

Amélioration et validation du modèle de fonctionnement de la végétation ISBA-A-g_s : stress hydrique et flux de CO₂

Vincent Rivalland
27 Novembre 2003

Jury :

Serge Chauzy

président

André Chanzy

rapporteur

Philippe Ciais

rapporteur

Jean-François Soussana

rapporteur

Yves Brunet

examineur

Jean-Christophe Calvet

directeur de thèse

Spécialité :

Interaction, Végétation, Atmosphère

Université Paul Sabatier (Toulouse III)
École Doctorale Sciences de l'Univers



Centre National de Recherches Météorologiques
42, avenue G. Coriolis 31057 Toulouse cedex 1



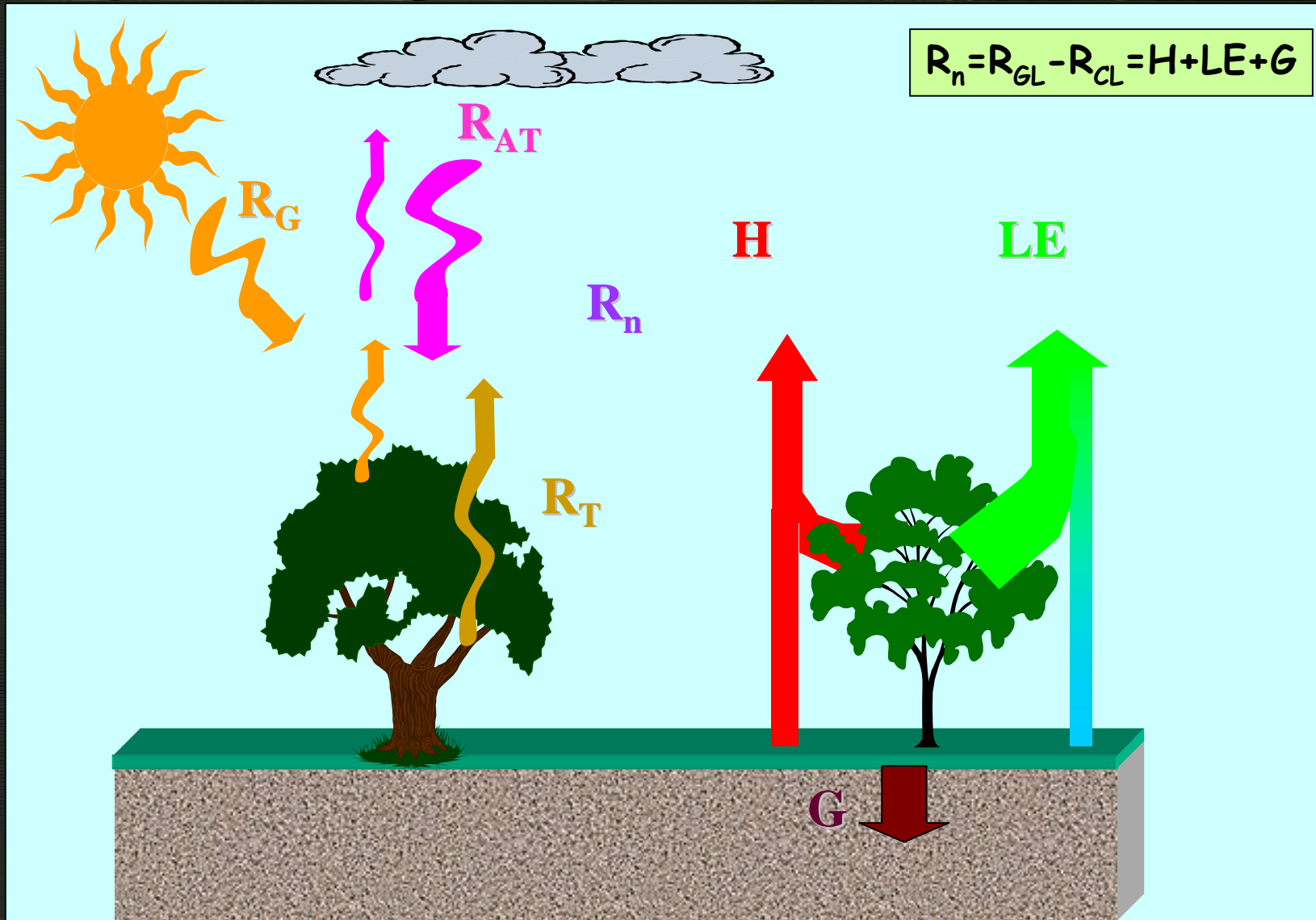
Objectifs de la thèse

I : Amélioration de la prise en compte du stress hydrique

II : Simulation et validation des flux de CO₂

**III : Modélisation de la biomasse et
des effets de fertilité du milieu**

Bilan énergétique en surface



Plan de l'exposé

PARTIE I: Contexte et introduction

PARTIE II: Paramétrisation du stress hydrique

1. Approche
2. Méta-analyse et paramétrisation pour les forêts

PARTIE III: Application à l'échelle du couvert - Flux de CO₂

1. Sites Euroflux – Méthodes d'analyse
2. Résultats

PARTIE IV: Version azote - Paramétrisation et évaluation

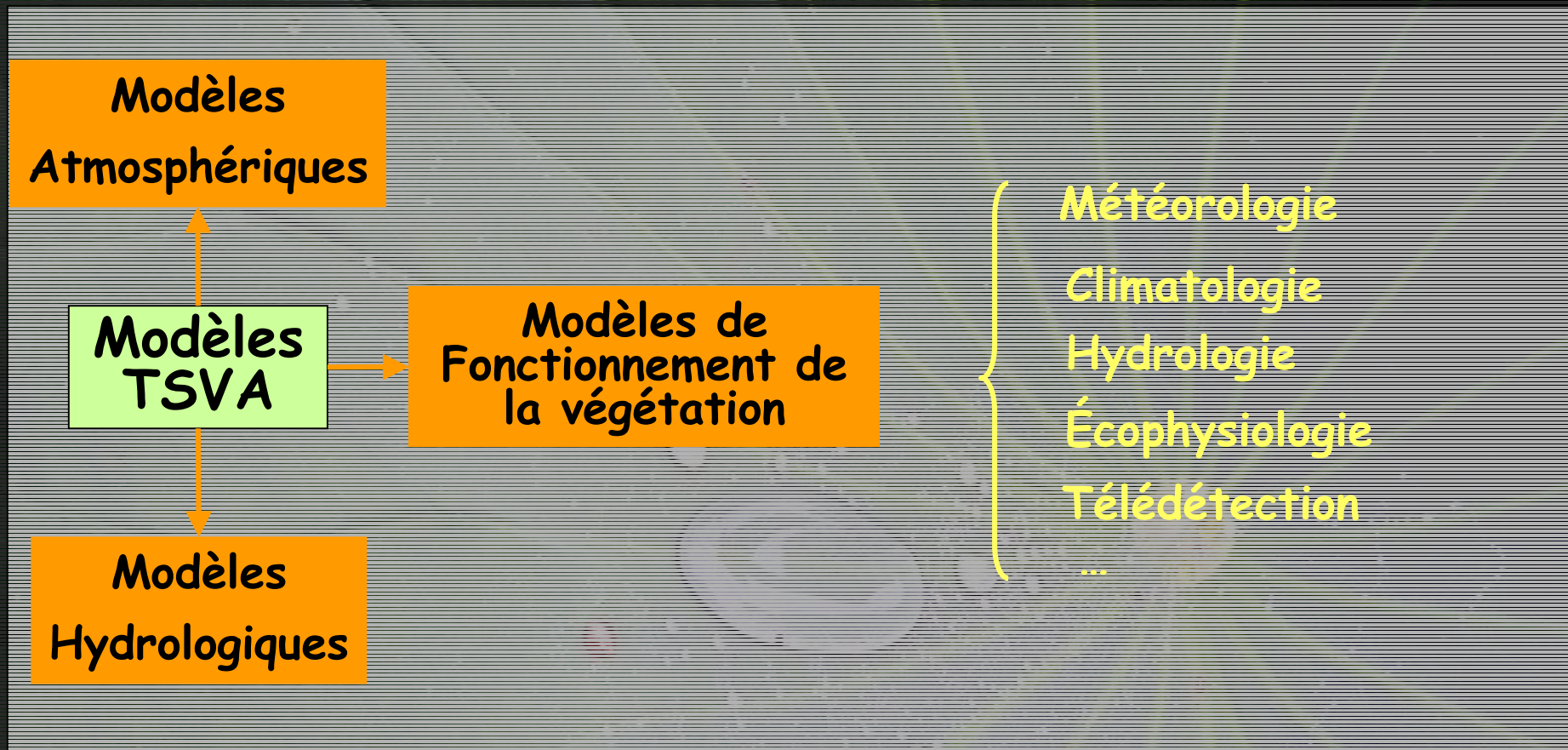
1. Formalisme du modèle et Méta-analyse
2. Expérimentation et Application

ISBA

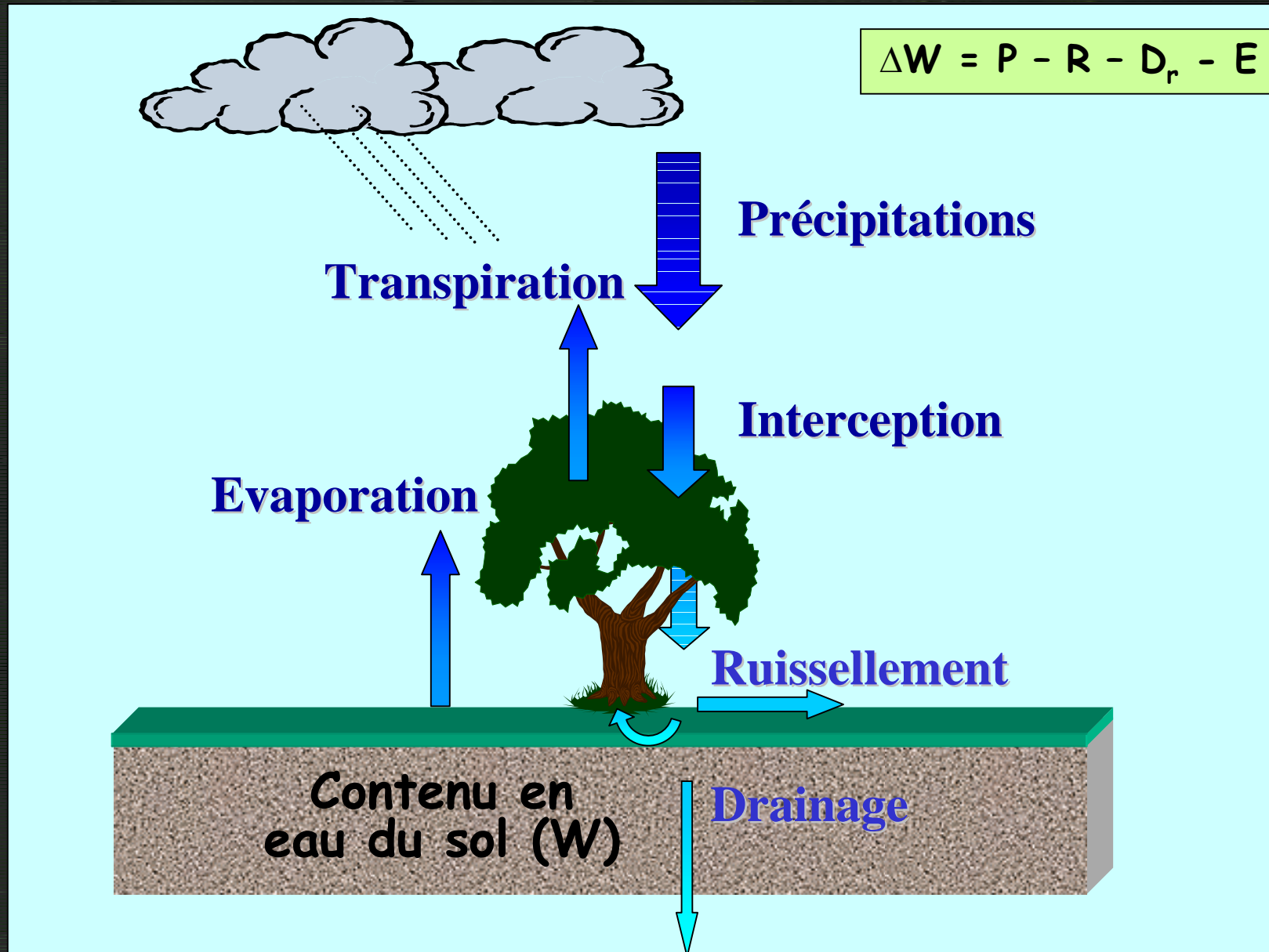
Interaction entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère

(schéma de surface opérationnel à Météo-France)

Famille des *TSVA* : Transfert entre le Sol, la Végétation et l'Atmosphère



Cycle de l'eau et bilan hydrique

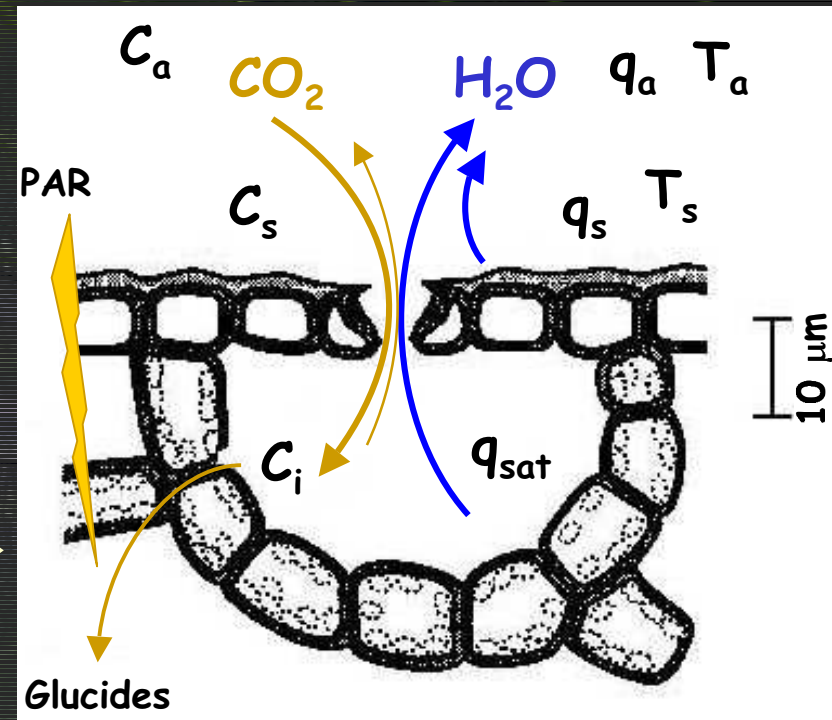
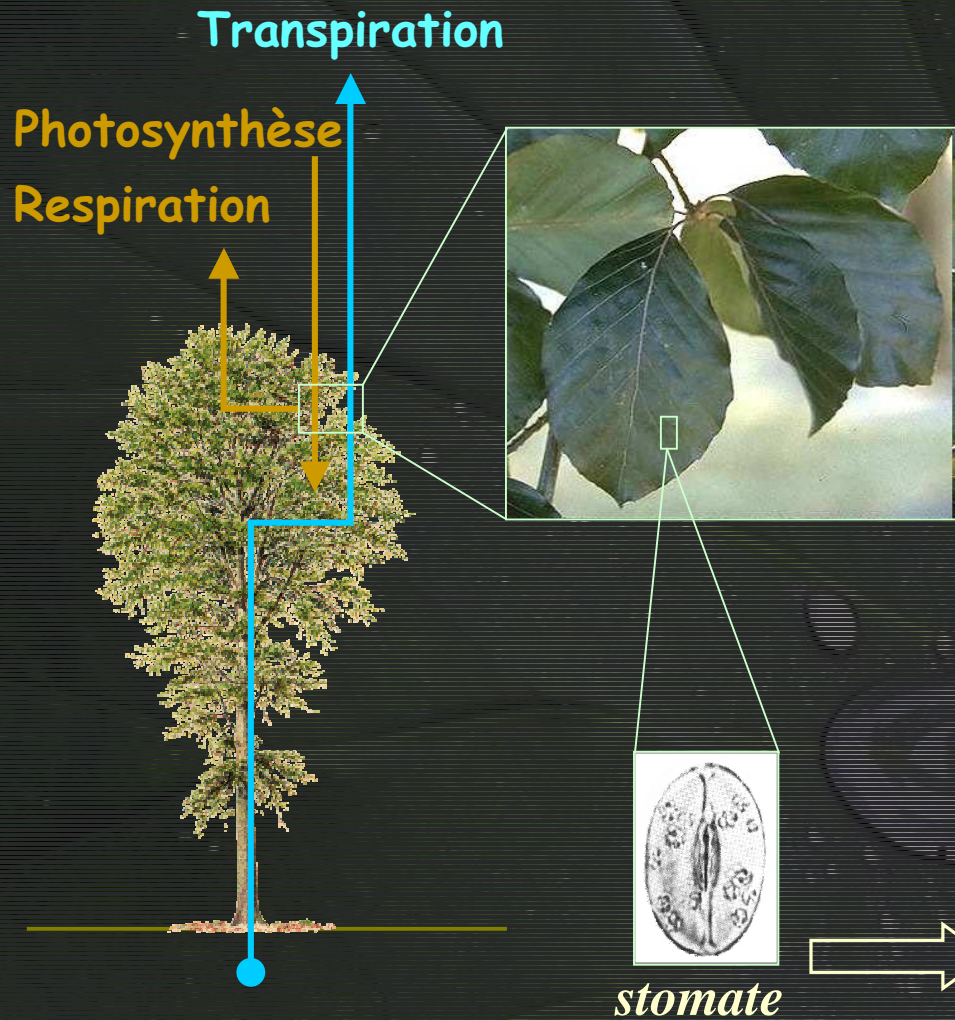


Rôle de la régulation stomatique

Ouverture stomatique optimise le rapport :

Photosynthèse / Transpiration

Conditions environnementales :
éclairage, température,
humidité de l'air, contenu en eau
du sol, $[CO_2]$ atmosphérique...



Régulation stomatique dans ISBA

Estimation de la conductance stomatique : g_s

ISBA-Standard

(Noilhan and Planton, 1989):

ISBA-A- g_s

(Calvet et al., 1998):

Température

Eclairement

Humidité air

Contenu en eau du sol

CO₂ atmosphérique

Photosynthèse

Respiration

(Jarvis, 1976)

} Assimilation nette

(Jacobs, 1995)

- ✓ modéliser **l'interaction végétation / climat** [\uparrow CO₂, \uparrow T°]
 - ✓ simuler les **échanges de carbone** de surface [flux net CO₂]
- ⇒ Enjeux importants pour la communauté scientifique

Deux versions d'ISBA

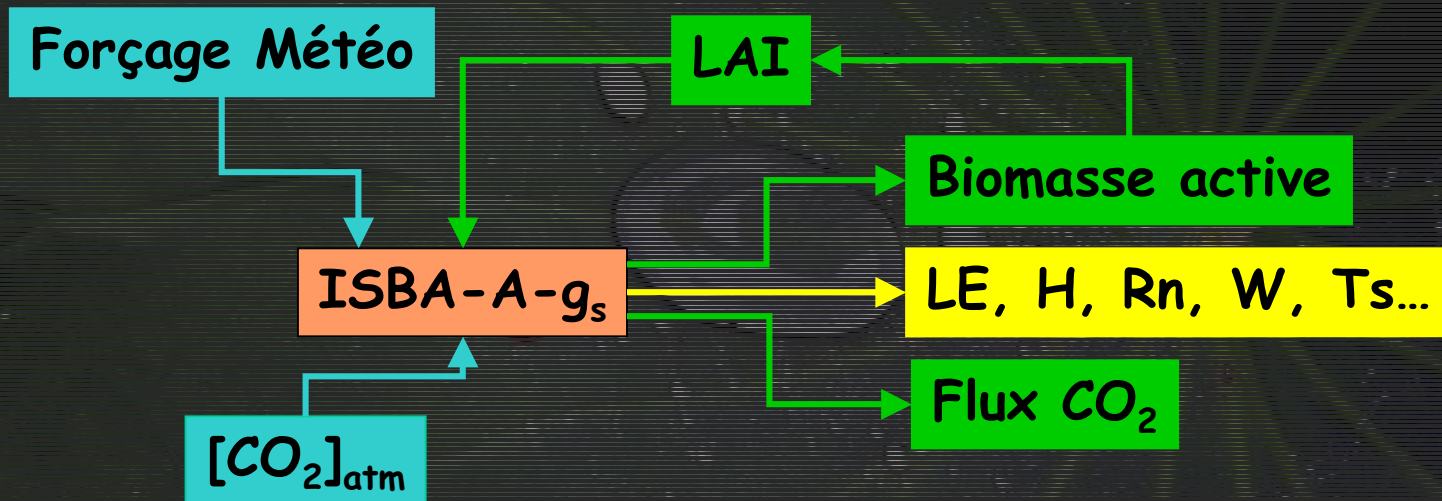
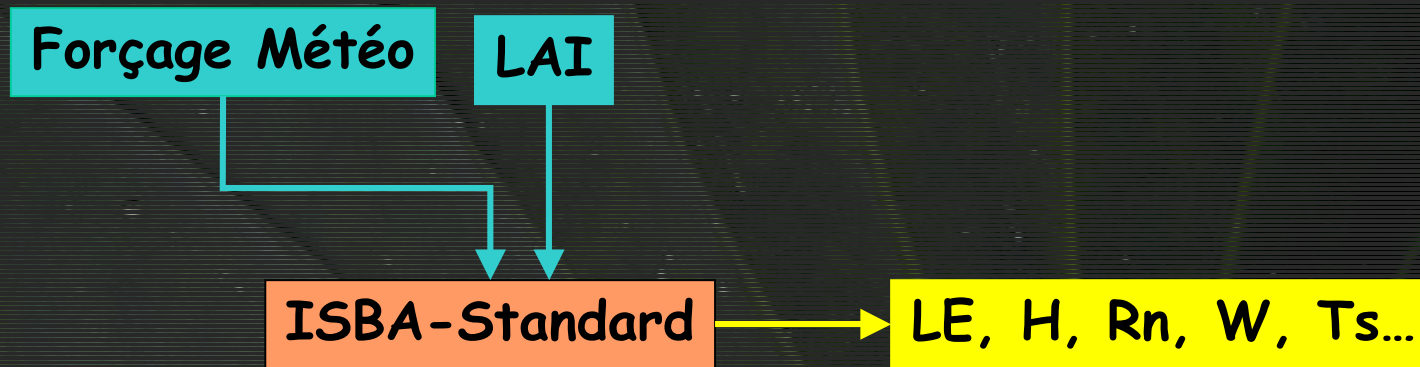


Schéma ISBA-A-g_s

ECHELLE DE LA FEUILLE

Modèle A-g_s : *Jacobs (1994)*

Variables climatiques de surface :
 $\Rightarrow [\text{CO}_2]_{\text{surface}}, R_G, T_s, D_s \dots$
 Paramètres du modèle :
 $\Rightarrow g_m, D_{\text{max}}, f_0$

Assimilation nette de CO₂

Conductance stomatique

Stress Hydrique
 $0 \leq \theta \leq 1$

ISBA
 Bilan énergétique et hydrique

Dilution azote

$$\alpha_B = \frac{1}{e \times N_a(\%) + f}$$

CROISSANCE ET MORTALITE

Croissance = $\sum A_n$
 Sénescence = loi exponentielle

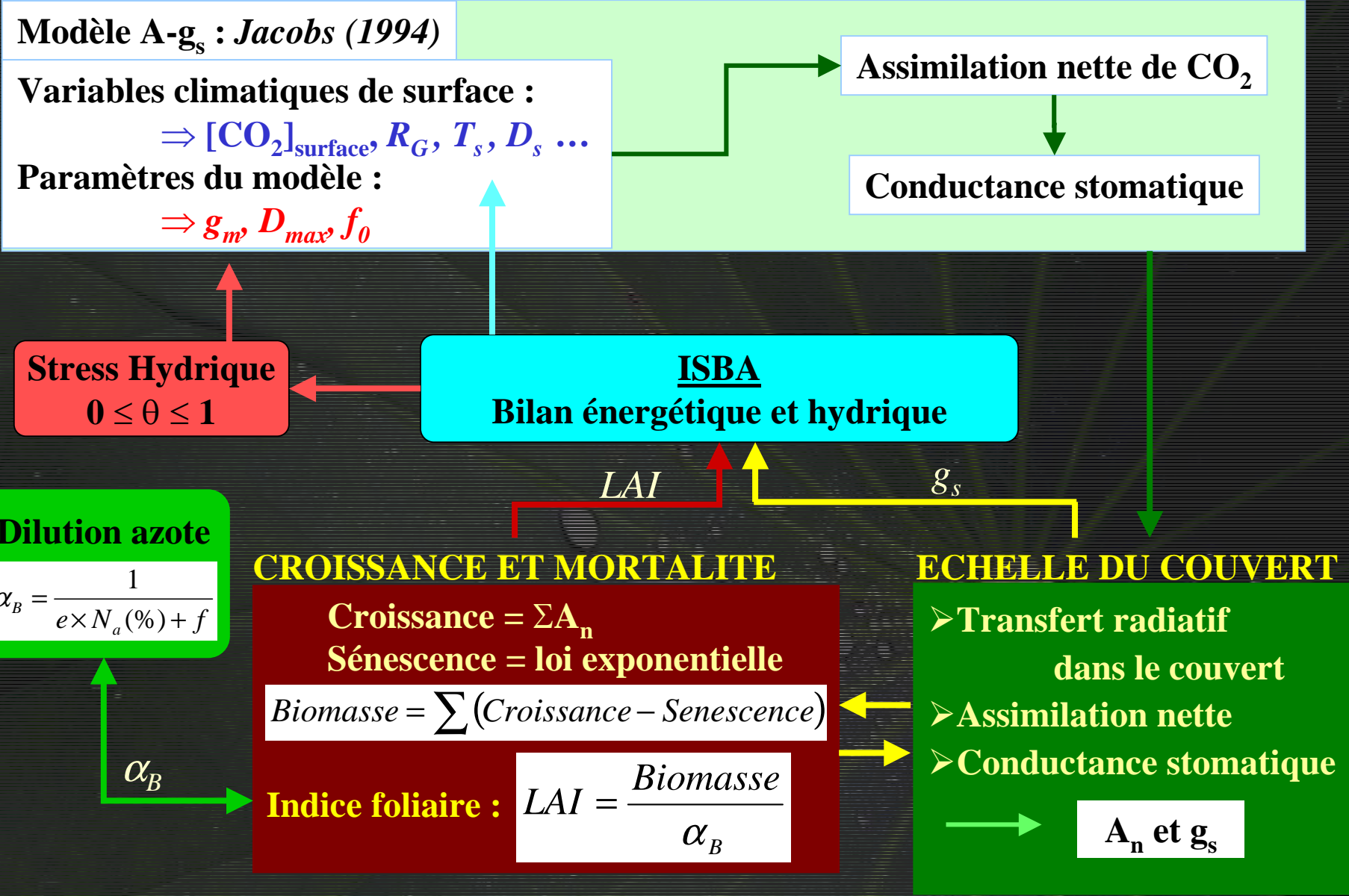
$$\text{Biomasse} = \sum (\text{Croissance} - \text{Senescence})$$

 Indice foliaire :
$$\text{LAI} = \frac{\text{Biomasse}}{\alpha_B}$$

ECHELLE DU COUVERT

- Transfert radiatif dans le couvert
- Assimilation nette
- Conductance stomatique

→ A_n et g_s



Plan de l'exposé

Objectif : Amélioration de la prise en compte du stress hydrique

PARTIE II: Paramétrisation du stress hydrique

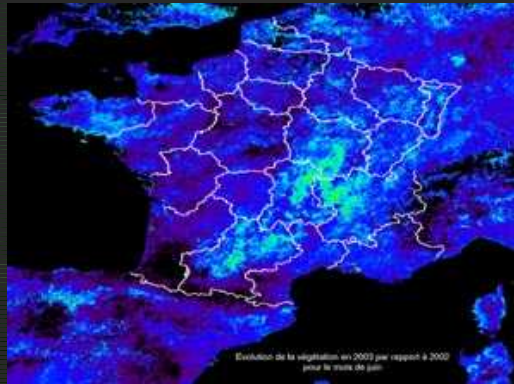
- 1. Approche**
- 2. Méta-analyses et paramétrisation pour les forêts**

Stress hydrique et végétation

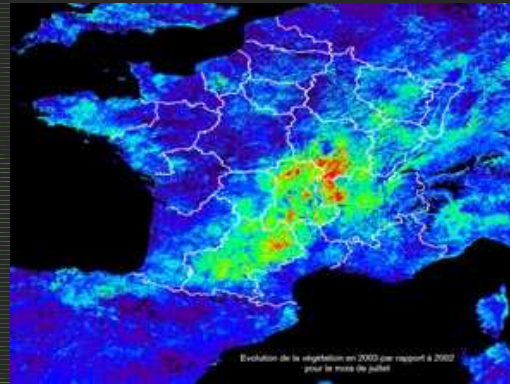
Illustration de la sécheresse de l'été 2003

Variation de l'indice de végétation (NDVI) entre 2003 et 2002

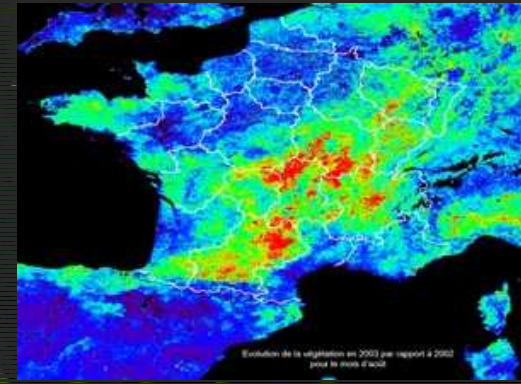
Juin



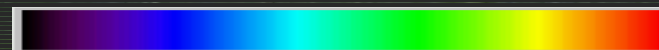
Juillet



Août



(CNES, 2003) Images SPOT/VEGETATION



← +Forte Indice 2003/2002 +Faible →

Conséquences du stress hydrique :

- ⇒ ↓ production végétale
- ⇒ ↓ évapotranspiration
- ⇒ ↑ température de surface

- ✓ Important de décrire finement les mécanismes
- ✓ Simuler leurs effets dans les modèles TSVA

Stress hydrique dans les modèles

θ = fonction de stress hydrique

Type Jarvis :

✓ Conductance stomatique $\times \theta$

Noilhan et Planton, 1989

Type A-gs :

✓ Assimilation nette $\times \theta$

Sala et Tenhunen, 1996

✓ Assimilation maximale $\times \theta$

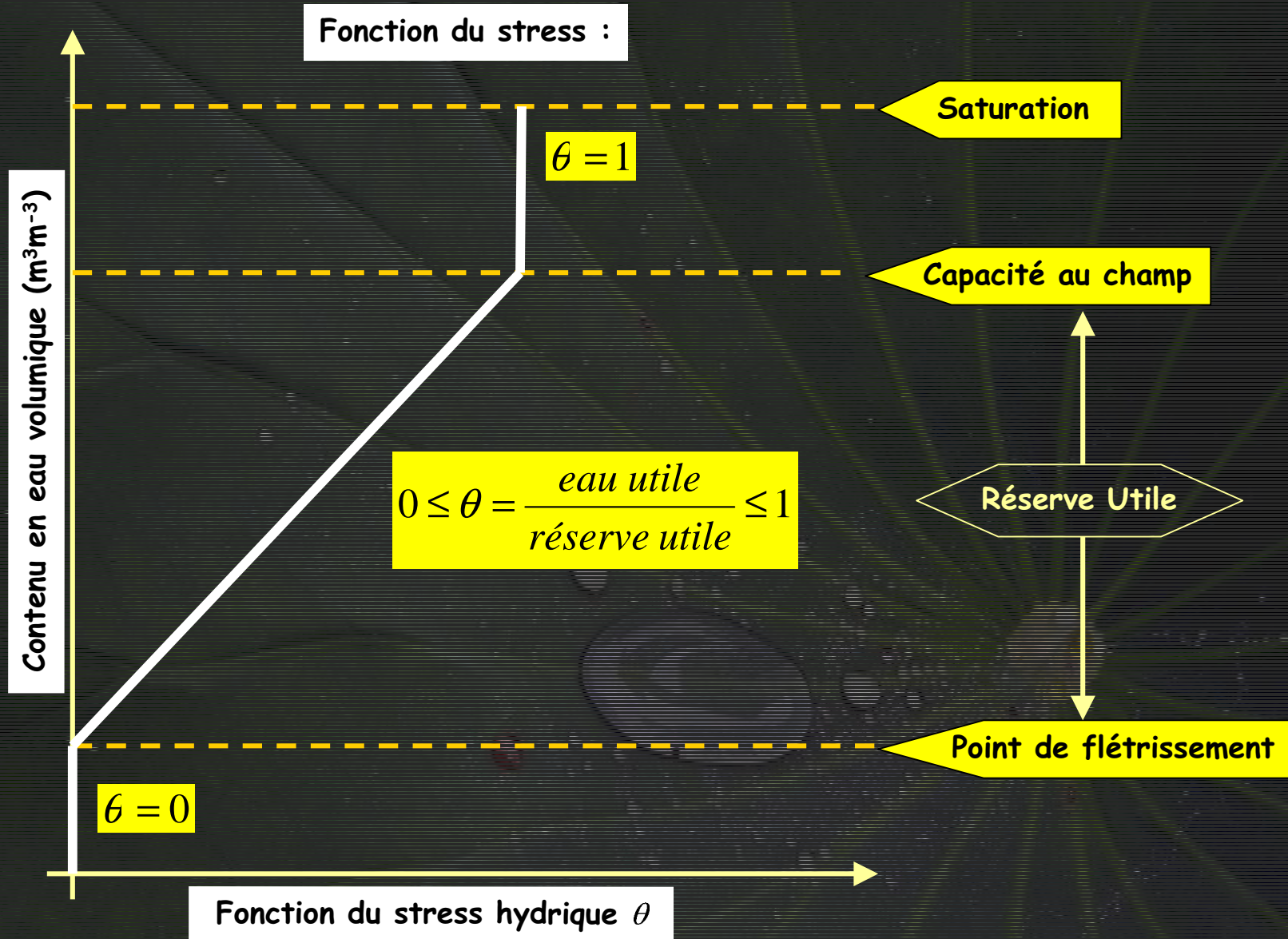
Cox et al., 1999

Différence dans les définitions de θ

Mahfouf et al., 1996

$\theta = f \left\{ \begin{array}{l} - \text{contenu en eau} \\ - \text{potentiel hydrique} \\ - \text{signal hormonal} \end{array} \right\}$

Définition de la fonction du déficit hydrique



Paramétrisation du stress *des HERBACEES*

Effet de l'augmentation du déficit hydrique du sol

↳ régulation par la plante de

$$WUE = \frac{\text{Photosynthèse}}{\text{Transpiration}}$$

PARAMETRISATION (Calvet, 2000)

Deux types de stratégies :

DEFENSIVE

WUE augmente dans les premières étapes du stress

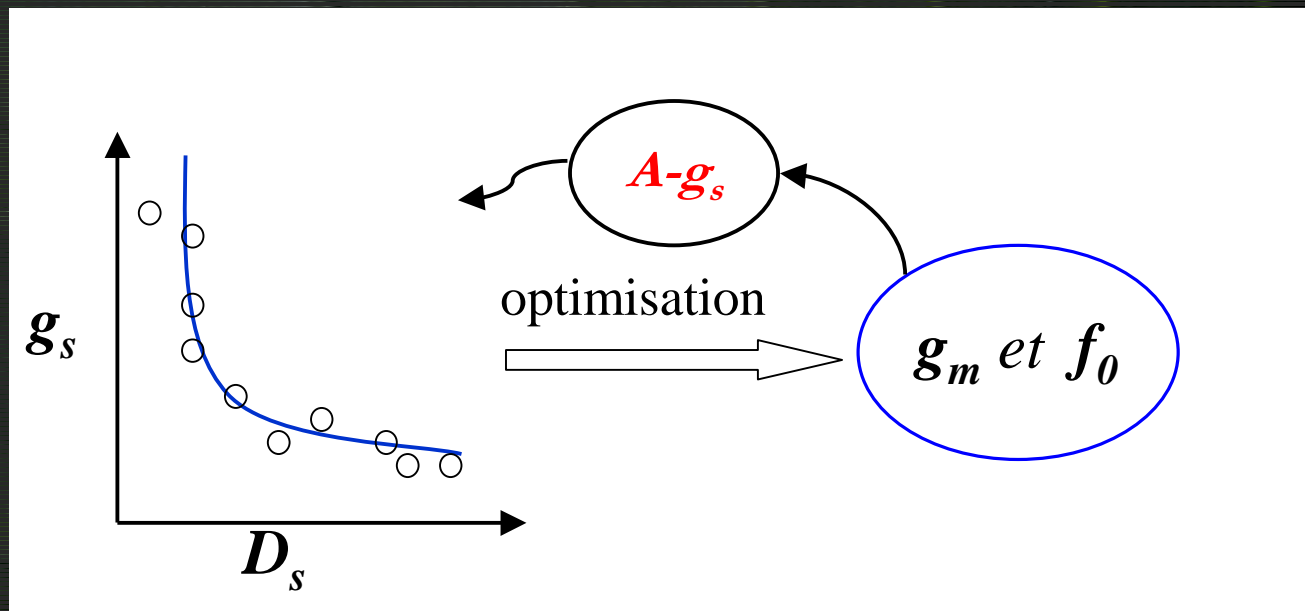
OFFENSIVE

WUE stable ou diminuant

ESPECES LIGNEUSES

Approche g_s-D_s

Méthodologie identique aux herbacées en optimisant sur g_m et f_0



- ➡ Mesures directes - échelle de la feuille
- ➡ Mesures micrométéorologiques - échelle du couvert

+ Littérature scientifique

Méta-analyse bibliographique

Conditions de déficit hydrique non limitantes

Résultats d'optimisation [g_m^* : f_o^*]

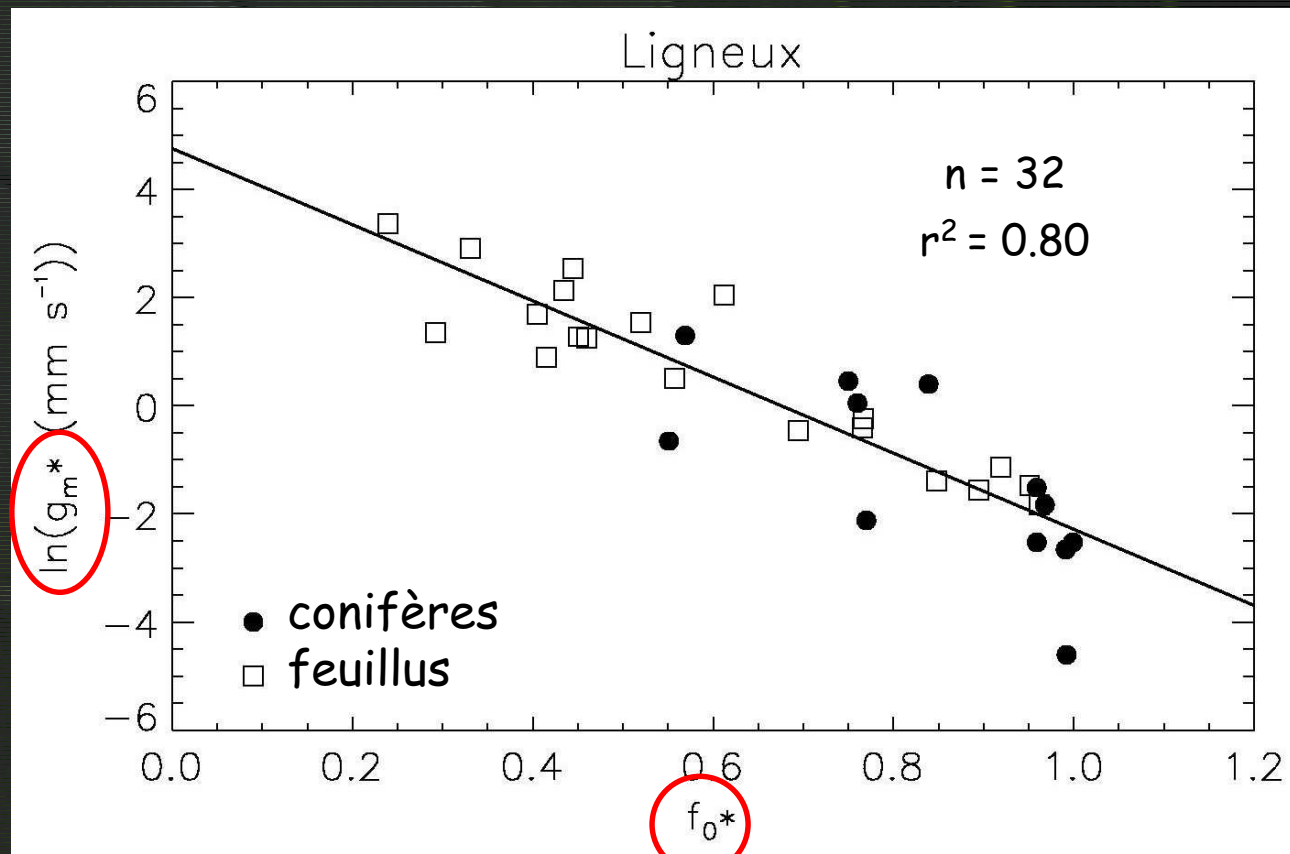
Espèce	Référence	g_m^* (mm s ⁻¹)	f_o^*	D_{max}^* (g kg ⁻¹)
<i>Actinidia deliciosa</i> (kiwi)	Gucci <i>et al.</i> , 1996	7.72	0.612	20
<i>Arbutus unedo</i> (arbusier)	Turner <i>et al.</i> , 1984	0.25	0.848	25
<i>Citrus sinensis</i> (citronnier)	Cohen et Cohen, 1983	3.88	0.292	45
<i>Corylus avellana</i> (noisetier)	Turner <i>et al.</i> , 1984	1.67	0.557	30
<i>Eucalyptus deglupta</i> (eucalyptus)	El-Sharkawy <i>et al.</i> , 1984	28.96	0.239	40
<i>Gossypium hirsutum</i> (coton)	Turner <i>et al.</i> , 1984	0.16	0.962	300
<i>Gossypium hirsutum</i> (coton)	Turner <i>et al.</i> , 1984	0.79	0.767	300
<i>Hedera helix</i> (lierre)	Aphalo et Jarvis, 1991	0.63	0.695	70
<i>Hedera helix</i> (lierre)	Aphalo et Jarvis, 1991	12.58	0.445	70
<i>Hedera helix</i> (lierre)	Aphalo et Jarvis, 1991	2.44	0.415	70
<i>Hedera helix</i> (lierre)	Aphalo et Jarvis, 1991	3.59	0.451	70
<i>Larix × eurolepis</i> (mélèze)	Sandford et Jarvis, 1986	0.08	0.959	300
<i>Malus pumila</i> (pommier)	Thorpe <i>et al.</i> , 1980	8.50	0.434	20
<i>Nerium oleander</i> (laurier rose)	Turner <i>et al.</i> , 1984	5.44	0.405	70
<i>Picea mariana</i> (épicéa)	Dang <i>et al.</i> , 1997	0.12	0.770	80
<i>Pinus banksiana</i> (pin gris)	Dang <i>et al.</i> , 1997	0.01	0.992	300
<i>Pinus contorta</i> (pin)	Sandford et Jarvis, 1986	0.16	0.968	300
<i>Pinus pinaster</i> (pin maritime)	Picon <i>et al.</i> , 1996	1.05	0.760	100
<i>Pinus pinaster</i> (pin maritime)	Picon <i>et al.</i> , 1996	1.58	0.750	100
<i>Pinus radiata</i> (pin)	Attiwill <i>et al.</i> , 1982	0.08	0.999	45
<i>Pinus süchensis</i> (pin)	Sandford et Jarvis, 1986	0.07	0.991	300
<i>Pinus sylvestris</i> (pin sylvestre)	Sandford et Jarvis, 1986	0.22	0.959	300
<i>Pinus sylvestris</i> (pin sylvestre)	Sandford et Jarvis, 1986	3.66	0.569	300
<i>Pinus taeda</i> (pin à encens)	Will et Teskey, 1997	1.49	0.839	80
<i>Pistacia vera</i> (pistachier)	Turner <i>et al.</i> , 1984	0.23	0.951	400
<i>Pistacia vera</i> (pistachier)	Turner <i>et al.</i> , 1984	0.32	0.919	300
<i>Prunus dulcis</i> (prunier)	Turner <i>et al.</i> , 1984	0.21	0.895	300
<i>Prunus dulcis</i> (prunier)	Turner <i>et al.</i> , 1984	0.66	0.766	300
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (sapin de Douglas)	Meinzer, 1982	0.52	0.551	20
<i>Quercus petraea</i> (chêne sessile)	Picon <i>et al.</i> , 1996	3.51	0.460	100
<i>Quercus petraea</i> (chêne sessile)	Picon <i>et al.</i> , 1996	4.68	0.520	100
<i>Quercus rubra</i> (chêne rouge)	Will et Teskey, 1997	18.28	0.331	80

Paramètres A- g_s :

23 espèces ligneuses

Variabilité inter-spécifique *ligneux*

Relation linéaire [$\ln(g_n^*)$; f_0^*]
en conditions hydriques du sol non limitantes

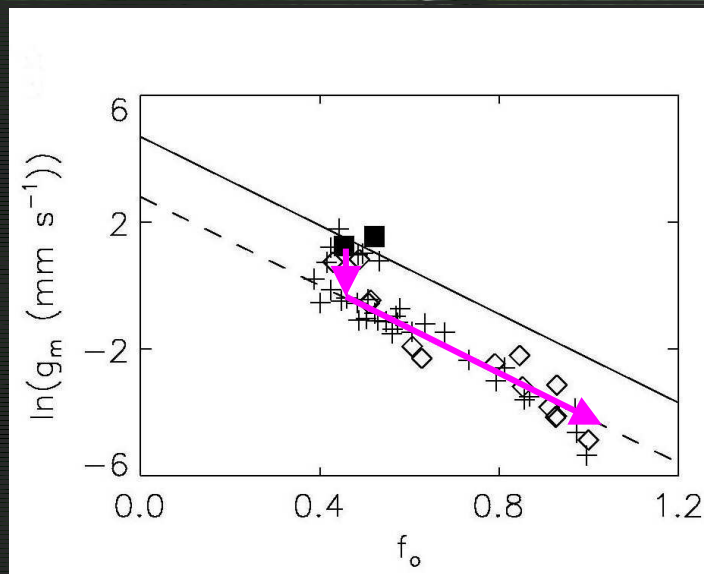


Effet du déficit hydrique

Effet du stress hydrique sur l'évolution des paramètres g_m et f_0

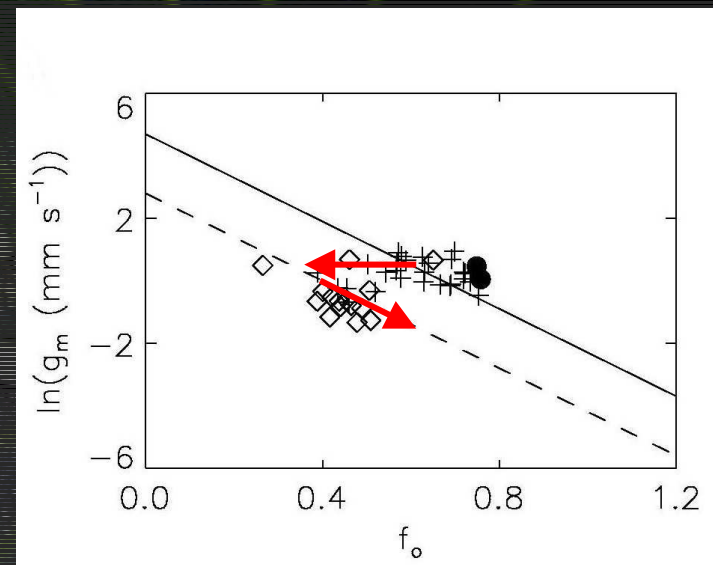
- ➔ Deux jeux de données en milieu contrôlé (Picon et al., 1998)
- ➔ Mesures à l'échelle de la feuille
- ➔ Gamme complète d'états du déficit hydrique du sol

Chêne Sessile (*Quercus Petraea*)



■ ● : $\theta \geq 1$
+ : $0.13 < \theta < 0.7$
◇ : $\theta < 0.13$

Pin Maritime (*Pinus Pinaster*)

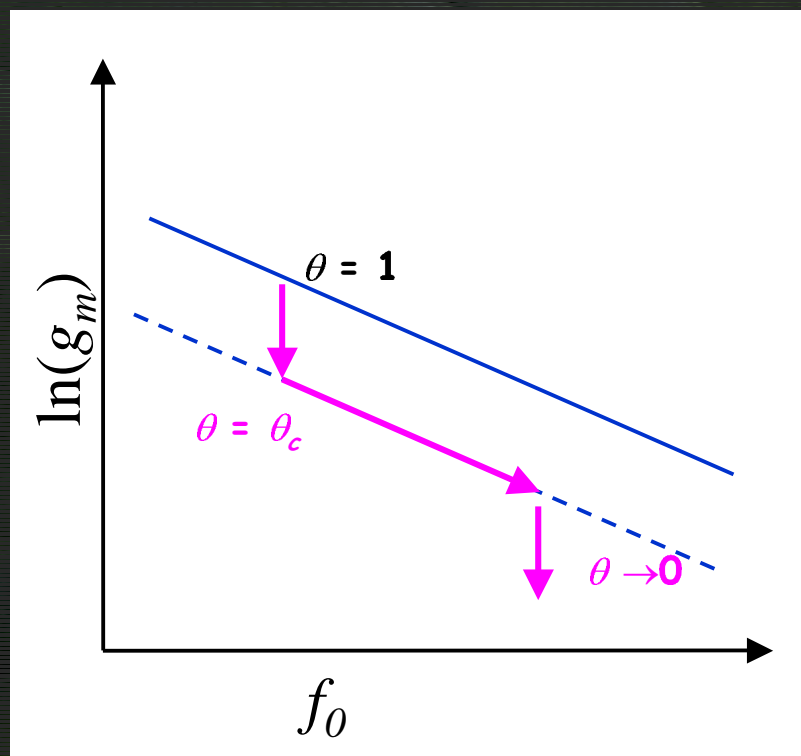


Paramétrisation du stress *LIGNEUX*

Deux types de stratégies :

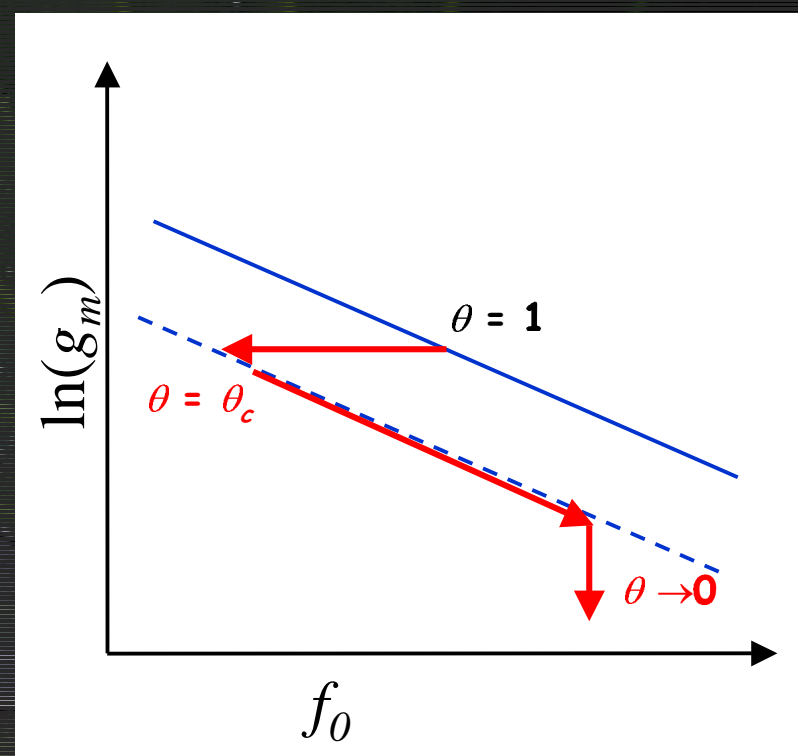
OFFENSIVE

Chêne Sessile



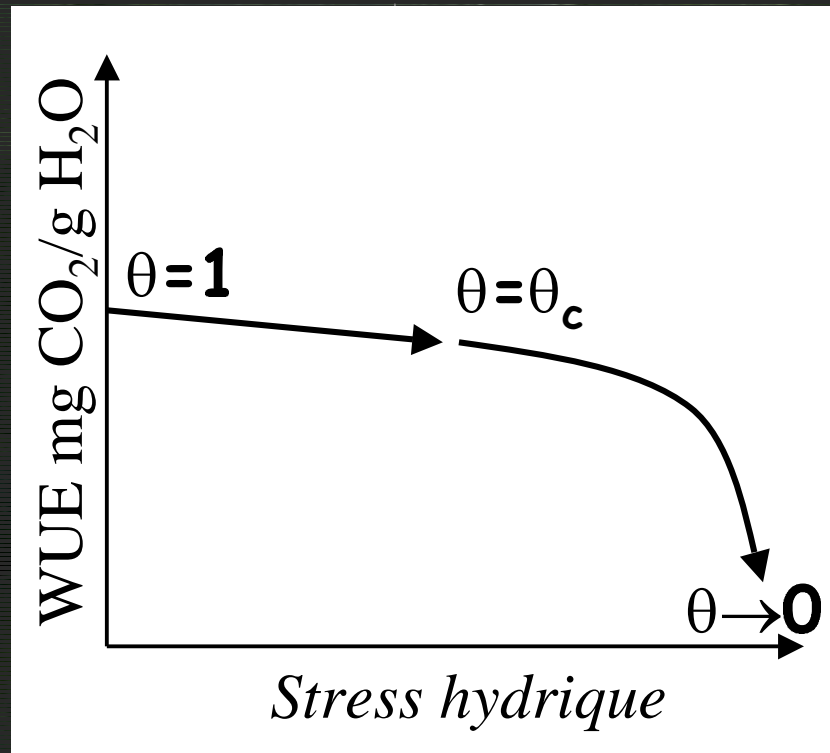
DEFENSIVE

Pin Maritime

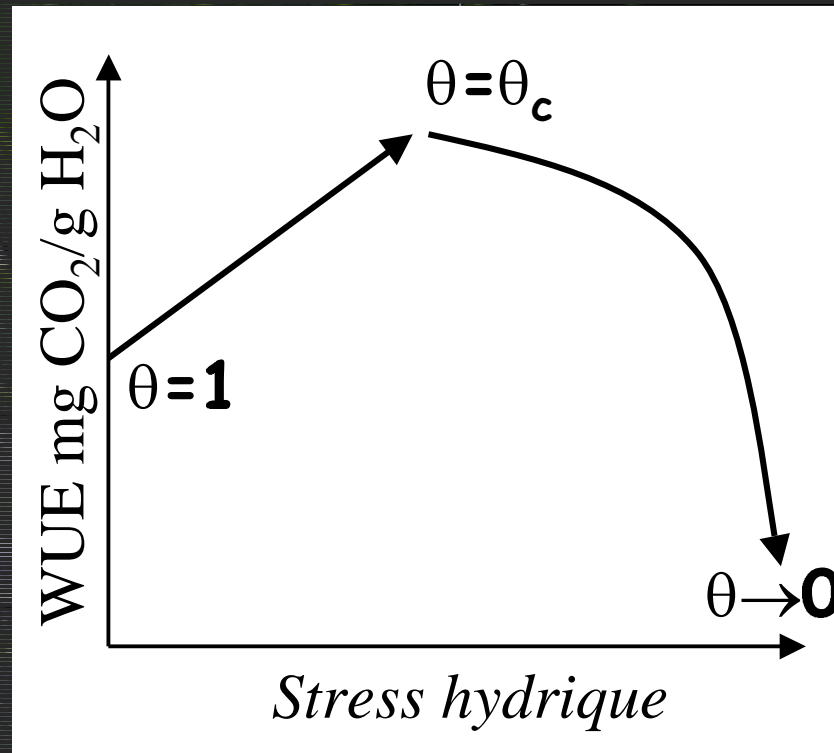


Efficacité d'utilisation de l'eau en fonction du stress hydrique:

STRATEGIE OFFENSIVE



STRATEGIE DEFENSIVE



Plan de l'exposé

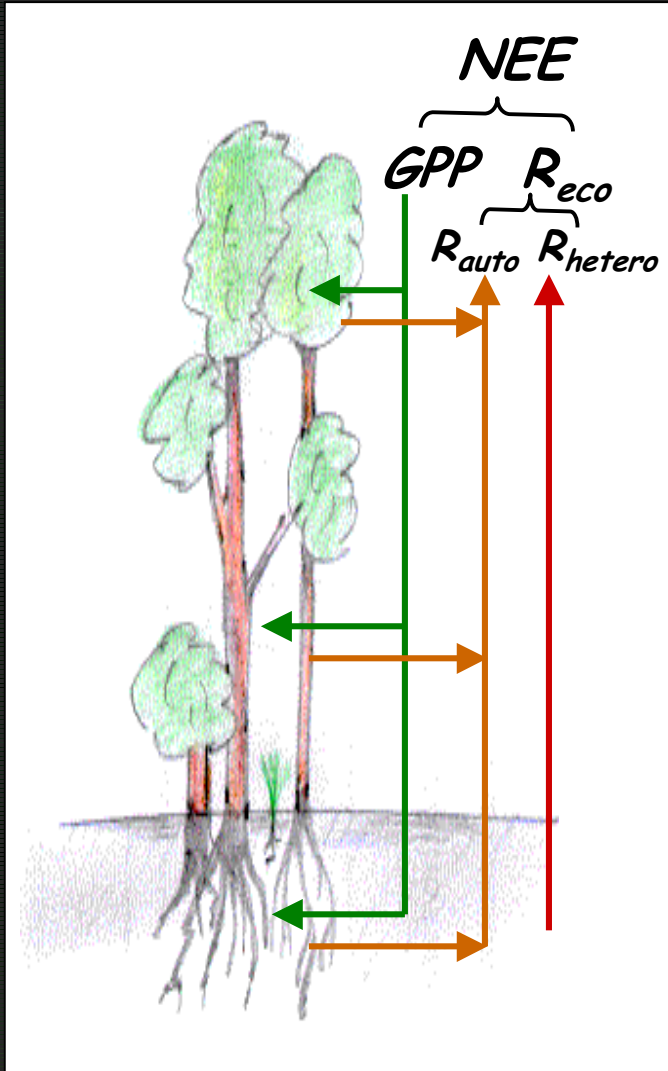
Objectif : Simulation et validation des flux de CO₂

PARTIE III: Application à l'échelle du couvert - Flux de CO₂

1. Sites Euroflux - Méthodes d'analyse
2. Résultats

Termes du Bilan Carboné

Échanges Écosystème-Atmosphère



Assimilation

⇒ photosynthèse

⇒ Production primaire brute de l'écosystème (GPP)

Respiration

⇒ Autotrophe : (R_{auto})

⇒ Hétérotrophe : ($R_{hétéro}$)

⇒ Écosystème (R_{eco})

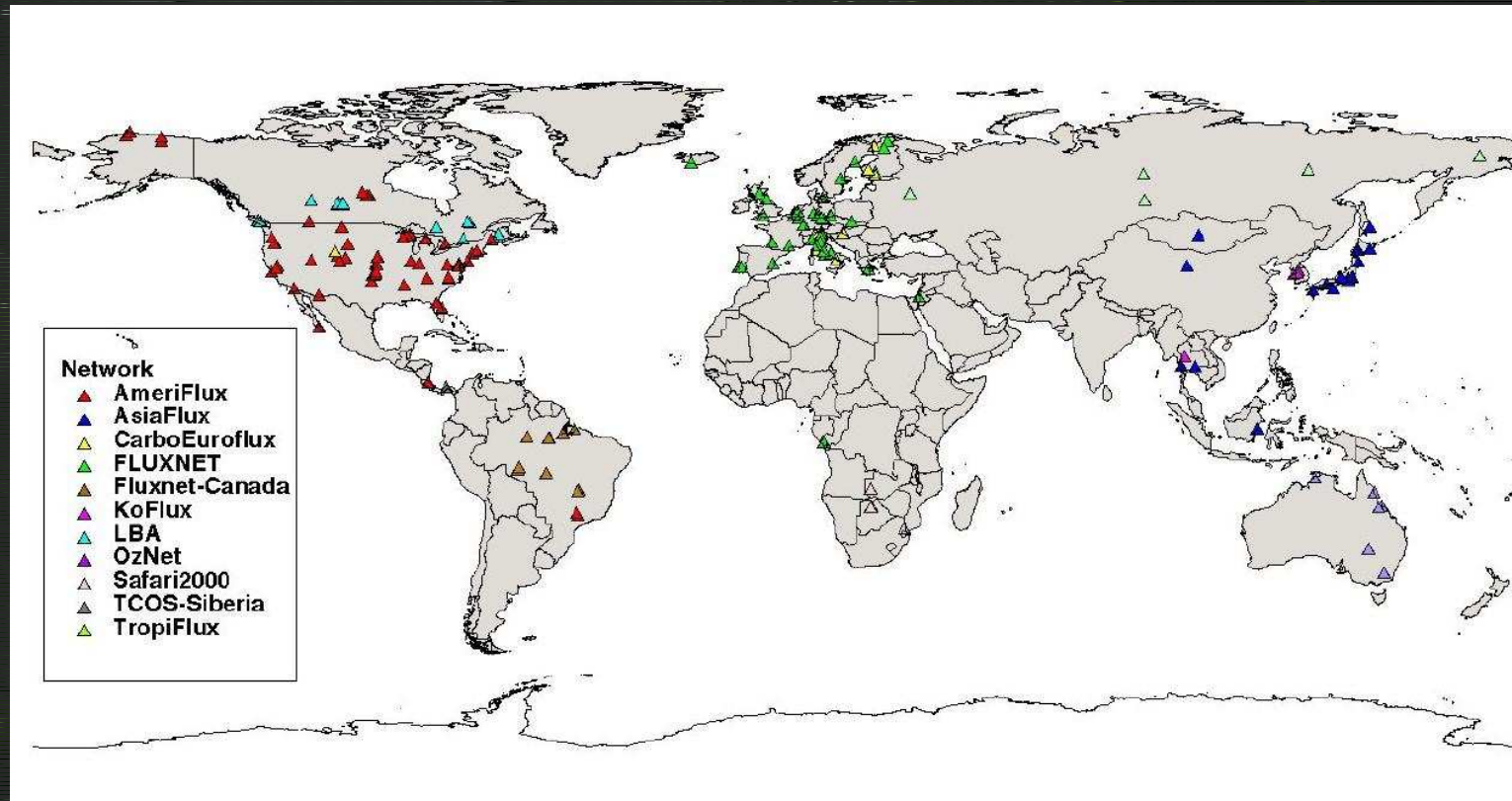
Bilan net

⇒ Production primaire nette de l'écosystème (NEE)

$$NEE = GPP - R_{eco}$$

FLUXNET

Réseau global de mesures de flux de carbone CARBOEUROFLUX, Ameriflux, Asiaflux...



Méthode : Covariance Turbulente

⇒ NEE (Flux net de CO_2)

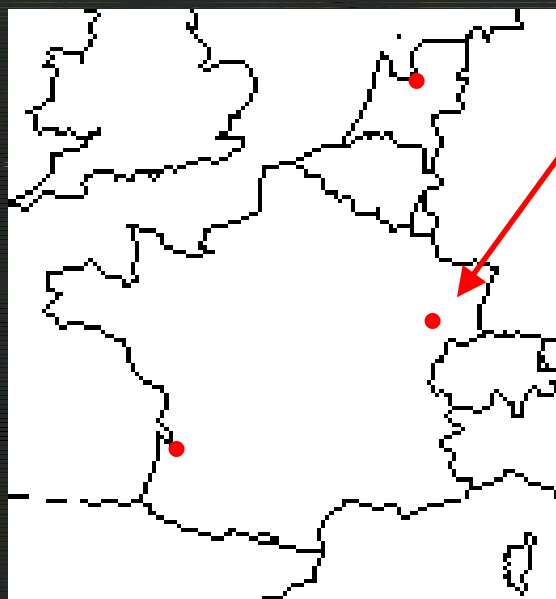
⇒ R_{eco} (estimation nocturne + extrapolation diurne)

⇒ GPP (estimation diurne)

1 Sites expérimentaux

INRA, Nancy

Sites CARBOEUROPE



Site de Hesse

Type de végétation

Une strate de végétation

- Une strate arborescente

Hêtre (*Fagus Sylvatica*)

Âge : 30 ans

Hauteur : 10-14 m

SITE: Sarrebourg
COUNTRY: France
LOCATION: 48°40' N - 7°05' E
ELEVATION: 300 m



2 Sites expérimentaux

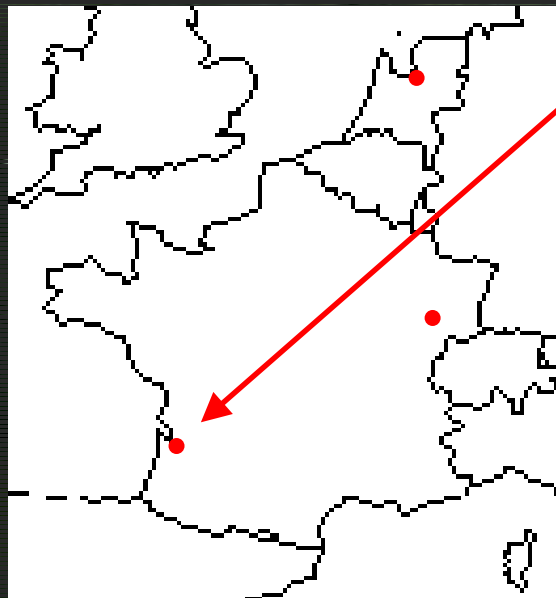
INRA, Bordeaux

Site du Bray

SITE: Bordeaux
COUNTRY: France
LOCATION: 44°05' N - 0°05' E
ELEVATION: 60 m

•Ecotype « **lande humide** »

Sites CARBOEUROPE



Type de végétation

Deux strates de végétation

•Une strate arborescente

pins maritimes (*Pinus Pinaster* Ait)

Âge : 28 ans

Hauteur : ~18 m

•Une strate herbacée

molinie (*Molinia coerulea* L. M.)

Hauteur : ~80 cm



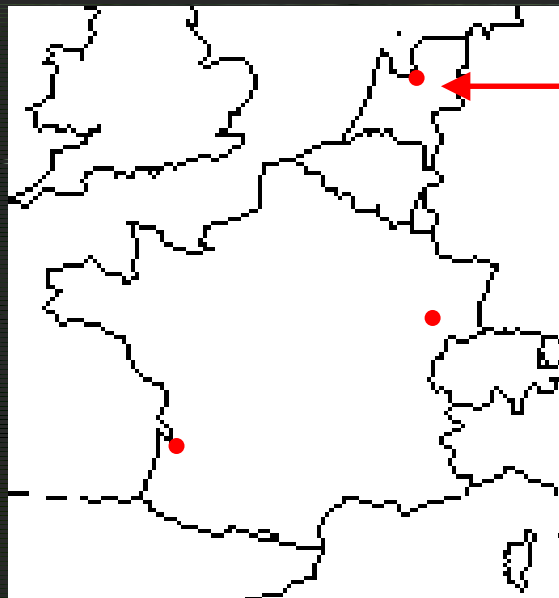
3 Sites expérimentaux

Exercice d'intercomparaison PILPS-Carbone, 2002

Site de Loobos

SITE: Winand Staring Center
COUNTRY: Netherlands
LOCATION: 52°10' N 5°44' 38" E
ELEVATION: 25 m

Sites CARBOEUROPE



Type de végétation

Deux strates de végétation

- Une strate arborescente

pins sylvestre (*Pinus sylvestris*)

Âge : 80 ans

Hauteur : ~14 m

- Une strate herbacée

Canche flexueuse (*Deschampsia flexuosa*)

Hauteur : ~50 cm



Étapes de l'application

Renseigner les paramètres clefs du modèle

1. Surface :

Texture du sol, albédo, rugosité,
coefficients thermiques...

Mesuré, prescrit
ou calibré

2. Photosynthèse-conductance stomatique :

g_m^* , D_{max}^* , f_0^* , stratégie

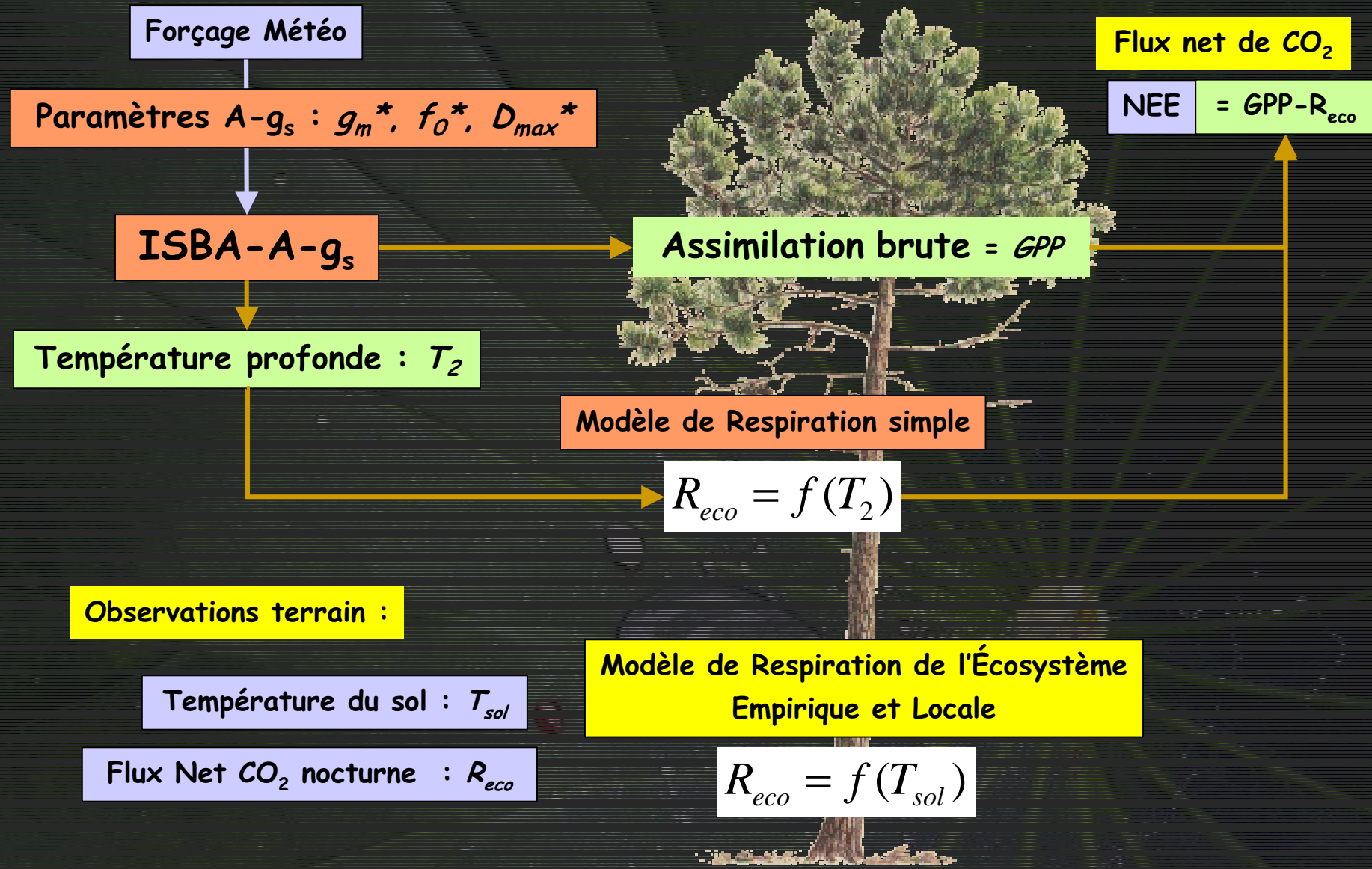
prescrit ou
calibré

3. Paramétrer la respiration :

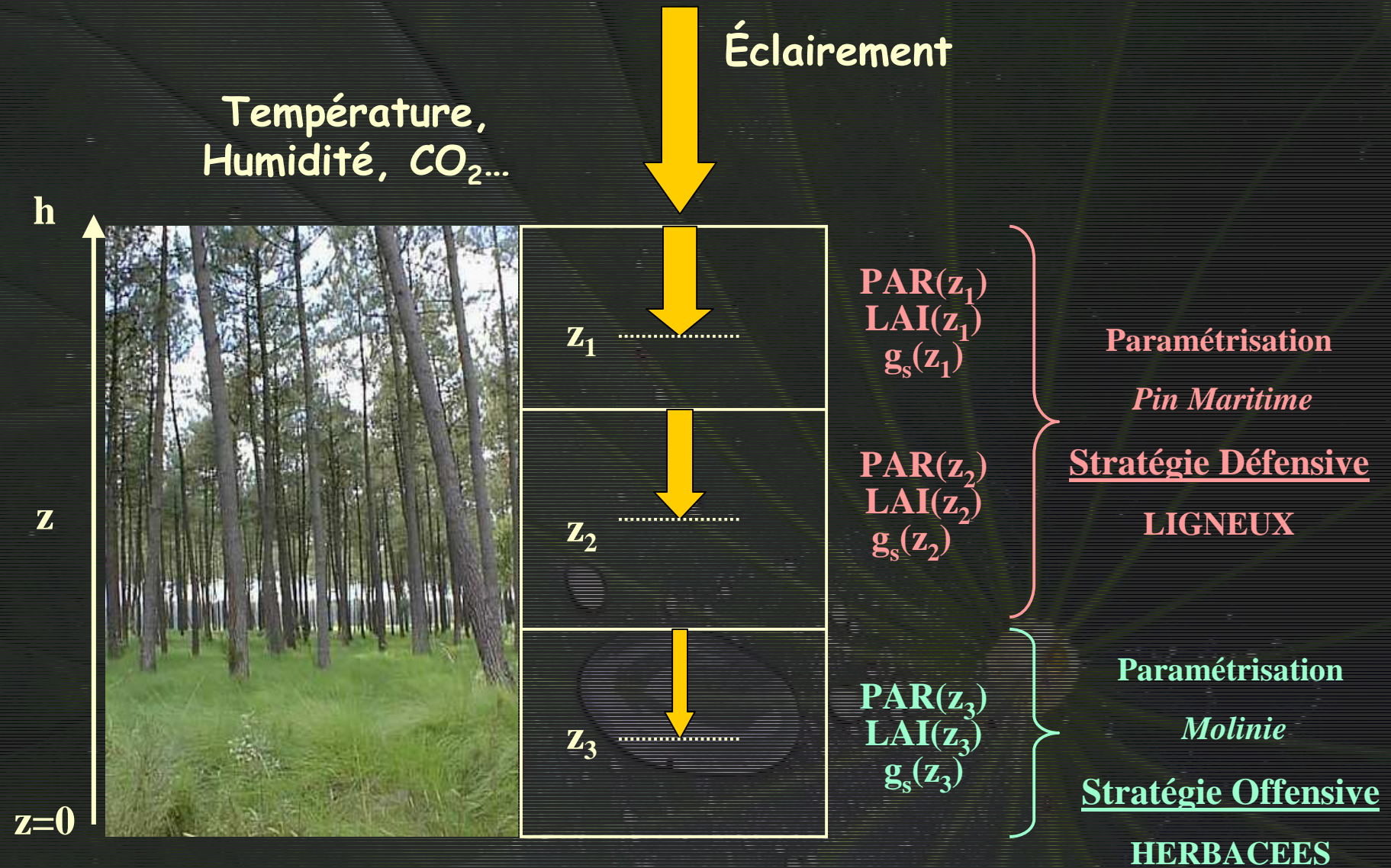
R_{eco} (25°C), Q_{10}

bibliographie

Estimation du flux net carboné dans ISBA-A-g_s



Cas de la Lande humide

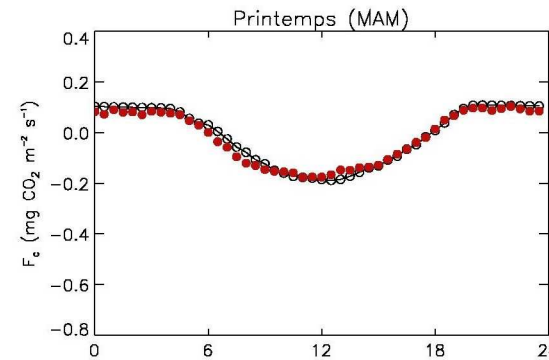
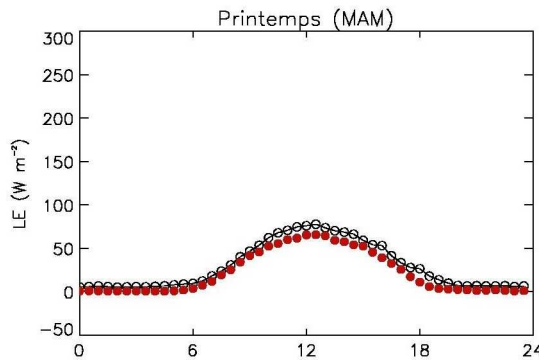


Printemps

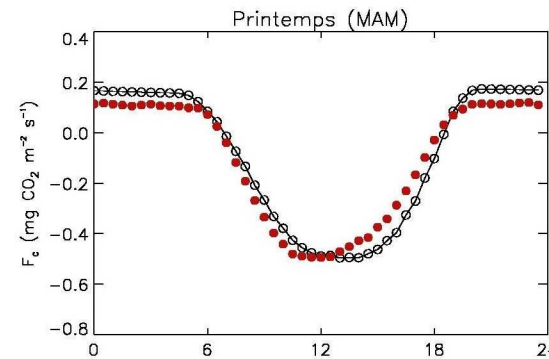
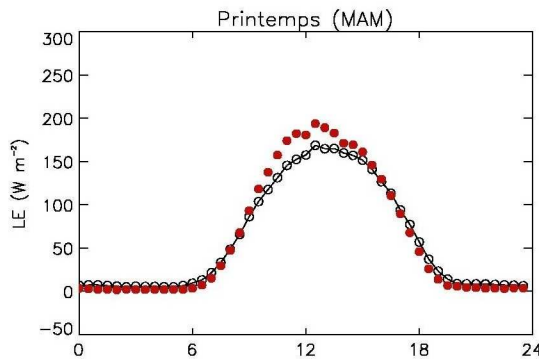
Flux de chaleur latente

Flux de CO₂

Hêtraie



Pinède

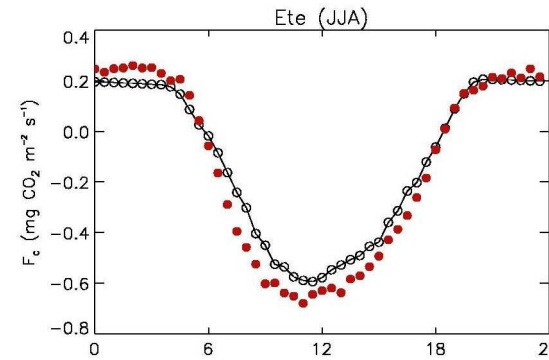
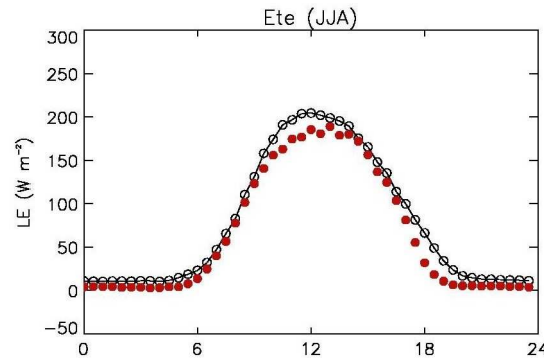


● Observation
⊖ Simulation

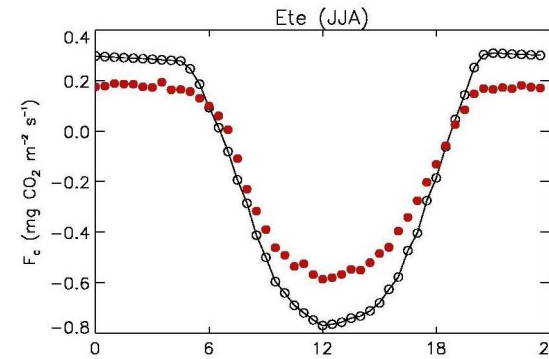
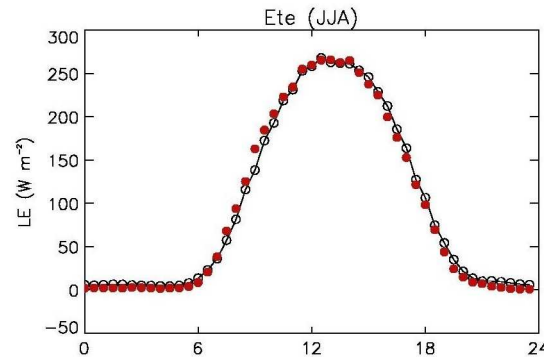
Flux de chaleur latente

Flux de CO₂

Hêtraie



Pinède



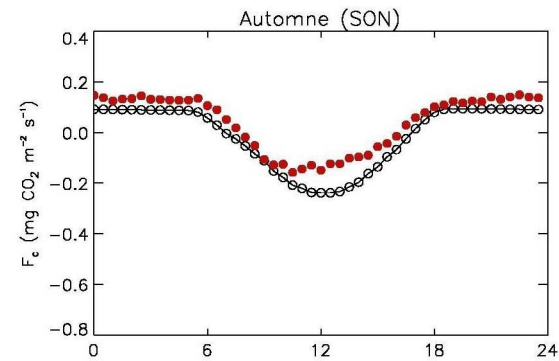
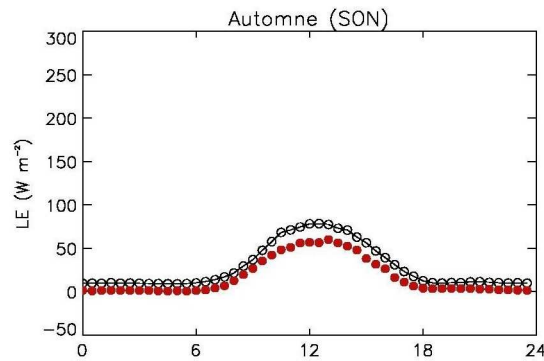
● Observation
⊖ Simulation

Automne

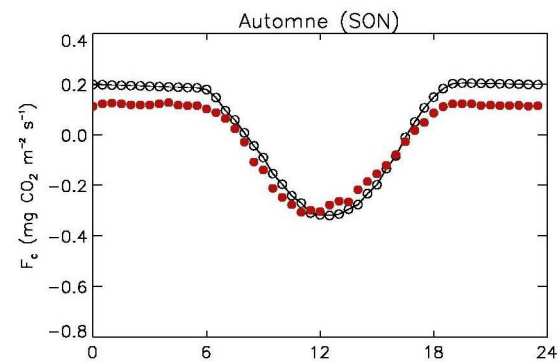
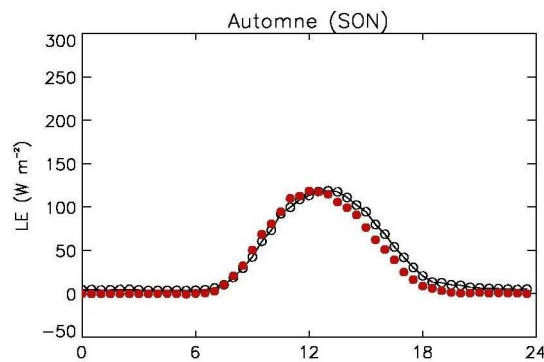
Flux de chaleur latente

Flux de CO₂

Hêtraie



Pinède



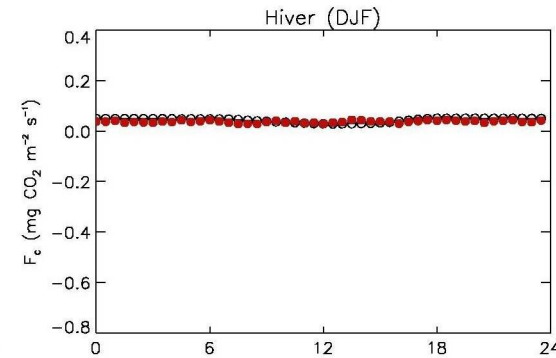
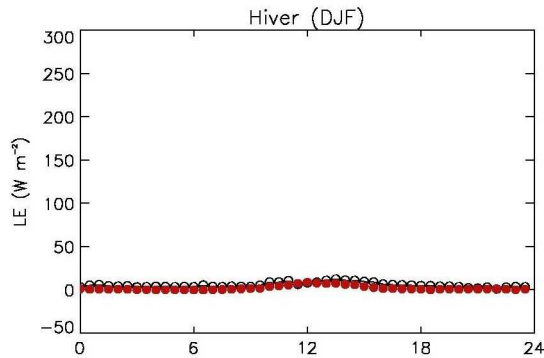
● Observation
⊖ Simulation

Hiver

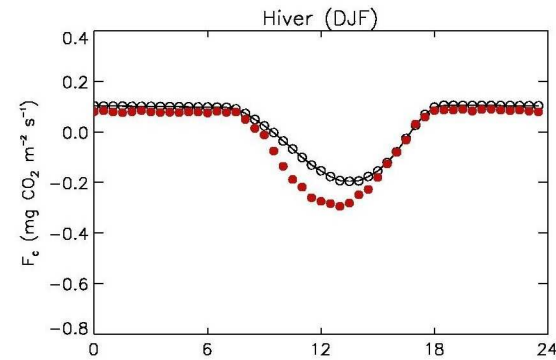
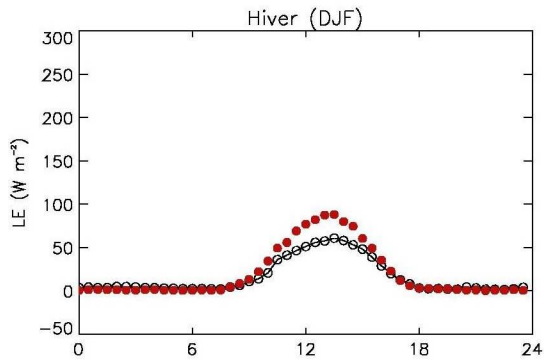
Flux de chaleur latente

Flux de CO₂

Hêtraie



Pinède



● Observation
⊖ Simulation

Critère statistique

Nash (%)
1997 et 1998

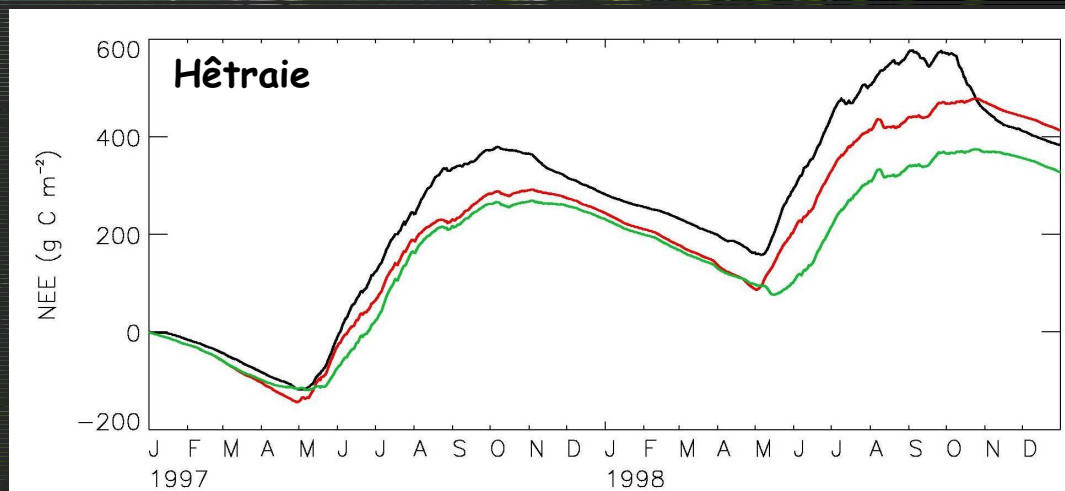
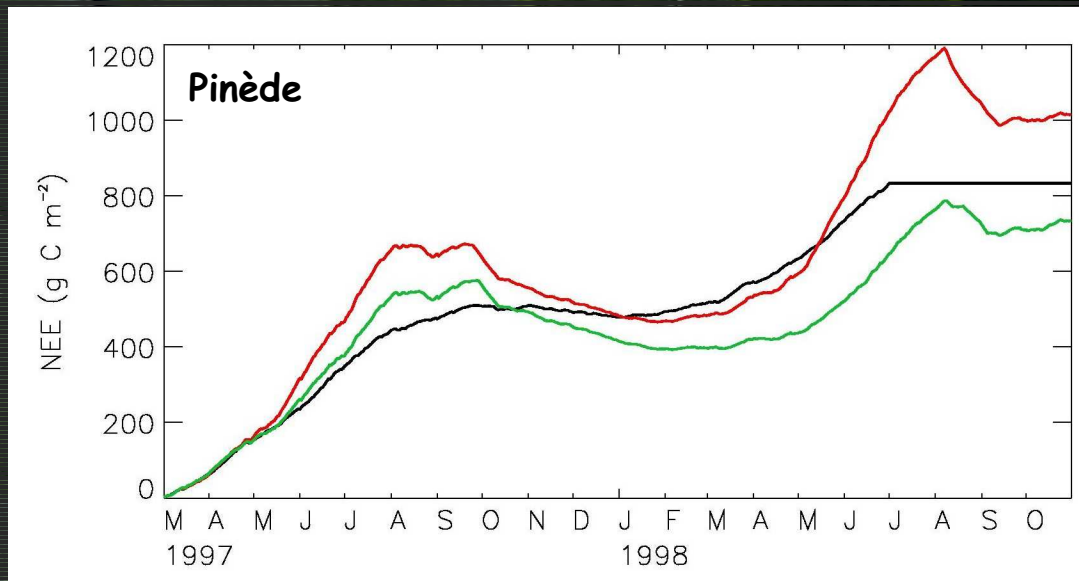
		LE	Fco ₂
Bray	ISBA-Standard	81 / 77	
	ISBA-A-g _s	81 / 72	59 / 67
Hesse	ISBA-Standard	69 / 70	
	ISBA-A-g _s	77 / 70	65 / 55
Loobos	ISBA-Standard	62 / 58	
	ISBA-A-g _s	55 / 52	61 / 66

Résultats estimation NEE

✓ Échelle Annuelle

Bilan Net Carboné Annuel de l'Écosystème

- Observations
- LAI dynamique
- LAI prescrit



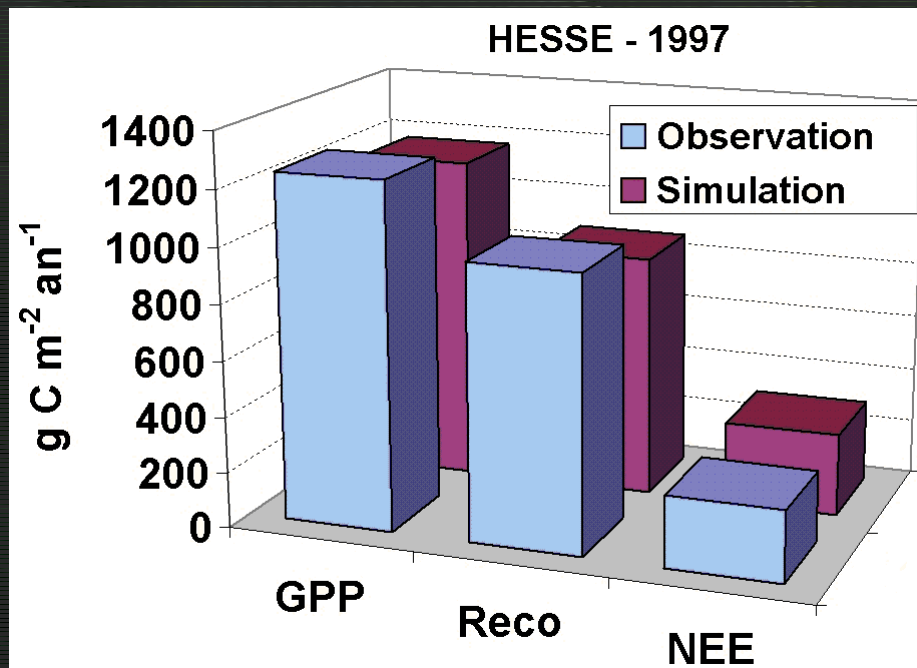
Conclusions bilan carboné

Paramètres A-gs \Rightarrow Photosynthèse brute (GPP)

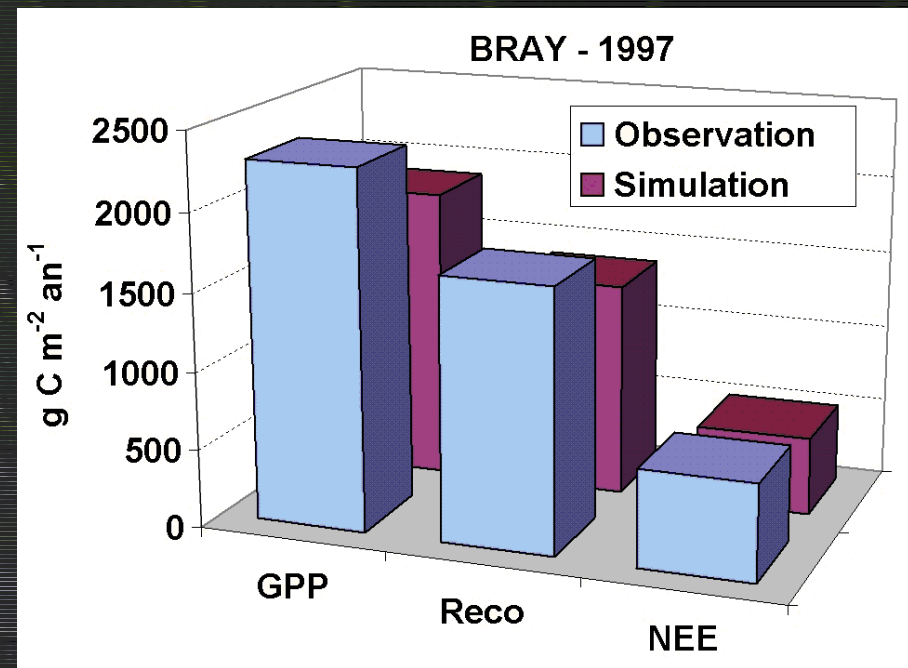
Modèle respiration écosystème (R_{eco})

Bilan net carboné (NEE)

$$NEE = GPP - R_{eco}$$

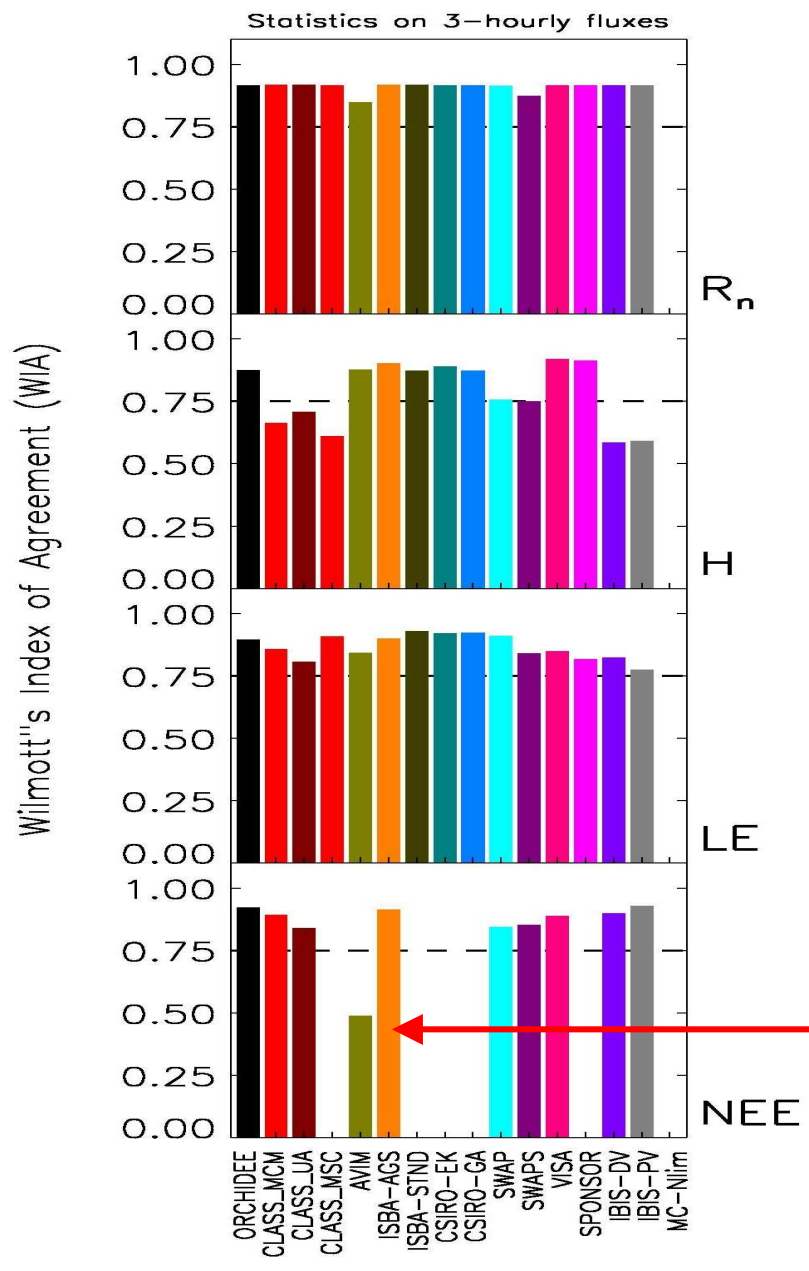


Estimations : (Granier et al., 2000)



(Berbigier et al., 2001)

Premier PILPS-Carbone



Expérience internationale
d'intercomparaison

GEWEX/GLASS

9 modèles intégrant
le carbone

Site forestier EUROFLUX

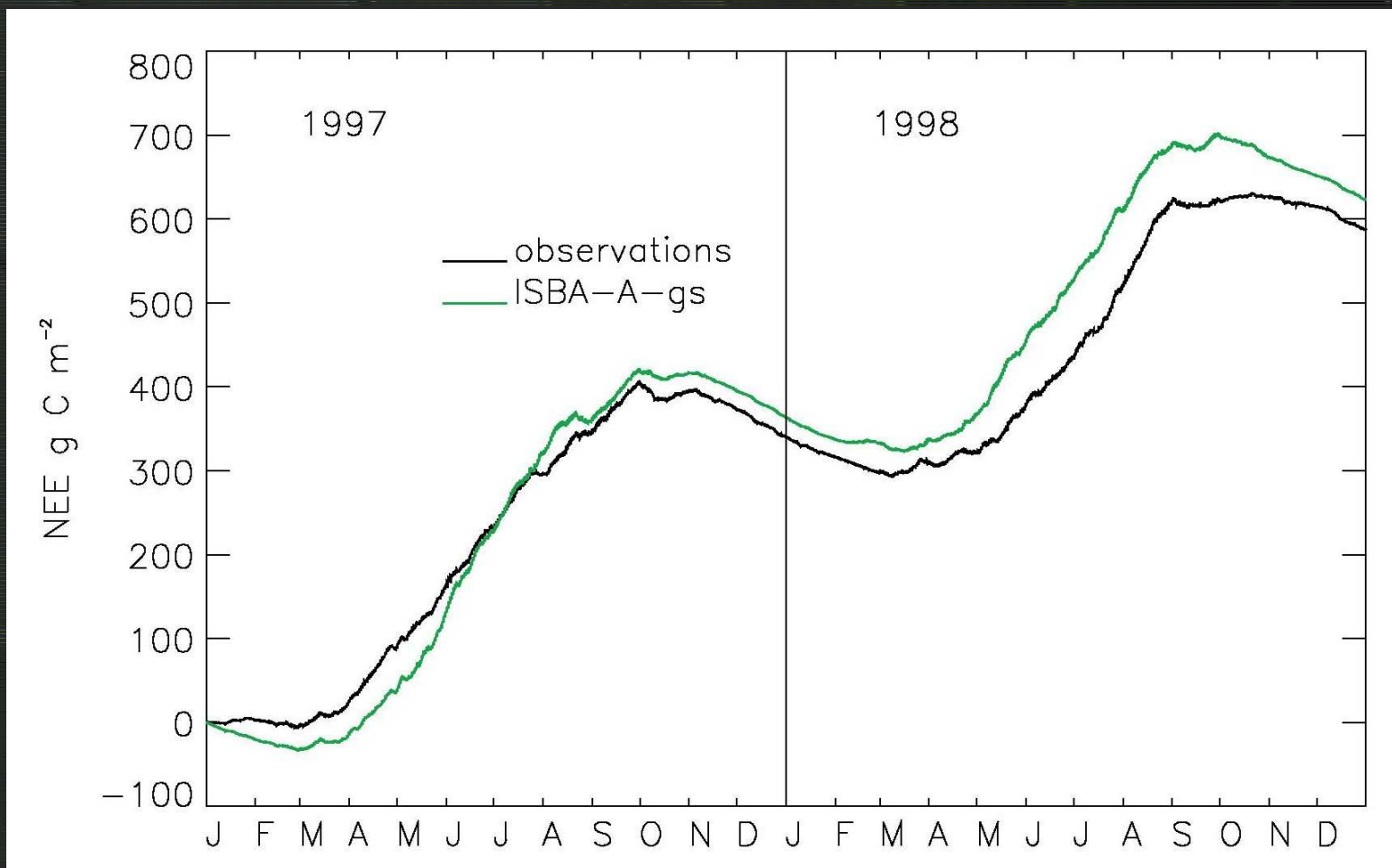
Pin sylvestre - Pays Bas

ISBA-A- g_s



Loobos - Pin sylvestre

NEE



Plan de l'exposé

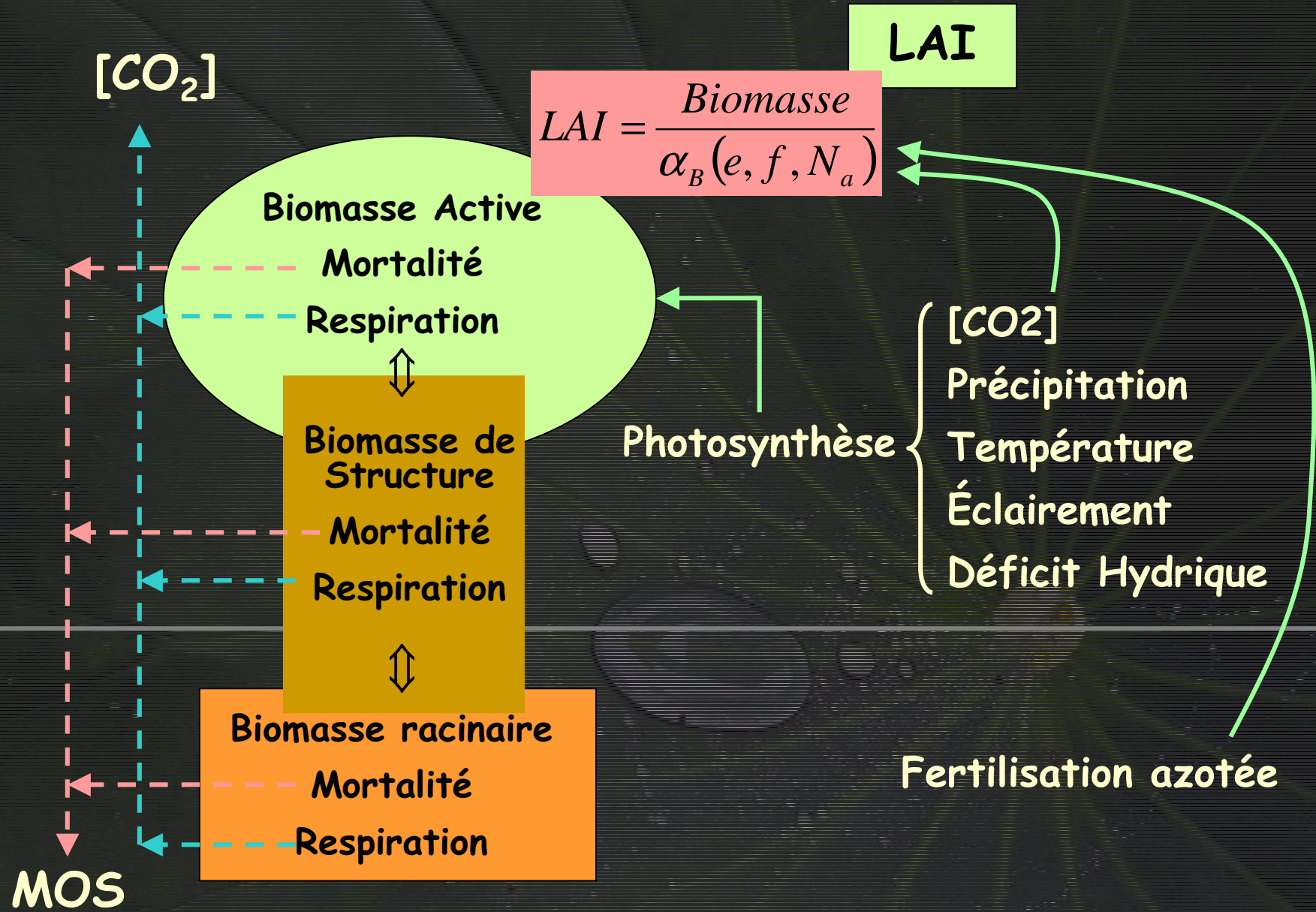
**Objectif : Modélisation de la biomasse et
des effets de fertilité du milieu**

PARTIE IV: Version azote - Paramétrisation et évaluation

- 1. Formalismes du modèle et Méta-analyse**
- 2. Expérimentation et Application**

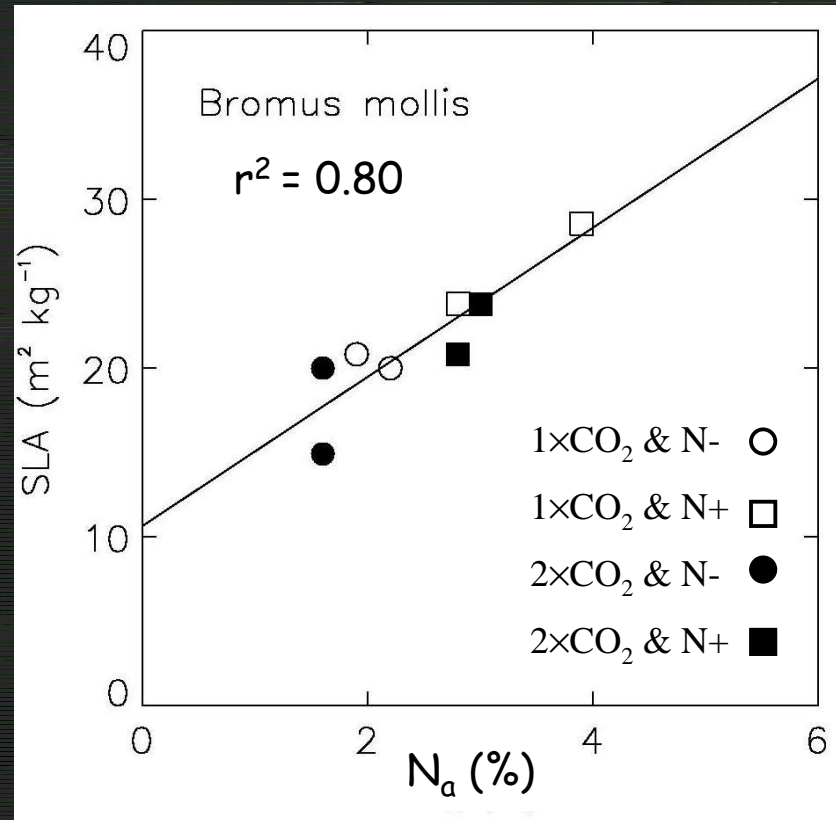
ISBA-A-g_s version Azote

(Calvet et Soussana, 2001)



Principe du modèle ISBA-A-gs azote

✓ Relation de plasticité de la végétation vis à vis de la fertilité du milieu



(Roderick et al., 2000)

$$SLA = \frac{LAI}{Biomasse} = e \times N_a(\%) + f$$

N_a : fonction de la nutrition azotée et du climat

Bromus mollis = herbacée

Meta-analyse - bibliographie

Détermination de e et f pour :

~50 espèces herbacées
~40 espèces ligneuses

Espèce	Référence	e m ² kg ⁻¹ % ⁻¹	f m ² kg ⁻¹
<i>Acorus calamus</i> (acore audorante)	Meziane et Shipley 2001	4.47	21.80
<i>Aegilops geniculata</i> (Blé sauvage)	Garnier <i>et al.</i> 2001	5.43	9.28
<i>Agropyron repens</i> (Chiendent)	Meziane et Shipley 2001	3.64	14.06
<i>Avenula bromoides</i> (Avoine des prés)	Garnier <i>et al.</i> 2001	6.48	3.47
<i>Brachypodium phoenicoides</i> (Brachypode)	Garnier <i>et al.</i> 2001	6.06	3.44
<i>Brassica oleracea</i> (Chou potager)	Roderick <i>et al.</i> , 1999	4.38	3.74
<i>Bromus erectus</i> (Brome dressé)	Garnier <i>et al.</i> 2001	2.40	10.33
<i>Dactylis polygama</i> (Dactyle)	Ryser et Eek 2000	25.02	-31.95
<i>Daucus carota</i> (carotte sauvage)	Garnier <i>et al.</i> 2001	7.76	-3.42
<i>Deschampsia coespitosa</i> (Canche cespiteuse)	Meziane et Shipley 2001	3.88	9.62
<i>Deschampsia flexuosa</i> (Canche flexueuse)	Van de Vijver <i>et al.</i> 1993	2.09	10.41
<i>Erysimum cheiranthoides</i> (Fausse giroflée)	Meziane et Shipley 2001	7.42	4.23
<i>Eupatorium maculatum</i> (Eupatoire maculée)	Meziane et Shipley 2001	-1.38	28.97
<i>Glycine max</i> (Soja)	Sims <i>et al.</i> 1998	3.97	15.18
<i>Helianthus annuus</i> (Tournesol)	Joel <i>et al.</i> , 1997	-3.99	24.28
<i>Hieracium aurantiacum</i> (Epervière orangée)	Meziane et Shipley 2001	10.32	-3.32
<i>Holcus lanatus</i> (Houllque laineuse)	Van de Vijver <i>et al.</i> 1993	0.96	22.16
<i>Hordeum jubatum</i> (Orge)	Meziane et Shipley 2001	4.32	9.23
Jachère	SMOSREX	2.04	6.32
<i>Leontodon autumnalis</i> (Léontaudon automnal)	Meziane et Shipley 2001	4.21	10.40
<i>Lolium perenne</i> (Ray grass commun)	Calvet et Soussana 2001	9.12	-3.40
<i>Medicago minima</i> (Luzerne fluette)	Garnier <i>et al.</i> 2001	5.85	4.78
<i>Ruscus aculeatus</i> (Fragon picant)	Garnier <i>et al.</i> 2001	7.47	-1.99
<i>Sanguisorba minor</i> (Sauge des Prés)	Garnier <i>et al.</i> 2001	4.39	8.69
<i>Silene cucubalus</i> (Silne enflé)	Meziane et Shipley 2001	4.83	8.98
<i>Solanum tuberosum</i> (Pomme de terre)	Roderick <i>et al.</i> 1999	8.52	-6.53
<i>Triticum aestivum</i> (Blé commun)	Hocking et Meyer 1991	-0.70	34.09
<i>Triticum aestivum</i> (Blé commun, Arminda)	STICS	3.07	2.71
<i>Triticum aestivum</i> (Blé commun, Talent)	STICS	3.25	2.06
<i>Triticum aestivum</i> (Blé commun, Thesée)	STICS	3.46	1.67
<i>Triticum durum</i> (Blé dur, Ambral)	STICS	2.66	5.42
<i>Triticum durum</i> (Blé dur, Arcour)	STICS	2.70	5.44
<i>Xeranthemum inapertum</i> (Xéranthème fermé)	Garnier <i>et al.</i> 2001	5.39	15.07
<i>Zea mays</i> (Maïs)	Hocking et Meyer 1991	-4.71	39.70

Expérimentation de terrain

(site du Fauga, 2002)

STICS (INRA)

Modèle de référence

(Brisson *et al.*, 1998)

Expérimentation d'enrichissement azoté

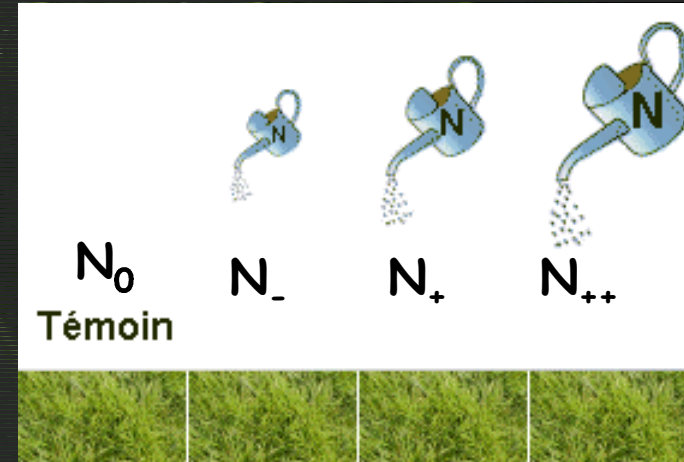
Jachère SMOSREX

CNRM - CESBIO

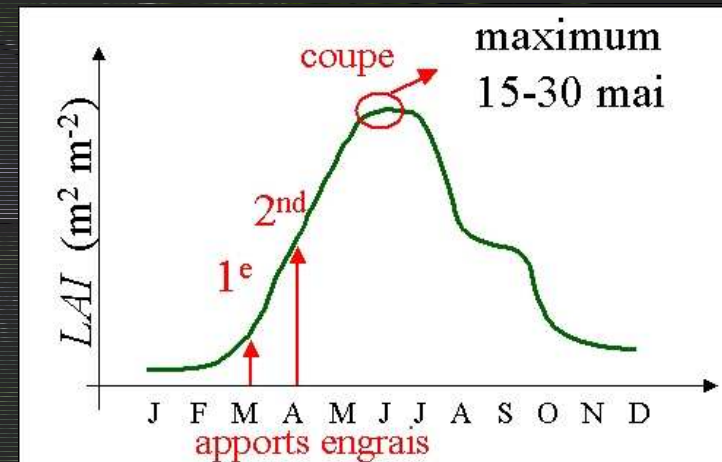


Couvert multispécifique herbacés

✓ 1 témoin + 3 traitements

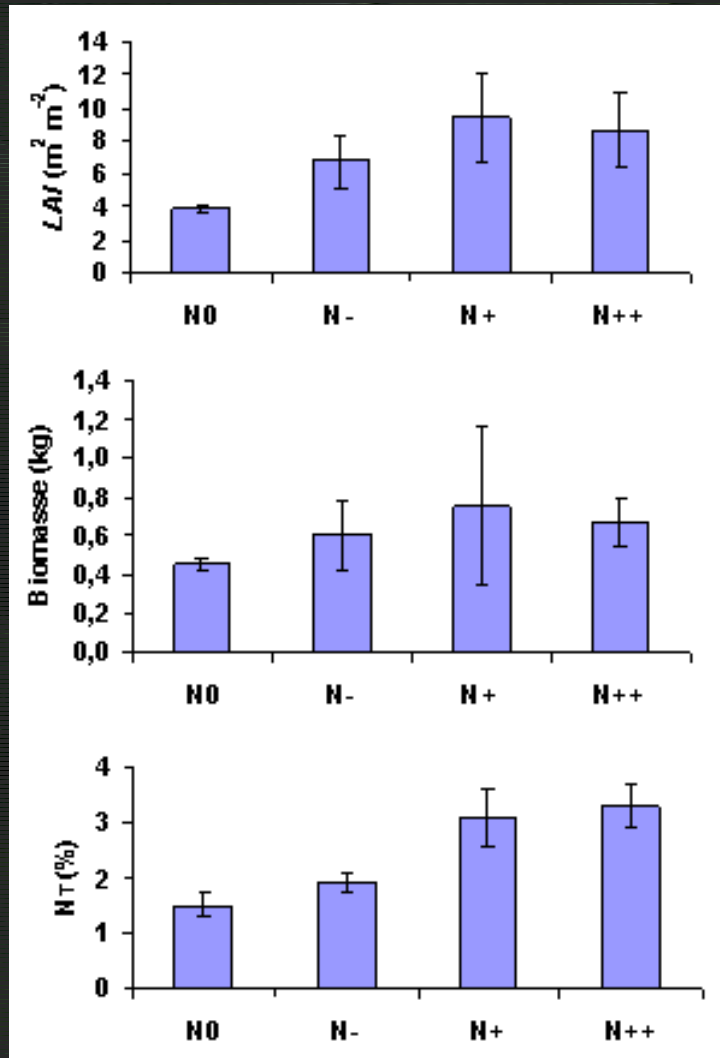


✓ Coupe au maximum de LAI

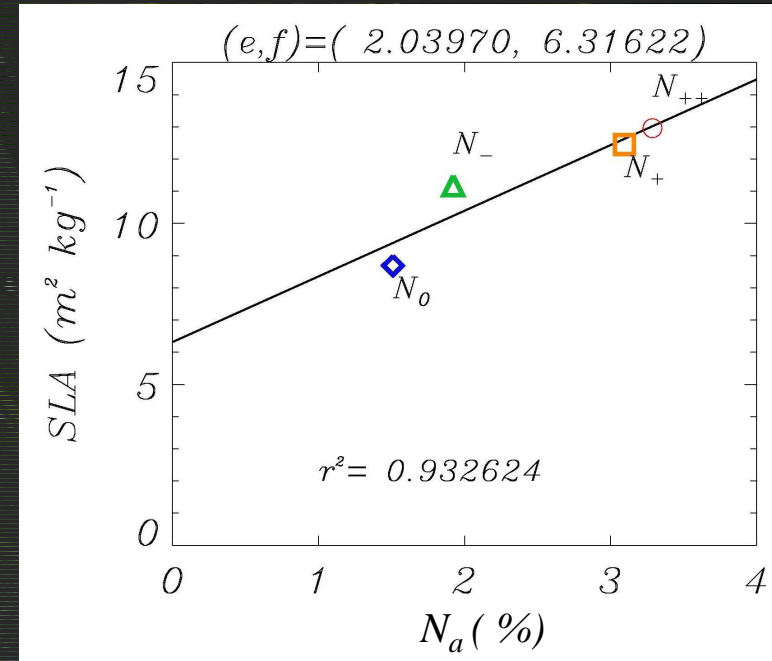


Mesures et analyse

✓ Variables mesurées



✓ relation de plasticité

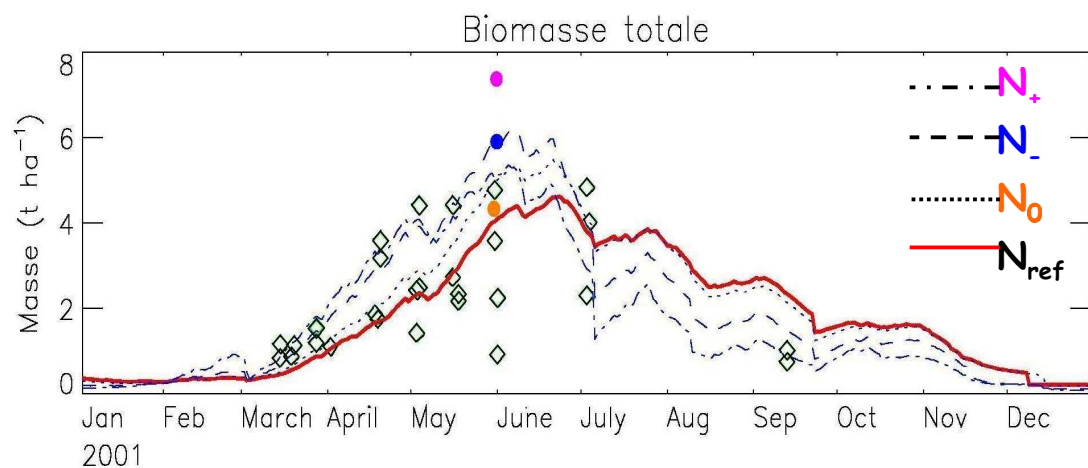
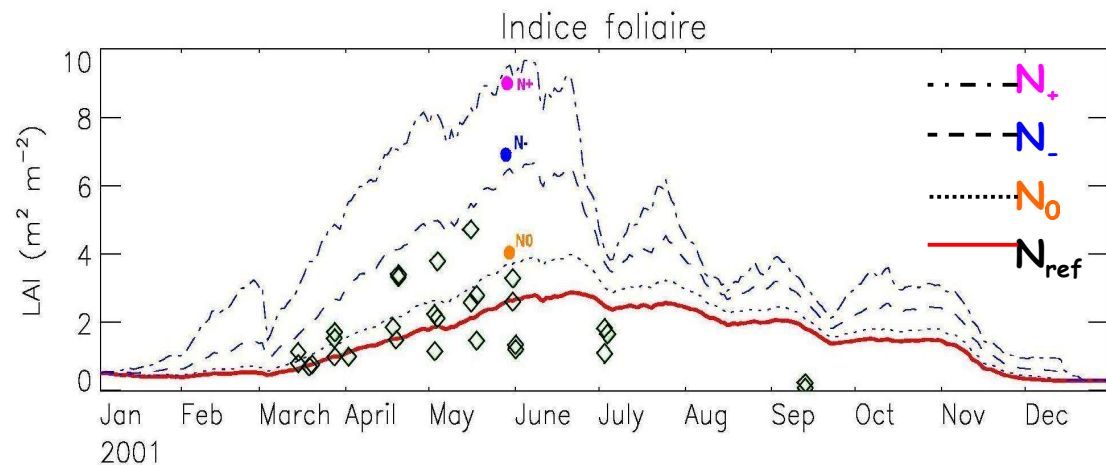


✓ Paramètre de croissance

$$SLA = e \times N_a(\%) + f$$

$$LAI = Biomasse \times (e \times N_a(\%) + f)$$

Test de sensibilité à l'enrichissement



- ✓ Mesures continues
LAI et Biomasse témoins
- ✓ Mesures ponctuelles
placettes enrichies

sensibilité à l'enrichissement
Variable N_a (%)

Obs./Sim.	N_{ref}	N_0	N_-	N_+
N_a (%)	1.4	2.0	3.7	6.5
B_T (g m^{-2})	333 460	451 547	602 618	752 535



CONCLUSIONS et PERSPECTIVES

Conclusions

Déficit hydrique :

- ✓ Ajout d'une paramétrisation détaillée
spécifique aux couverts forestiers

Modélisation :

- ✓ Prise en compte simple du sous-bois
- ✓ Modélisation du flux de CO_2 instantané et annuel
sur couverts forestiers
- ✓ Comparaison avec d'autres modèles (PILPS-Carbone)

ISBA Version Azote :

- ✓ Compartimentation de la biomasse en 3 réservoirs :
 - ❖ Biomasse active, de structure et racinaire
- ✓ Prise en compte de la fertilité du milieu

✓ Changement d'échelle

- ❖ Méta-analyse étendue à davantage d'espèces
- ❖ Cartographie des paramètres de surface
- ❖ Méthode « tiles » sur les surfaces hétérogènes

✓ Cycle du carbone

- ❖ ISBA-A-gs dans ARPEGE/Climat
- ❖ Couplage avec le modèle CENTURY de carbone du sol (LSCE)
- ❖ Application étendue aux données FLUXNET
- ❖ Assimilation de données de télédétection