

# Les avancées de la recherche dans le domaine de la modélisation des interactions sol-plante en forêt

- REGEFOR, Nancy, 10 au 12 juin 2013
- SAINT-ANDRE Laurent, SAINTE-MARIE Julien, LEGUEDOIS Sophie, FERRY Bruno, LAFOLIE François, MARSDEN Claire, VAN DER HEIJDEN Gregory, DUFRENE Eric, BONTEMPS Jean-Daniel, LEGOUT Arnaud



Forêt tropicale humide

# Contexte général

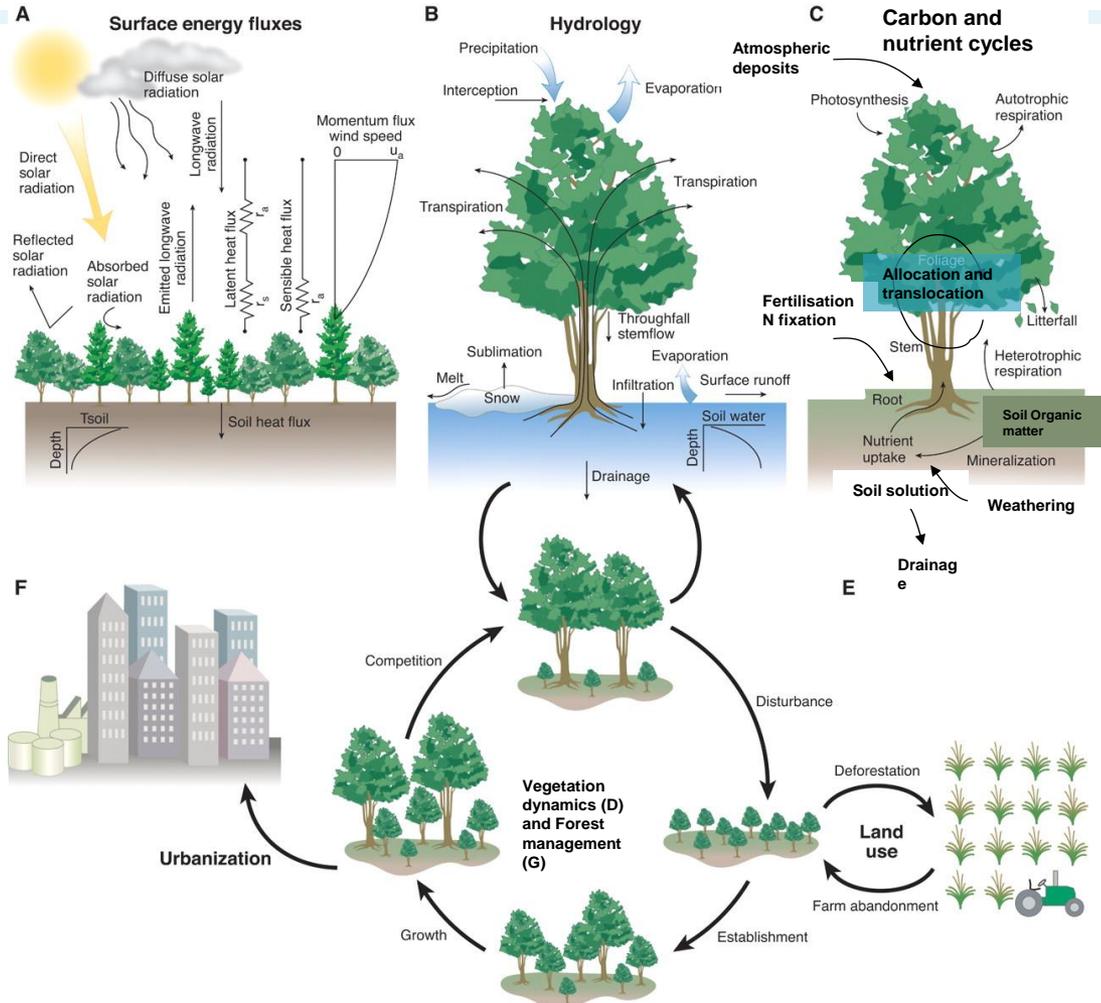
Les écosystèmes forestiers sont

**-par nature des systèmes complexes** (temporellement, spatialement, ...)

**-soumis à une forte demande sociétale**

(production, séquestration du C, biodiversité, quantité et qualité des eaux)

**-impactés** par les changements globaux **mais aussi régulateurs** (atténuation des changements climatiques, interactions avec l'atmosphère, impact des essences sur les cycles biologiques..)





Hêtraie tempérée

# Contexte général

Deux types d'interrogations formulées par les gestionnaires:

(i) **d'ordre économique** (quel itinéraire sylvicole pour atteindre tel ou tel objectif ? en quantité et / ou en qualité de bois ? quelle valorisation de la biomasse ? comment assurer, dans le temps, la pérennité de la production ? etc.) ;



*Nombreux essais sylvicoles, réseaux de placettes permanentes [observation, type RENECOFOR, GUYAFOR] ou expérimentation (GIS Coopérative de données, Plantacomp, réseau amendement, etc..)]*

(ii) **d'ordre écologique** (impact des essences et du régime sylvicole sur la fertilité, la physique, la biologie et la matière organique dans les sols ? impact des changements climatiques et des changements d'usage des terres sur le double sol-plante ?)



*Essais/sites ateliers sur les cycles biogéochimiques, les flux de matière et d'énergies (ex SOERE F-ORE-T), incluant souvent un volet expérimental (ex: exclusion de pluie, manipulation de la matière organique du sol)*



Plantation de Douglas

# Contexte général

Deux types d'interrogations formulées par les gestionnaires:

(i) **d'ordre économique** (quel itinéraire sylvicole pour atteindre tel ou tel objectif ? en quantité et / ou en qualité de bois ? quelle valorisation de la biomasse ? comment assurer, dans le temps, la pérennité de la production ? etc.) ;



*Elaboration de **modèles** de dynamiques forestières à **base dendrométrique** associés à des simulateurs*

(ii) **d'ordre écologique** (impact des essences et du régime sylvicole sur la fertilité, la physique, la biologie et la matière organique dans les sols ? impact des changements climatiques et des changements d'usage des terres sur le double sol-plante ?)



*Elaboration de **modèles** de dynamiques forestières à **base écophysiological et biogéochimique***



Plantations de  
Pins dans les  
Landes

# Contexte général

Ces interrogations rendent nécessaire de:

**Economie**

**Limiter les intrants  
Aider au choix des essences  
Etc...**

Progresser dans la compréhension des processus  
biogéochimiques à différentes échelles

**Ecologie**

**Maximiser les  
services rendus et  
la  
multifonctionnalité  
des écosystèmes**

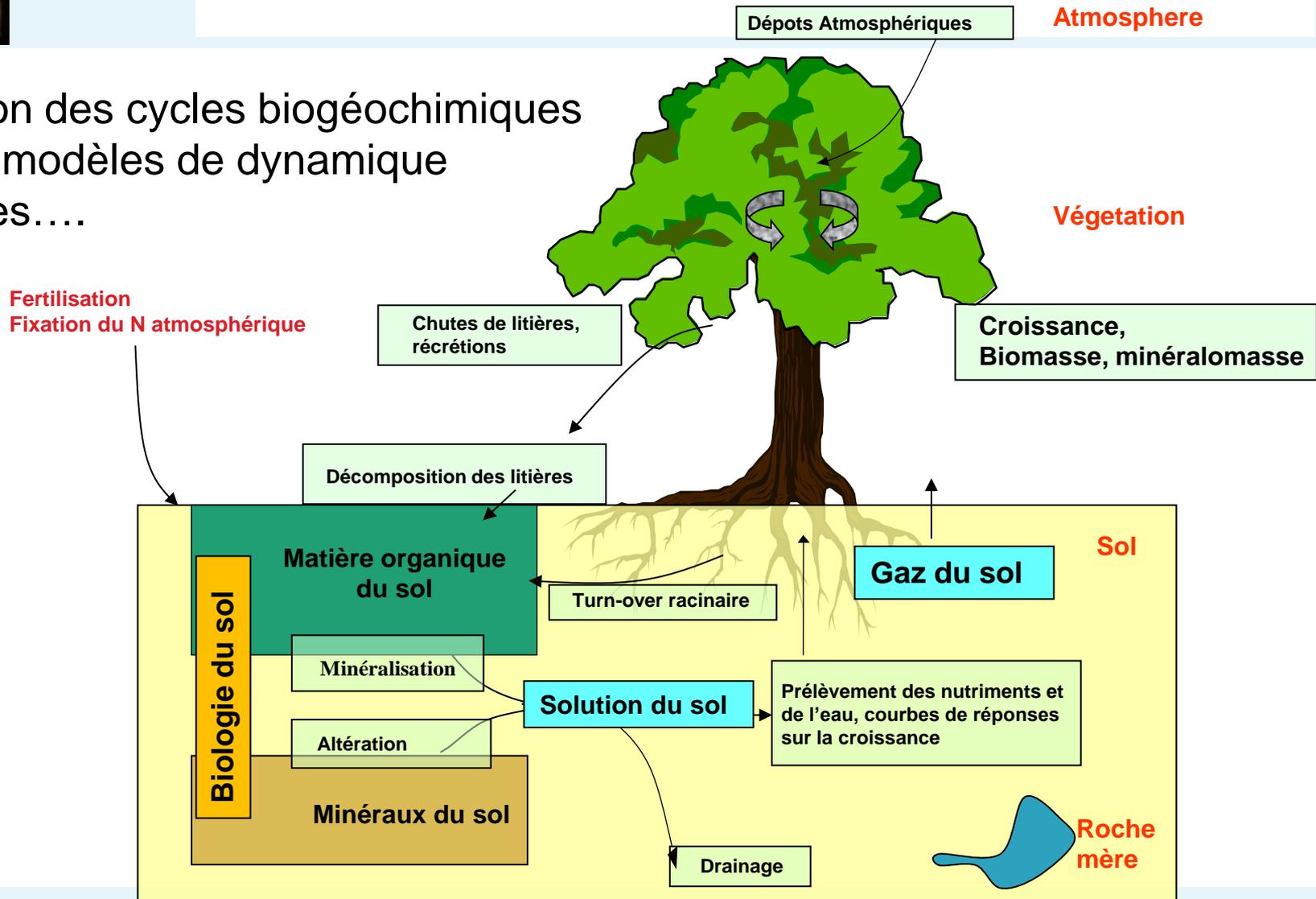
Développer des  
modèles **sol-plante**  
Prenant en compte les  
décisions des  
gestionnaires et le  
climat



Plantations d'Eucalyptus au Congo

# Interaction sol-plante, généralité

Intégration des cycles biogéochimiques dans les modèles de dynamique forestières....

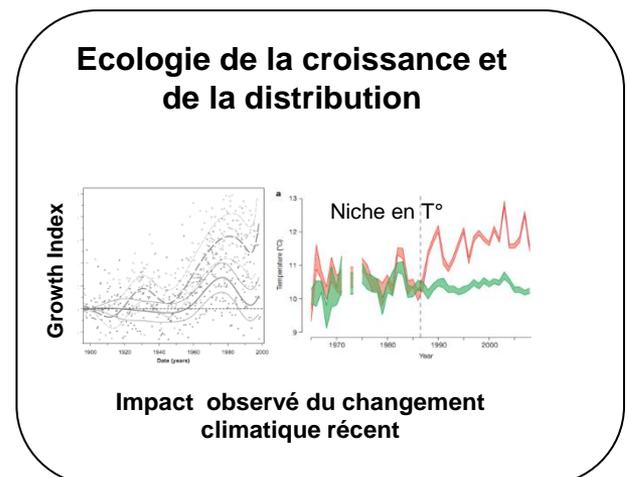
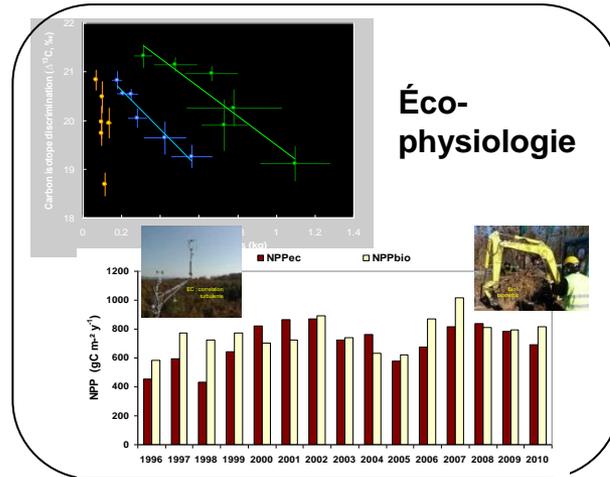




Taillis de Chêne verts

# Interaction sol-plante, quelle réponse disciplinaire?

Nécessité d'allier une démarche disciplinaire forte



**Microbiologie**

**Qui et où?**  
Identifier et déterminer la structure des communautés microbiennes forestières

**Quel rôle ?**  
Analyser la fonction potentielle des microorganismes forestiers

**Quelles interactions et comment?**  
Mesurer et intégrer les interactions entre micro-organismes dans le fonctionnement des sols

**Biogéochimie Sciences du sol**

**Bilan de fertilité**  
(SIA, 2017, AgroparBiochimie, INRA, INRAE et INRAE 2019)

Axe 1 - Apports particuliers  
Axe 2 - Incorporation des résidus dans le biomasse ou dans le sol  
Axe 3 - Processus d'absorption par les plantes  
Axe 4 - Flux et perturbation (démembrement, production, consommation des biochimiques préformés)

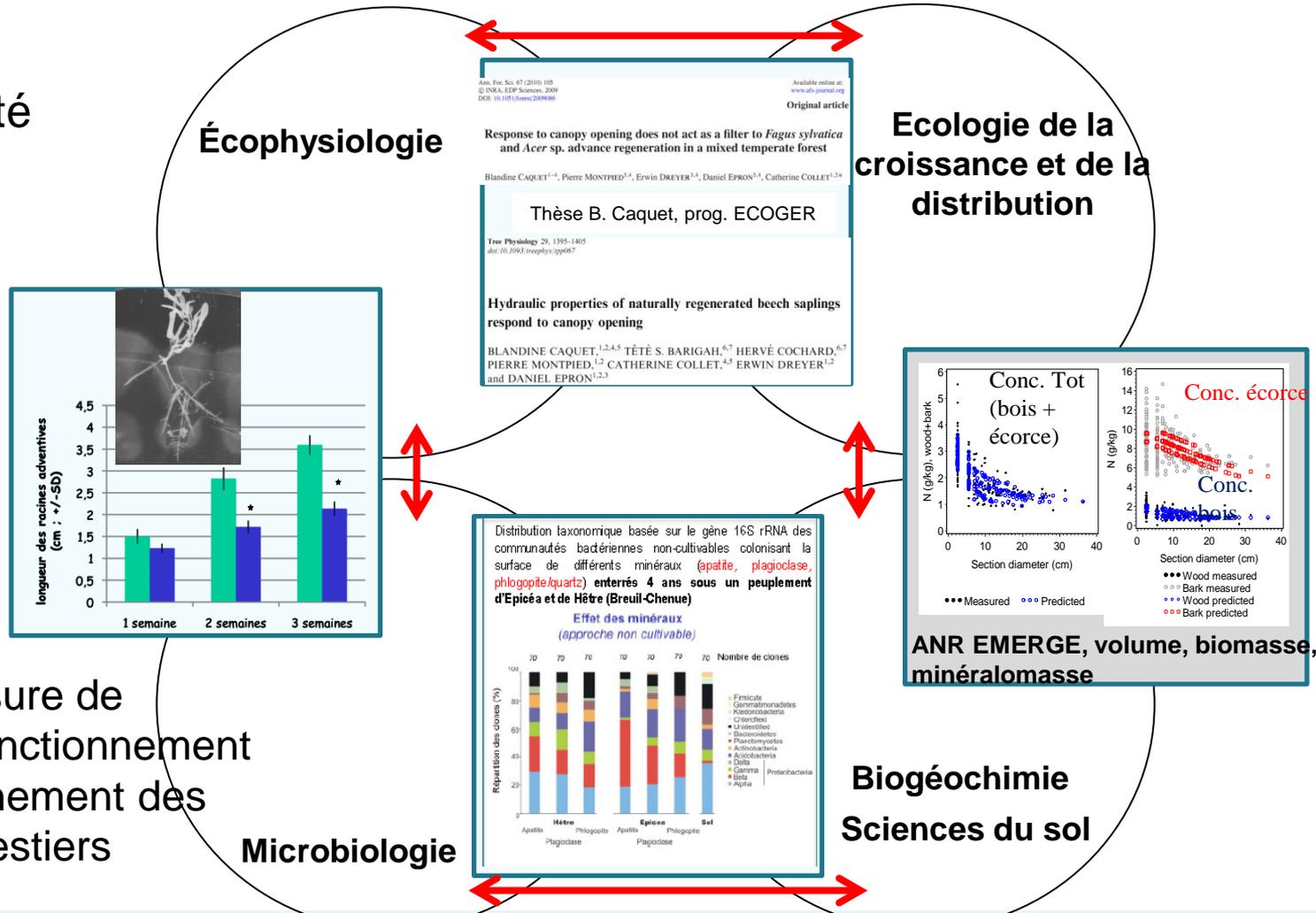
SE Images C/N  $\delta^{13}C$  (‰)  $\delta^{15}N$  (‰)



Plantation d'hévéa

# Interaction sol-plante, quelle réponse disciplinaire?

avec de la pluridisciplinarité



Pour être en mesure de comprendre le fonctionnement et le dysfonctionnement des écosystèmes forestiers

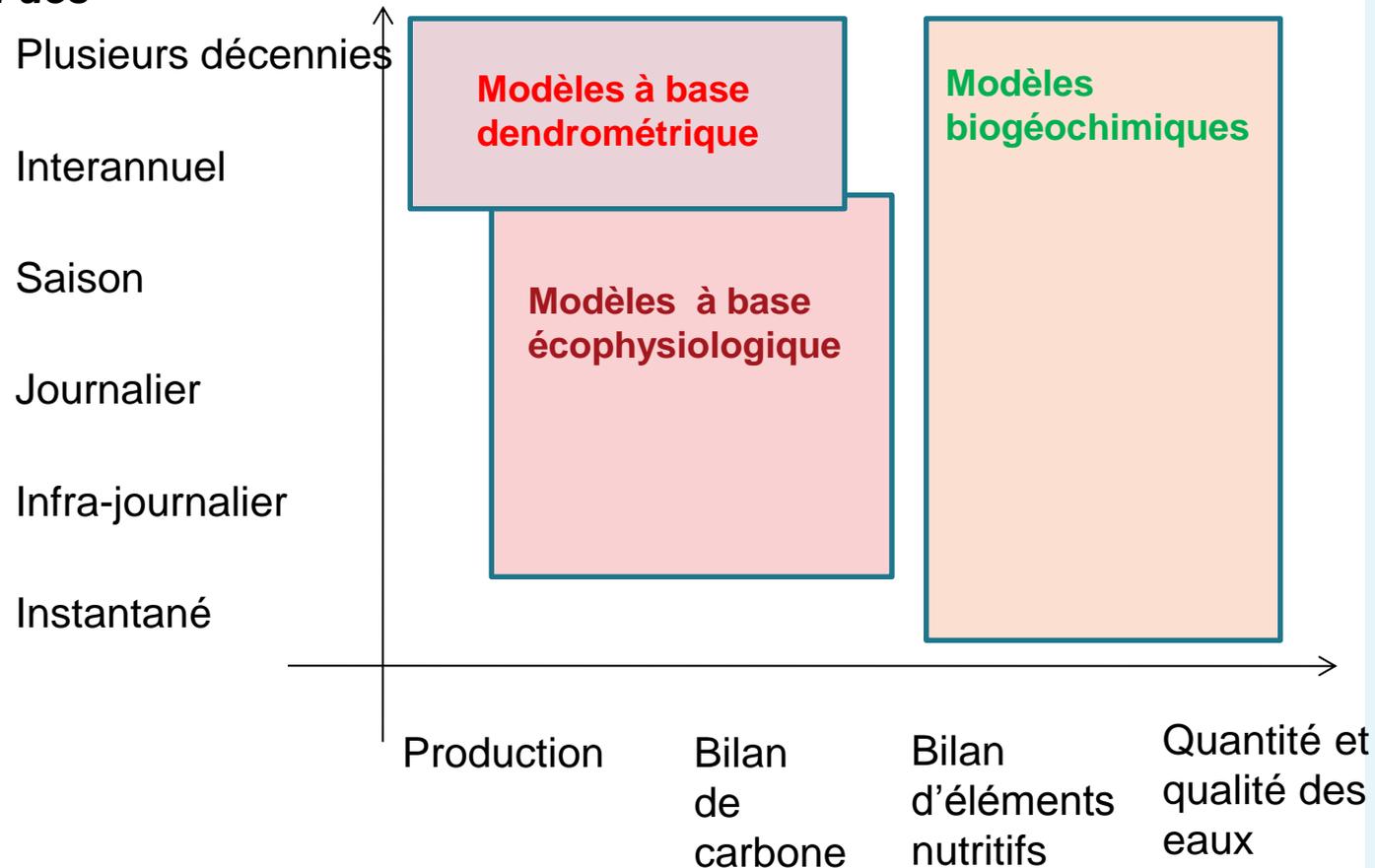


Système Agro-forestier Café - Erythrine

# Interaction sol-plante, quelles approches?

## ***Hierarchisation des processus***

**Continuum d'approches (modèles mécanistes incluant une partie empirique et modèles empiriques dont les équations intègrent des mécanismes sous-jacents)**





Système Agro-forestier Café - Erythrine

# Interaction sol-plante, quelles approches?

**- Réponse directe aux questions des gestionnaires (silviculture explicite)**

**-- Bon couplage Carbone/Eléments minéraux (biomasse / minéralomasse)**

**- Aptes à étudier le fonctionnement des écosystèmes sur la base de données peu coûteuses**

**- Mais pas climat/cycles biogéochimiques - explicites**

Plusieurs décennies

Interannuel

Saison

Journalier

Infra-journalier

Instantané

**Modèles à base dendrométrique**

**Modèles à base écophysiological**

**Modèles biogéochimiques**

Production

Bilan de carbone

Bilan d'éléments nutritifs

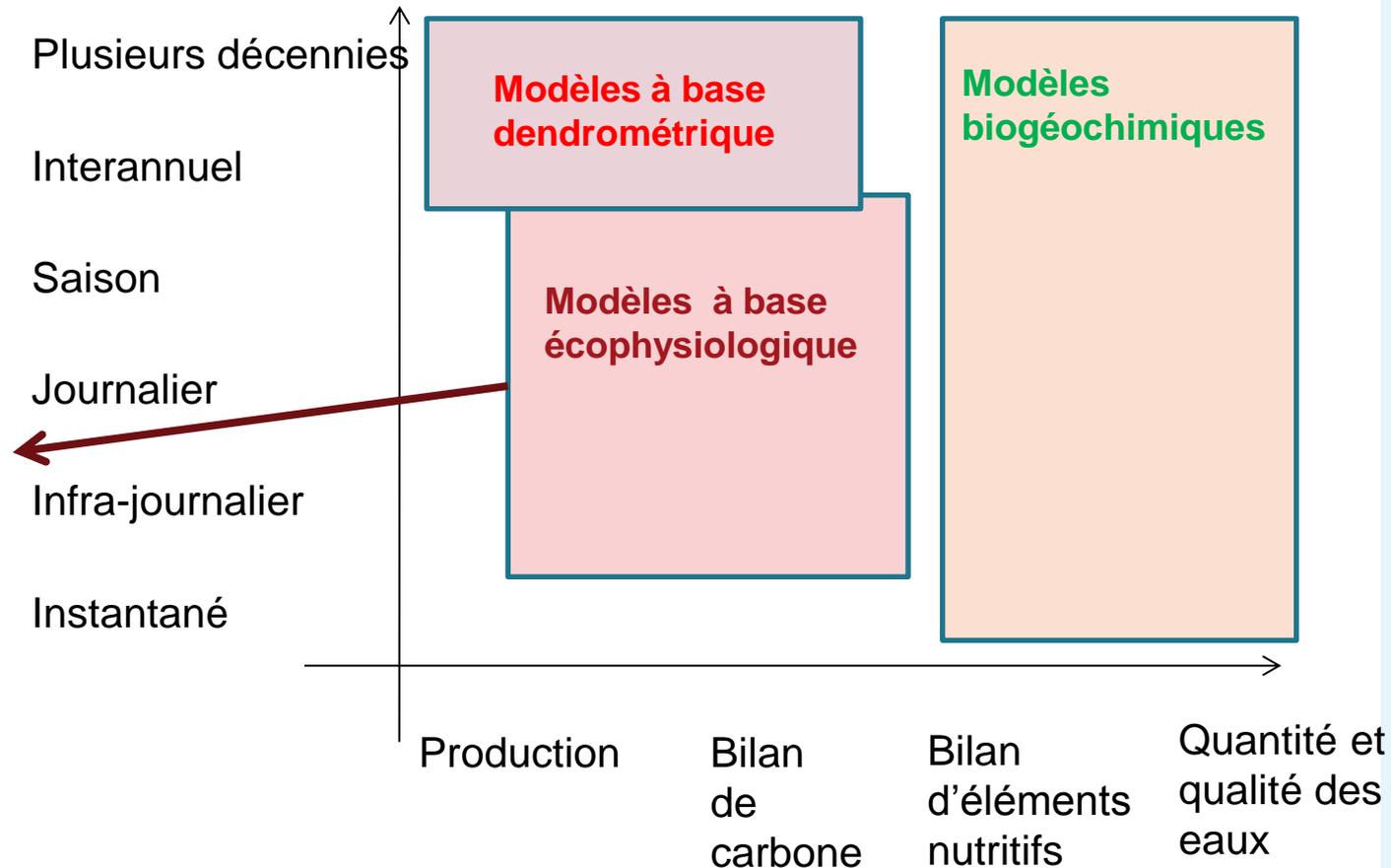
Quantité et qualité des eaux



Système Agro-forestier Café - Erythrine

# Interaction sol-plante, quelles approches?

- **Couplage fonctionnel** entre les cycles C, et Eau
- **Prise en compte explicite** du climat
- **Mais difficulté à répercuter** la fertilité des sols et la gestion forestière sur l'allocation de la biomasse (inter- et intra-arbres)





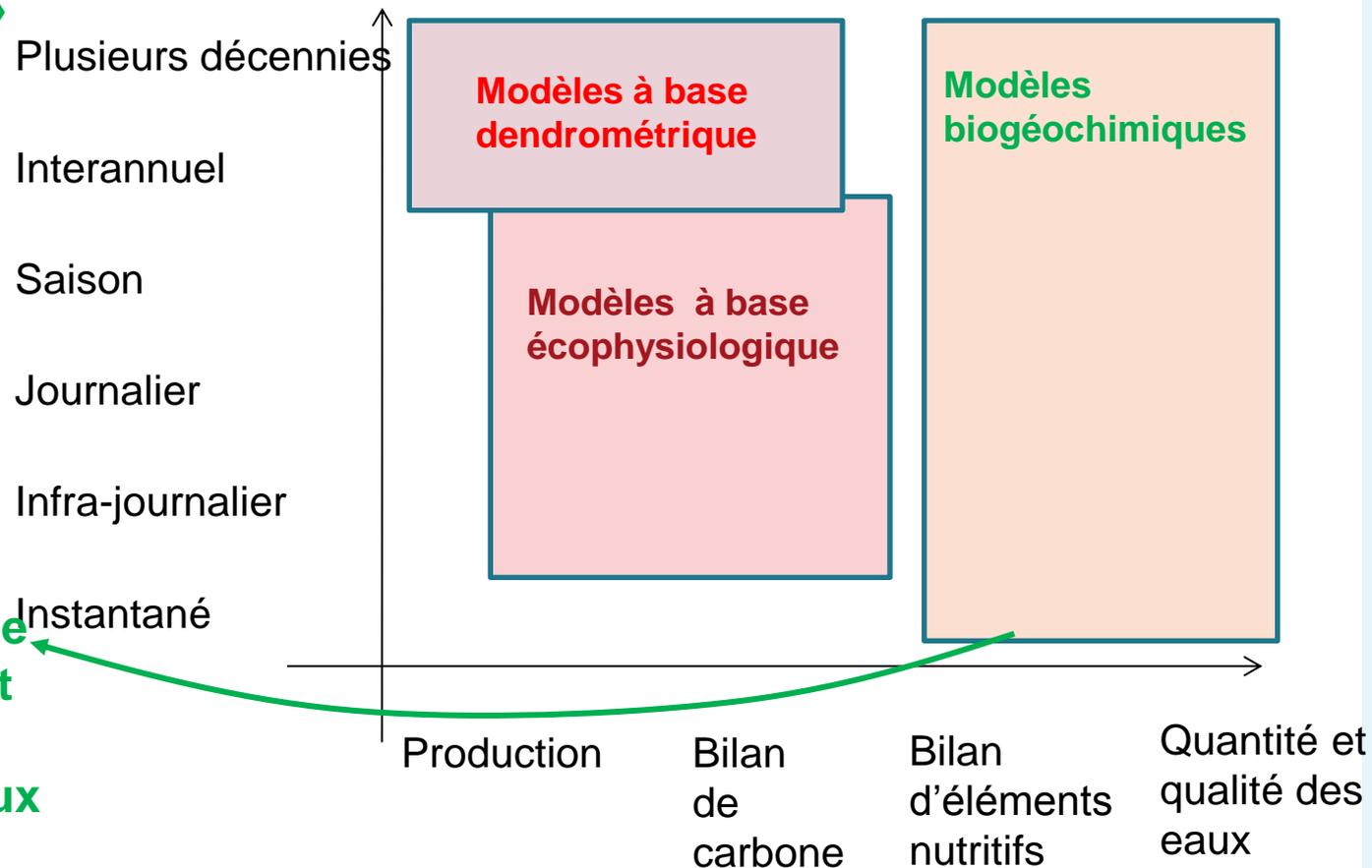
Système Agro-forestier Café - Erythrine

# Interaction sol-plante, quelles approches?

- Bonne description des processus « sol » (altération, minéralisation MOS, chimie, ...)

- Prise en compte explicite du climat et des propriétés du sol

-- Mais difficulté à prendre en compte la biologie et la physique du sol, le prélèvement et l'allocation des éléments minéraux aux organes





Futaie de chêne et sous-étage de charme

# Exemples de modèles

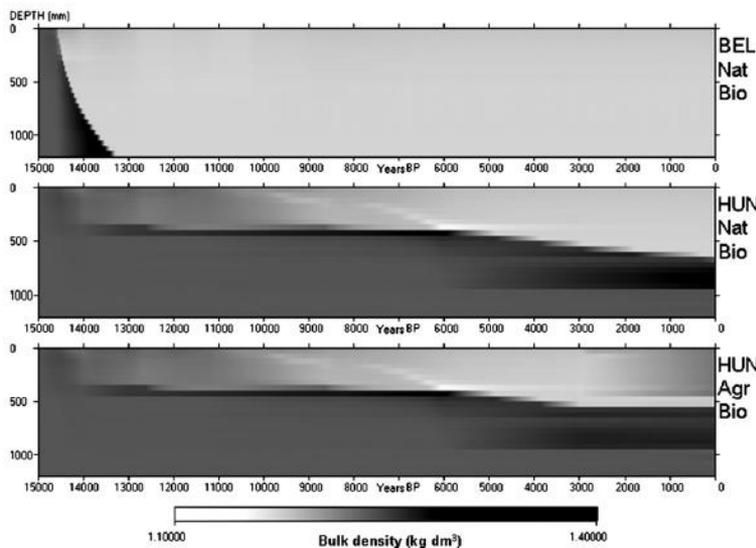
Modèles à base dendrométrique

Modèles biogéochimiques

Modèles à base écophysiole

## Les modèles de mécanique des sols et géomorphologiques

- P. ex. : WEPP, EPIC, Root Bundle Model, SoilGen
- Modélisation de l'érosion des sols, stabilité des pentes ou la pédogenèse
- Echelles temporelles longues (jusqu'au siècle et >)
- La végétation rarement intégrée, si oui de façon frustrée (entrée d'une succession végétale) ou alors en terme de production
- Description qui peut-être détaillée de la dynamique des sols (p. ex. évolution de la texture dans SoilGen)



Sortie de SoilGen1 pour 3 sites différents (BEL Nat Bio, HUN Nat Bio et HUN agr Bio). Chronoséquence d'évolution de la densité apparente en fonction du temps (x) et de la profondeur (y). Finke et Hutson (2008)



Mélange pin d'Alep – Chêne vert

# Exemples de modèles

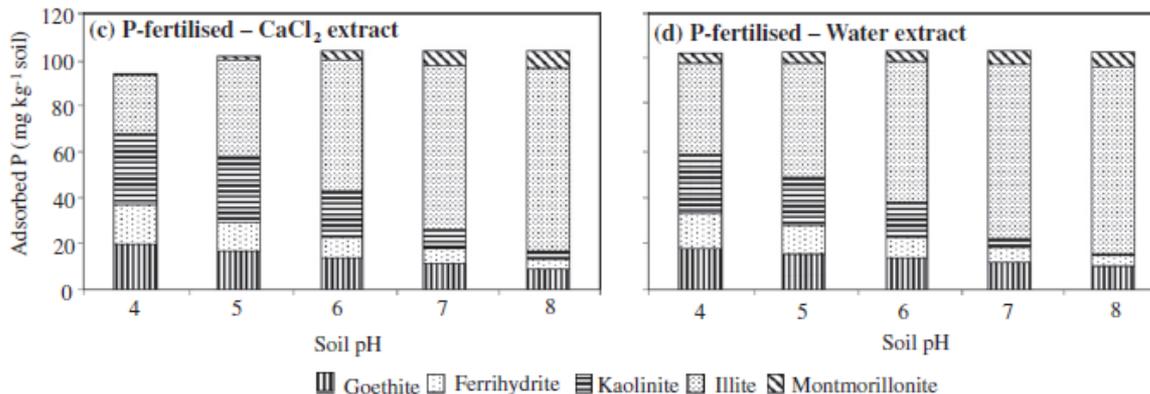
Modèles à base dendrométrique

Modèles biogéochimiques

Modèles à base écophysiole

## Les modèles biogéochimiques

- P. ex. : PHREEQC, Visual3P, CHESS, WHAMM, MIN3P, Nucm
- Composition chimique/réactivité chimique/transport réactif dans les milieux poreux (dont le sol)
- Description de chaque réaction chimique
- Les interactions avec les plantes ne sont représentées que de manière implicite (pas de modélisation mécaniste du prélèvement)



Sortie MINTEQ

Simulated concentration of P adsorbed onto the different soil minerals as a function of soil pH in the control treatment (a and b) and in the P-fertilized (c and d) treatment. Results obtained with the two extractions, CaCl<sub>2</sub> (a and c) and water (b and d), are shown. Devau et al. (2011)



Forêt tropicale humide

# Exemples de modèles

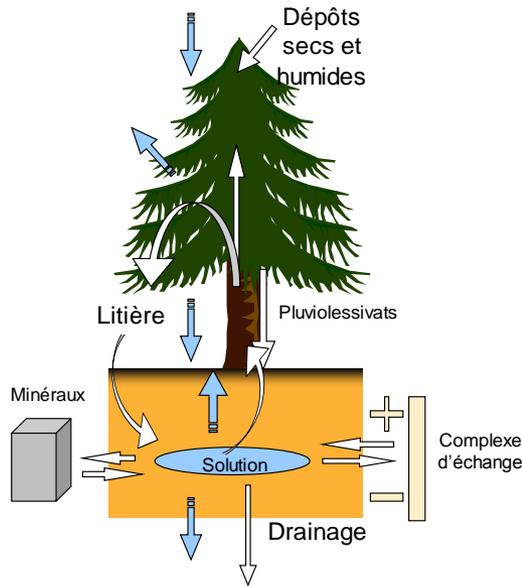
Modèles à base dendrométrique

Modèles biogéochimiques

Modèles à base écophysiole

## Les modèles biogéochimiques

Ex: NuCM



### Les plus...

- Centré sur le sol, Cycles et flux
- Evolution des pools de nutriments avec le temps

### Les moins...

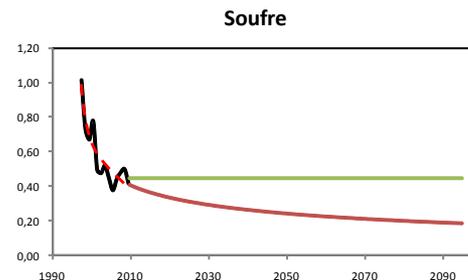
- Réponse de la croissance face à l'évolutions des pools de nutriments biodisponibles

### Evolution des dépôts atmosphériques

- Dépôts constant et égaux aux dépôts actuels
- Diminution des dépôts selon la tendance actuelle

### Sylviculture

- Sylviculture traditionnelle (exportation des grumes)
- Sylviculture intensive (exportation des grumes et des rémanents)





Hêtraie tempérée

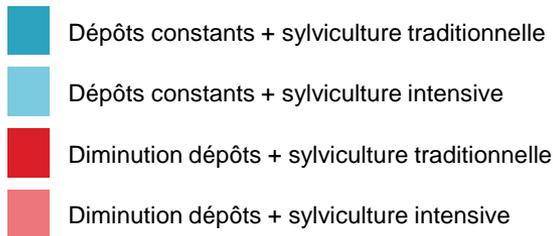
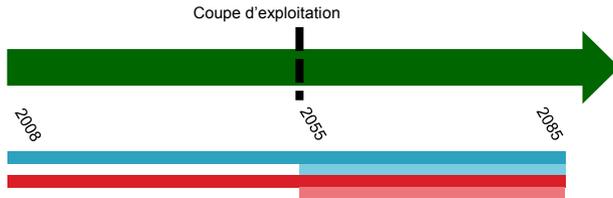
# Exemples de modèles

Modèles à base dendrométrique

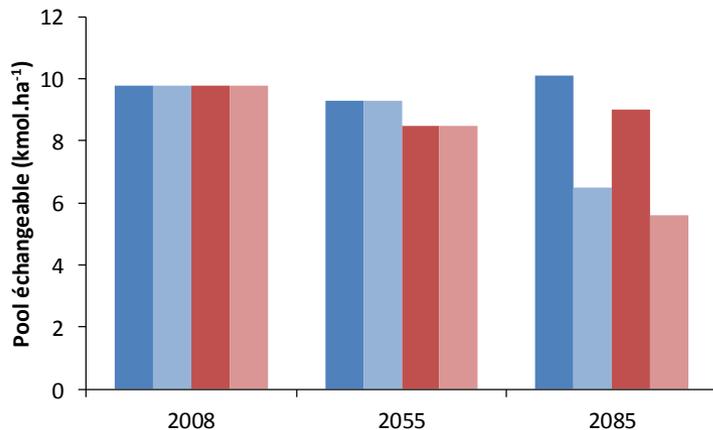
Modèles biogéochimiques

Modèles à base écophysiological

## Résultats



### Ca+Mg



## Les modèles biogéochimiques

### Conclusion

- Pas de restauration naturelle malgré la diminution des dépôts en sulfates
- Sensibilité de ces écosystèmes vosgiens sur grès à l'intensification de la sylviculture
- Correctif possible par amendement

### Les limites du modèle

- Relation sol-plante: modélisation de la croissance en fonction des stocks biodisponibles du sol
- Cycle de l'azote
- Couplage des cycles biogéochimiques
- Biologie du sol (rhizosphère, mycorhize, racines...)



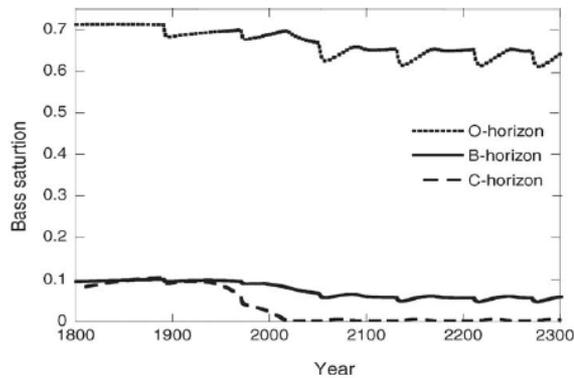
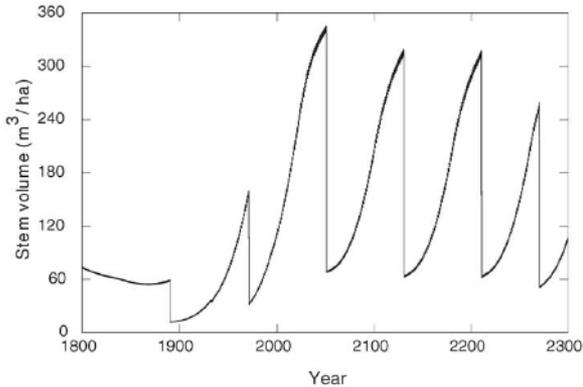
Plantation de Douglas

# Exemples de modèles

Modèles à base dendrométrique

Modèles biogéochimiques

Modèles à base écophysiole



## Les modèles biogéochimiques d'écosystèmes

- P. ex. : SAFE, ForSAFE, WITCH-ASPECT, PASTIS
- Représentation des cycles biogéochimiques + dynamique écosystème
- Nutriments : C, N principalement + transfert d'eau
- Le prélèvement par les plantes est explicitement représenté, la croissance végétale peut également l'être

Sorties de ForSAFE (Wallman et al, 2005), Simulation du volume sur pied et taux de saturation

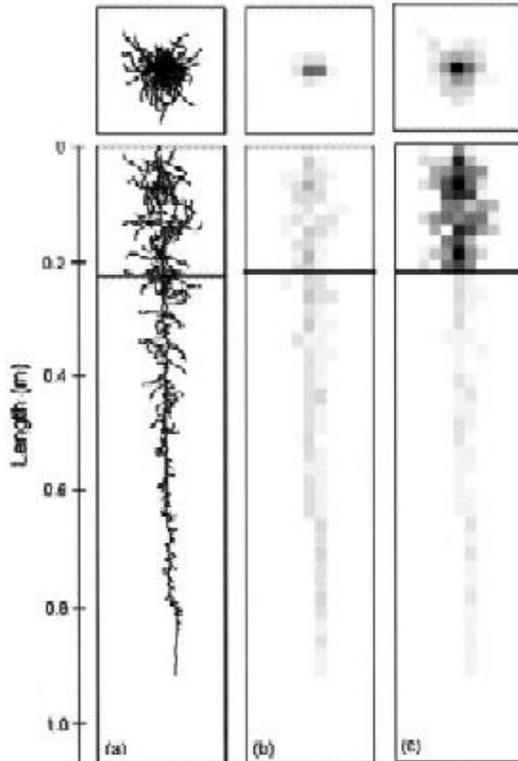


Plantations de  
Pins dans les  
Landes

# Exemples de modèles

Modèles à base  
dendrométrique

Modèles  
biogéochimiques



## Les modèles de croissance racinaire

- P. ex. : ROOTMAP, SPACSYS
- Principalement des modèles centrés sur les plantes mais quelques uns intègrent les interactions avec le sol
- T° du sol, propriétés mécaniques
- plus rarement nutriments (N), eau
- Échelle de l'horizon, peuvent être très détaillés au niveau de la description du sol (3D)

Sortie ROOTMAP (Dunbadin, 2002) Prélèvement de nitrate par le système racinaire du lupin (cadre du haut vue de dessus et cadre du bas, vue de profil). (a) Système racinaire simulé, (b) The uptake pattern at 56 days (250/250  $\mu\text{MNO}_3\text{-N}$  (upper/lower root system)), (c) he uptake pattern at 57 days, after treatment application (1500/250  $\mu\text{M NO}_3\text{-N}$ )



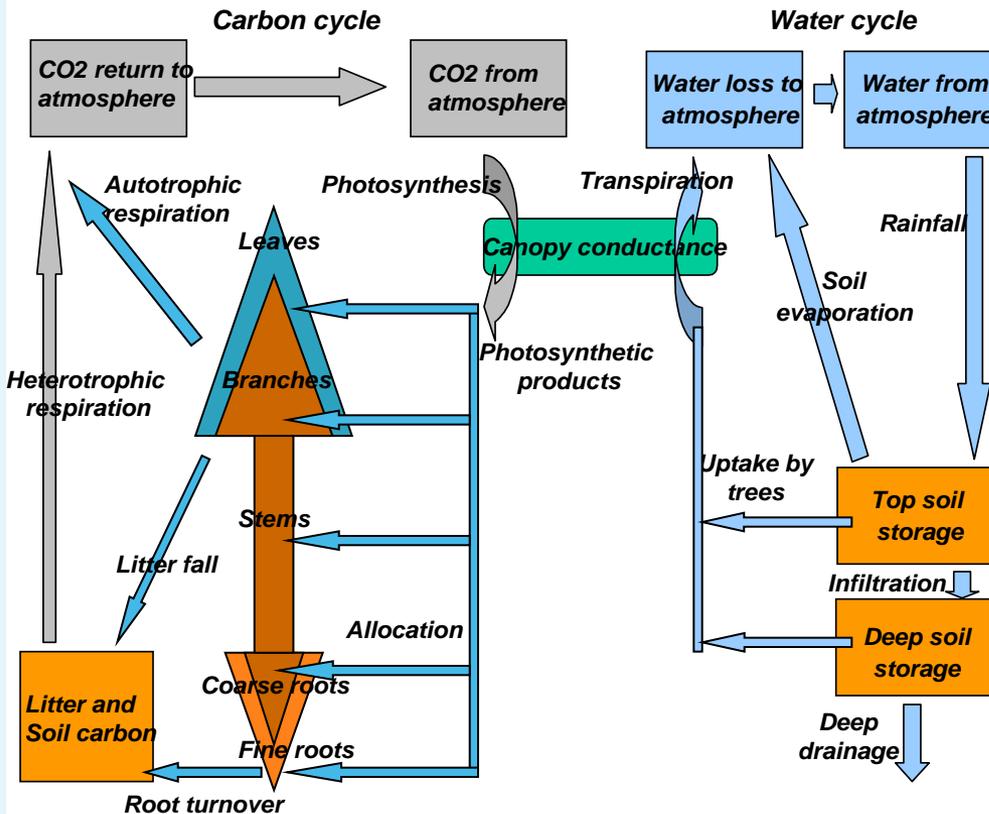
Taillis de Chêne verts

# Exemples de modèles

Modèles à base dendrométrique

Modèles biogéochimiques

## Les modèles à base écophysologique - Détaillés



- P. ex. : CASTANEA, PNeT, ...
- Intègrent en général le cycle de l'azote en plus de celui du C et de l'eau
- Impact de N sur la photosynthèse, le LAI et la respiration de maintenance
- Modèles d'évolution de la MOS inclus (svt Century)

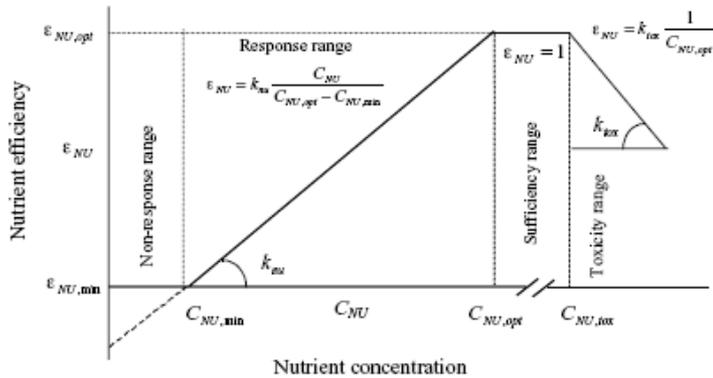


Plantations d'Eucalyptus au Congo

# Exemples de modèles

Modèles à base dendrométrique

Modèles biogéochimiques



Les modèles à base écophysiological - Détaillés

• P. ex. : CASTANEA, PNeT

Fonction de réduction de la production primaire nette (NPP) dépendant de la concentration en N/Nutriments dans la feuille (mais forme de la fonction différente selon les modèles: G'day, ForNBM, King)

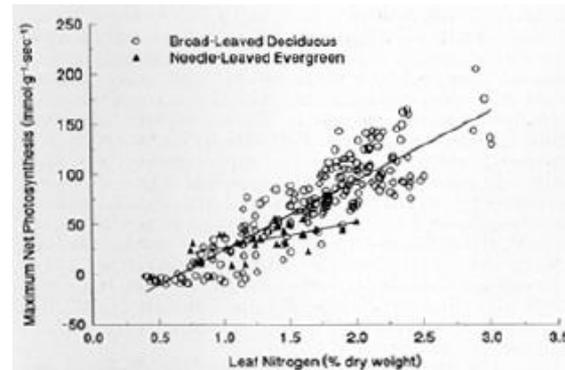


Fig. 2 Relationship between foliar N concentration and  $A_{max}$  for broad-leaved deciduous and needle-leaved evergreen species (data from Reich et al. 1995)

Relation entre le maximum de photosynthèse et la concentration en N dans les feuilles (PnET)



Plantation d'hvévé

# Exemples de modèles

Modèles à base dendrométrique

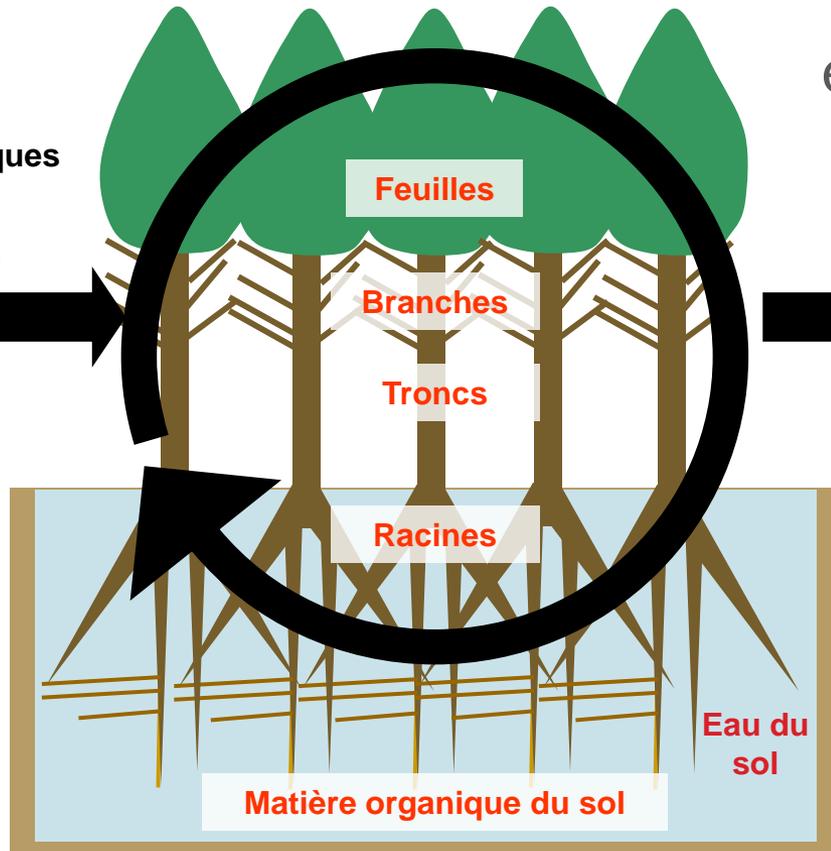
Modèles biogéochimiques

Simulation des flux de C, N et eau entre compartiments de biomasse, le sol, et l'atmosphère

## Les modèles à base écophysologique - Simplifiés

Variables climatiques journalières

Rayonnement, pluviométrie, température



Principales sorties journalières:

- Production primaire brute, respiration autotrophe et hétérotrophe, évapotranspiration
- Croissance des arbres (biomasse, volume, hauteur moyenne),
- séquestration de carbone, immobilisation et minéralisation d'N...
- Teneur en eau du sol

• P. ex. : G'day, Cabala

Arbres moyens : pas de simulation de compétition entre arbres de taille différente

D'après Comins & McMurtrie 1993, Corbeels et al. 2005 a,b,c, Marsden et al. 2013)



Plantation d'hévéa

# Exemples de modèles

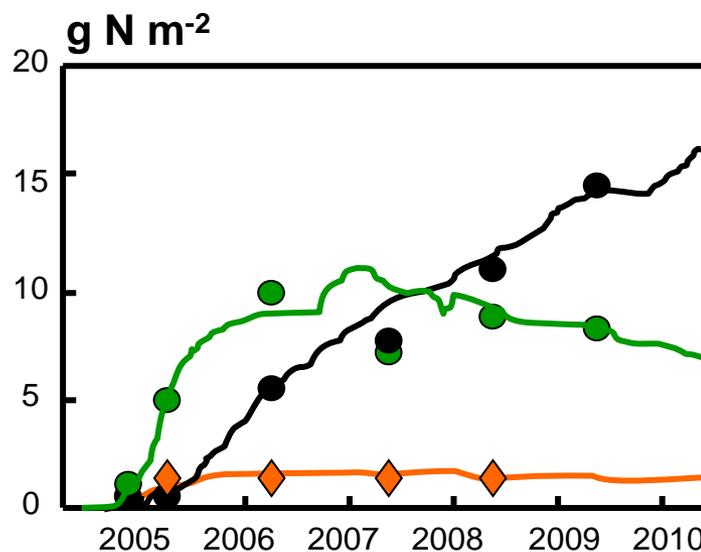
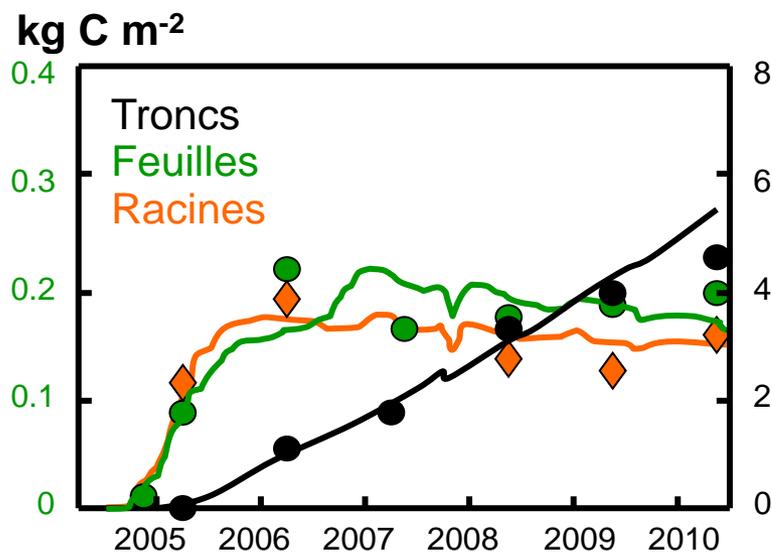
Modèles à base dendrométrique

Modèles biogéochimiques

Les modèles à base éco-physiologique - Simplifiés

Résultats de simulation des stocks de C et N dans la biomasse sur une plantation d'*Eucalyptus* au Brésil

• P. ex. : G'day, Cabala



d'après Marsden et al. 2013



Plantations d'Eucalyptus au Congo

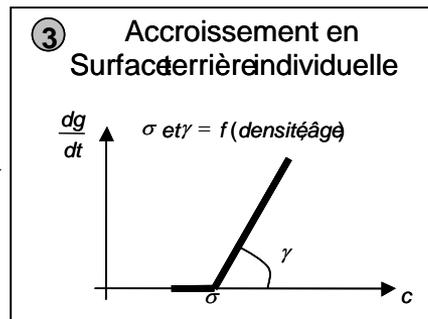
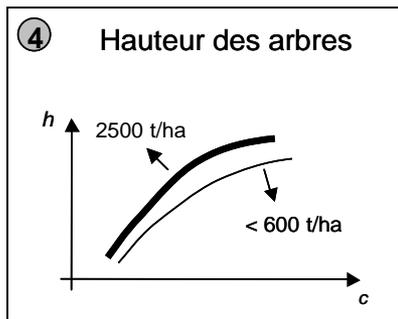
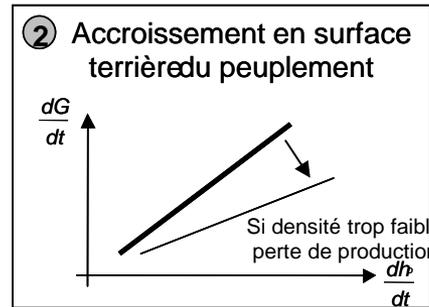
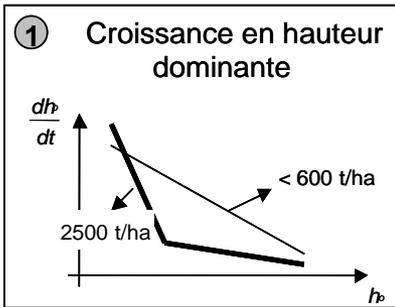
# Exemples de modèles

Modèles à base dendrométrique

Modèles biogéochimiques

Modèles à base écophysiole

Inventaire (t)



Inventaire (t+1)

## Les modèles à base dendrométrique

- P. ex. : E-Dendro, Fagacee, PP3, ...
- Données d'entrée: inventaire forestier
- Module de croissance prenant explicitement la sylviculture en compte
- Modules de propriétés du bois (volume, biomasse minérale, masse basés sur modèles prenant en compte la dimension des arbres et leur âge)



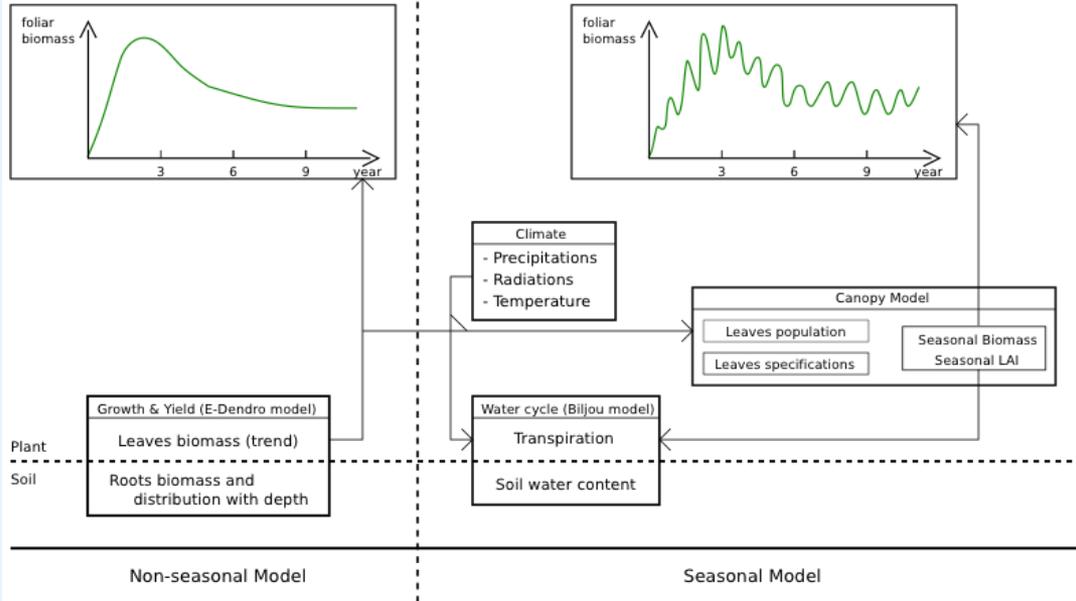
Plantations d'Eucalyptus au Congo

# Exemples de modèles

Modèles à base dendrométrique

Modèles biogéochimiques

Modèles à base écophysiole

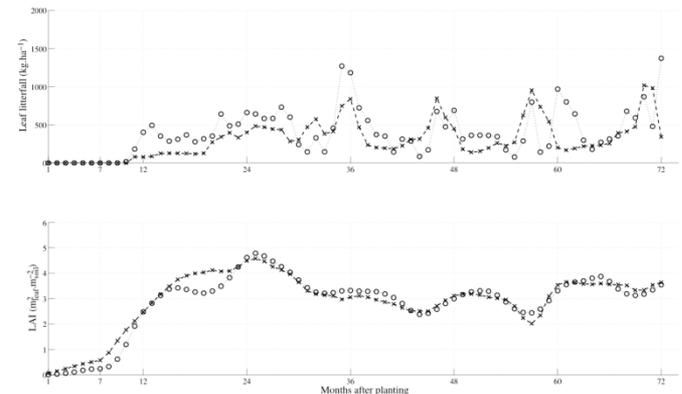


## Les modèles à base dendrométrique

- Intégration progressive des concepts issus de l'écophysiole et de la biogéochimie.... (ex E-Dendro et Fagacée, thèse J. Sainte-Marie)

Modélisation du cycle de l'eau par un modèle sol/plante à base dendrométrique, exemple de simulation de chutes de litière et de LAI (Eucalyptus au Brésil)

Modèles de canopée inter-essence (Eucalyptus, Chêne, Hêtre,,... Sainte-Marie et al 2013)





Plantations  
d'Eucalyptus au  
Congo

# Exemples de modèles

Modèles à base  
dendrométrique

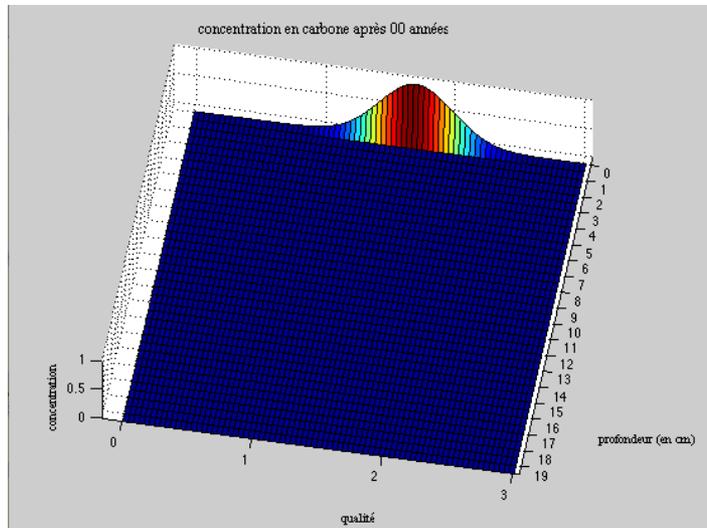
Modèles  
biogéochimiques

Modèles à base  
écophysiole

## Les modèles à base dendrométrique

- Intégration progressive des concepts issus de l'écophysiole et de la biogéochimie.... (ex E-Dendro et Fagacée, thèse J. Sainte-Marie)

Décomposition de la matière organique le long d'un profil de sol vertical (cf. Bosatta & Ågren 1996)



Propagation dans le sol de l'apport constant d'une distribution de carbone suivant la qualité.



Système Agro-forestier Café - Erythrine

# Conclusion

## Type de modèle

		Type de modèle	
		Plante ←	→ Sol
Objet représenté	Plante	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Mieux expliciter les processus (ex. allocation, dynamique des réserves), et les intégrer dans les approches dendrométriques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Prélèvement de nutriments et d'eau</li> <li>. Modulation de la croissance et de la production de litières</li> <li>. Action de la plante (ex: nitrification)</li> </ul>
	Interactions	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Carbone</li> <li>. Eau</li> <li>. Nutriments</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Carbone</li> <li>. Eau</li> <li>. Nutriments</li> <li>. Propriétés physiques</li> </ul>
	Sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Milieu à rendre non statique</li> <li>. Courbes de réponse des modèles à la disponibilité en nutriments et en eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Liens entre la biologie du sol et la géochimie; intégration dans les approches simplifiées</li> </ul>

