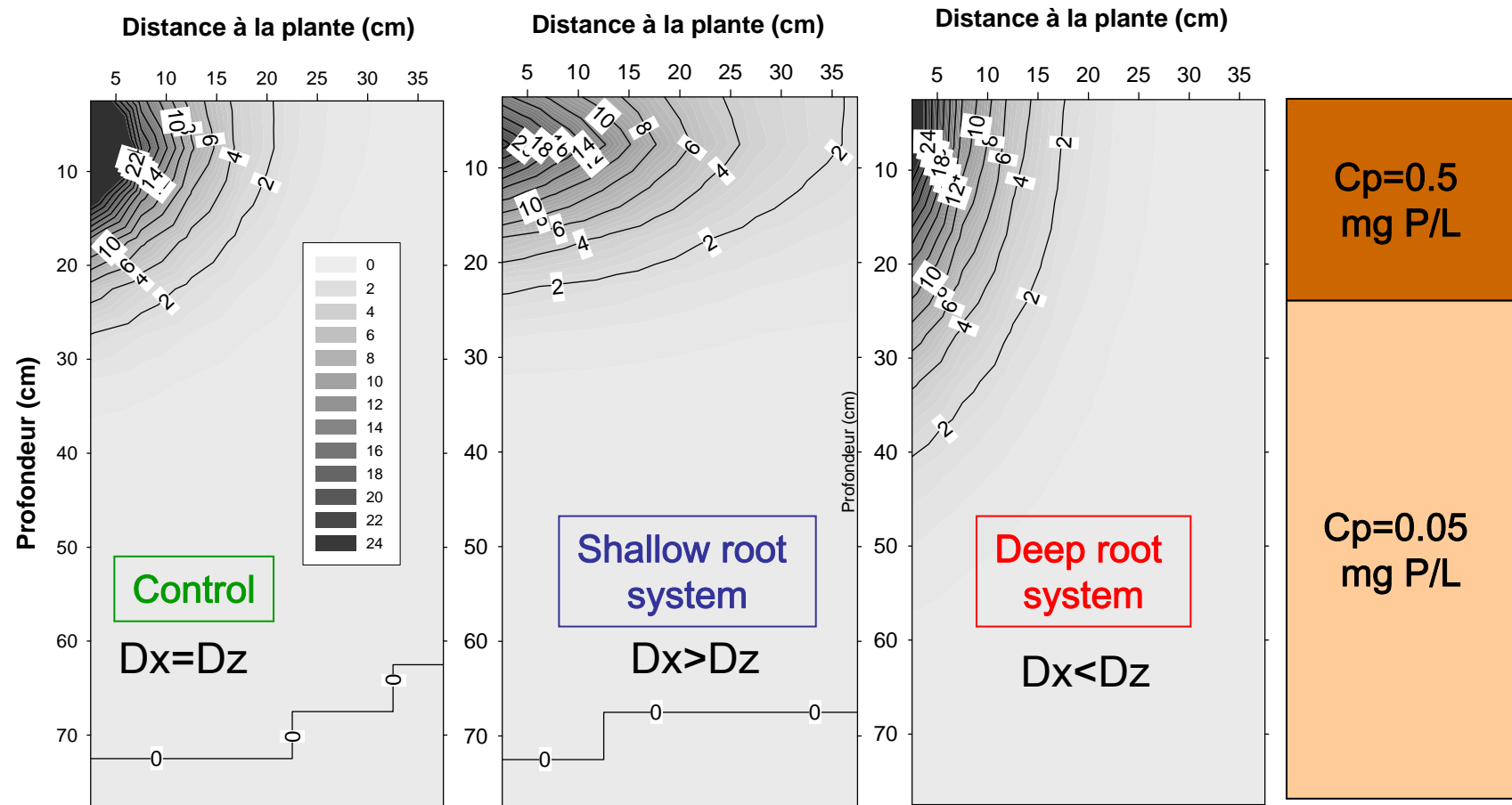
# 1. Simulation de valeurs seuils de $C_p$ dans le sol pour le prélèvement et la croissance du maïs

Prediction of plant response to soil P availability



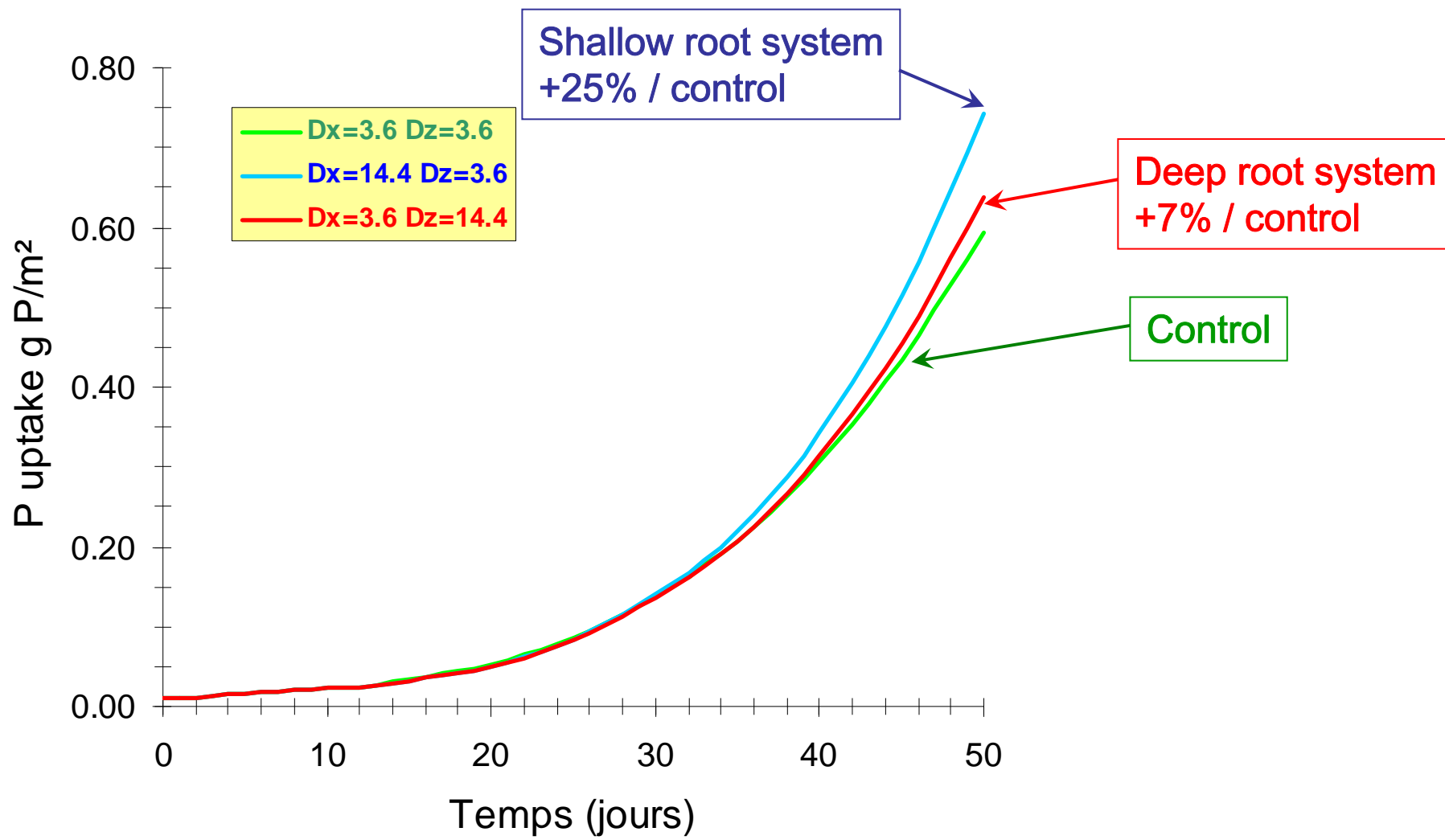
## 2. Analyse par simulation de l'impact de modifications de l'architecture racinaire sur le prélèvement de P

$$\frac{\partial L_{rv}}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial X} \left( D_{L,X} \frac{\partial L_{rv}}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( D_{L,Z} \frac{\partial L_{rv}}{\partial Z} \right) - \lambda_L L_{RV} + Q_L(X,Z,T)$$



Iso-contours des densités racinaires après 50 j de simulation

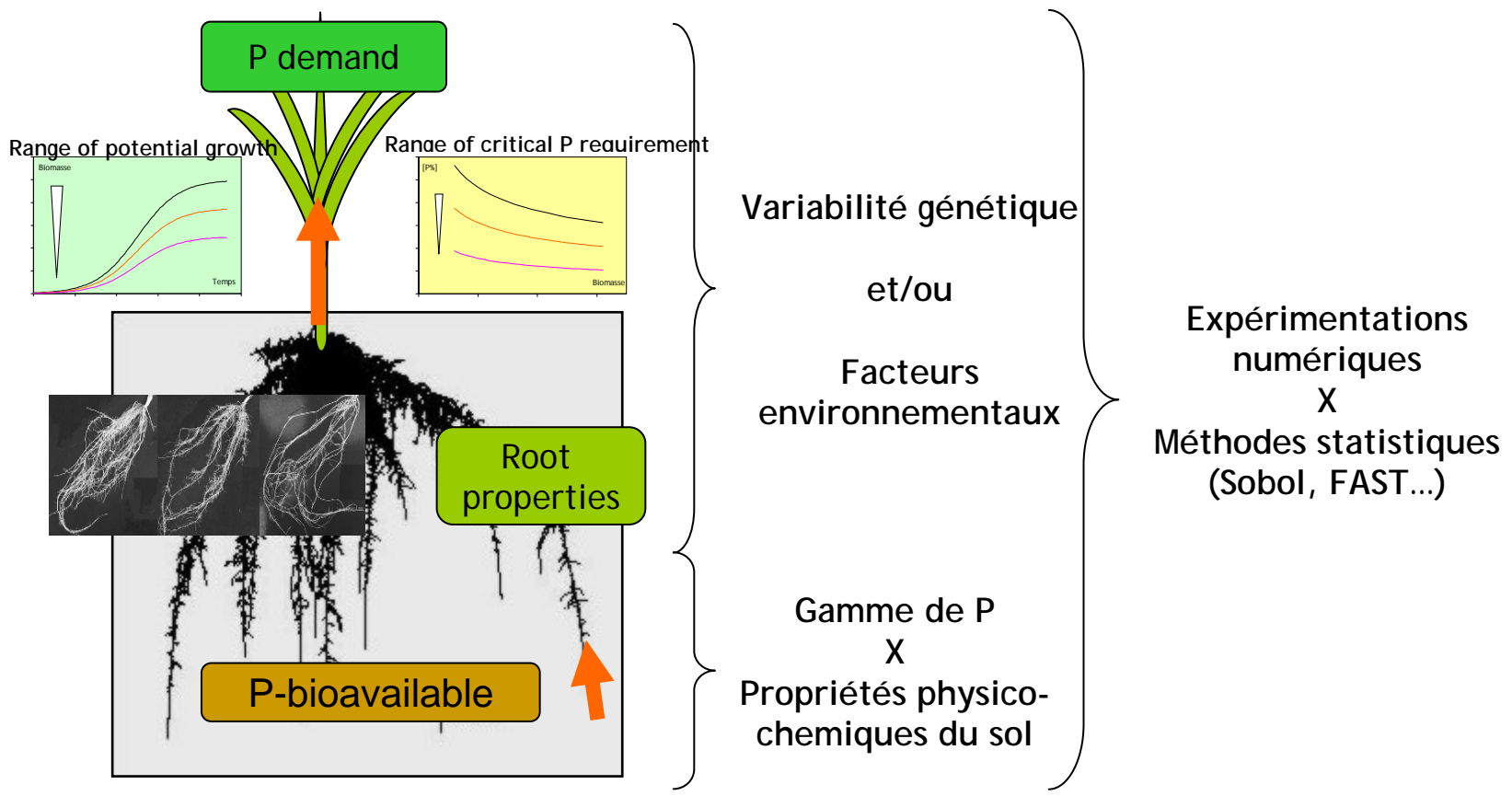
# 2. Analyse par simulation de l'impact de modifications de l'architecture racinaire sur le prélèvement de P



# 3. Utilisation du modèle pour des recherches génériques sur les relations 'architecture racinaire - prélèvement minéral'

- Importance des processus locaux pour la prédiction du prélèvement à l'échelle de la plante entière?
- en faible disponibilité P: Définition d'ideotypes X Fourniture du sol en P

## Analyse de sensibilité globale du modèle de transfert sol-plante



# **III. Les modèles de transfert sol-plante: Intérêt et limites pour le diagnostic et le raisonnement de la fertilisation**

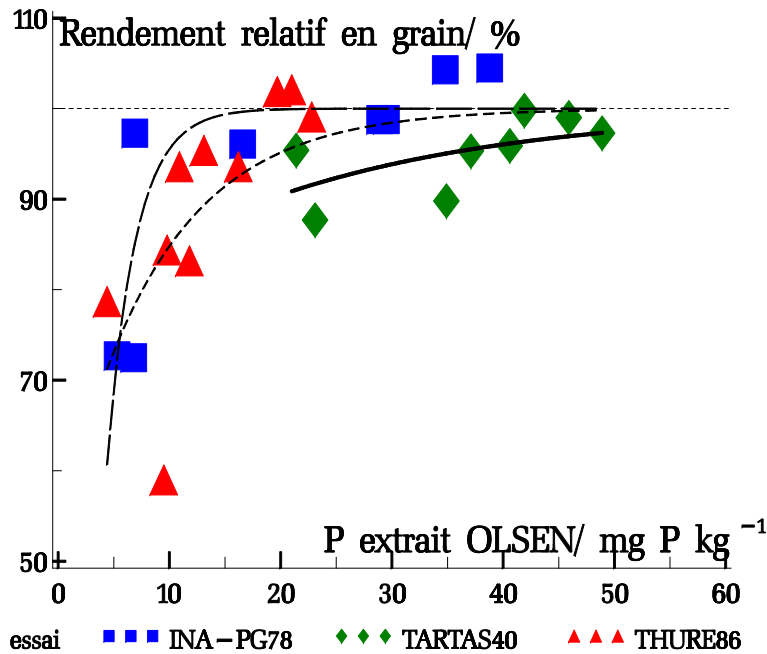


# Les apports des modèles de transfert sol-plante

- **Cadre conceptuel** pour l'étude des interactions complexes au sein du système sol-plante
- **Intégration des connaissances**
- **Outil de prédiction:**
  - Exploration numérique: Analyse de sensibilité, évaluation ex-ante de pratiques
  - Ecart prédictions-observations: définition de questions de recherche
  - Diagnostic et établissement de références améliorés

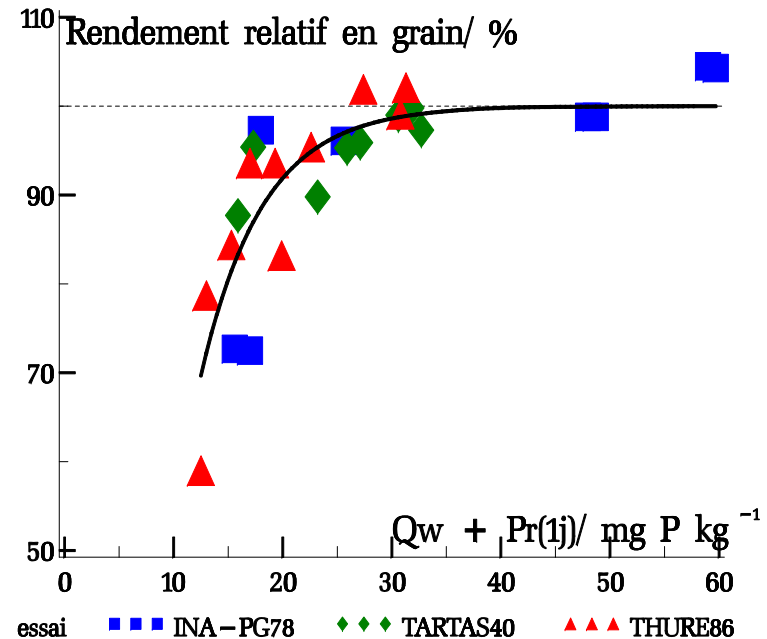
# Exemple définition de nouveaux indicateurs

Modélisation empirique basée sur l'expérimentation



Indicateur de biodisponibilité du P:  
Extractant Chimique

Modélisation mécaniste:  
élaboration d'indicateurs  
intégrateurs pertinents /  
fonctionnement



Nvx Indicateurs de biodisponibilité:  
Cp et réapprovisionnement par phase  
solide

(d'après Morel et al, 2000; Morel et Denoroy: Projet CASDAR RIF)

# Les limites des modèles de transfert sol-plante

- **Dilemmes à gérer:**

- **Généricité et complexité:** Nombre élevé de paramètres, difficiles à acquérir  
→ Difficulté à mettre en œuvre
- **Simplicité:** intégration dans les outils d'aide la décision
- **Validation globale vs validation spécifique**

Un modèle générique prédira en moyenne correctement sur dans une large gamme de situations, mais peut-être mis en défaut dans des situations spécifiques

Modèle générique → Simplification pour application dans un domaine plus restreint (calibration sur essais *in situ* adaptés)

- **Analyse multifactorielle limitée:**

- Malgré leur complexité, les modèles intègrent toujours un nombre réduit de facteurs (C, N, eau, P, K) et considèrent rarement les interactions. Les facteurs biotiques sont peu pris en compte

# Les perspectives

## Poursuite de l'acquisition de connaissances scientifiques

### – Plante:

- Précision de la demande sur l'ensemble du cycle
- Meilleure représentation du système racinaire
- Considération des symbioses
- Réponse multi-contrainte
- Compétition – Facilitation: peuplements hétérogènes

### – Biodisponibilité

- Mécanismes de réapprovisionnement par le sol
- Intégration du pool de P organique: lien avec dynamique microbienne du sol
- Géochimie: interactions en espèces chimiques

### – Intégration

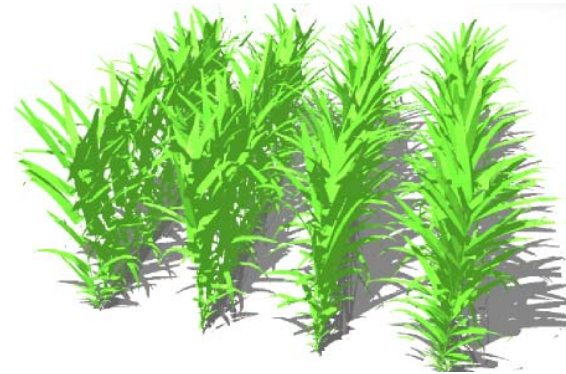
- Prélèvement hydrique x minéraux
- Hiérarchisation des processus

# Les perspectives

- Développement des plates-formes de modélisation:

- Plante Virtuelle: OpenAlea

- Sol Virtuel



Meilleure intégration des processus biologiques – physiques – chimiques et de leurs interactions

Exploration numérique de la complexité du système sol-plante

→ **Systeme de culture**





<http://www.bordeaux-aquitaine.inra.fr/tcem>

**Merci de votre attention**