

La modélisation des relations sol-plante

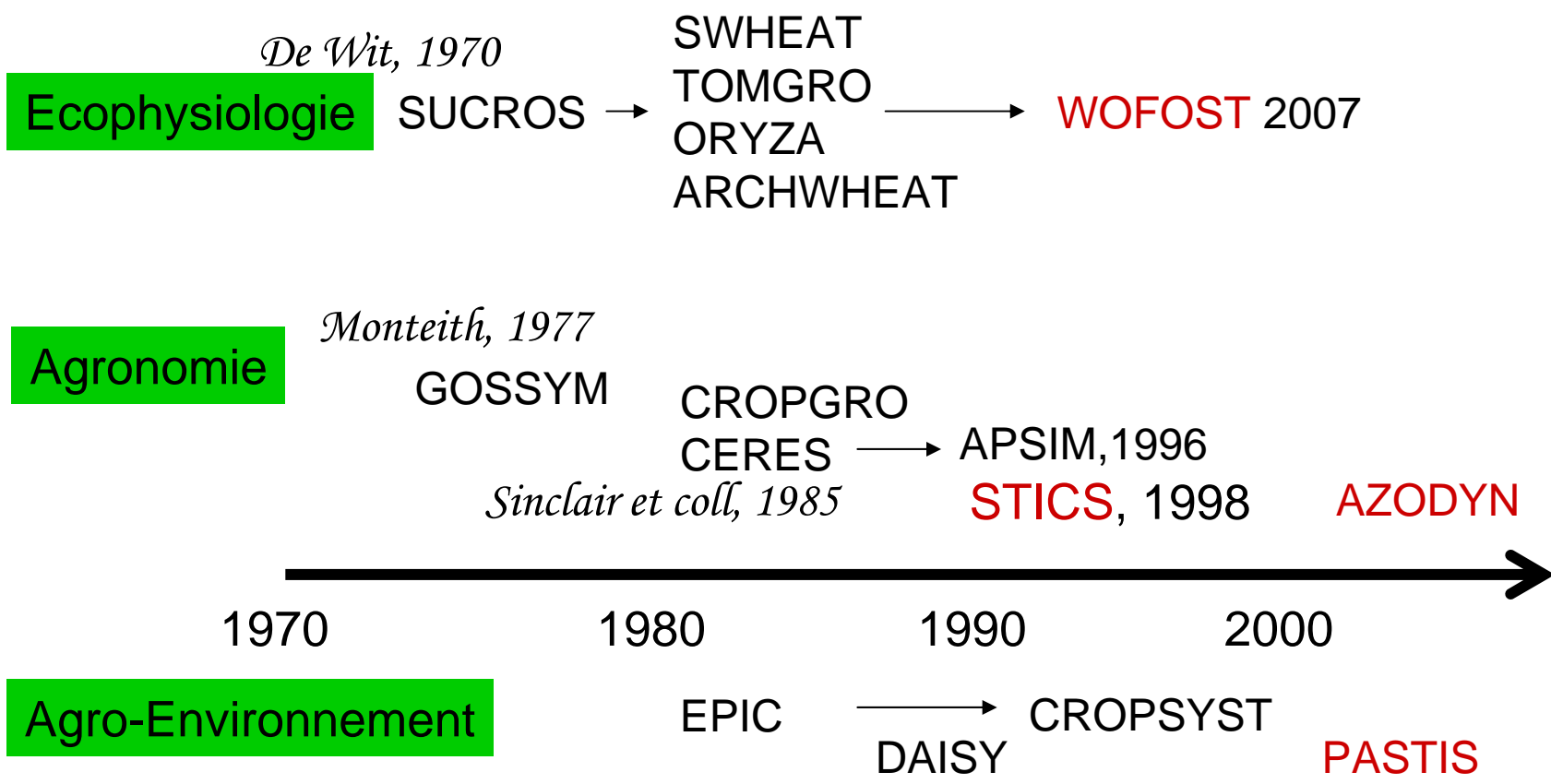
A Mollier et S Pellerin
UMR TCEM INRA-Bordeaux

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

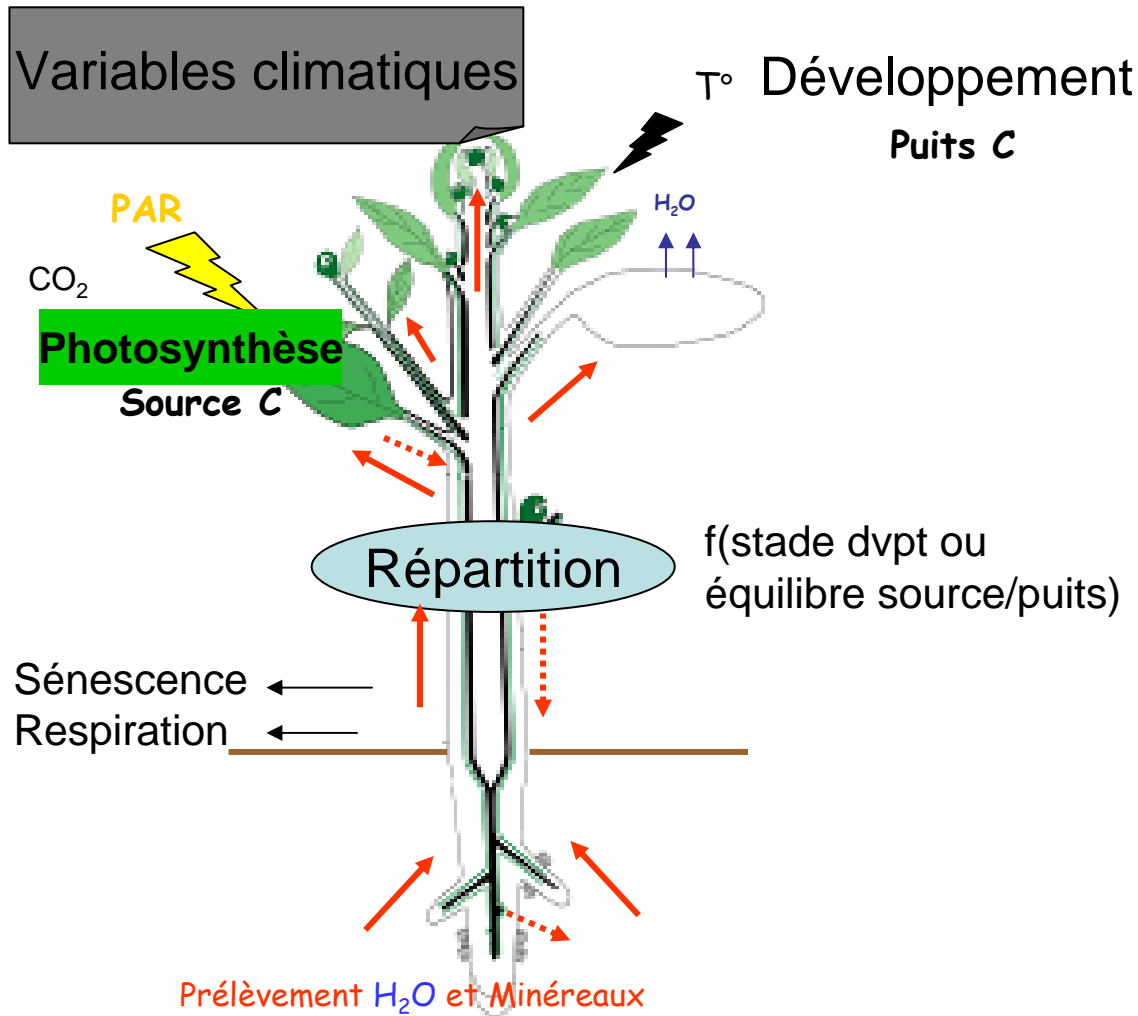
I. Les modèles de croissance des cultures

- 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

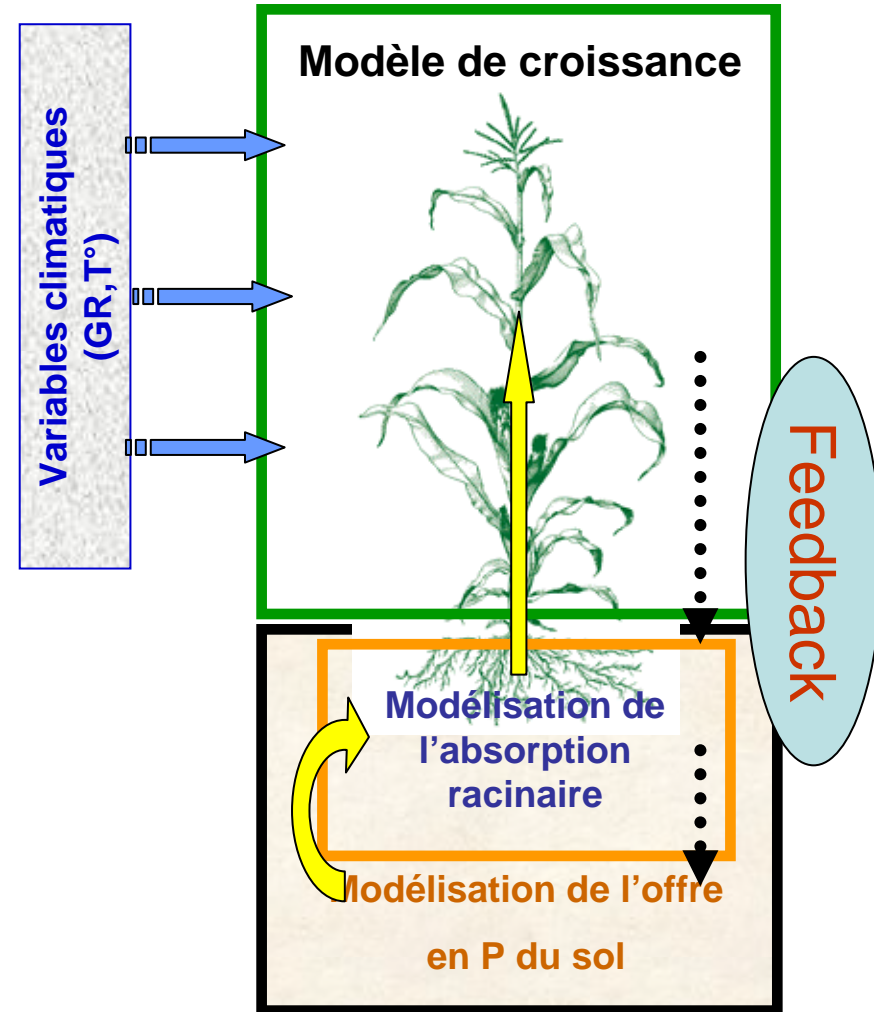
- Maïs
- P

• 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

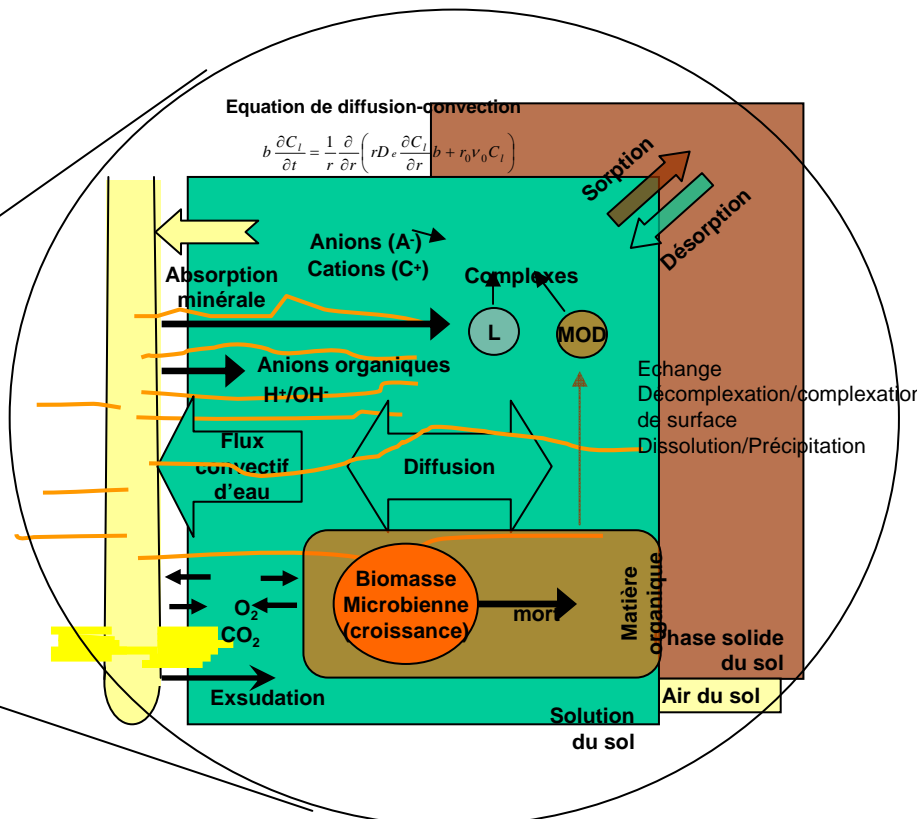
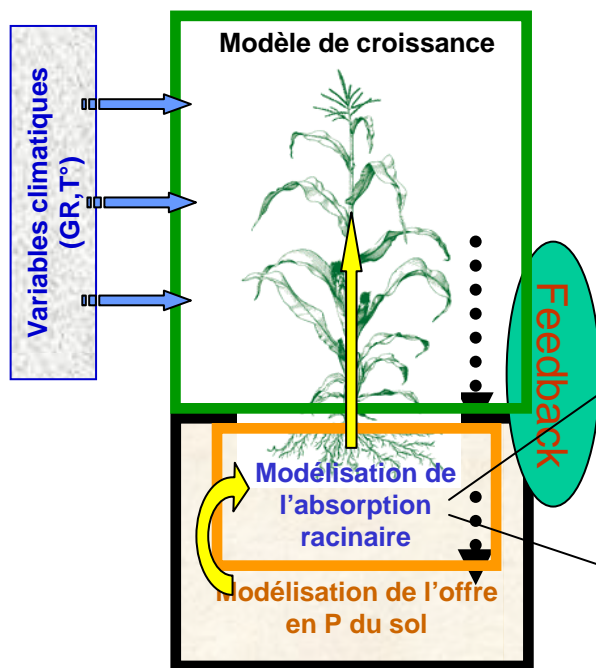
⇒ Intégration de 2 échelles

Le système sol-plante intégré
(m³ 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
(cm³, t=jours, décades)

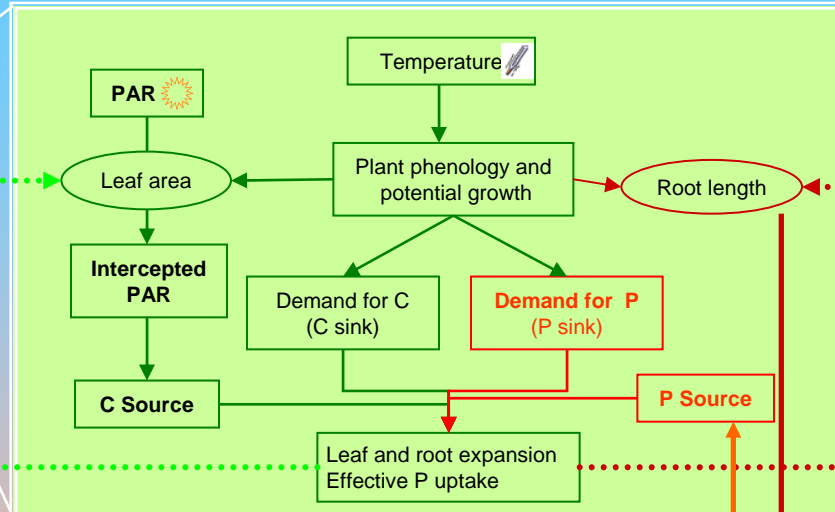
Géochimie + transfert réactif local



(Mollier et al., 2008)

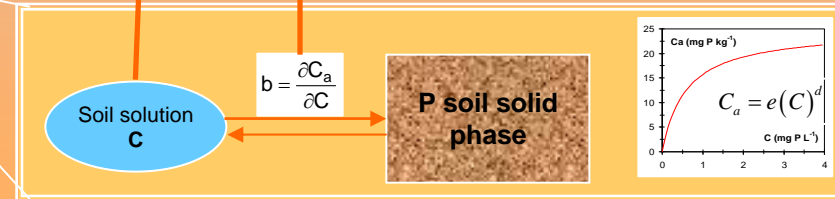
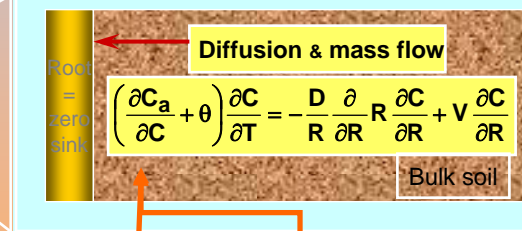
Modélisation intégrée du transfert sol-plante

Integration and feedback



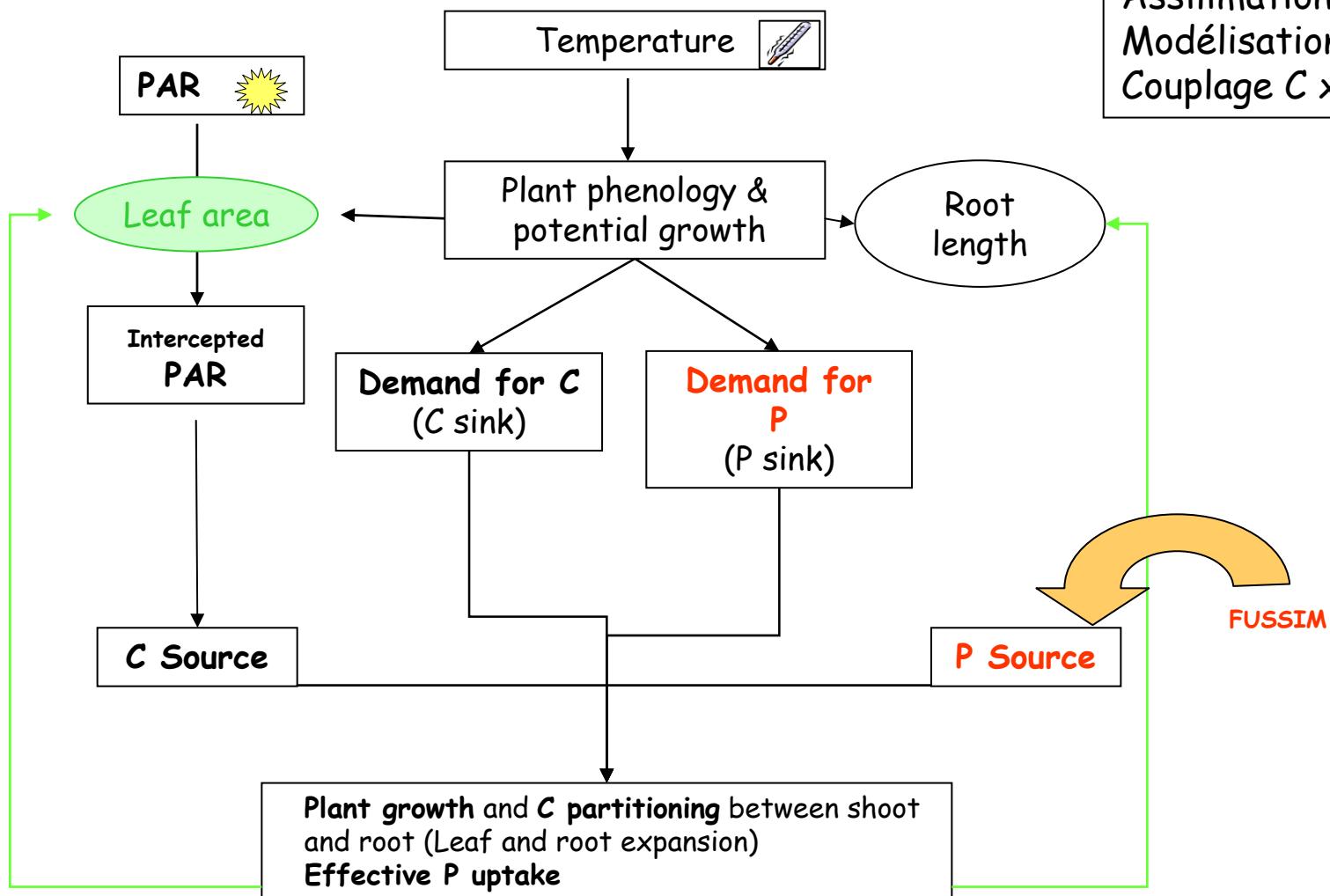
Modèle numérique

Evaluation modulaire et globale



II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

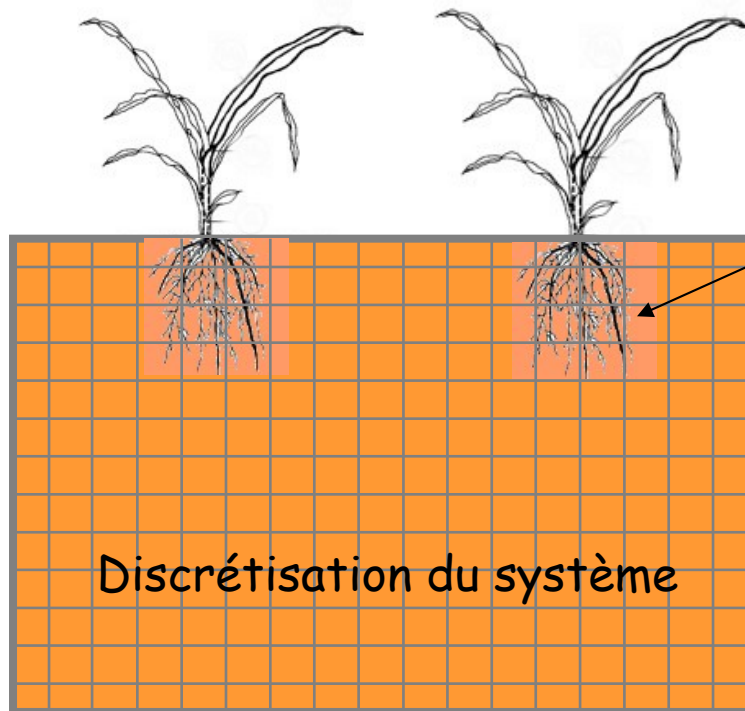
Modélisation de la croissance



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

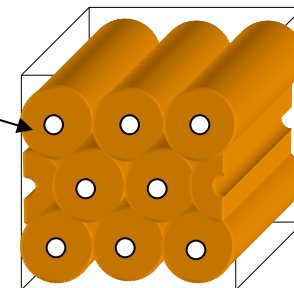
II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

Discrétisation du volume de sol exploré par le système racinaire

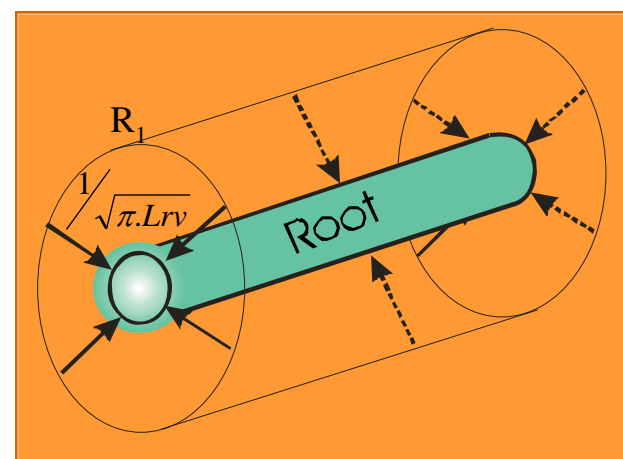


Volume
élémentaire
'Control volume'

$Lrv_{i,j}$



Segment de racine

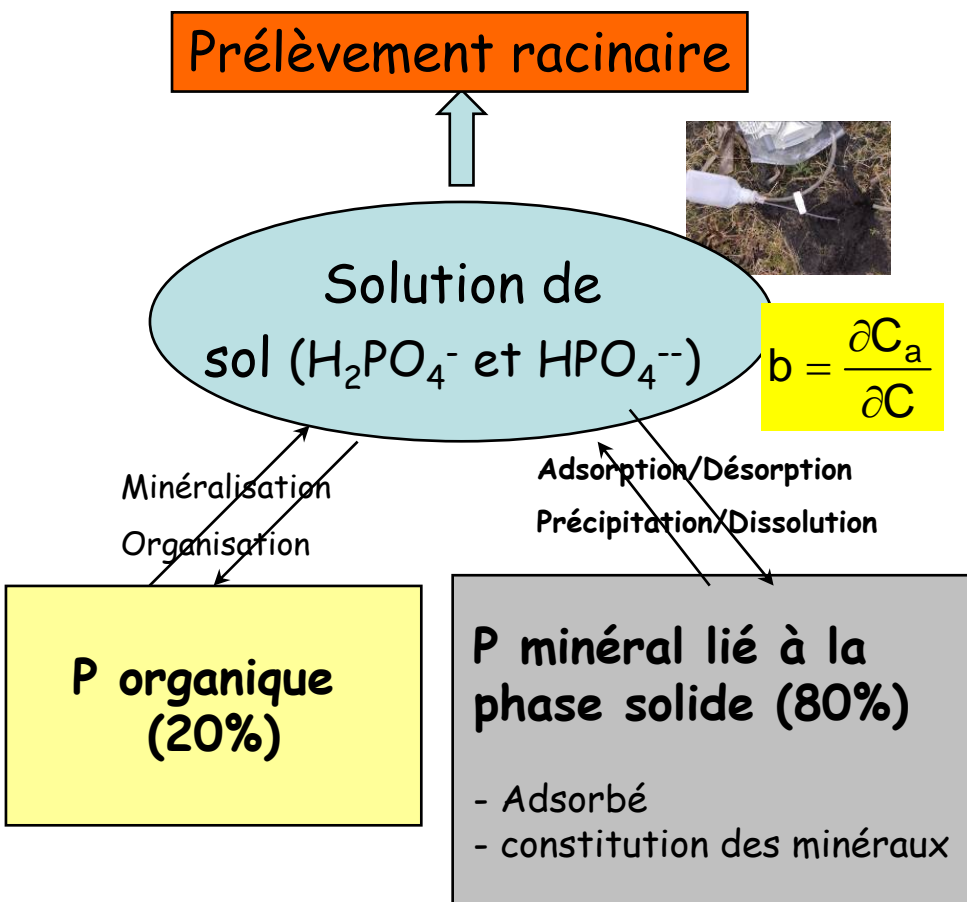


- R_0 : rayon racinaire (cm)
- R_1 : mi-distance moy. entre racines (cm)
- Lrv : longueur de racine par unité de volume de sol (cm cm^{-3})

II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

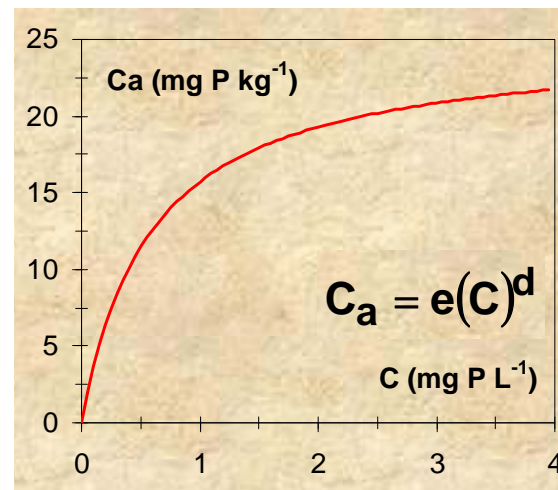
Modélisation de la phytodisponibilité de P

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

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

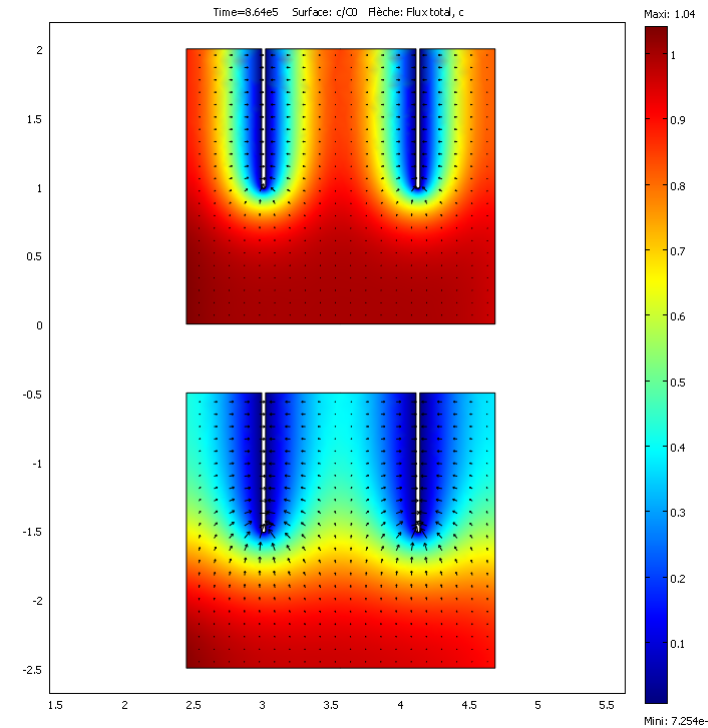
Racines

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

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

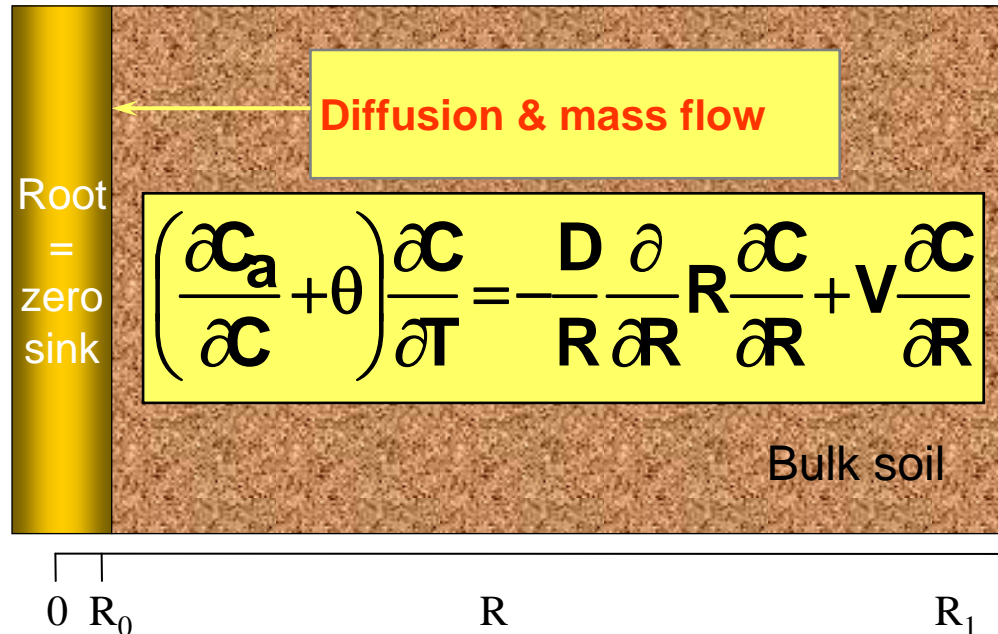
Bouldin; Nye Marriott; Barber Claassen; Willigen; Greenwood....

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 , θ)
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

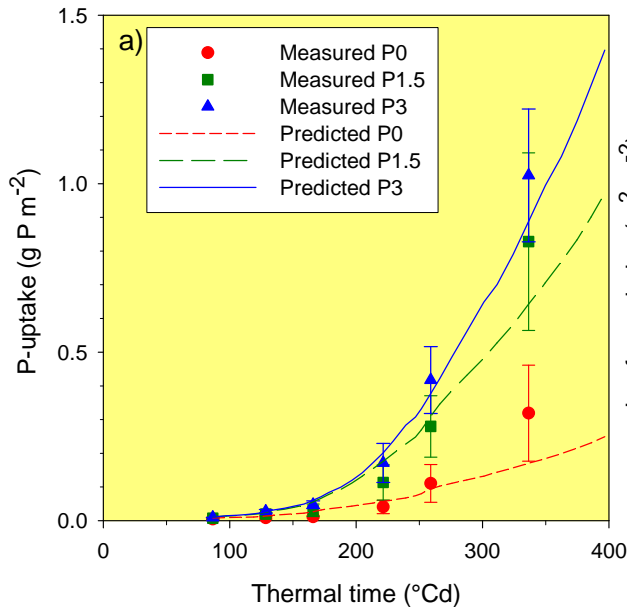
Sol

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

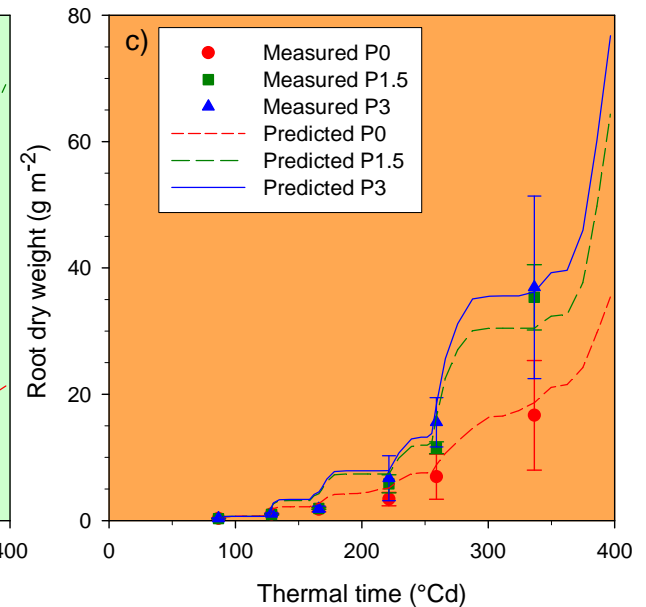
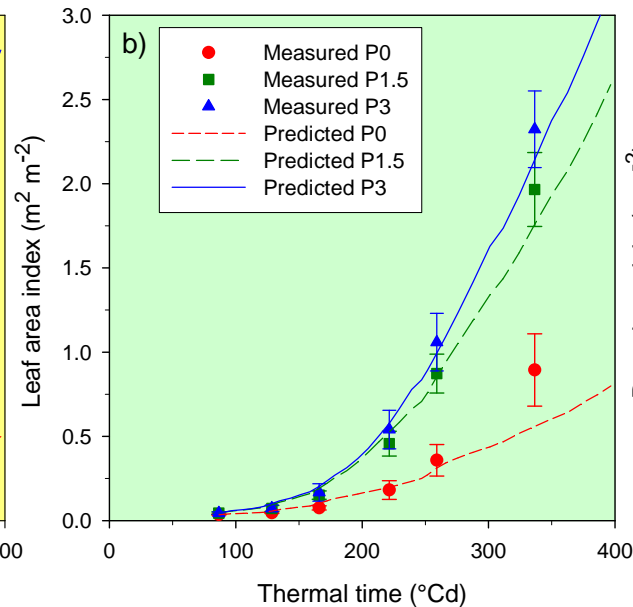
II. Modélisation du transfert sol-plante du phosphore

Field evaluation: Comparison of predicted and observed variables

P-uptake



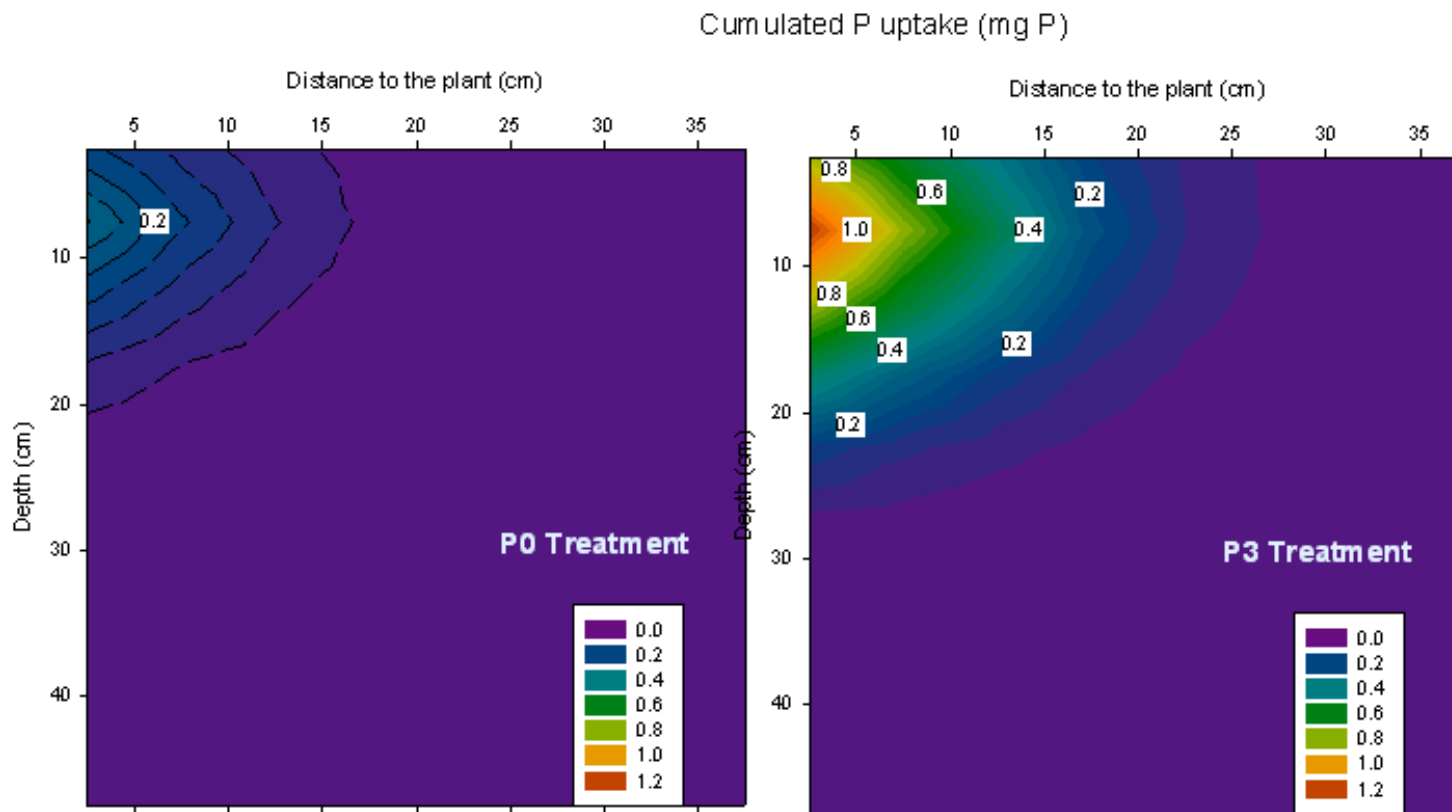
Shoot and Root growth



(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

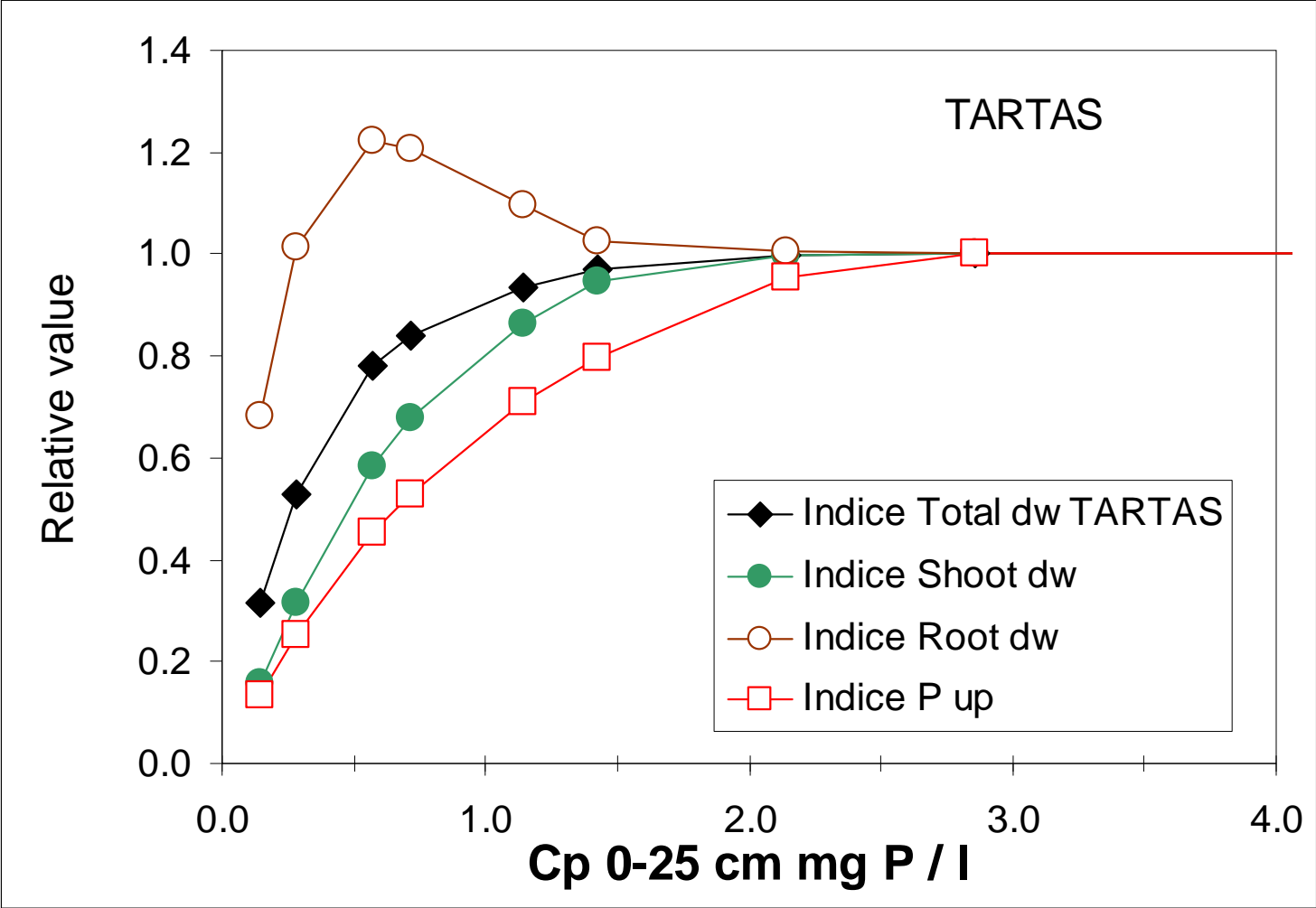


Localisation of cumulated P-uptake after 50 days

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

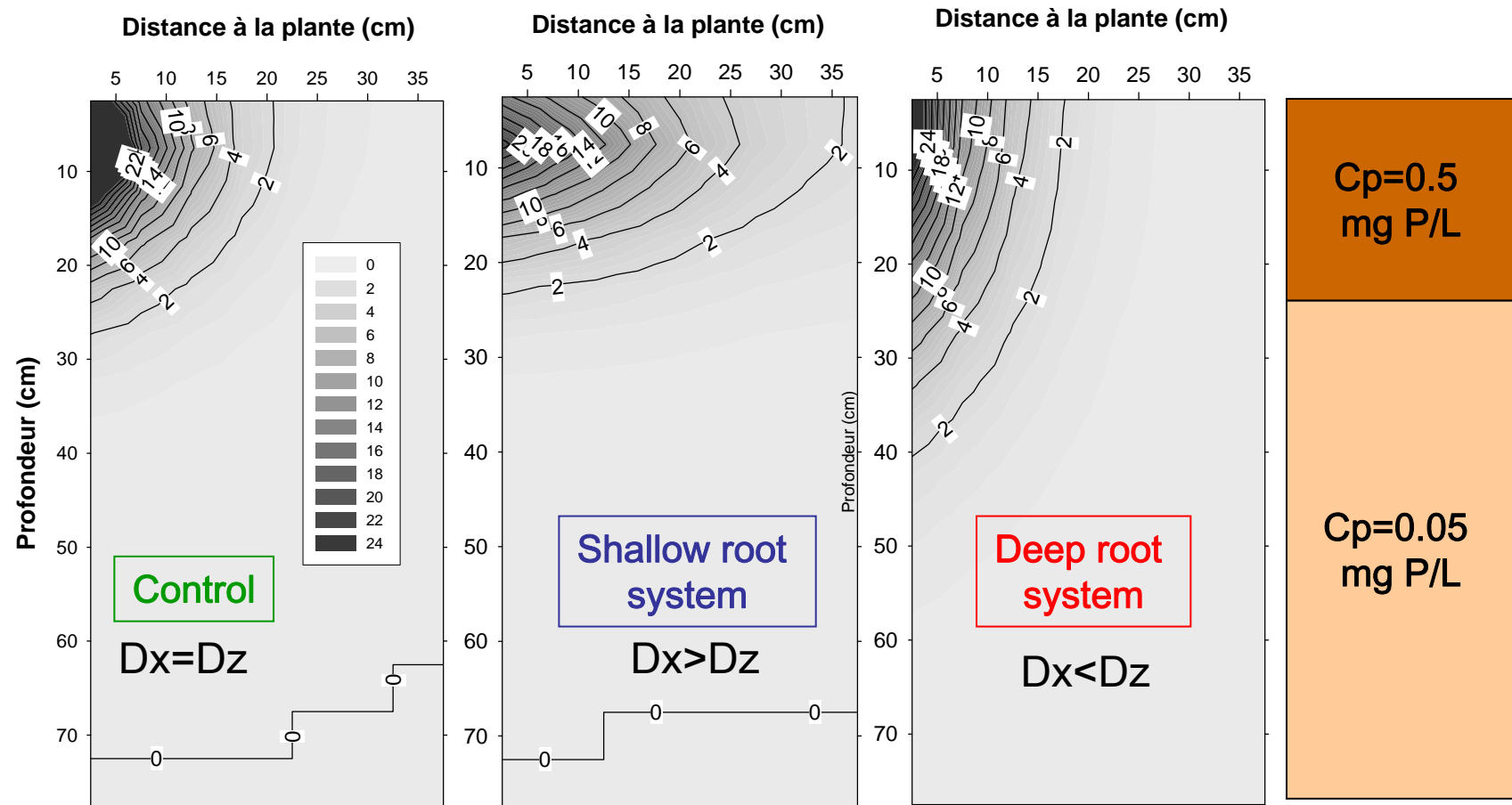
1. Simulation de valeurs seuils de C_p dans le sol pour le prélèvement et la croissance du maïs

Prediction of plant response to soil P availability



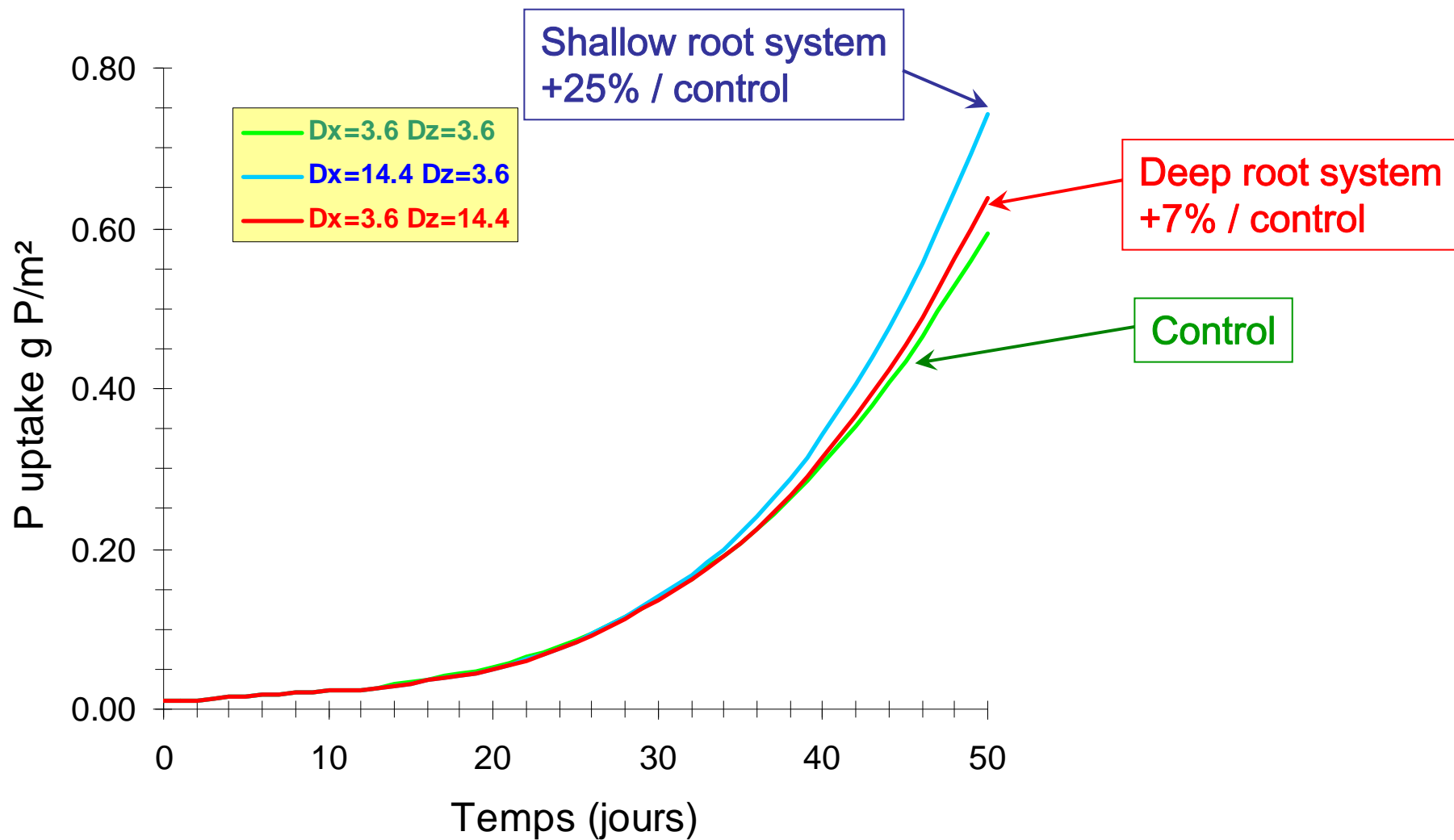
2. Analyse par simulation de l'impact de modifications de l'architecture racinaire sur le prélèvement de P

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



Iso-contours des densités racinaires après 50 j de simulation

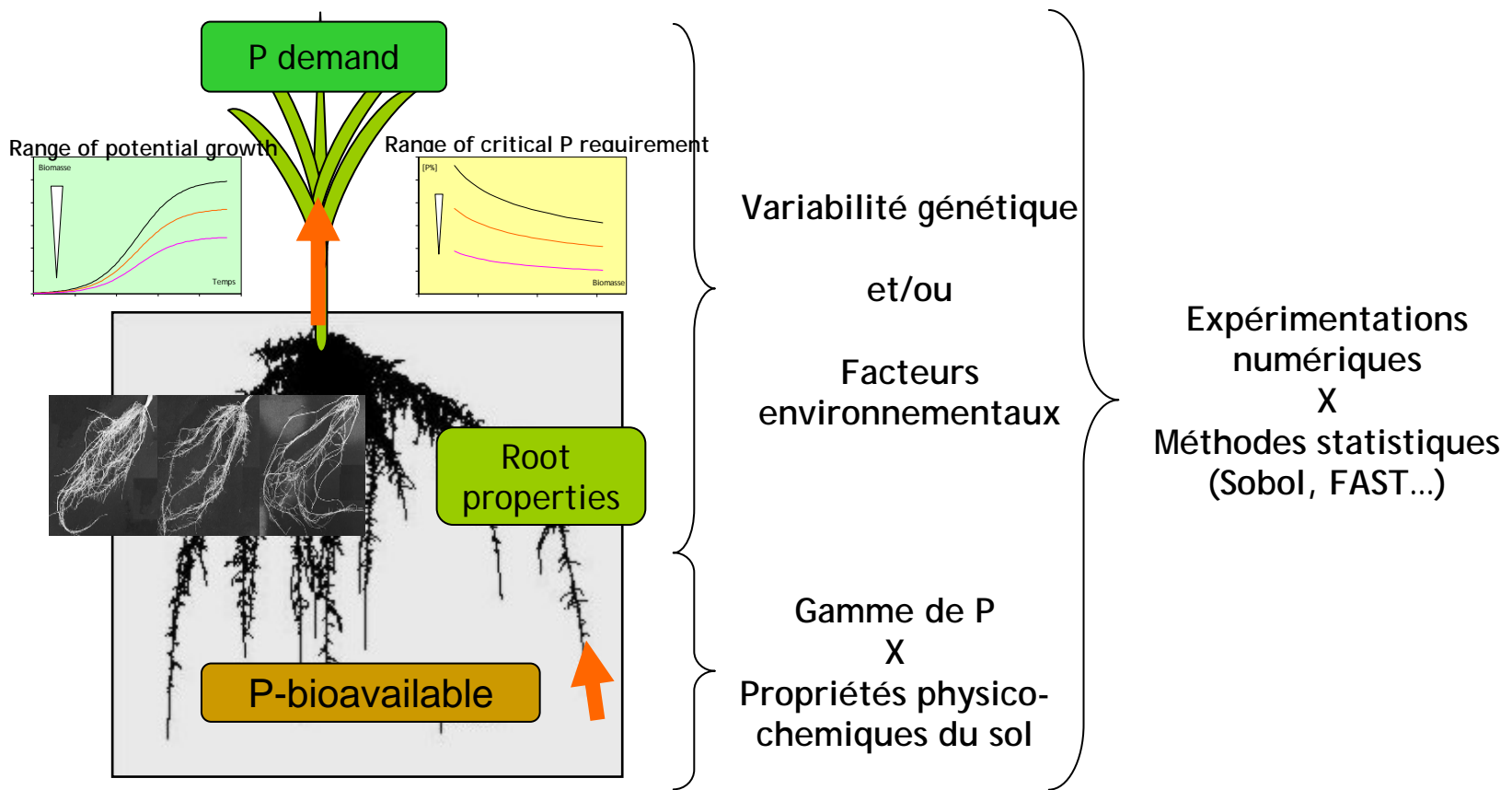
2. Analyse par simulation de l'impact de modifications de l'architecture racinaire sur le prélèvement de P



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



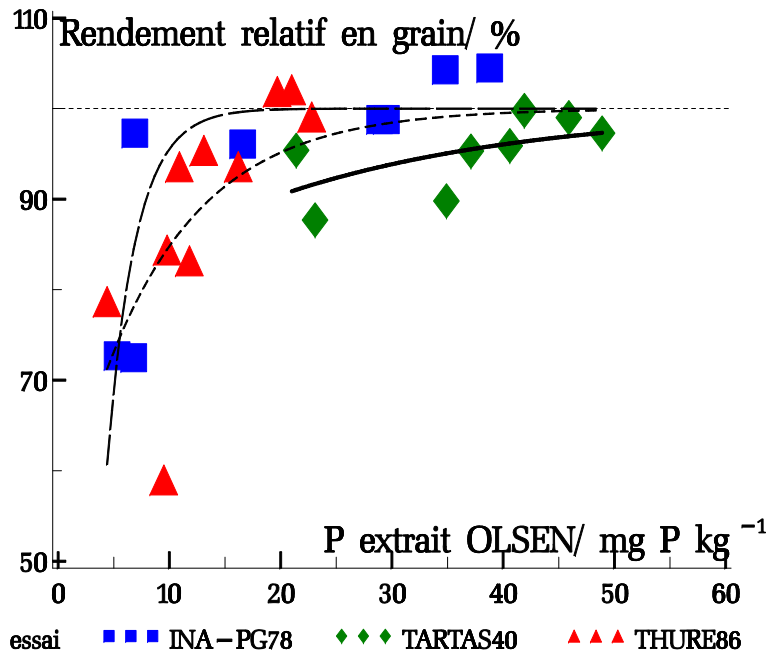
III. Les modèles de transfert sol-plante: Intérêt et limites pour le diagnostic et le raisonnement de la fertilisation

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

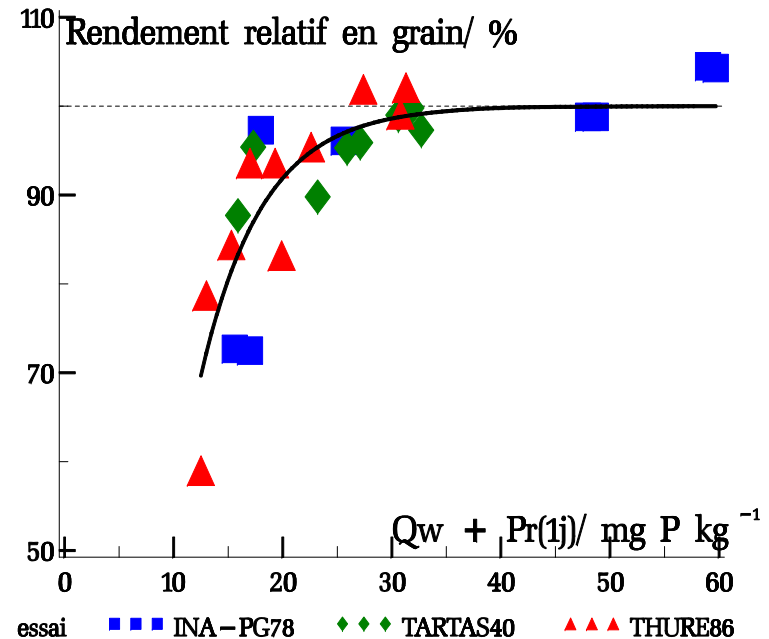
Exemple définition de nouveaux indicateurs

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

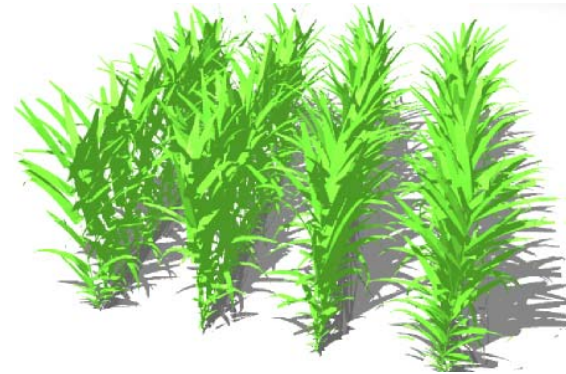
- Prélèvement hydrique x minéraux
- Hiérarchisation des processus

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