



# Fonctionnement et impacts environnementaux des Eucalyptus : Mythes et Réalités

JP Bouillet, J-P Laclau, Y Nouvellon, L Mareschal, G le Maire, A Albrecht, L Saint-André (UMR Eco&Sols)

P Battie-Laclau, JLM Gonçalves, AV Krushe, C Hamilton, PCO Trivelin (USP - Brésil), L Koutika, A Mabilia (Crdpi-Congo)

D Epron (UMR EEF), J Ranger, B Zeller (Inra), JL Stape, D Binkley (NCU, USA), M Ryan (USDA, USA)

Atelier: « L'eucalyptus, une essence majeure pour le reboisement à Madagascar »  
Antananarivo – 18 et 19/06/2013

# Enjeux

## Pourquoi s'intéresser aux *Eucalyptus* ?

- ➡ ↙ continue de la demande mondiale en produits ligneux
- ➡ Besoins d'alternatives pour réduire la pression sur les forêts naturelles (Madagascar, Amazonie, Asie SE,...)
- ➡ Usages multiples de l'eucalyptus
  - Industriels : cellulose, panneaux...
  - Petits producteurs : bois de service, énergie, bois d'oeuvre...
- ➡ > 20 millions d'hectares d'eucalyptus dans le monde
- ➡ Forte expansion : exemple du Brésil → de 4,5 millions ha en 2010 à > 10 millions ha en 2020 (ABRAF, 2011)

# Enjeux

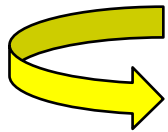
Pourquoi s'intéresser aux *Eucalyptus* ?

## Impacts environnementaux des plantations d'eucalyptus ?

Great Debate (Inde), deserto verde (Brésil),...

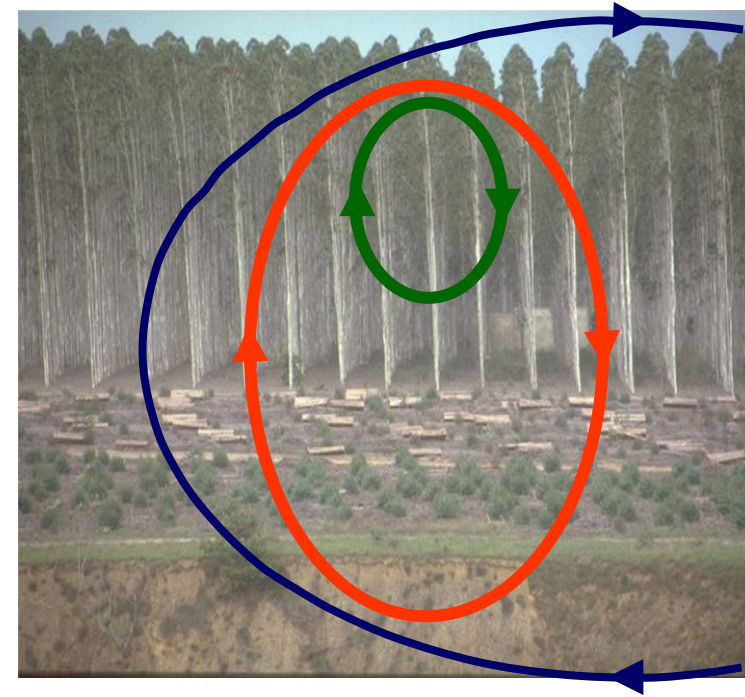
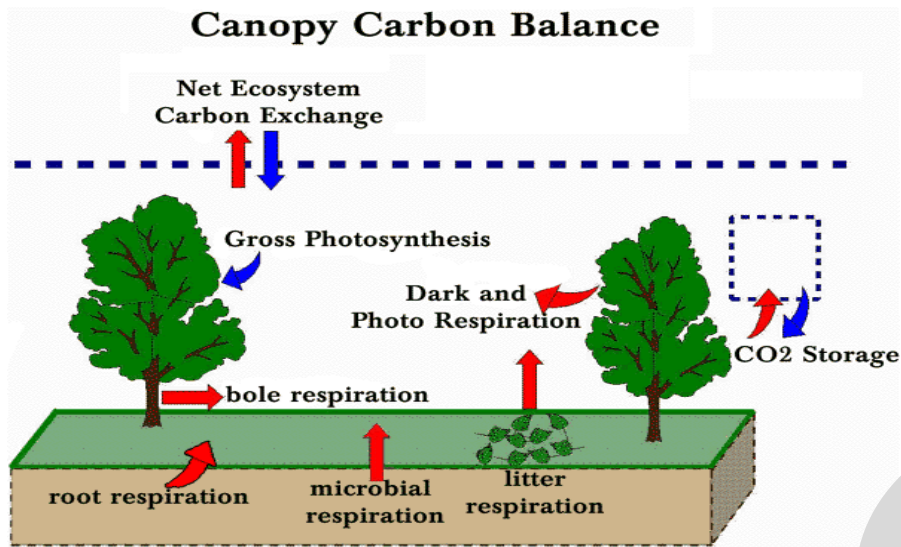
→ assèchement des nappes, stérilisation des terres,...

**Fonctionnement H<sub>2</sub>O, C et minéral des plantations**



**Bilans hydriques, bilans de C, fertilité des sols...**

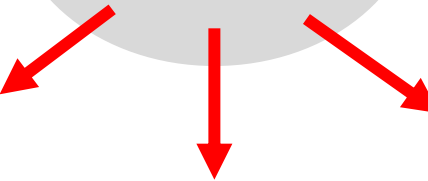
# Approche biophysique de la durabilité des plantations (Congo, Brésil)



## Cycle du carbone

- Sequestration du C
- Principaux flux (photosynthèse, respiration...)
- Production de biomasse...

## Suivi intensif



## Cycle de l'eau

- Evapotranspiration,
- Régulation stomatique,
- Dynamique de l'eau dans le sol,
- Recharge des nappes phréatiques...

## Cycles des nutriments

- Flux dans l'écosystème
- Entrées-sorties du sol,
- Bilans par rotation,...

# Fonctionnement hydrique et carboné

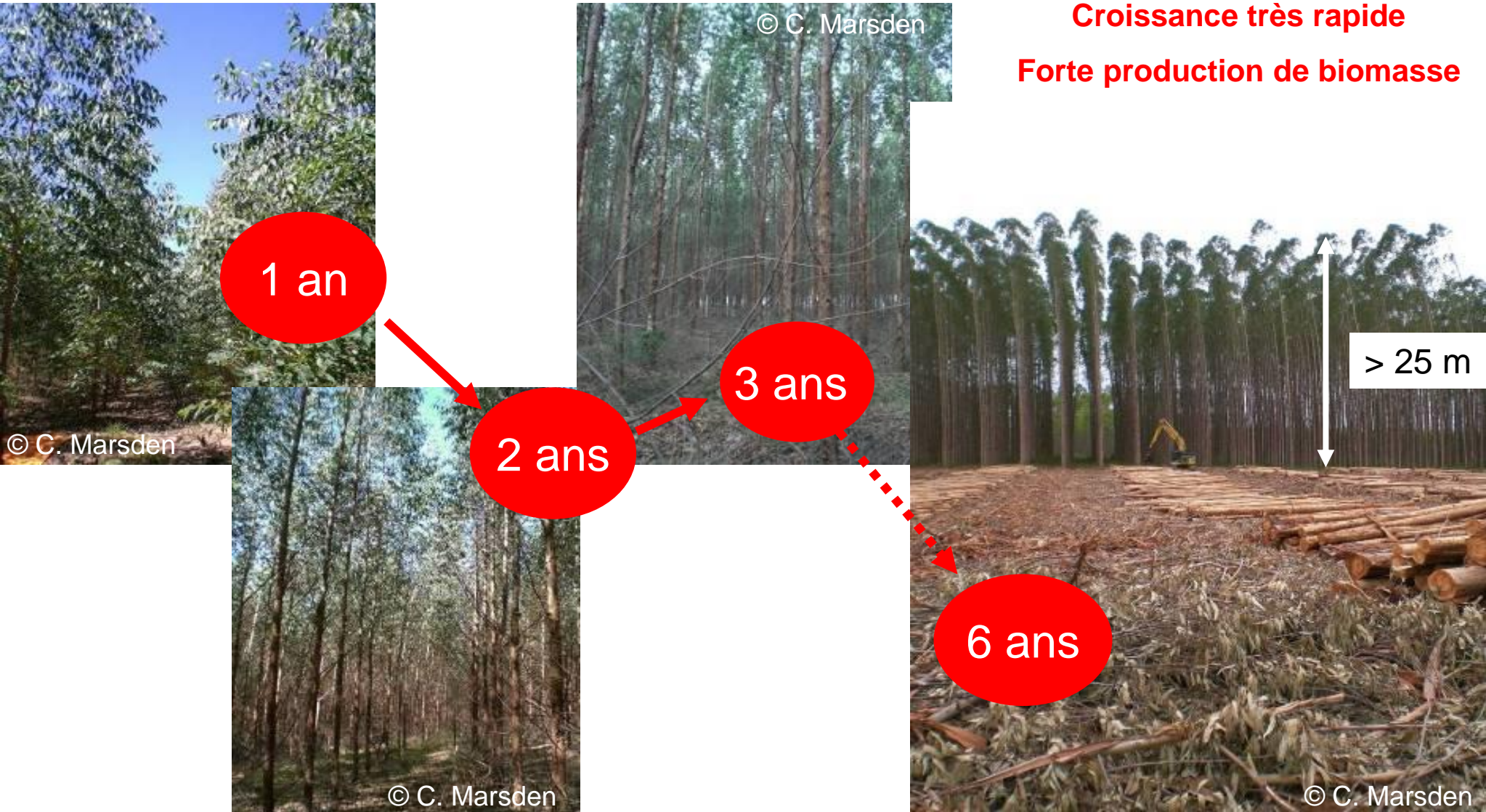
Mesures écophysiologicals : arbre, sol  
Dispositifs Eddy-covariance : écosystème



# Fonctionnement hydrique et carboné



# Fonctionnement hydrique et carboné



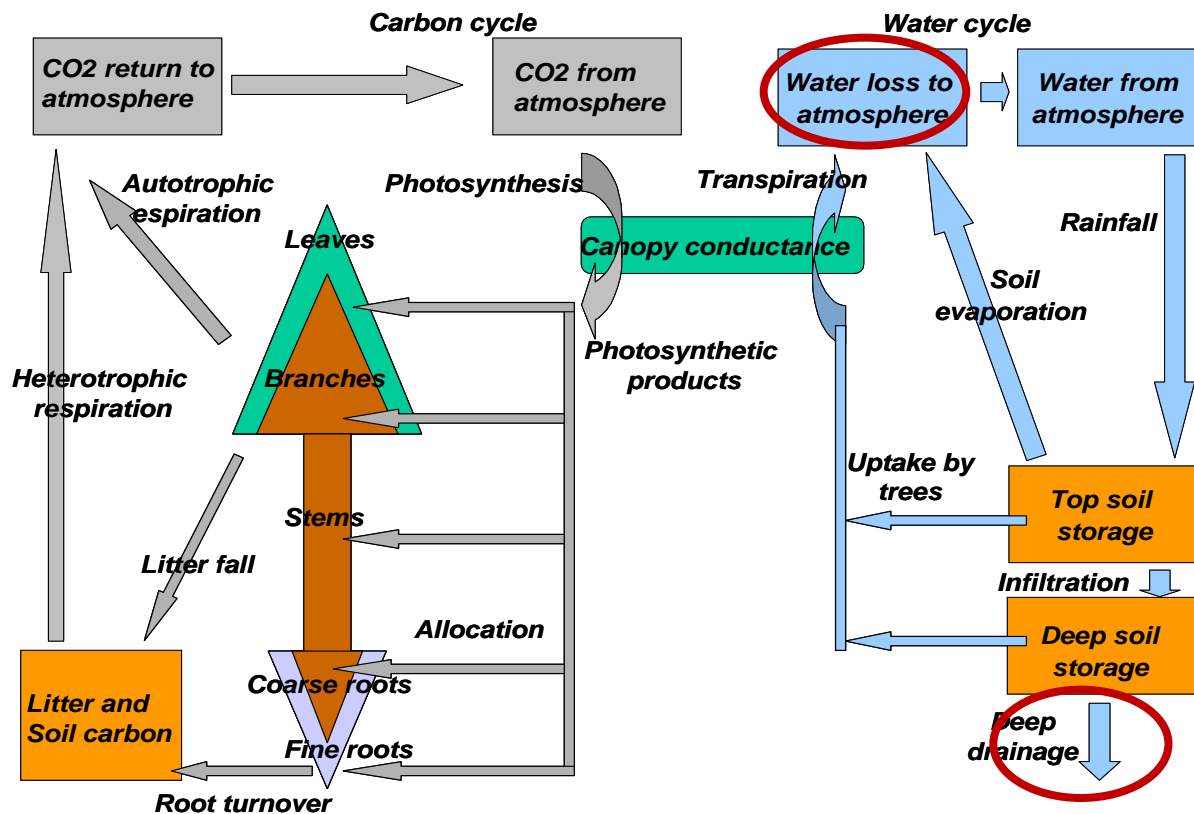
# Fonctionnement hydrique et carboné

Photosynthèse :



Demande en eau = f (LAI, paramètres physiologiques =  $J_{\max}$ ,  $V_{\max}$ ...)

Contrôle stomatique = f (espèce, rayonnement,  $\text{VPD} = f(\text{H\%}_{\text{air}}, T_{\text{re}})$ )



Précipitations,  
Texture sol  
Demande arbre



# Fonctionnement hydrique et carboné

## Comparaison des consommations hydriques des plantations

### d'*E. grandis* (Brésil) et *E. urophylla\*grandis* (Congo)

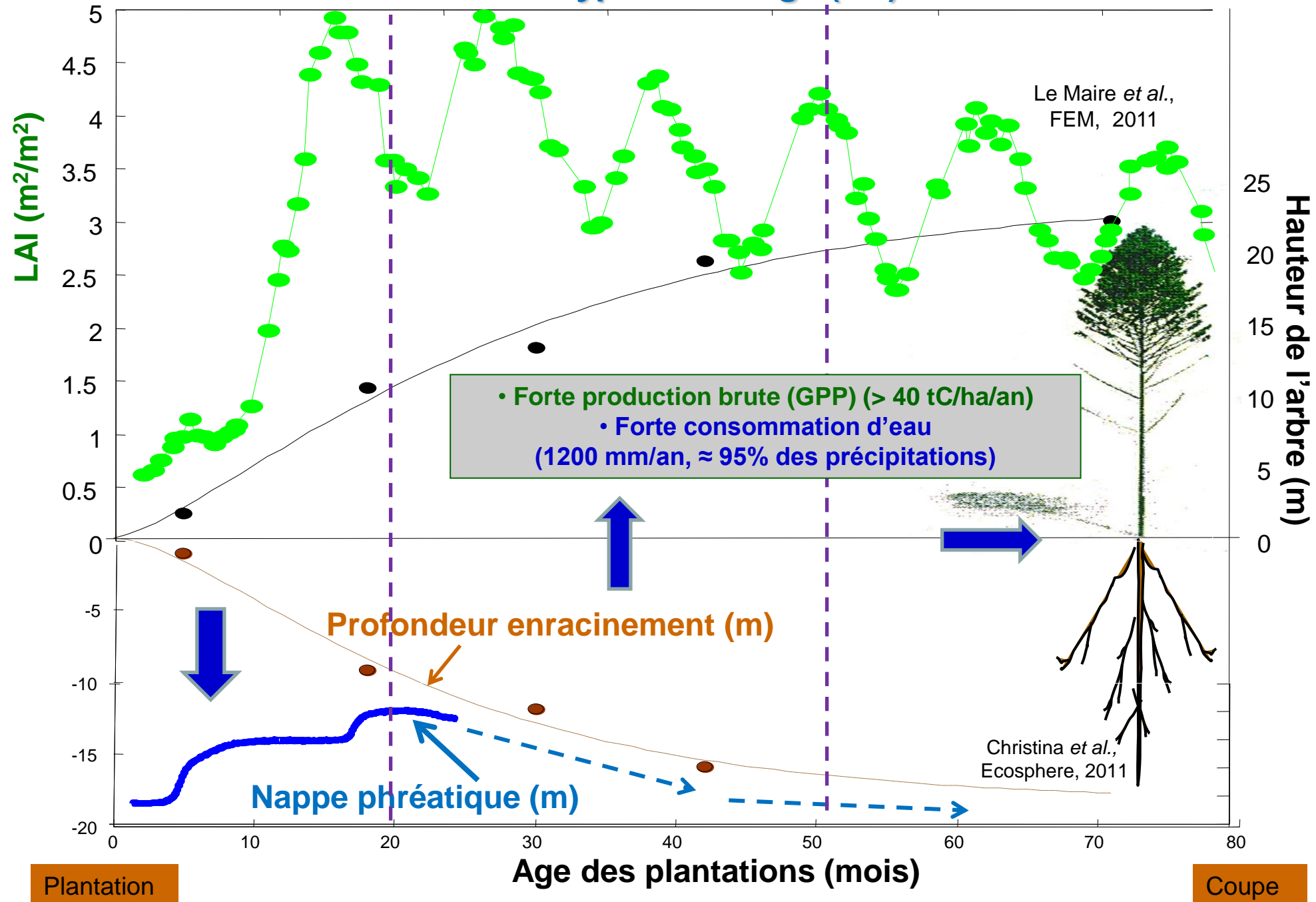
#### Brésil (Itatinga)

Tre moy : 19,5°C, précipitations: 1350mm an<sup>-1</sup>, Hr<sub>air</sub>: 70%,  
saison sèche (2 mois) peu marquée, faible nébulosité (ray. net: 3850 MJ m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>),  
Ferralsols (20% argile) CEC<sub>[0-5cm]</sub>: 1,0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> sol)

#### Congo (Pointe-Noire)

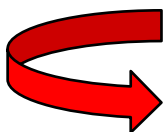
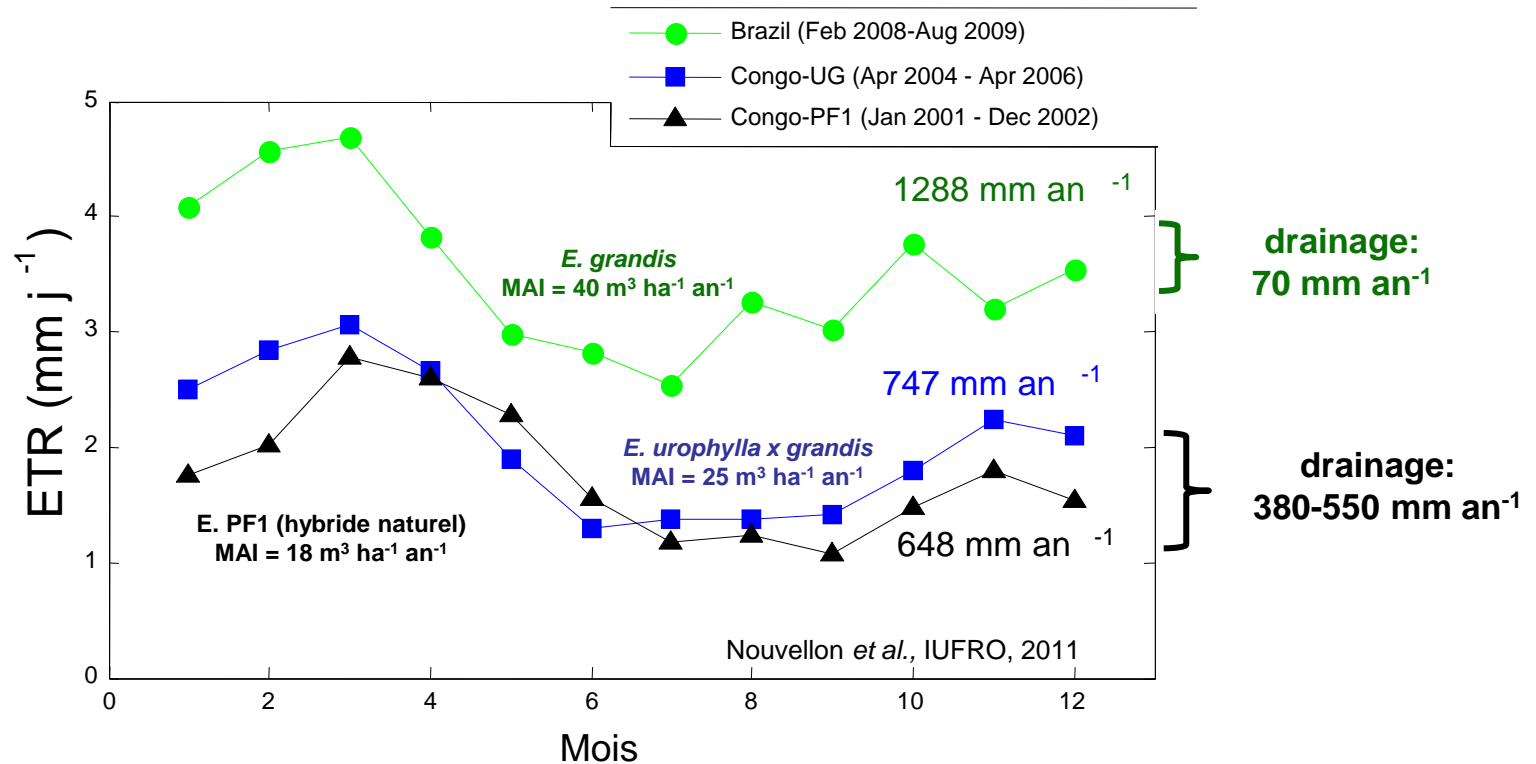
Tre moy : 25,5°C, précipitations: 1200mm an<sup>-1</sup>, Hr<sub>air</sub>: 85%,  
saison sèche (5 mois) très marquée, forte nébulosité (ray. net: 2750 MJ m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>)  
Ferralic arenosols (5% argile; CEC<sub>[0-5cm]</sub>: 0,3 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> sol)

# Plantations d'Eucalyptus: Itatinga (SP) – Brésil



# Fonctionnement hydrique et carboné

## Comparaison Brésil / Congo



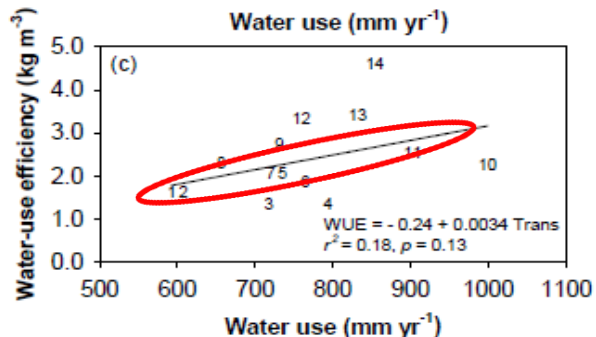
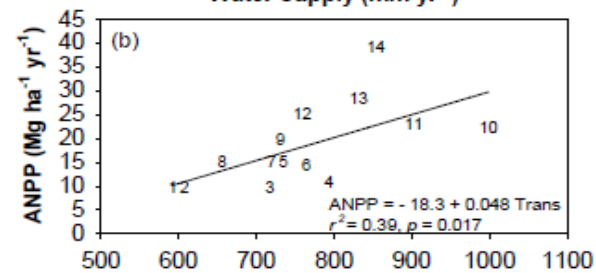
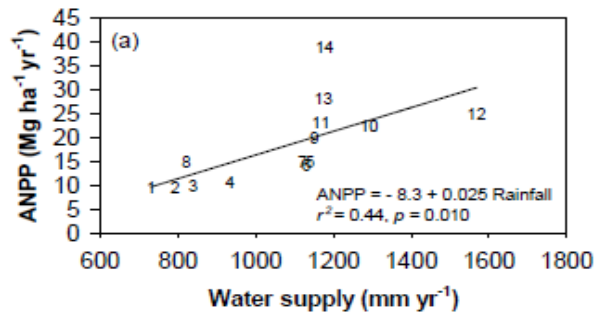
Pour une espèce donnée le bilan hydrique dépend de la production et de l'environnement

# Fonctionnement hydrique et carboné

## Water Use Efficiency (C fixé / eau consommée)

### Gradient S-N Brésil *E. urophylla* \* *grandis*

(Stape *et al.*, FEM, 2004)



**WUE** ▼ quand appro. eau ▼ (cohérent avec Binkley *et al.*, FEM, 2004)

### WUE *E. grandis* sur un même site (Af du Sud)

variation de 1 à 4 entre clones (Albaw *et al.*, IJFR, 2013)

### WUE différents écosystèmes (Af du Sud)

(Wise *et al.*, FEM, 2011)

Tree species	Plantation/trial	Biophysical WUE (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	
<i>Eucalyptus</i> species	M1 Gembokfontein	0.00261	
	M2 Windy Hill	0.00300	
	M3 Kwambonambi	0.00351	
	M4 Kia-Ora	0.00276	
	M5 Tanhurst	0.00279	
	M6 Baynesfield	0.00128	
	M15 Palm Ridge	0.00241	
	M20 KT	0.00338	
	M25 Futululu	0.00631	
	M29 Amangwe	0.00475	
	M22 Bushlands	0.00290	
	M17 Bushlands	0.00547	
	AVERAGE	0.00343	
	<i>Pinus patula</i>	Usutu, Swaziland	0.00303
	<i>Pinus radiata</i>	Southern Cape	0.00133
Afro-temperate forest	Southern Cape	0.00028	
<i>Afrocarpus falcatus</i>	Magoebaskloof	0.00057	
Sandveld traditional management	Kruger National Park	0.00004	
Sandveld sustainable use	Kruger National Park	0.00006	

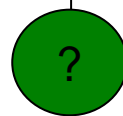
# Consommation d'eau = ETR



Opinion publique

**Forêts naturelles : fortes ETR**  
**Effet positif**

**Eucalyptus : fortes ETR**  
**Effet négatif**



Pour les plantations d'*Eucalyptus*, de fortes ETR signifient

**POSITIF**

Effets possibles sur le climat local  
Faibles pertes de nutriments

**NEGATIF**

ETR fortes → débit des rivières → réduction  
disponibilité en eau → aménagement du territoire  
(Dye and Verfeld, FEM, 2007; Albaw *et al.*, IJFR, 2013)

# Fonctionnement hydrique et carboné

## Bilan de C: méthode des stocks

### Afforestation des savanes littorales du Congo (rapport Ulcos, 2006)

5,1 tC ha<sup>-1</sup>  
pour la savane

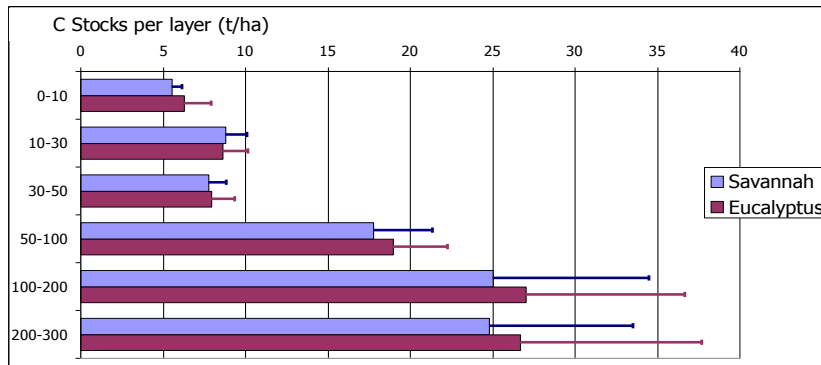


Moyenne « glissante »  
29,5 tC ha<sup>-1</sup>

Evolution du C dans la biomasse aérienne et racinaire des eucalyptus

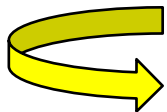
Year	C increments (tC.ha <sup>-1</sup> .year <sup>-1</sup> )	Standard Deviation	Confidence interval at 95%	
			-	+
1	4.44	0.21	4.85	4.09
2	8.78	0.36	9.50	8.11
3	9.37	0.61	10.49	8.04
4	8.63	0.76	10.12	7.13
5	7.45	1.02	9.60	5.54
6	6.42	0.95	8.21	4.49
7	5.41	1.12	7.49	3.09

Evolution des stocks de C du sol de savane vs eucalyptus



pas de DS entre  
écosystèmes

Litière au sol  
4,4tC ha<sup>-1</sup> vs ≈ 0 pour savane (brûlis annuel)



$$\text{Bilan C afforestation savane} = (29,5 - 5,1) + (4,4 - 0) + 0 = 28,8 \text{ tC ha}^{-1}$$

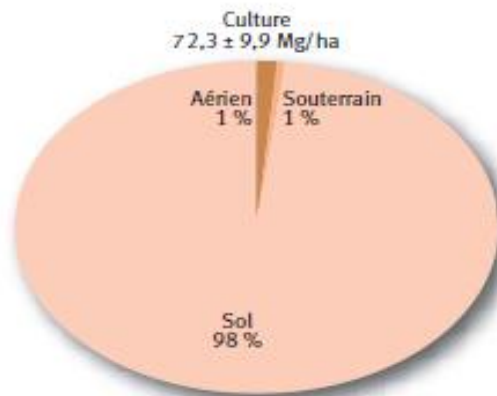
# Fonctionnement hydrique et carboné

## Taillis *E. robusta* sur les hautes terres de Madagascar

Razakamanarivo et al., BFT, 2010

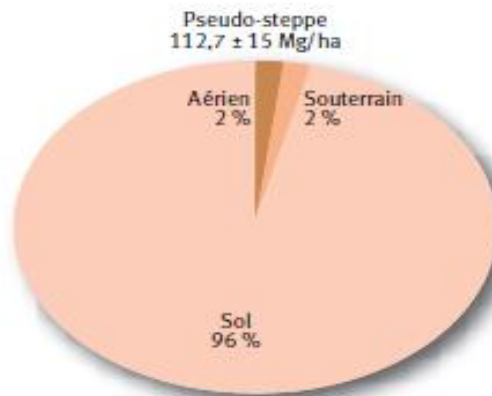


- 40,4 tC ha<sup>-1</sup>

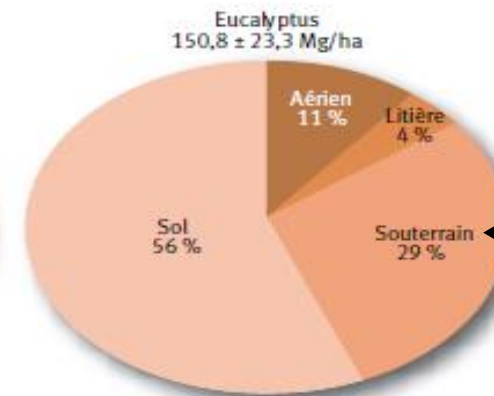


Culture/jachère

+ 38,1 tC ha<sup>-1</sup>



Pseudo-steppe



Taillis

← Souches

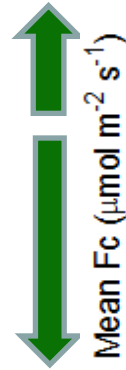
# Fonctionnement hydrique et carboné

## Méthode des flux

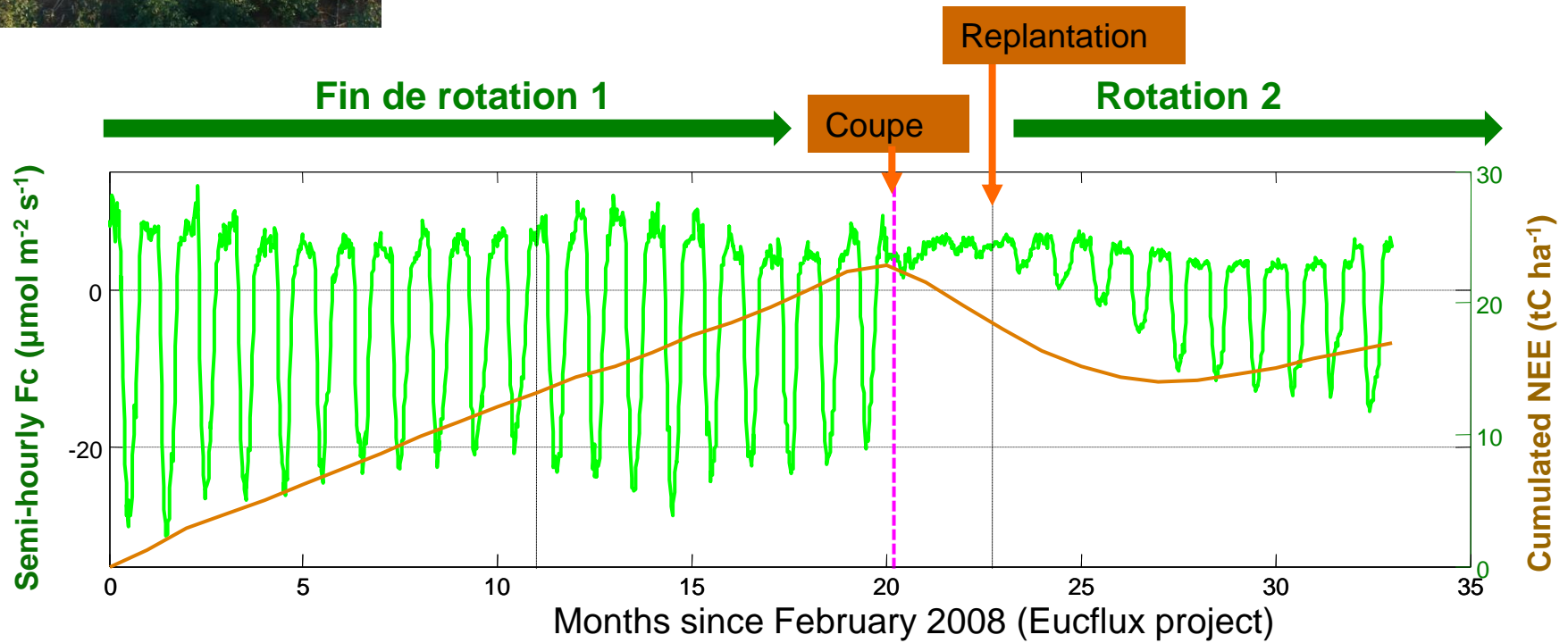
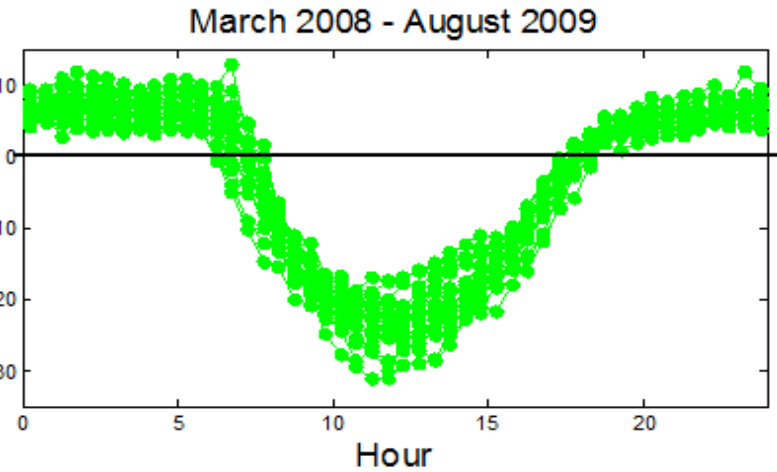


Net CO2 efflux

Net CO2 uptake



Mean  $F_c$  ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )





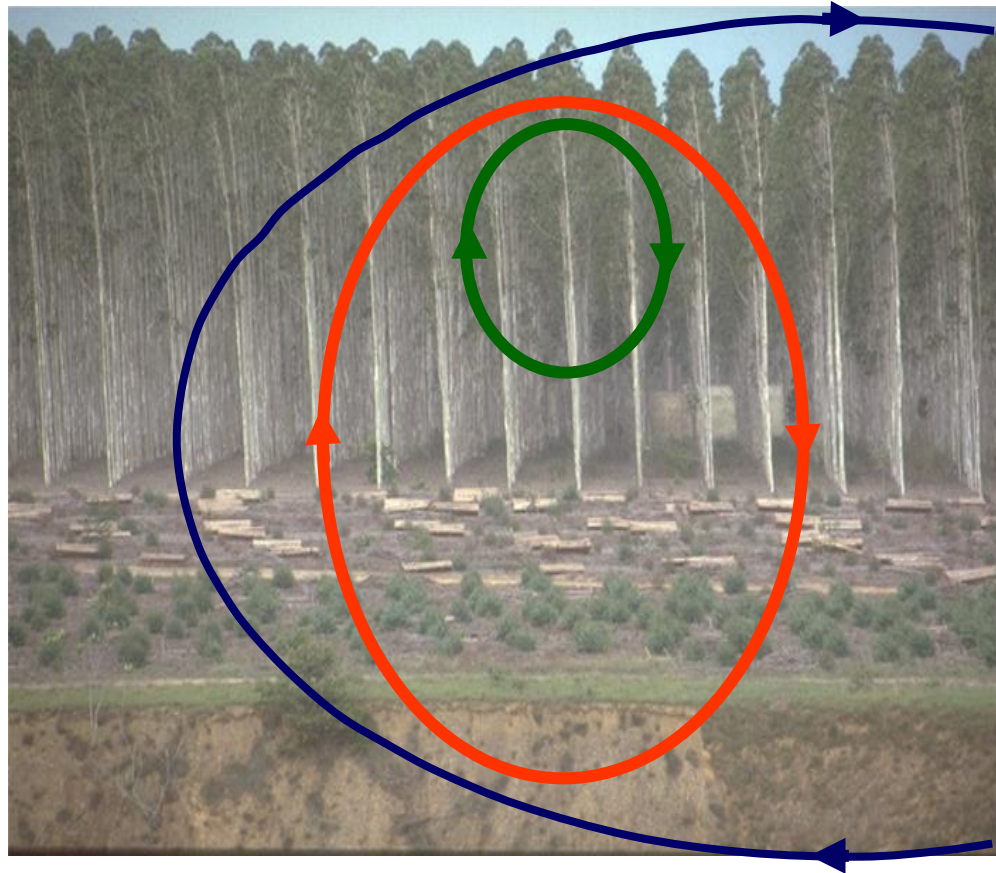
# Fonctionnement hydrique et carboné

## Flux de C dans différents écosystèmes forestiers

Production Primaire Brute (GPP), Respiration de l'Ecosystème (RE)  
et échange net de CO<sub>2</sub> entre le couvert et l'atmosphère (NEE)  
de différents écosystèmes forestiers (tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)  
(Epron et al., in press)

	GPP	RE	NEE
<b>Plantation d'Eucalyptus</b>			
Congo <i>E. PF1</i>	18	14	4
Congo <i>E. urophylla*grandis</i>	29	19	10
Brésil <i>E. urophylla*grandis</i>	42	25	17
<b>Plantation d'épicéa de Sitka</b>			
9-11 ans (Irlande)	10	9	1
16-18 ans (Irlande)	19	9	9
30-32 ans (Irlande)	14	10	4
<b>Forêts tropicales humides</b>			
Malaisie	32	31	1
Guyane	19	18	1
<b>Forêts tempérées</b>			
hêtraie lorraine	13	10	3
chênaie verte	12	10	2
pinède landaise	22	17	5

# Fonctionnement biogéochimique



**Cycle  
géochimique**

**Cycle  
biochimique**

**Cycle  
biologique**

## Cycles des nutriments

- Flux dans l'écosystème
- Entrées-sorties du sol,
- Bilans par rotation,...

# Fonctionnement biogéochimique

Pluiolessivats



Dépôts atmosphériques



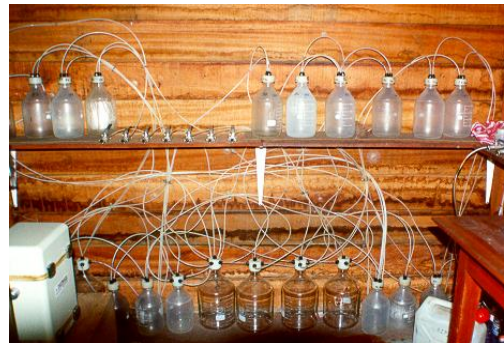
Ecoulements des troncs



Solutions du sol (→ 6m de prof.)



Recueil des solutions



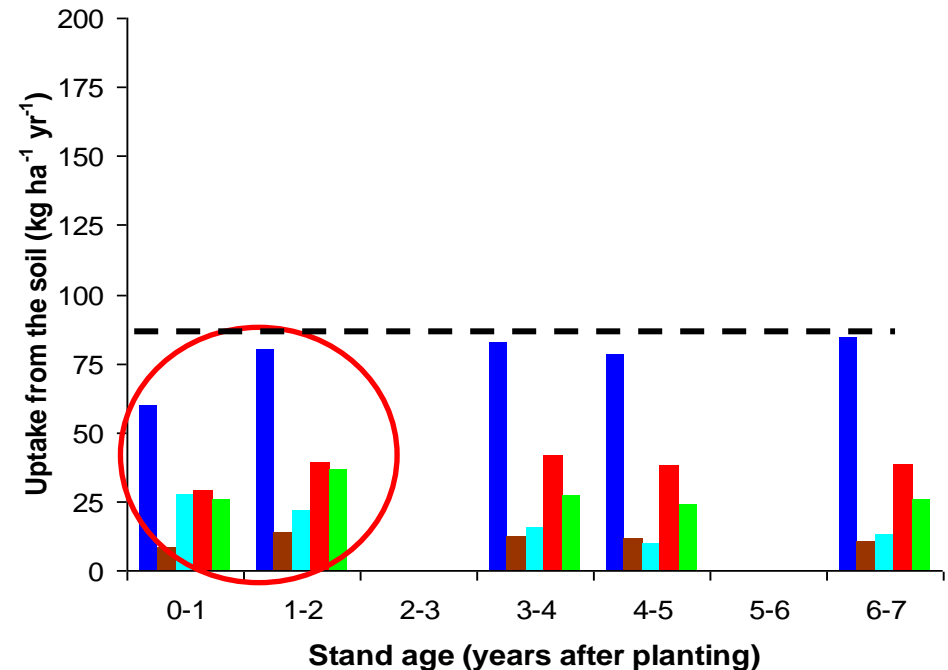
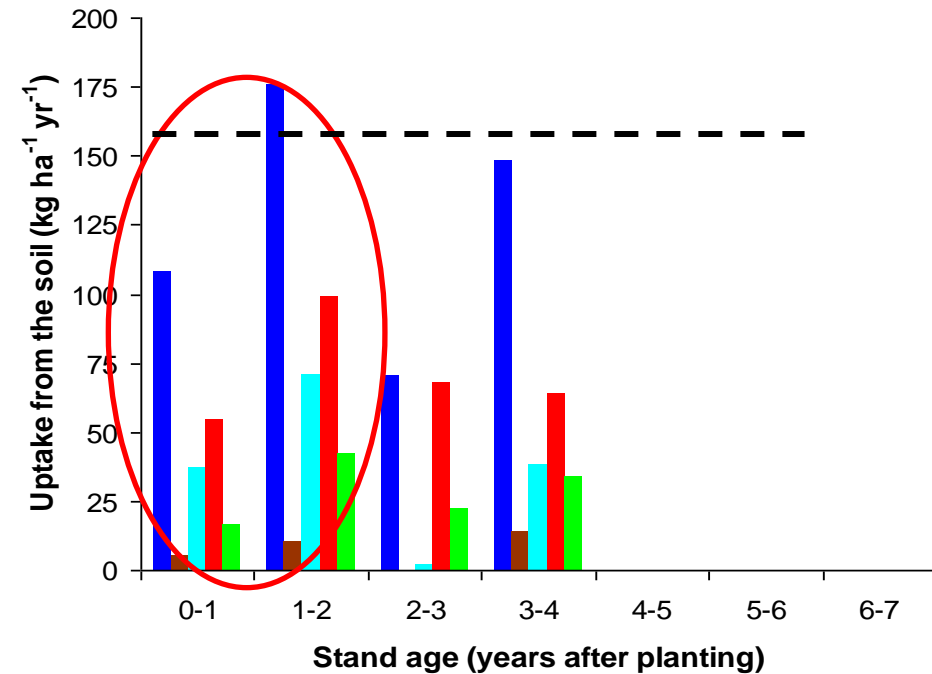
Suivi humidité sol (→ 17m de prof.)



# Prélèvements au sol

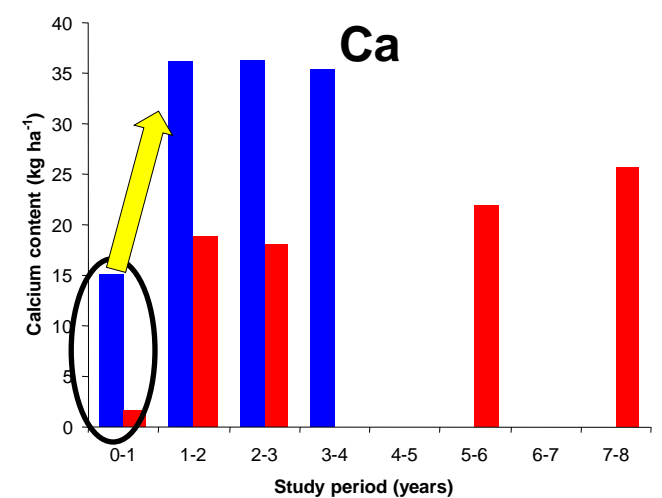
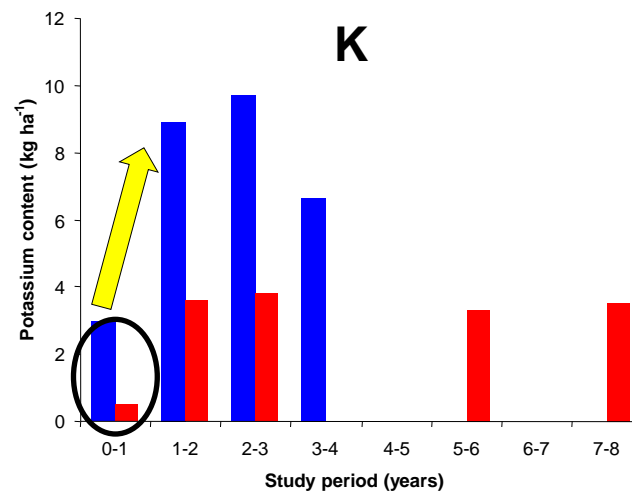
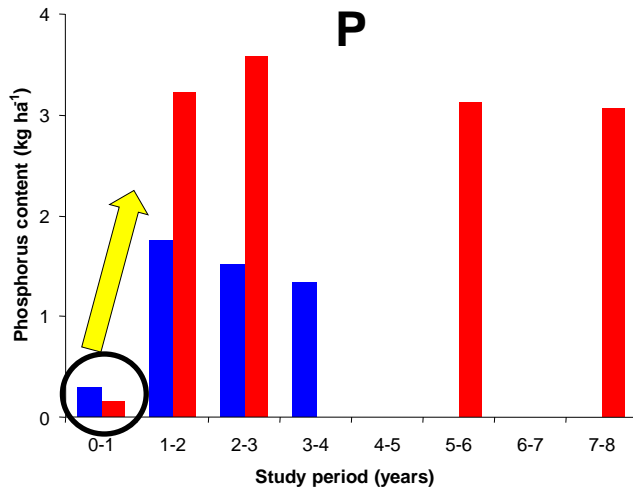
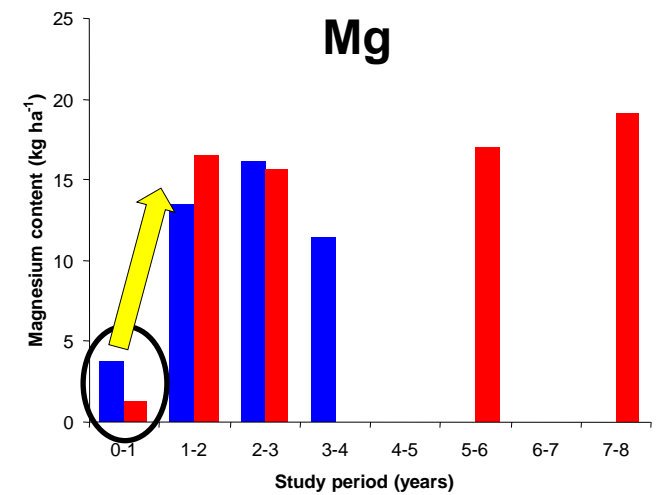
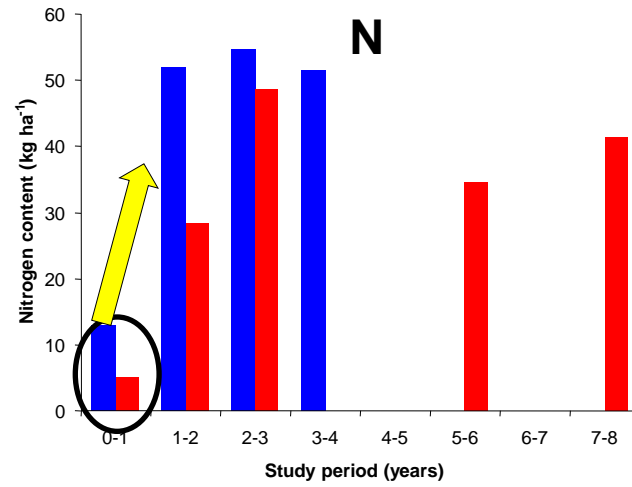
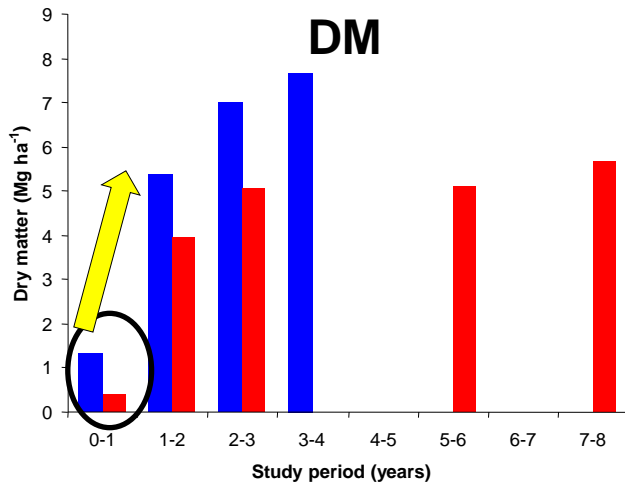
## ITATINGA (Brésil)

## KONDI (Congo)



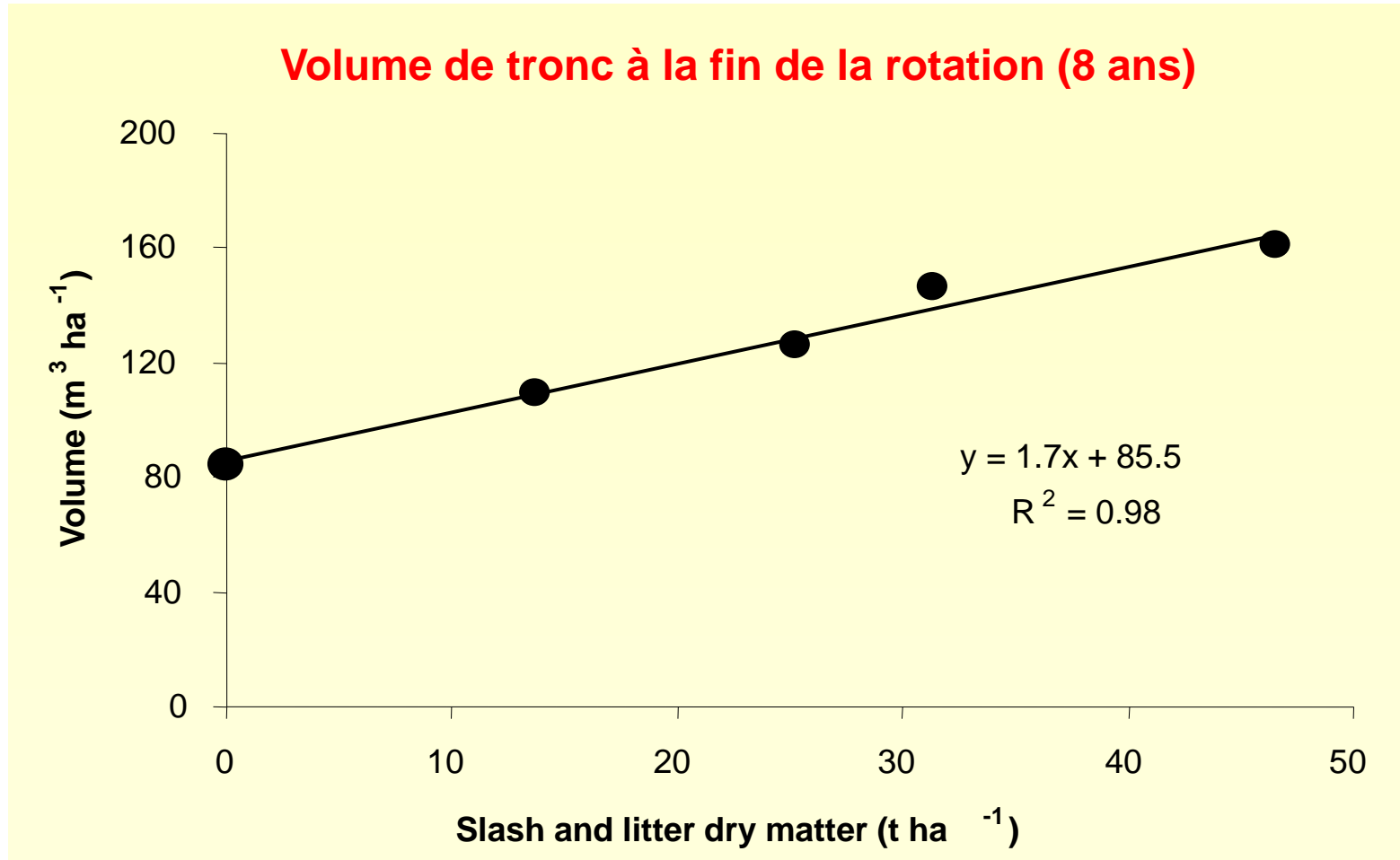
- Forts prélèvements dès la 1<sup>ère</sup> année (alors que les arbres sont encore peu développés)
- Prélèvement / unité de biomasse > les deux 1<sup>ères</sup> années : constitution du houppier
- Plus fort prélèvement à Itatinga piloté par la plus forte production de biomasse

# Retours par les litières

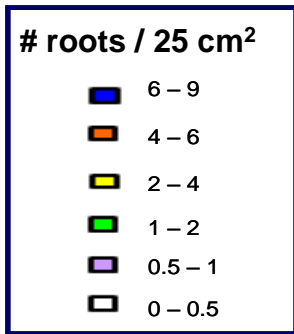
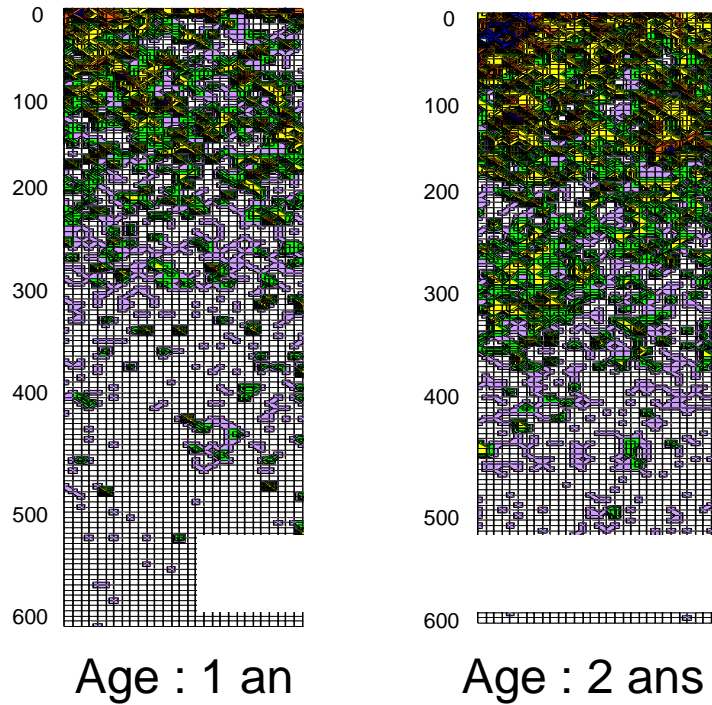


Retours très faibles la 1<sup>ère</sup> année mais qui augmentent fortement ensuite

## Réponse à la gestion des résidus et de la litière au Congo (réseau CIFOR)

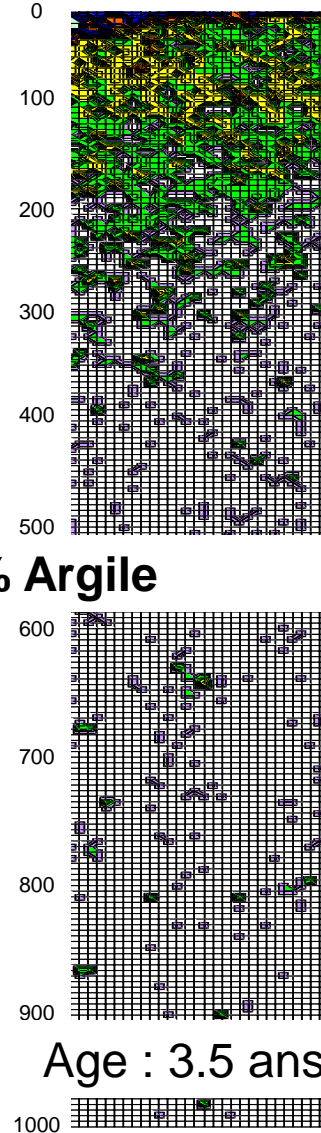


**Eucalyptus: excellent filtre (absorption rapide en profondeur, ≈ pas de perte en nutriments...)**

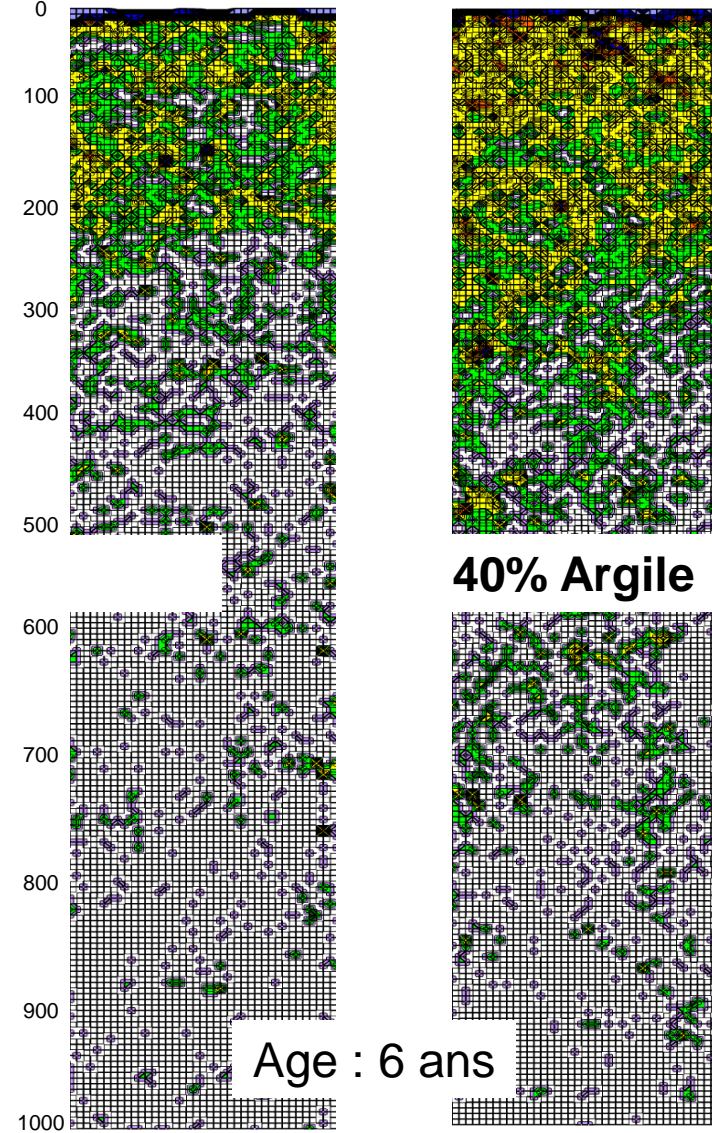


**Exploration du sol par les racines fines  
(diam. < 1 mm)**

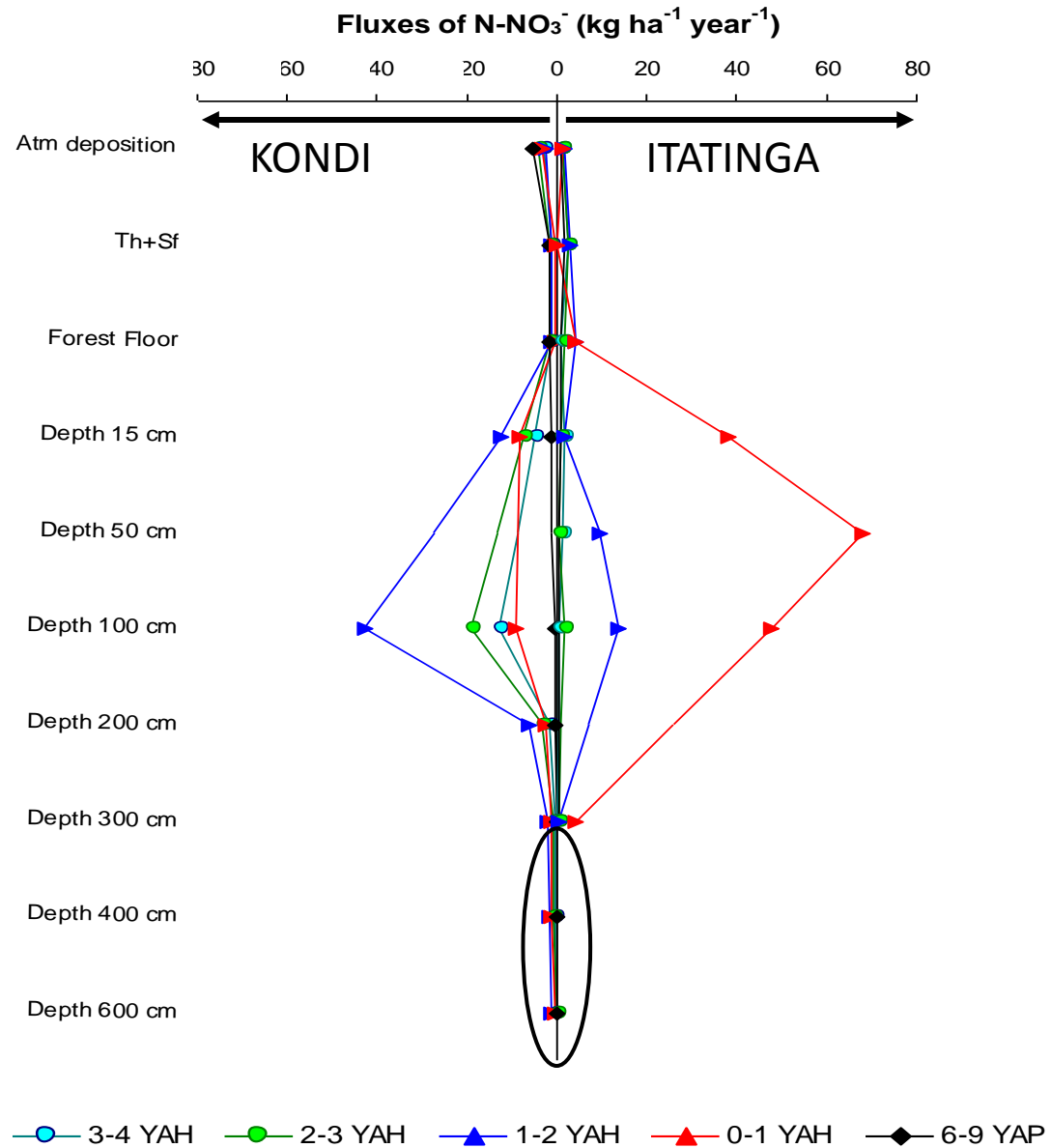
**20% Argile**



**Profondeur (m)**

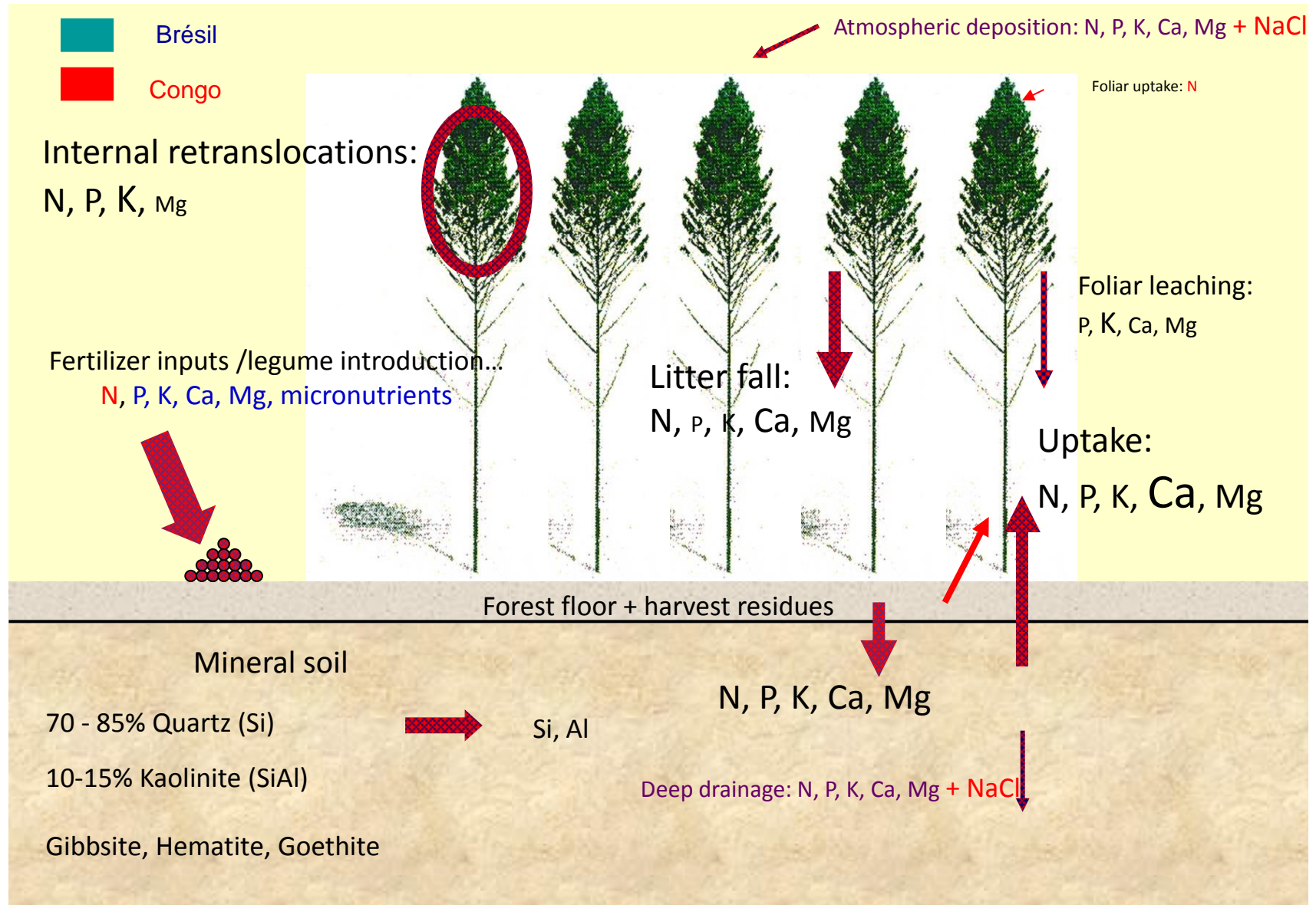


# Flux de $\text{NO}_3^-$ dans l'écosystème





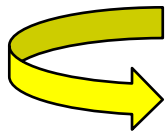
# Importance relative des différents cycles (Congo, Brésil)



# Bilan minéral : Itatinga (Brésil)

(Silva et al., FEM, 2013)

	Stemwood		Stembark		Output	Input	Budget
Volume ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ )	260		35				
Biomass ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	118		11				
Element	Concentration ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Amount ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Concentration ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Amount ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	( $\text{kg ha}^{-1}$ )		
N	1.1	130	3.7	41	130	80	-50
P	0.3	34	1.7	19	34	32	-2
K	0.4	47	2.9	32	47	105	58
Ca	1.7	201	13.1	144	201	0	-201
Mg	0.1	12	3.2	35	12	0	-12
S	0.1	12	0.4	4.4	12	24	12



**Bilan  $\approx$  équilibré avec la fertilisation appliquée**

mais

Nécessité apport de Ca-Mg et ↗N

**Apport de nutriments indispensable pour assurer une production durable  
de la majorité des écosystèmes forestiers** (Fisher and Binkley, 2000)

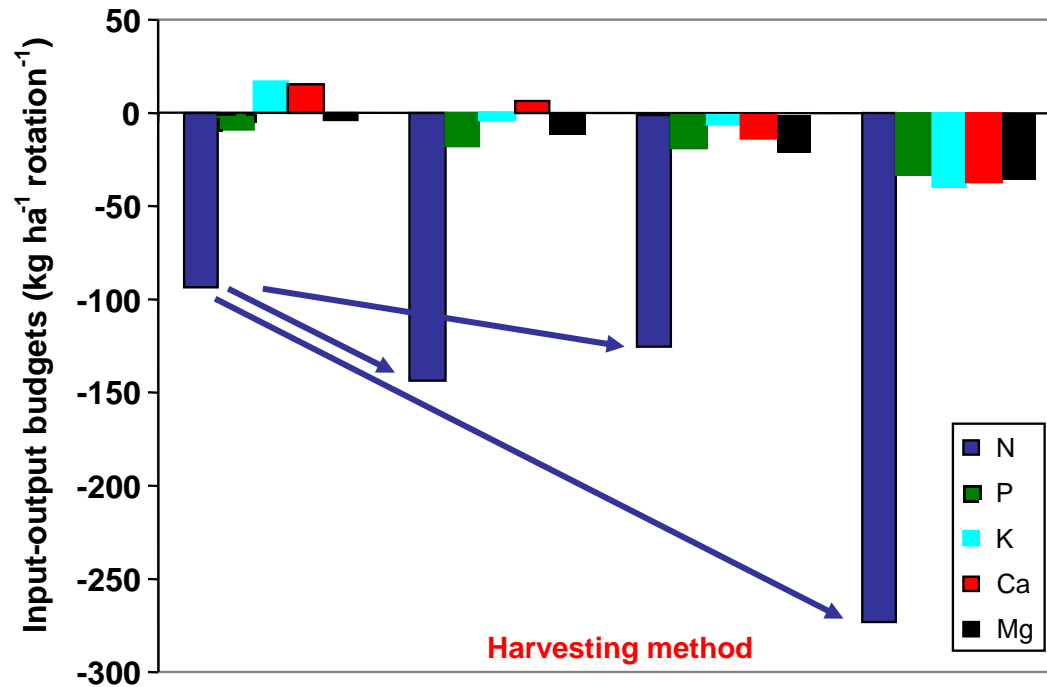


**Fertilisation (N, P, K, Ca, Mg, Bo, Zn, Cu,..) appliquée en plantations commerciales  
d'eucalyptus dans le monde entier**

- **Brésil** (Gonçalvez et al., South. Forests, 2008),
- **Argentine** (Graciano et al, Plant Soil, 2009)
- **Congo** (Laclau et al., FEM, 2010)
- **Afrique du Sud** (du Toit and Scholes, SJFR, 2002)
- **Australie** (Coorbeels et al., FEM, 2005)
- **Indonésie** (Mackensen and Fölster, FEM, 2000)

# Modes de gestion et bilans de fertilité (Congo)

(Laclau et al., FEM, 2010)

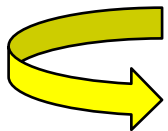


**Scenario 1:**  
de-barked pulpwood harvest

**Scenario 2:**  
de-barked pulpwood  
and firewood harvest

**Scenario 3:**  
pulpwood  
with bark harvest

**Scenario 4:**  
whole tree harvest



**Choix des modes de gestion préservant la fertilité des sols**

# Pistes de recherche

## Exemple de la gestion des taillis à Madagascar

**Quantification des principaux flux du cycle biologique**

**Raccourcissement des durées de rotation : coupe de brins de 2, 3 ans**



**Augmentation du prélèvement / unité de temps**



**Evolution temporelle de la minéralomasse /prélèvements au sol**

# Pistes de recherche

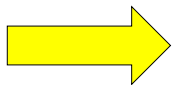
## Exemple de la gestion des taillis à Madagascar

**Quantification des principaux flux du cycle biologique**

**Exportation ou brûlis de la litière**



**Amplifie le (risque de) déséquilibre des bilans**



**Evaluation des retours au sol, des stocks d'éléments minéraux dans les litières et de leur décomposition = f (âge, toposéquence...)**

# Pistes de recherche

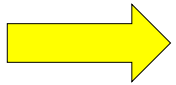
## Exemple de la gestion des taillis à Madagascar

**Intensification écologique de la production**

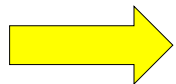
Pas d'apport minéral et/ou organique



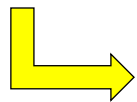
(Risque de) bilans de plus en plus déséquilibrés avec le temps



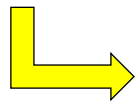
**Evolution des propriétés du sol sur une chronoséquence**



**Comparaison des plantations pures *E. robusta* et mixtes *E. robusta* + *A. dealbata* / *A. mearnsii***



**Evolution des propriétés du sol (C, N, P,...)**



**Production des peuplements**



**Complémentarité entre espèces (lumière, nutriments...)**



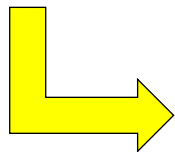
**Facilitation (fixation N<sub>2</sub>, disponibilité P, chaînes trophiques)**

# **Pistes de recherche**

## **Exemple de la gestion des taillis à Madagascar**

### **Fonctionnement des taillis**

- **Dynamique des systèmes racinaires (profondeur d'exploration, contribution des horizons profonds à la nutrition minérale, reconstitution des racines fines après coupe,...)**
- **Dynamique des réserves carbonées des souches après coupe...**
- **Caractérisation écophysiological (photosynthèse, consommation eau...)**
- **....**



**Atelier du 19 juin**





**Misoatra - Merci**