

# CASTANEA

## Process-based model simulating forest functioning

### **Eric Dufrêne**

Valérie le Dantec / carbone du sol

Hendrik Davi / photosynthèse, allocation du carbone & validation

Christophe François / bilan radiatif & changement d'échelle

Guerric le Maire / changement d'échelle

Thomas Eglin / Isotopie

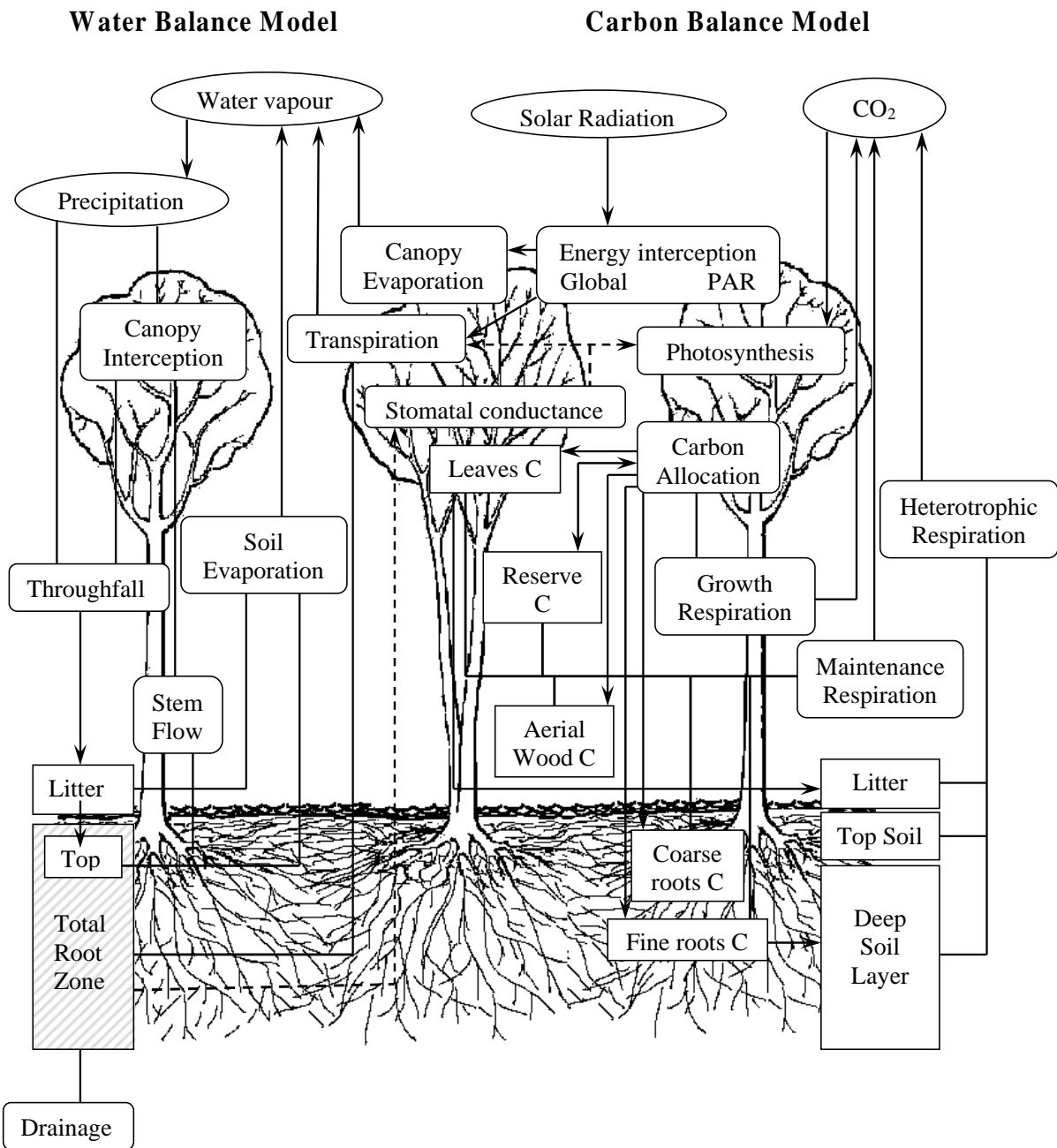
Nicolas Delpierre / Phénologie, azote & validation

Nicolas Martin / hydraulique & changement d'échelle

Joannes Guillemot / allocation du carbone & changement d'échelle

H. Davi URFM

# Description of CASTANEA model



**Canopy photosynthesis**  
Farquhar model coupled with  
Ball & Berry

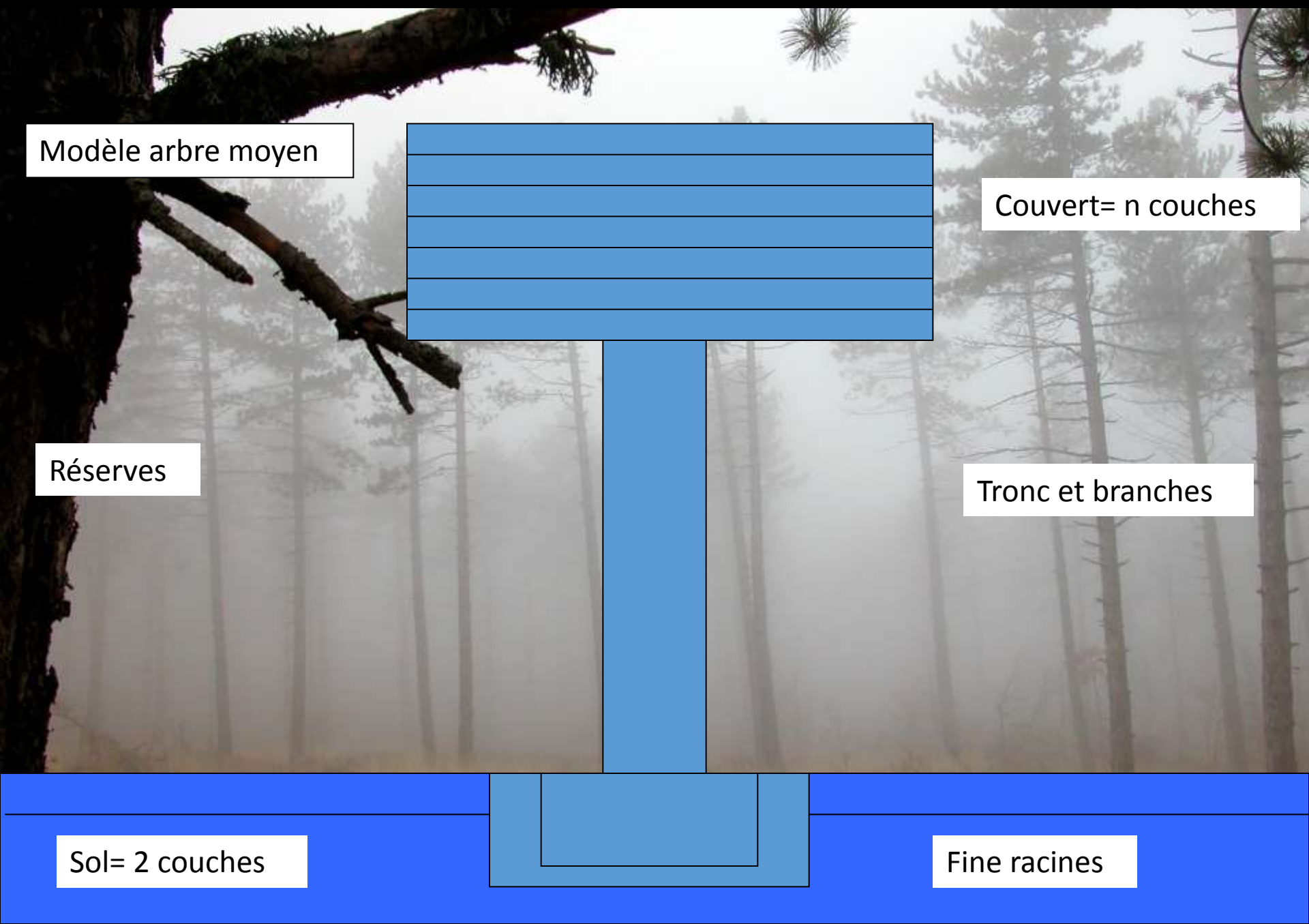
**Leaves respiration**  
Q10, Nitrogen, Biomass

**Wood respiration**  
Q10, Nitrogen, alive biomass

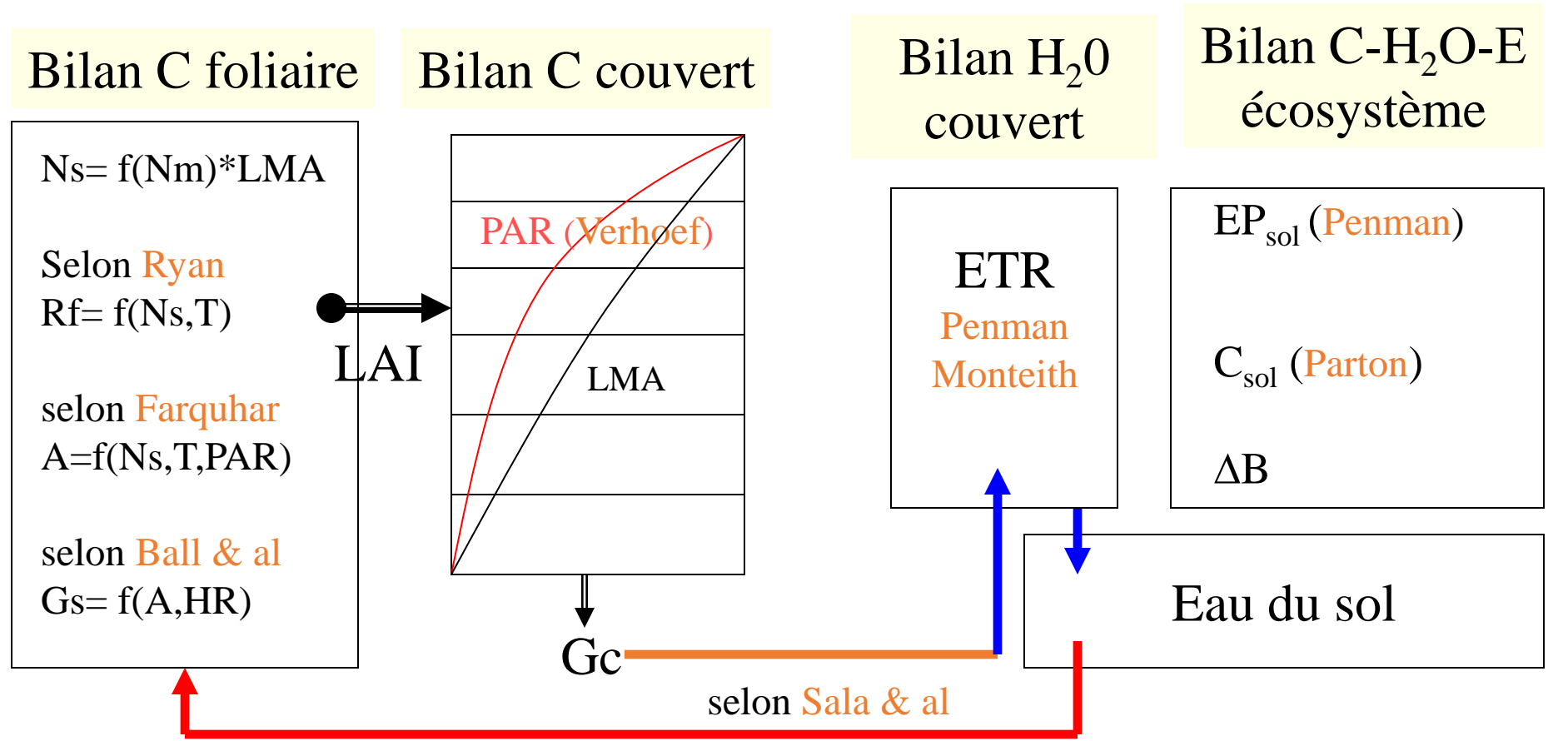
**Water interception**  
LAI, clumping,  
leaves/needle reserves

**Transpiration**  
Penman Monteith

# Description of CASTANEA model



# Description of CASTANEA model



Modèle multicouche

**Modèle fonctionnement  
couvert homogène**

ISBA ORCHIDEE

CASTANEA

STICS

**Modèle structure fonction**  
Greenlab/ ADEL

**Modèle fonctionnement  
Individu centré**

TREE-GRASS

HYSAFE

**Modèle architectural**  
Modèles AMAP

**Global**

**Mosaïque d'Agro écosystèmes**

**Couvert + sol**

**Plante**

**Organe**

Structure

Fonctionnement



## Feuilles

- indice foliaire (LAI)
  - azote (N)
- masse surfacique (LMA)

## Bois aérien

Biomasse ( $B_{\text{bois}}$ )

*Les paramètres clés de l'écosystème*

## Racines

Biomasse ( $B_{\text{racines}}$ )

Réserve utile en eau  
(RU)

Matière organique du sol  
( $C_{\text{sol}}$ )



# CAPSiS implementation

**Class FmSpecies:** species parameters read in CASTANEA file

**Class FmSettings:** initial parameters (constant and simulations choices)

**Class FmClimate:** climate file read when evolution

**Class FmModel:** conductor  
Core Method  
yearlyFmSimulation

Initialization  
Climate day  
Phenology  
Water interception  
HourlyLoop  
radiative budget  
    canopy layer loop  
    photosynthesis  
    Wood respiration  
    Aerodynamics  
resistances  
    Transpiration  
    Soil evaporation  
Wood growth  
Water Budget  
Soil heterotrophic respiration

## Core structural classes

**Class FmCell** (abstract => CASTFmCell and PDGFmCell):  
stand parameters read in inventory file

**FmCanopy**  
    **FmCanopyLayer**  
        **FmLeaf**  
  
**FmWood**  
**FmSoil**

Contain state variables and method of evolution

## Stocking classes

**Class FmYearlyresults**  
**Class FmDailyResults**  
**Class FmHourlyResults**

## Hybrid classes

**FmRadiativeBudget:** radiative budget

**FmCanopyEvergreen** (only Evergreen): dynamics of different leaf age cohorts

**FmLeafDynamics:** phenology modules

**FmCanopyWaterReserves:** water stocking by vegetation

**FmWoodGrowth:** Wood growth and carbon allocation

Contain state variables and method of evolution

# CAPSIS implementation

**Class FmModel:** conductor

Core Method **yearlyFmSimulation**

**Intialization:** initializeYear

**Climate day:** FmClimateDay climateDay = climate.nextWithoutLooping();

**Phenology:** fmLeafDynamics.currentLAIdeciduous

**Water interception:** canopyWaterReserves.waterInterception

**HourlyLoop:** hourlyLoop

**radiative budget:** radiativeBudget.updateRadiation

**canopy layer loop**

**photosynthesis:** getGazExchange

**Wood respiration:** cell.getWood().hourlyWoodRespiration

**Aerodynamics resistances:** aerodynamicResistances =  
    canopy.getAerodynamicResistances

**Transpiration:** transpirationResults = canopy.getTranspiration

**Soil evaporation:** hourlySoilEvaporation = cell.getSoil().getSoilEvaporation

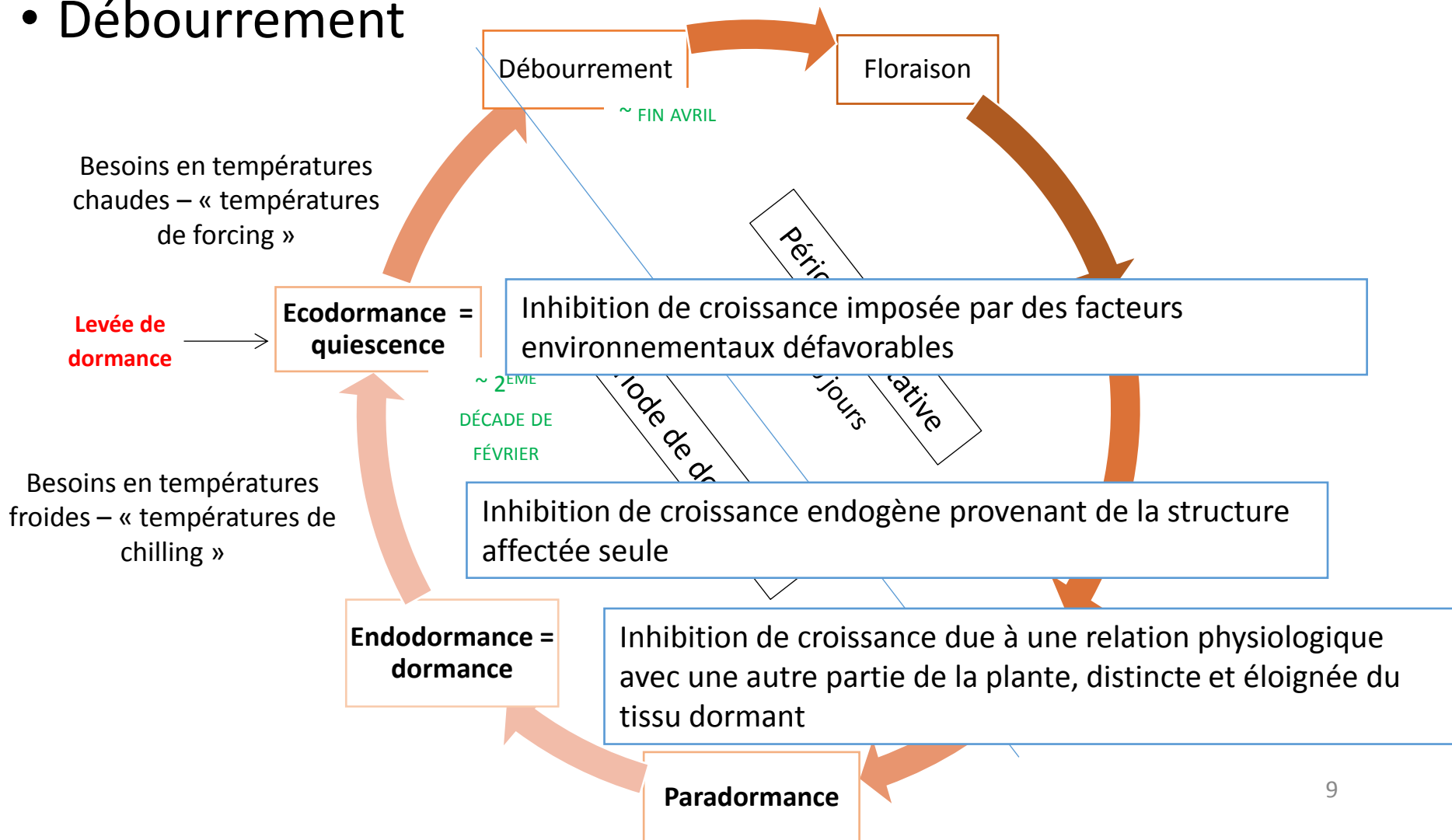
**Wood growth:** woodGrowth.carbonAllocation

**Water Budget:** cell.getSoil().waterDynamics

**Soil heterotrophic respiration:** cell.getSoil().soilHeterotrophicRespiration



## • Débourrement



# Phenology: budburst

Dufrêne et al., 2005

$$S_{\text{frcBB}} = \sum_{N_{\text{START1}}}^N R_{\text{frcBB}} \quad \text{if} \quad S_{\text{frcBB}} < F_{\text{critBB}}$$

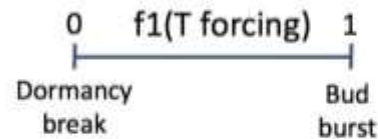
$$R_{\text{frcBB}} = \begin{cases} T & \text{if } T > T_2 \quad \text{and} \quad N > N_{\text{start1}} \\ 0 & \text{if } T \leq T_2 \quad \text{or} \quad N < N_{\text{start1}} \end{cases}$$

FmLeafDynamics current LA deciduous

Gaüzere & Chuine

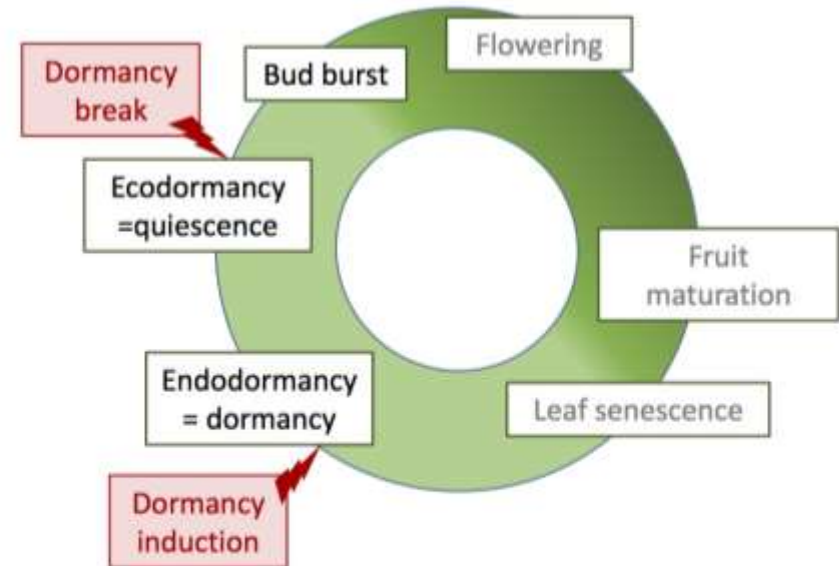
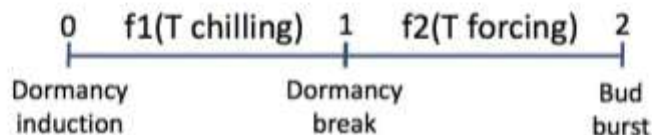
- **One-phase models** (e.g. “UniForc”)

describe the effects of environmental factors on bud development since dormancy break



- **Two-phases models** (e.g. “UniChill”)

describe the effects of environmental factors on bud development since the dormancy induction



FmLeafDynamics fitlib UniForc

# Phenology: budburst

Gäuzere & Chuine

- “Photoperiod model”

1 phase model

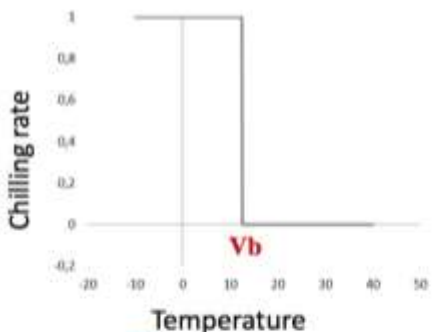
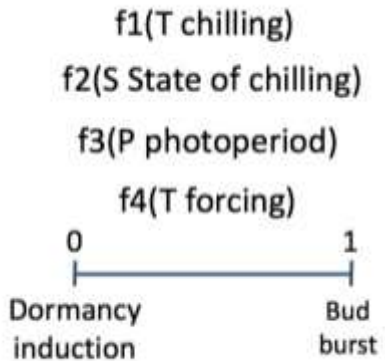
$f1$  = threshold

$f2$  = sigmoid inverse

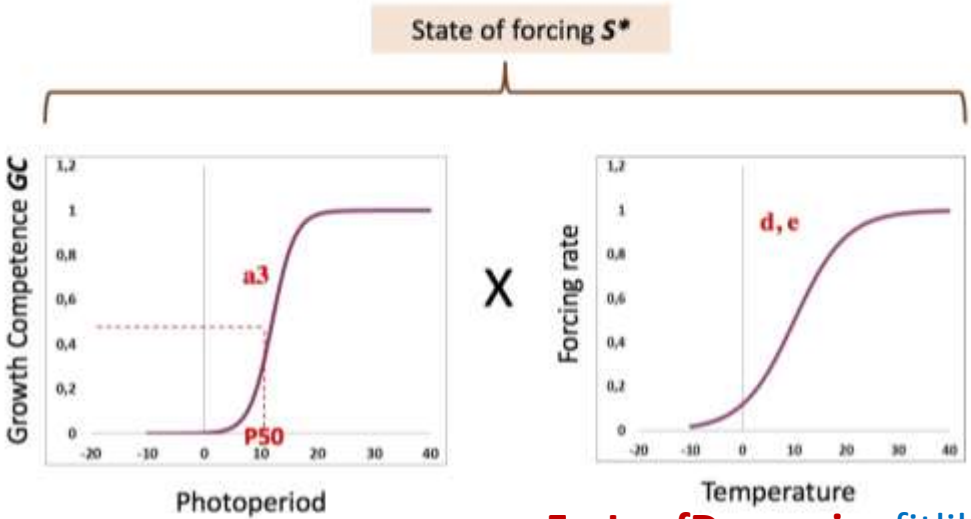
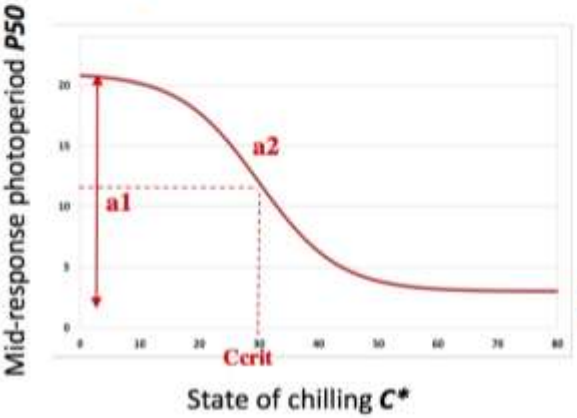
$f3$  = sigmoid

$f4$  = sigmoid

9 parameters

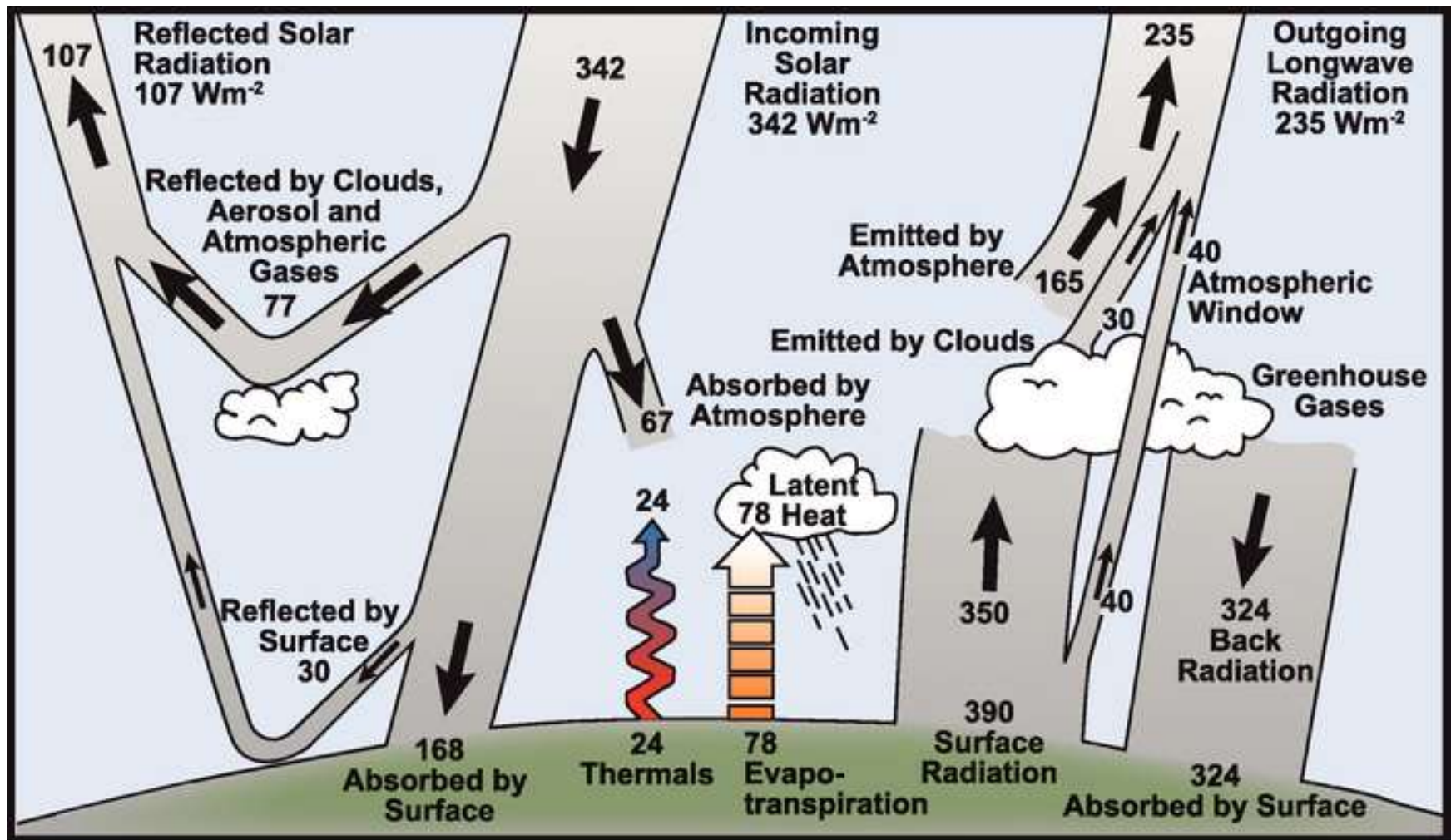


State of chilling  $C^*$



details...

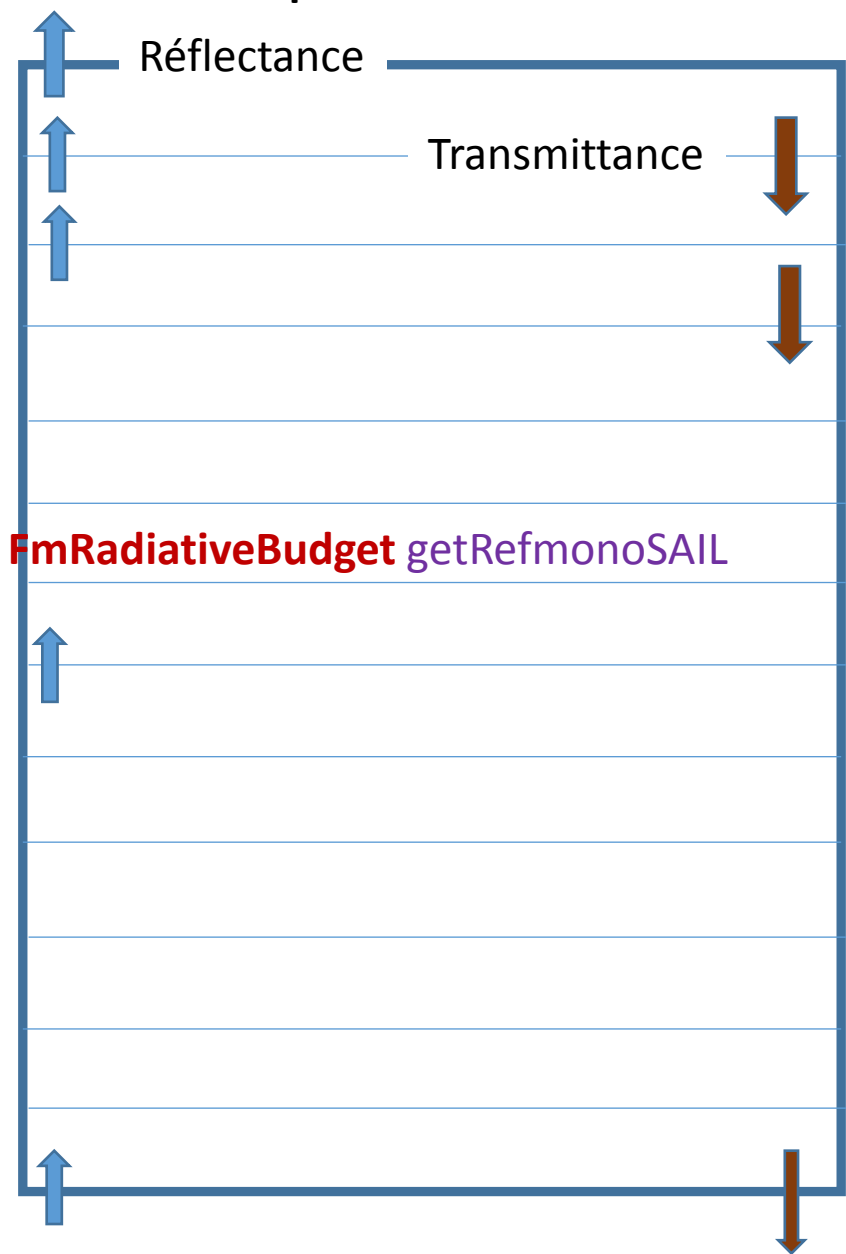
# Light interception and energy budget





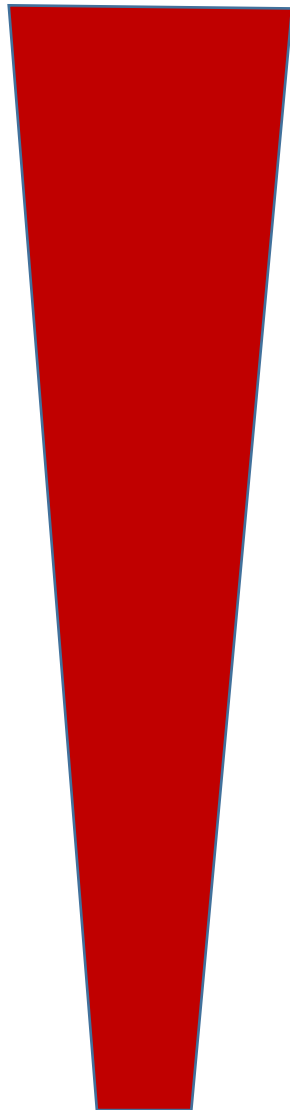
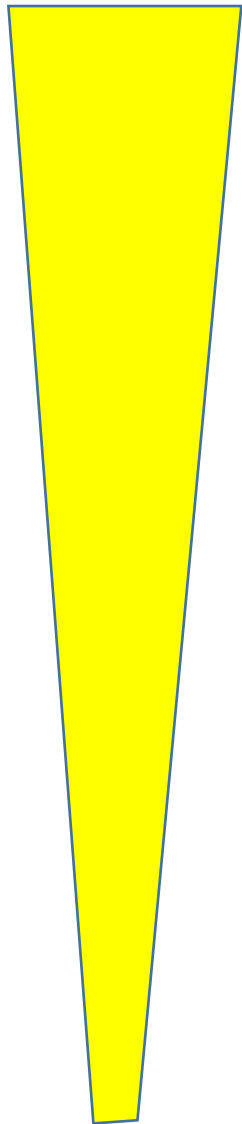
# Light interception and energy budget

Pour le PAR: séparation du diffus et du direct



PAR

PIR



FmRadiativeBudget updateRadiationCoef

# Light interception and energy budget

$$aPAR_s^k = a_s I_s(k)$$

$$aPAR_d^k = a_d \left[ \left( \text{Intop}_{dd}^k + \text{Inbottom}_{dd}^k \right) I_d(k) + \left( \text{Intop}_{sd}^k + \text{Inbottom}_{sd}^k \right) I_s(k) \right]$$

$$a_d = 1 - \rho_{dd} - \tau_{dd}$$

$$a_s = 1 - \tau_{ss} - \rho_{sd} - \tau_{sd}$$

$$\text{Intop}_{dd}^k = \frac{1}{(1 - \rho_{dd} R_{botdd}^{k+1})} + \frac{R_{botdd}^{k+1} \tau_{dd} R_{dd}^{k-1} \tau_{dd}}{(1 - R_{dd}^{k-1} \rho_{dd})(1 - \rho_{dd} R_{botdd}^{k+1})(1 - R_{botdd}^{k+1} \tau_{dd} R_{dd}^{k-1} \tau_{dd})}$$

$$\text{Intop}_{sd}^k = \frac{\rho_{sd} R_{botdd}^{k+1}}{(1 - \rho_{dd} R_{botdd}^{k+1})} + \frac{\rho_{sd} R_{botdd}^{k+1} R_{botdd}^{k+1} \tau_{dd} R_{dd}^{k-1} \tau_{dd}}{(1 - R_{dd}^{k-1} \rho_{dd})(1 - \rho_{dd} R_{botdd}^{k+1})(1 - R_{botdd}^{k+1} \tau_{dd} R_{dd}^{k-1} \tau_{dd})} +$$

$$\frac{\tau_{sd} R_{dd}^{k-1} \tau_{dd} R_{botdd}^{k+1}}{(1 - R_{dd}^{k-1} \rho_{dd})(1 - \rho_{dd} R_{botdd}^{k+1})(1 - R_{botdd}^{k+1} \tau_{dd} R_{dd}^{k-1} \tau_{dd})}$$

$$\text{Inbottom}_{dd}^k = \frac{\tau_{dd} R_{dd}^{k-1}}{(1 - R_{dd}^{k-1} \rho_{dd})(1 - \rho_{dd} R_{botdd}^{k+1})(1 - R_{botdd}^{k+1} \tau_{dd} R_{dd}^{k-1} \tau_{dd})}$$

$$\text{Inbottom}_{sd}^k = \frac{\tau_{sd} R_{dd}^{k-1}}{(1 - R_{dd}^{k-1} \rho_{dd})} + \frac{\tau_{sd} R_{botdd}^{k+1} \tau_{dd} R_{dd}^{k-1} \tau_{dd}}{(1 - R_{dd}^{k-1} \rho_{dd})(1 - \rho_{dd} R_{botdd}^{k+1})(1 - R_{botdd}^{k+1} \tau_{dd} R_{dd}^{k-1} \tau_{dd})} +$$

$$\frac{\rho_{sd} R_{botdd}^{k+1} \tau_{dd} R_{dd}^{k-1}}{(1 - R_{dd}^{k-1} \rho_{dd})(1 - \rho_{dd} R_{botdd}^{k+1})(1 - R_{botdd}^{k+1} \tau_{dd} R_{dd}^{k-1} \tau_{dd})}$$

## 2 bilans énergétiques: un pour le sol et un pour la végétation

Rayonnement net=

Rayonnement global+ Rayonnement atmosphérique (Rah)  
- Rayonnement émis (RH)

$Rah = (1 + Zs(oktas)^2 (1 - Xs * \exp(-Ys * ea / (Ta + 273.15)))) * stefan^{(Ta + 273.15, 4)}$   
*Xs, Ys, Zs sont des constantes, oktas = skyl \* 8 (donc fonction du diffus)*

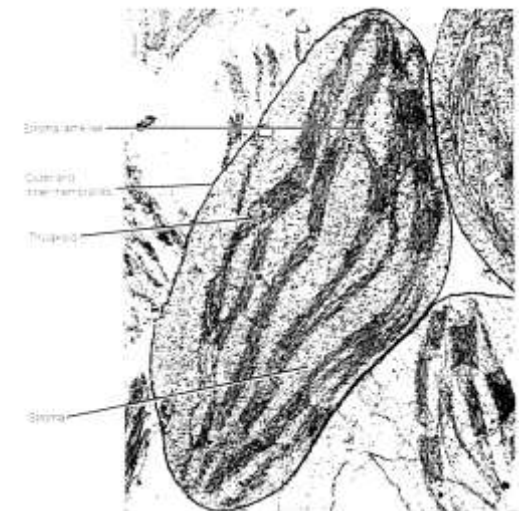
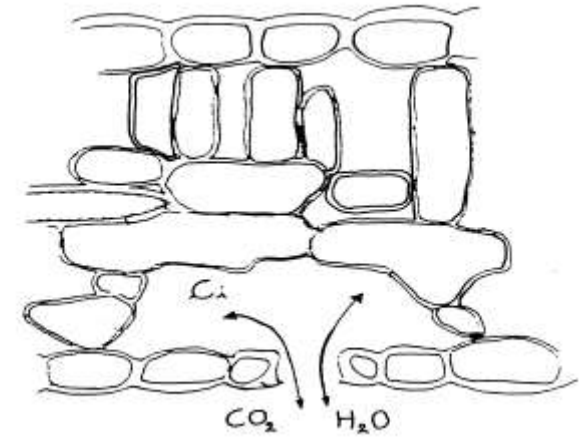
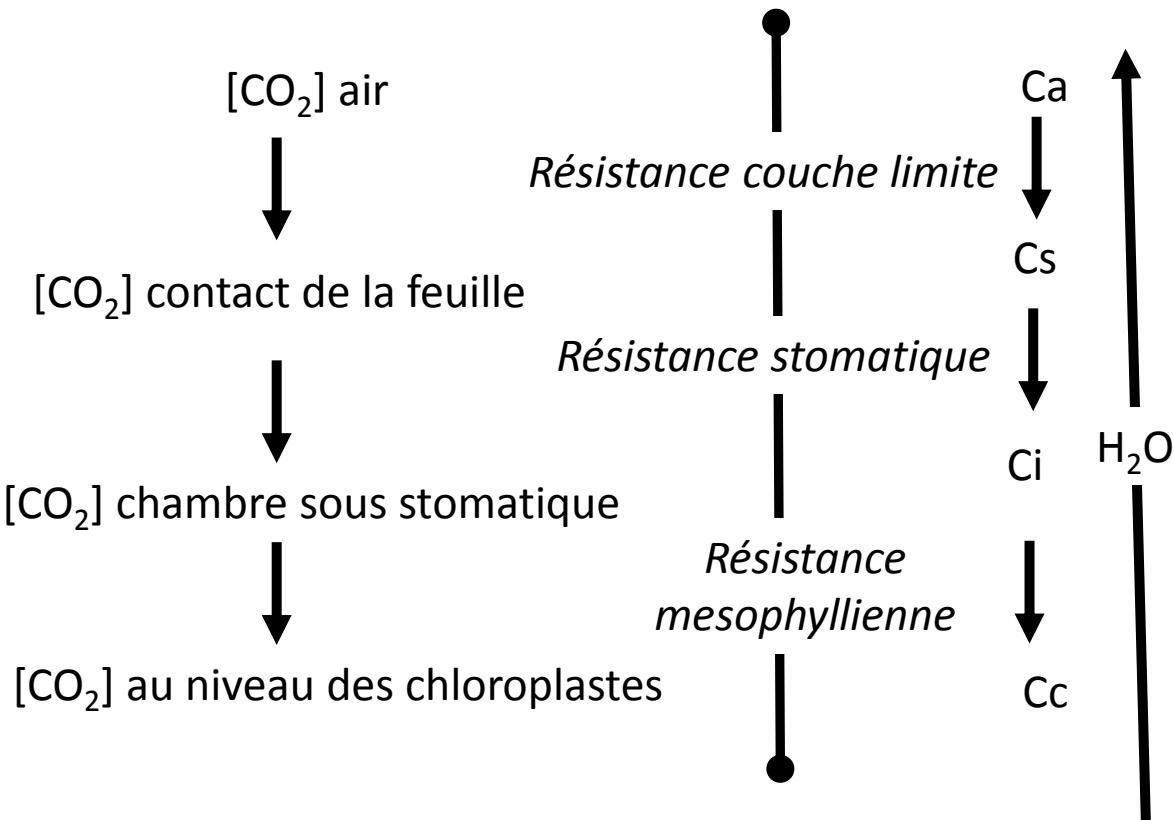
$Rvsh = stefan^{(Ta + 273.15, 4)}$

$RH_{veg} = (wt + emsg * emst) * Rvsh - emsg * emst * Rgsh$

*Emst, emst, wt: emisivités*

# Photosynthesis

## A] Stomata closure and CO<sub>2</sub> path



**Ouverture stomatique dépend de la turgescence  
des cellules des gardes**



Contrôle le flux entrant en CO<sub>2</sub>  
Flux sortant en H<sub>2</sub>O



# Photosynthesis

## B] Light

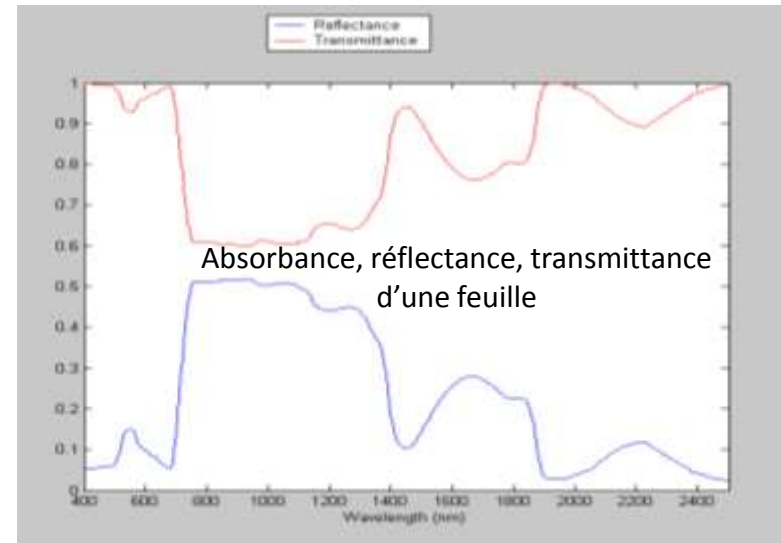
### Quantité et qualité de la lumière absorbée

PAR: Rayonnement photosynthétiquement actif

*Polarisation de la lumière*

Diffus

Direct



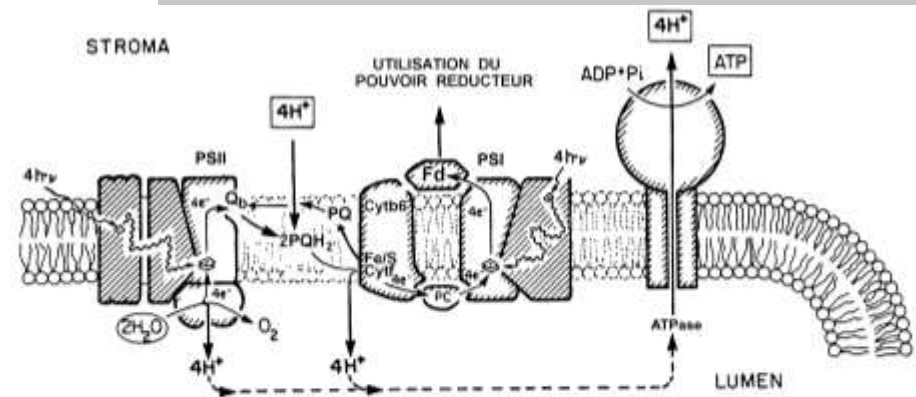
### Chaîne de transport d'électrons

1 collecte des photons  
antennes PSI et PSII

2 Hydrolyse de l'eau

3. Production d'ATP

4. Production de pouvoir réducteur



PSI Photosystème I

PSII Photosystème II

Fe/S Cytochrome f

Fd Ferredoxine

Centre réactionnel

PQ Plastoquinone

PQH<sub>2</sub> Plastoquinone réduite

Q<sub>b</sub> Plastoquinone fixée sur le PS<sub>2</sub>  
pour accepter les e<sup>-</sup>

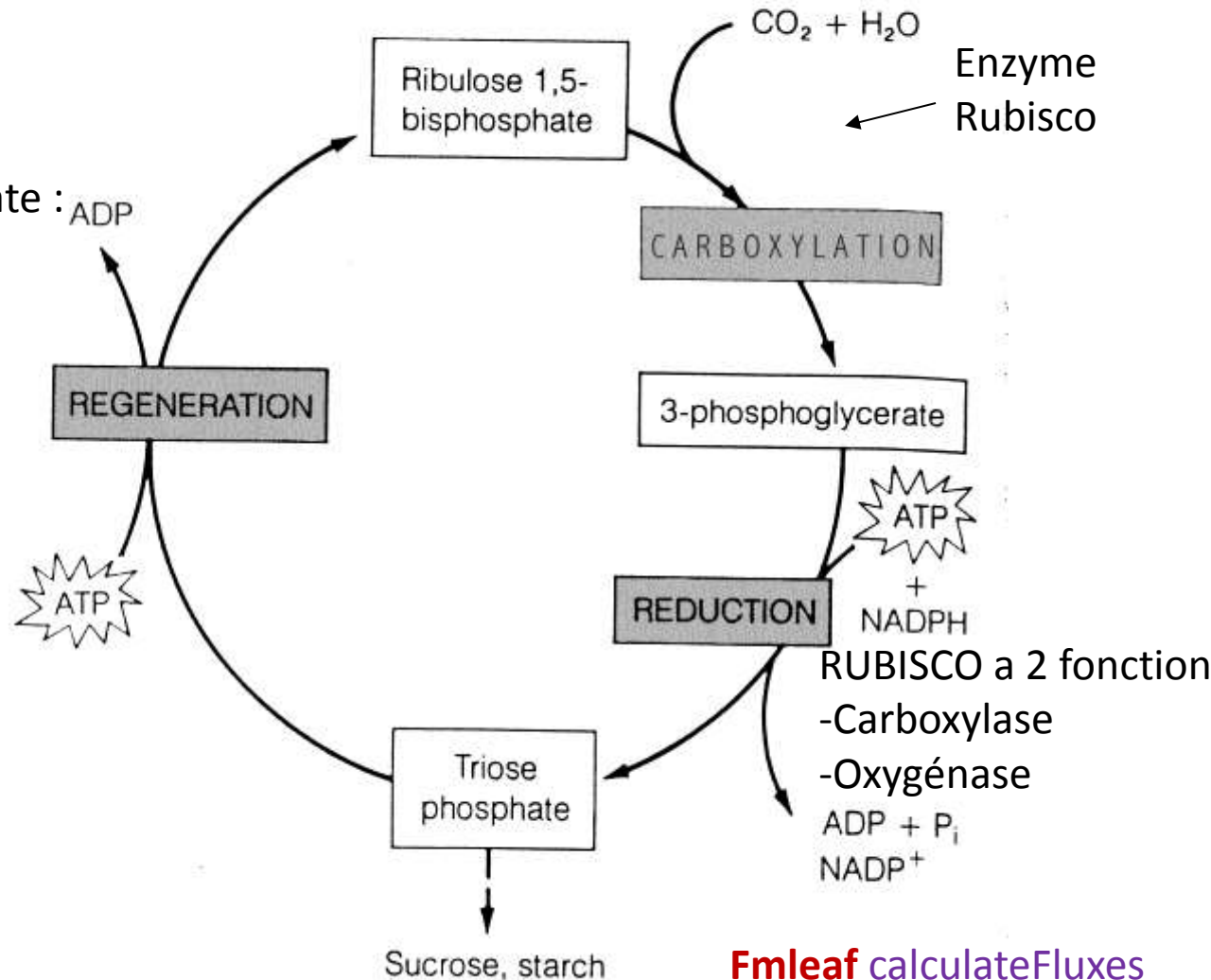
e<sup>-</sup> électrons

## C] La carboxylation

ATP et pouvoir réducteur (NADPH)  
produit au niveau de la chaîne d'électrons

COUPLAGE

Production de trioses phosphate :  
cycle de Calvin

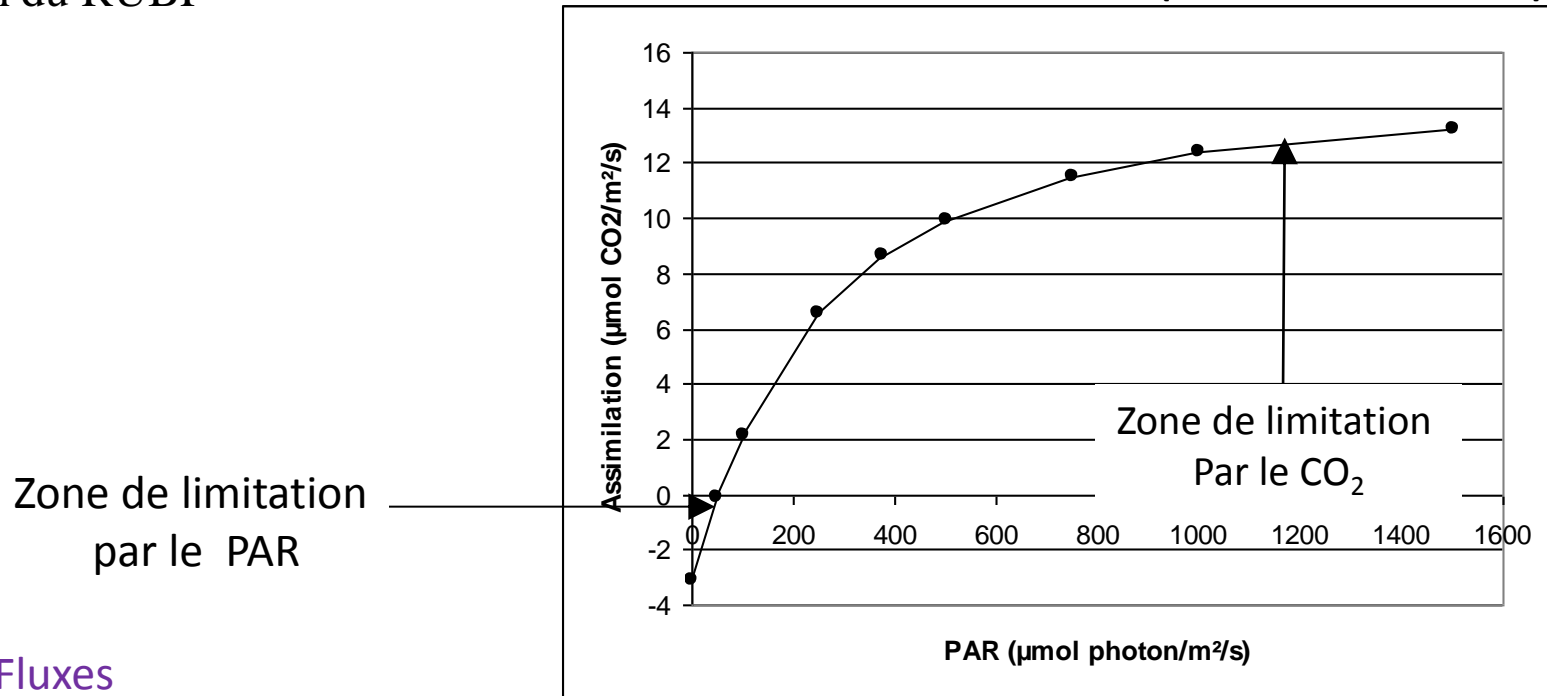


## D] Les étapes limitant l'assimilation

La carboxylation peut être limitée par

- I] Apport en substrat  $\text{CO}_2$   $C_c = f(R_{\text{CO}_2})$       ouverture stomatique
- II] Vitesse de carboxylation  $= f(\text{activité carboxylase de la RUBISCO})$
- III] Transport d'électrons  $= f(\text{PAR}_{\text{absorbé}}, [\text{chlorophylle}], [\text{protéines chaîne}])$
- IV] Régénération du RUBP

**Courbe de réponse  
de l'assimilation au PAR  
(feuille de chêne vert)**



## D. Le modèle de photosynthèse foliaire (*Dérivé de Farquhar et al (1980) et Ball et al. (1987)*)

**A**= Assimilation nette en  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$

**Rd**= Respiration à l'obscurité en  $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$

**Vjmax**=vitesse maximale de transport des électrons  $\mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$

**Vcmax**= vitesse maximale de carboxylation de la RUBISCO  $\mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$

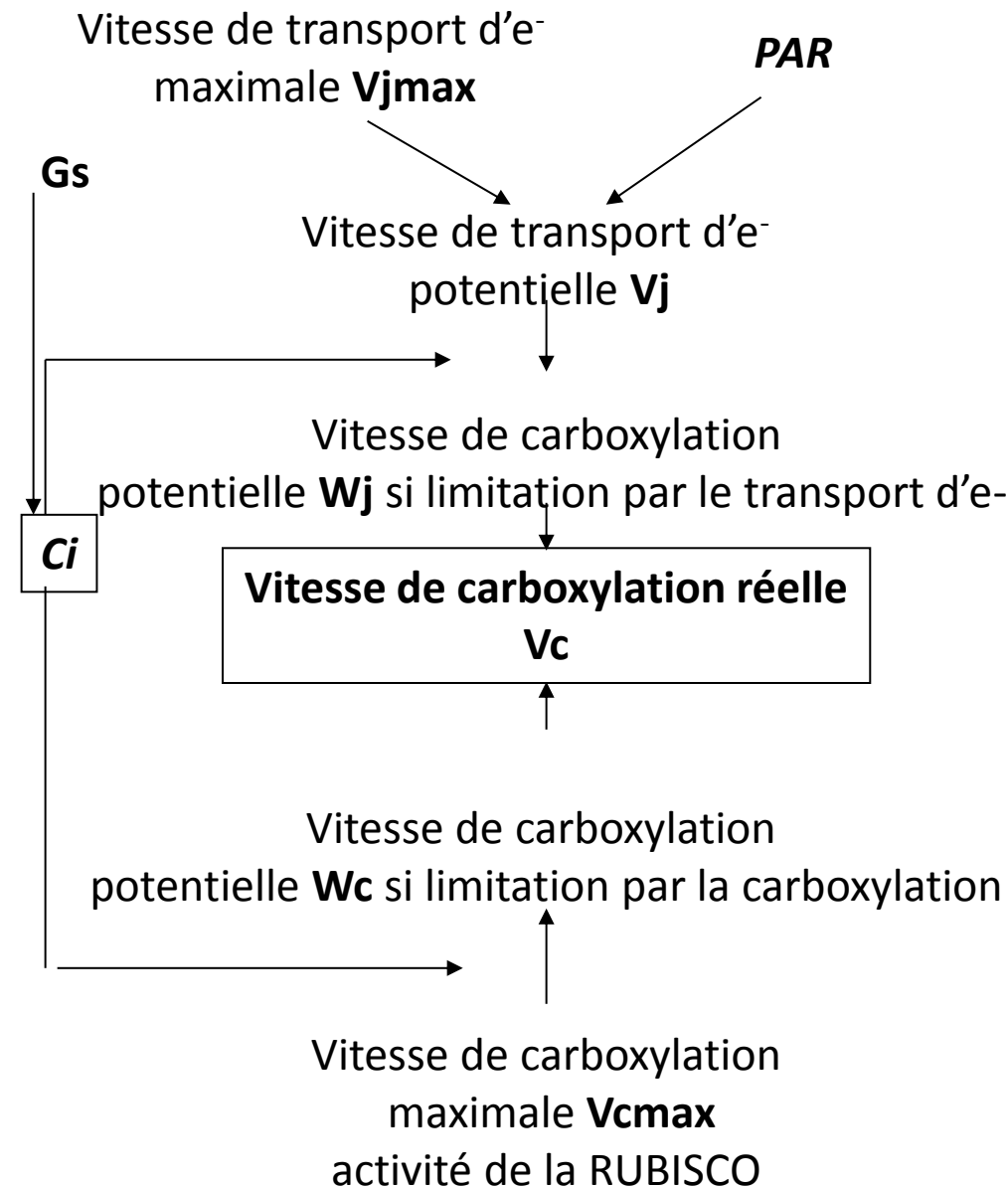
**$\alpha$** = rendement quantique

**$\Gamma^*$** = point de compensation au  $\text{CO}_2$  sans respiration

$$\Gamma^*_0 = \frac{(K_{c0} \times 0.21 \times O_{i0})}{2 \times K_{o0}}$$



# Photosynthesis



Équation de diffusion

$$A = G_{s_{CO_2}} \times (C_s - C_i)$$

Équation de **carboxylation**

$$A = V_c - R_d$$

$$V_c = \min\{W_j; W_c\}$$

Contrôle stomatique

$$G_{s_{H_2O}} = G_0 + G_1 \times \frac{A \times RH}{C_b}$$

ou

Modèle de Jarvis  $G_s = f(PAR, VPD, T)$

# Photosynthesis

Équation de carboxylation

$$A = V_c - R_d$$

$$V_c = \min \{W_j; W_c\}$$

$$W_c = V_{c \max} \frac{C_i - \Gamma^*}{C_i + K_c \times \left(1 + \frac{O_i}{K_o}\right)}$$

$$W_j = \left(\frac{V_j}{4}\right) \times \left(\frac{C_i - \Gamma^*}{2\Gamma^* + C_i}\right)$$

$$V_j = \frac{\alpha \times PAR_a + V_{j \max} - \sqrt{(\alpha \times PAR_a + V_{j \max})^2 - 4\theta \times \alpha \times PAR_a \times V_{j \max}}}{2\theta}$$

# Photosynthesis

## Effet température

La température agit sur tous les paramètres présentés ci-dessus

Par le biais de l'activité enzymatique et des coefficients de solubilité

Long (1991) pour  $O_i$ ,  $C_i$ , et Nolan and smilie(1976) pour  $V_{jmax}$  et Bernacchi (2001) for  $V_{cmax}$ ,  $V_{omax}$ ,  $K_c$ ,  $K_o$  and  $\Gamma^*$

$$K_c = \exp\left(\frac{cK_c - E_a K_c}{(T_a + 273) \times R}\right)$$

$$K_o = \exp\left(\frac{cK_o - E_a K_o}{(T_a + 273) \times R}\right)$$

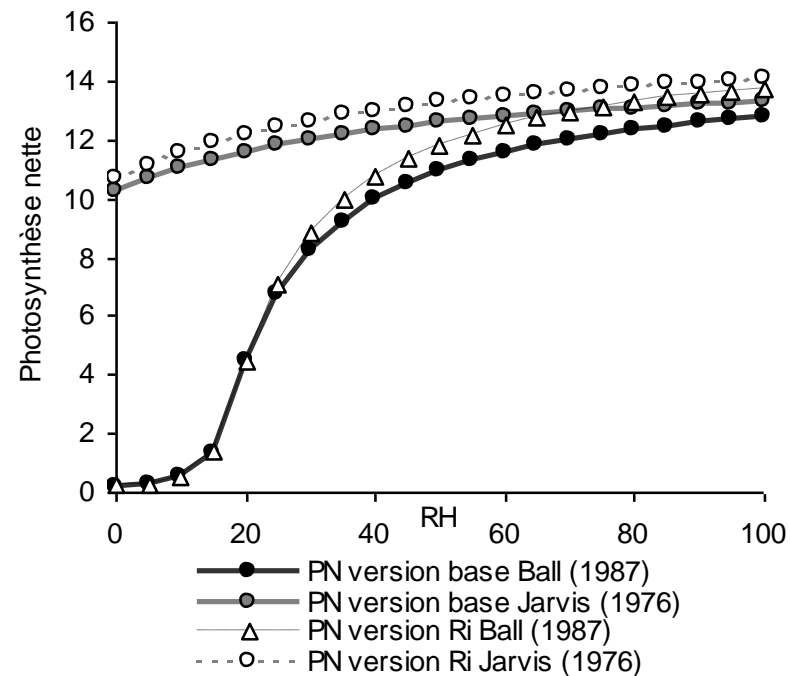
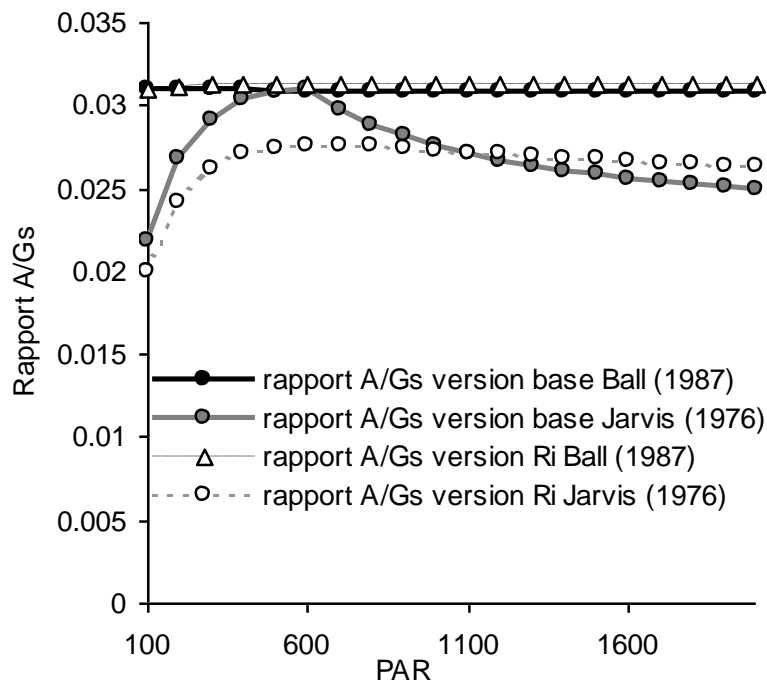
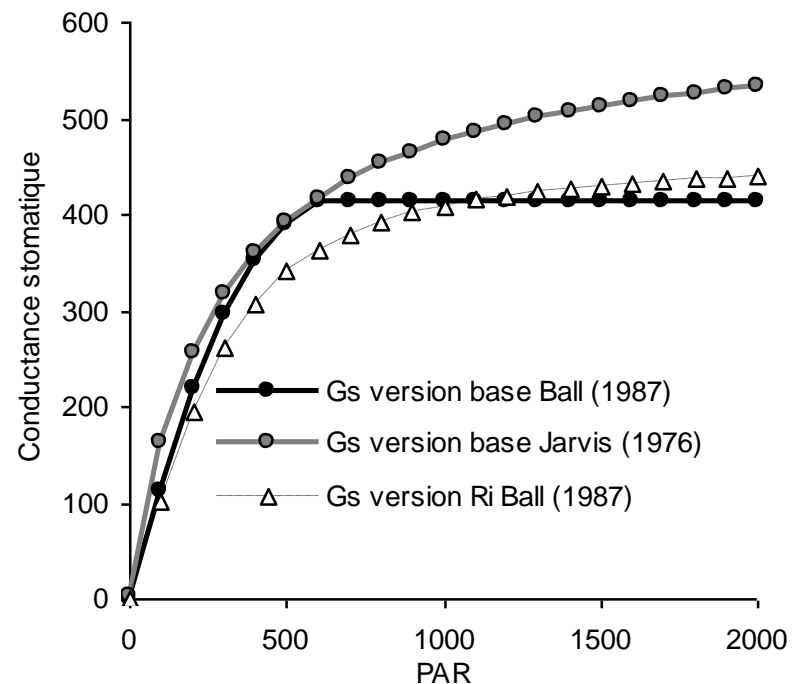
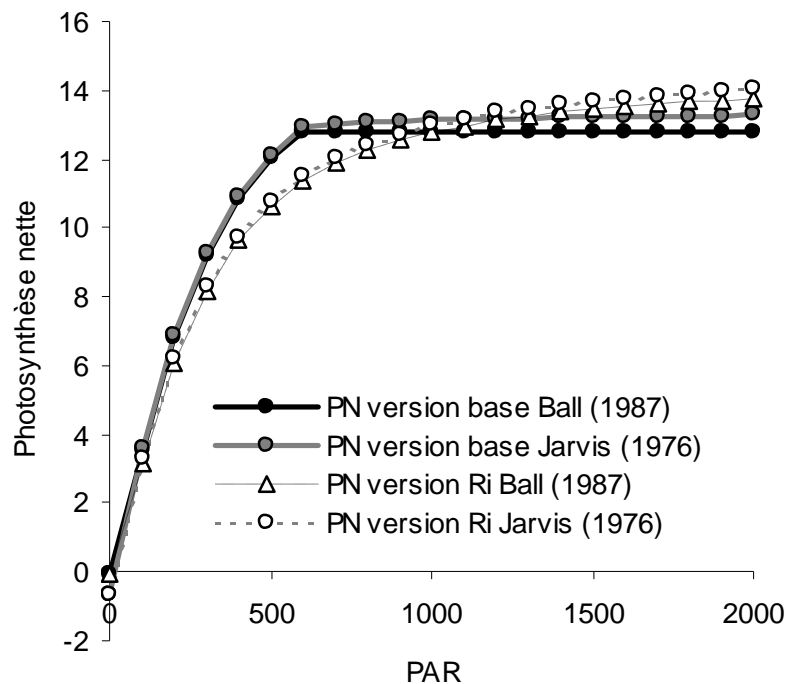
$$V_{C_{max}} = V_{C_{max0}} \times \exp\left(\frac{cV_c - E_a V_c}{(T_a + 273) \times R}\right)$$

$$VJ_{max} = VJ_{max0} \times \frac{\exp\left(\frac{E_a V_j \times (T_a - 25)}{(298 \times R \times (T_a + 273))}\right)}{(1 + \exp(ETT \times (T_a + 273) - JMT)) \times R \times (T_a + 273)}$$

$$C_i = C_{i0} \times f_{ci}$$

$$f_{ci} = \frac{(1.674 - 0.061294 \times T_a + 0.0011688 \times T_a^2 - 8.8741 \times 10^{-6} \times T_a^3)}{0.73547}$$

$$O_i = \frac{O_{i0}}{0.026934} \times (0.047 - 0.0013087 \times T_a + 2.5603 \times (0.1)^5 \times T_a^2 - 2.1441 \times 10^{-17} \times T_a^3)$$





## Détermination de différents paramètres et constantes

### Les constantes inter-spécifiques ou spécifiques

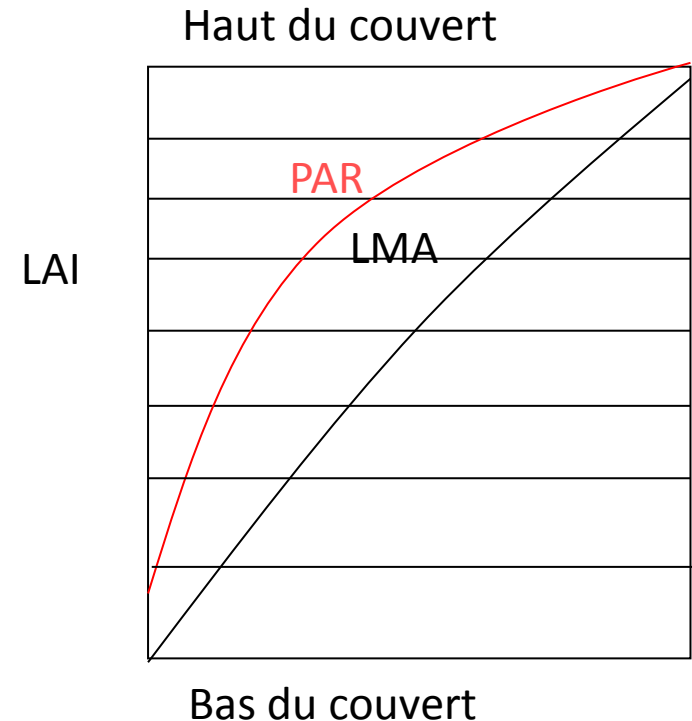
- effet température
- les paramètres de caractérisation enzymatique
- rendement quantique ?

### Les paramètres variant entre espèces et ou spatialement

- $V_{jmax} = f(\text{protéines du transport d'e}^-) \cong f(\text{azote surfacique})$
- $V_{cmax} = f([RUBISCO]) \cong f(\text{azote surfacique})$
- $\text{rendement quantique} = f([Chl]) \cong \text{constant}$

Expérimentalement ces 3 paramètres peuvent être déterminés

À partir des courbes  $A/C_i$   $A/PAR$  ou  $J/PAR$



*Extinction du PAR et des propriétés photosynthétiques*

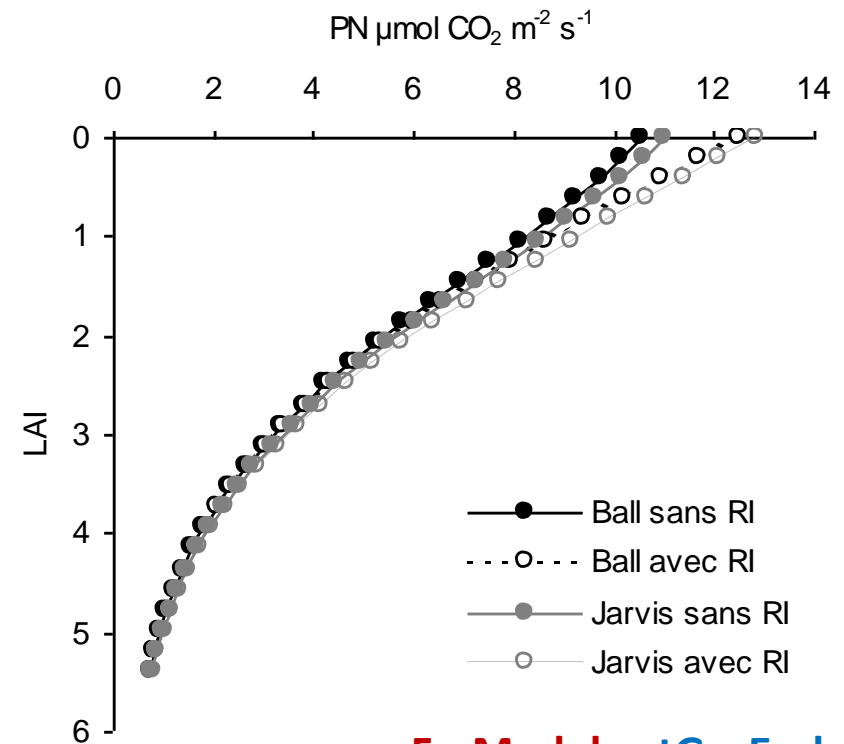
# Photosynthesis

$$Vc \max(I) = NC_2 \times Na(I) + NC_1$$

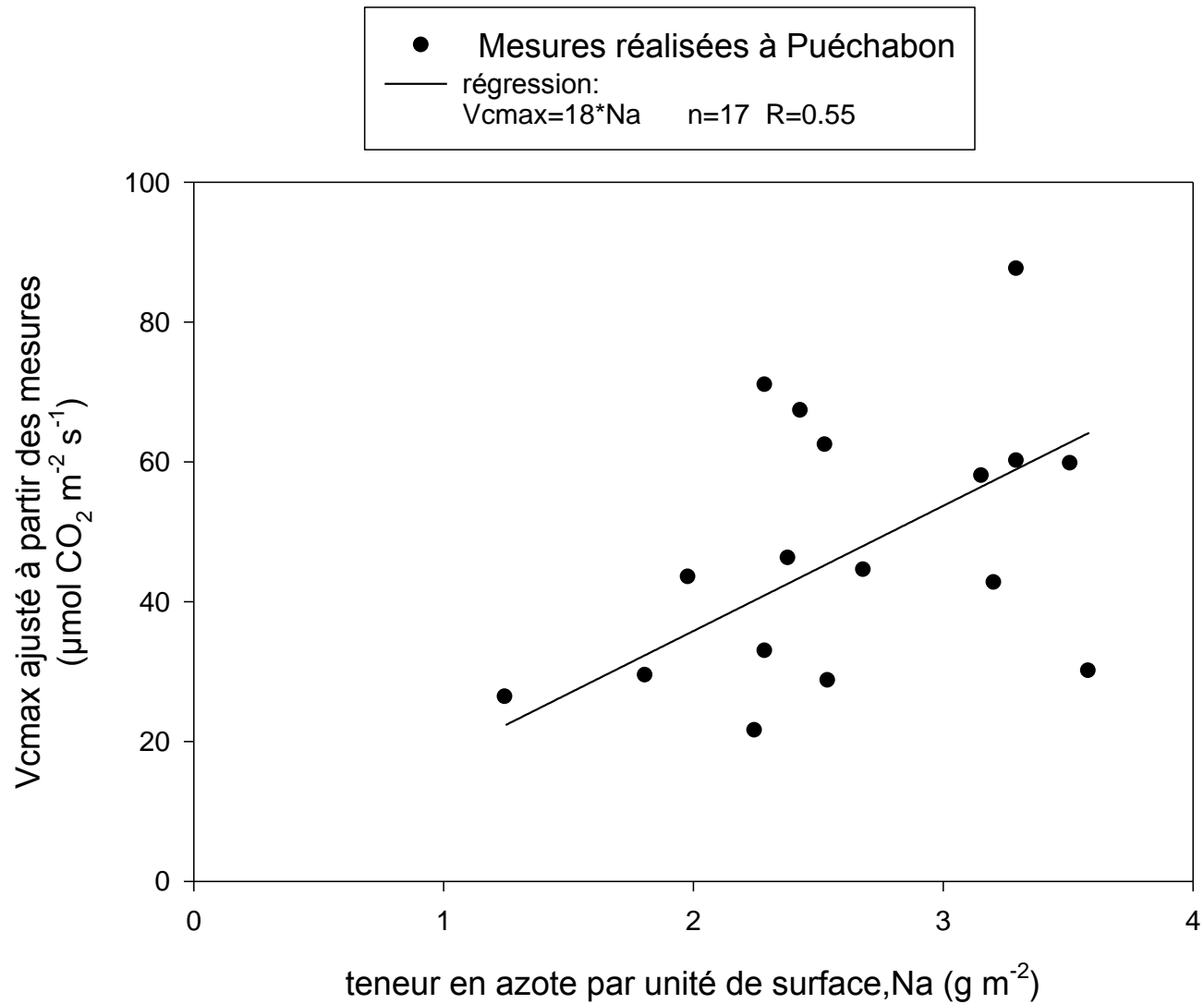
$$Vj \max(I) = NJ_2 \times Na(I) + NJ_1$$

$$Na(I) = Nm \times LMA(I)$$

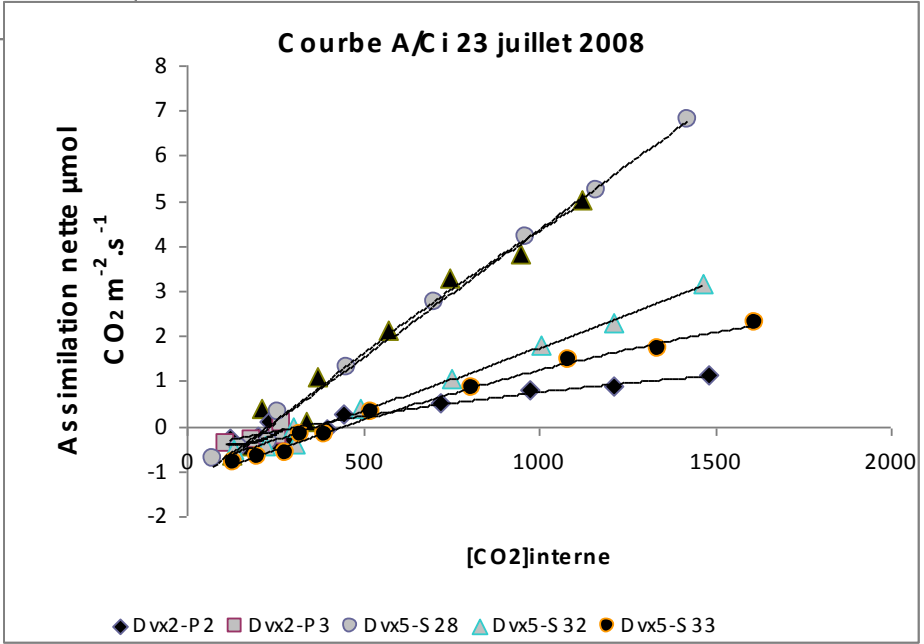
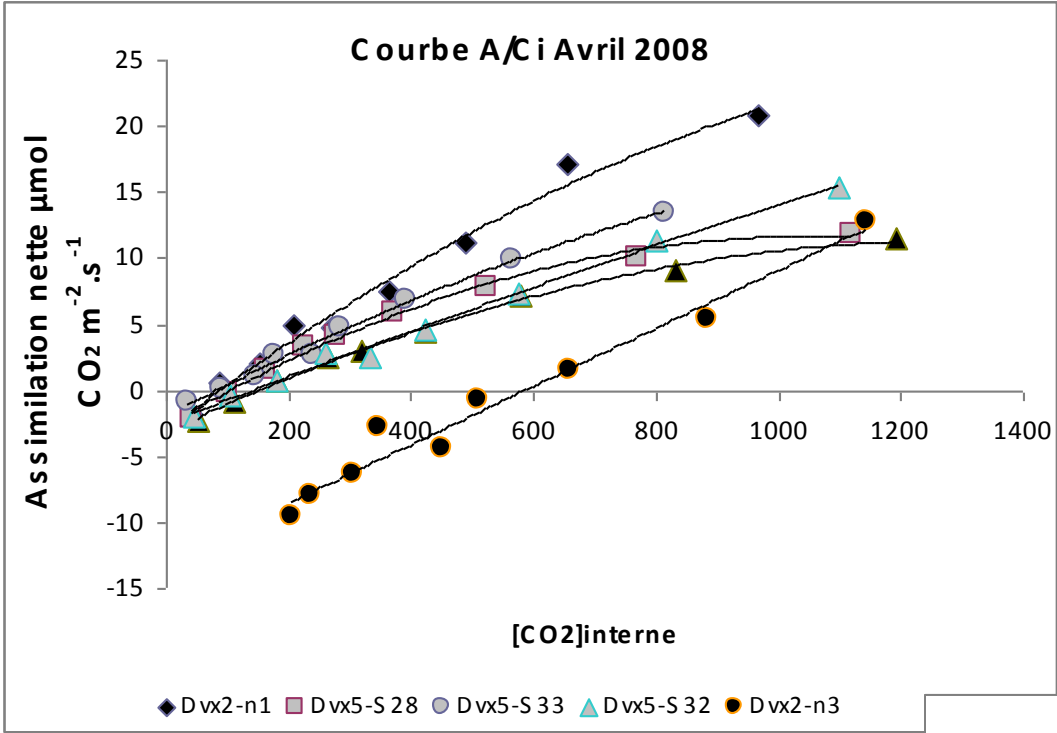
$$LMA(I) = LMA_0(\exp(-K_{LMA} LAI(I)))$$



# Photosynthesis



# Photosynthesis



# Maintenance respiration

$$RM_{organ} = B_{aliveorgan} \times MRN \times N_{morgan} \times Q_{10organ}^{\left(\frac{T_{suf} - T_{MR}}{10}\right)}$$

Tronc	% tissus vivants	Q <sub>10</sub> FORTRAN	Q <sub>10</sub> CAPSIS
Feuilles	1	2.1	2.1
Tronc	<b>0.21 ou f(Age)</b>	1.7	2.1
Branches	0.37	2.8	2.1
Grosses racines	0.37	1.7	2.1
Racines fines	1	2.2	2.1

FmWood hourlyWoodRespiration

Fmleaf calculateFluxes

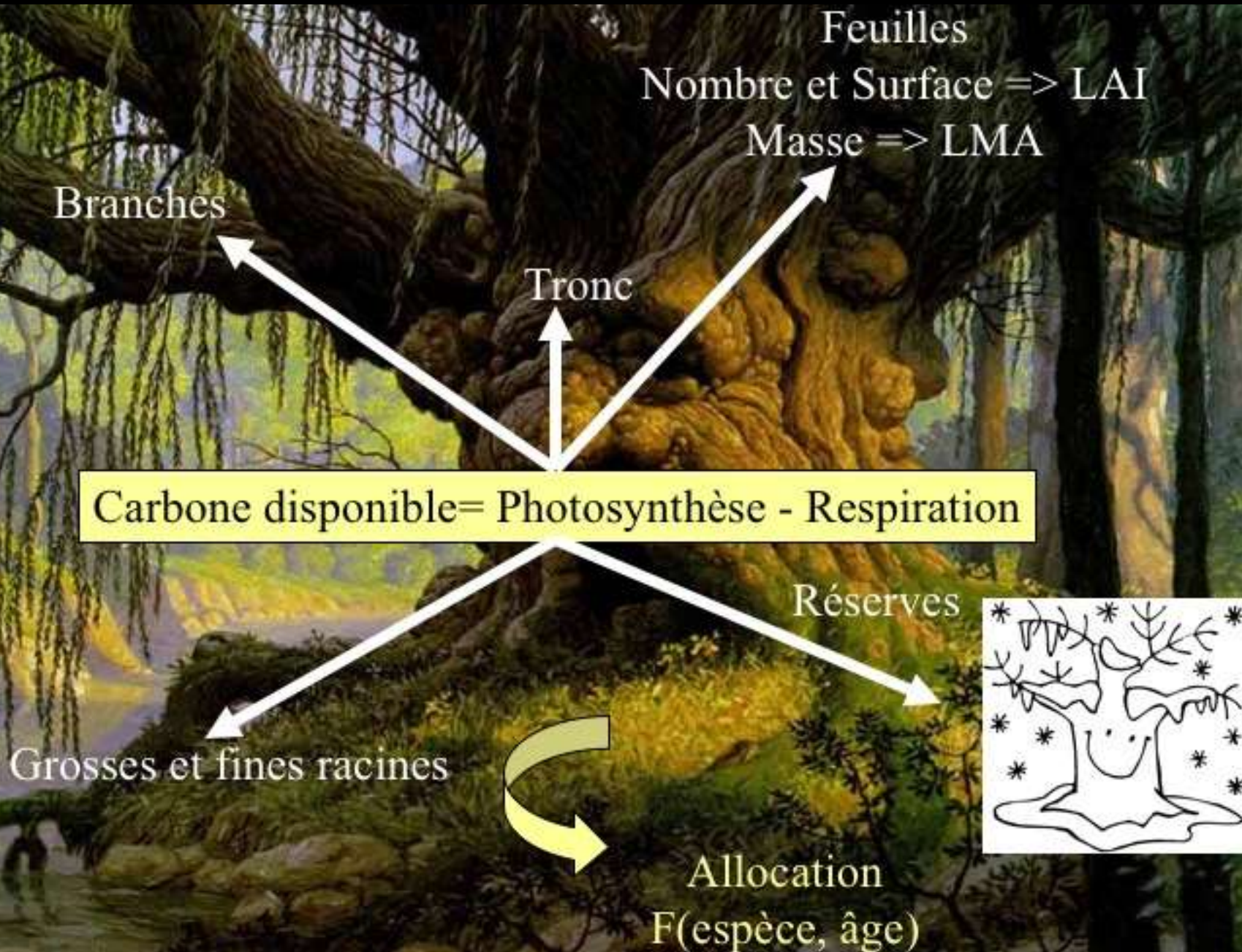
$$RG_{\text{dorgan}} = GB_{\text{organ}} \times (CR_{\text{organ}} - 1)$$

Coût de construction (CR) sont forcés dans le CASTANEA species dans CAPSIS

Coût de construction (CR) sont calculés à partir des compositions biochimiques dans FORTRAN



# Carbon allocation



$$GB_{organ} = \frac{AG_{organ}}{CR_{organ}} \times (A_{canopy} - RM - RG_{leaf} - GB_{leaf})$$

$AG_{organ}$  = fixé (Dufrêne et al., 2005)

$Ag_{organ}$  = calculé avec homéostasie des réserves et ratio racines fines/feuilles pour maintenir la constance des résistances hydrauliques (Davi et al., 2009)

$Ag_{organ}$  = calibré selon sites et dépend du climat (Guillemot et al., 2017)

$$\frac{B_{fine\ roots}}{BF} = \frac{1 + cH \frac{TO_{sapwood}}{TO_{fineroots}}}{K_r R_{hyd} LMA}$$

# Water budget

Si on néglige le sous étage:

$$\Delta R_{sol} = P_{sol} + E_{gt} + E_c - E_v(\text{arbre}) - TR(\text{arbre}) - E_v(\text{sol}) - DR - EI$$

	Définition	Dépend
$P_{sol}$	Pluies arrivant directement au sol	LAI, Pluies
$E_{gt}$	Egouttement des feuilles	LAI, rétention en eau des feuilles, ETP après pluie
$E_c$	Ecoulement le long du tronc	Texture du tronc
$E_v$	Evaporation du feuillage après pluie	Demande evaporative au niveau des feuilles , rétention en eau des feuilles
$TR$	Transpiration de l'arbre	Demande evaporative au niveau des feuilles, conductance stomatique
$E_v(\text{sol})$	Evaporation du sol	Demande evaporative au niveau du sol, contenu en eau du sol
$DR$	Drainage verticale	Réserve utile du sol, macroporosité, contenu en eau du sol
$EI$	Ecoulement latéraux	Pente, rugosité du sol

## Quelques définitions

La teneur en **eau massique** (appelée aussi pondérale)  $W$  (pour water = eau) correspond au rapport entre la masse d'eau  $M_w$  contenue dans le sol et la masse du sol sec  $M_s$  (s pour solide) :

$$W = M_w / M_s.$$

La teneur en **eau volumique**  $\theta$  correspond au rapport entre le volume d'eau  $V_w$  contenu dans le sol et le **volume total des trois phases** (liquide, solide, gazeuse) du sol ou volume apparent  $V_b$  (b pour bulk = global) puisqu'il ne s'agit pas du seul volume de la phase solide

$$\theta = V_w / V_b$$

Pour passer de l'un à l'autre on utilise la notion de densité apparente  $D_a$

$$\theta = W D_a$$

Lorsque le **teneur en eau d'un sol** est exprimée à l'aide de  $\theta$ , le stock d'eau  $S_w$  en mm de lame d'eau s'obtient par :  $S_w = E \theta$ . Avec  $E$  l'épaisseur du solum en mm.

## Equation dynamique

$$R_{sol}(t+1) = R_{sol}(t) + \Delta R_{sol}$$

$\Delta R_{sol} = f(R_{sol})$  par le biais du drainage et de la régulation de la transpiration

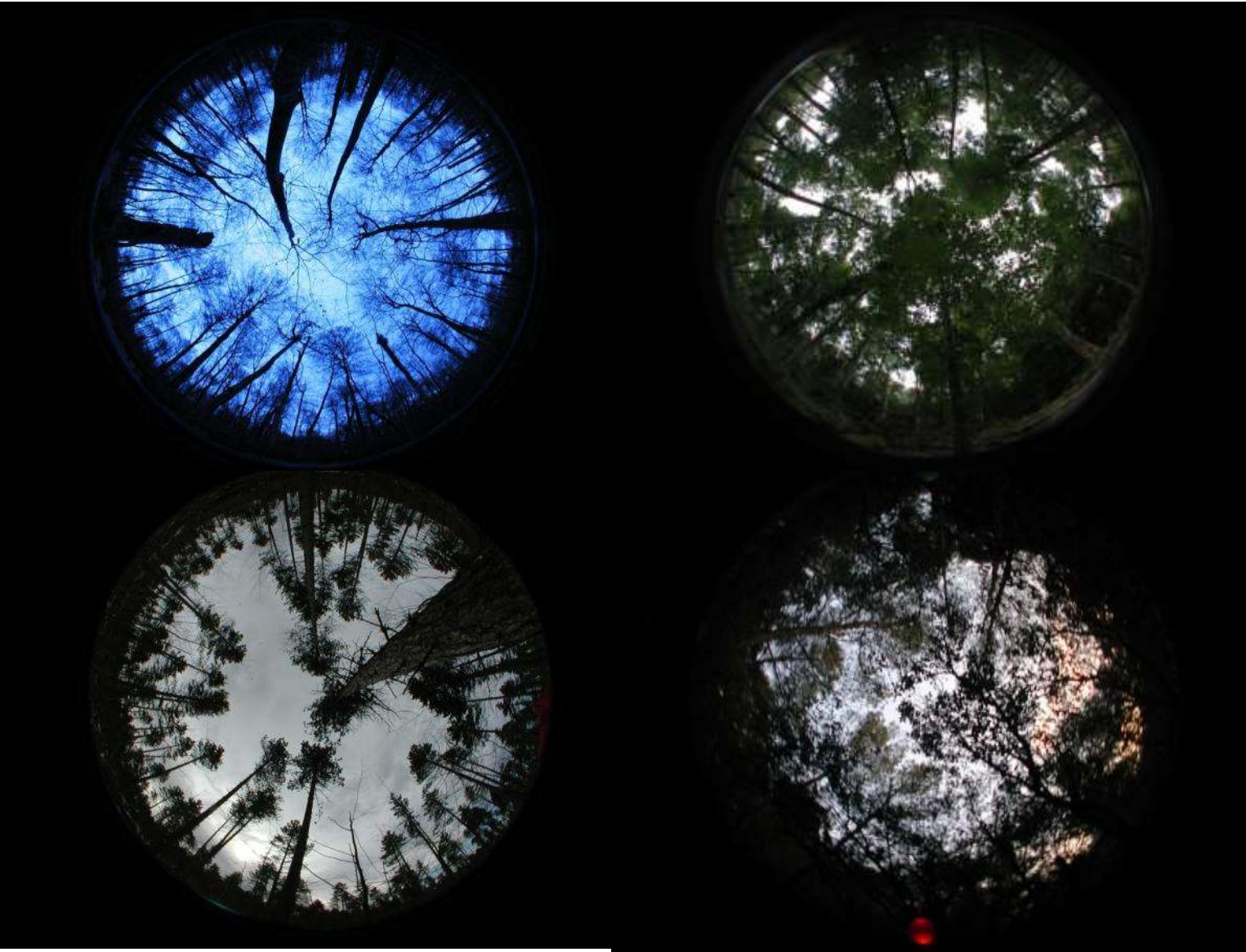
Définir un pas de temps: la résolution temporelle du bilan hydrique  
 $t = 1$  heure, 1 jour, 1 semaine, 1 mois ou 1 année

Paramètre important c'est la réserve utile du sol

$RU = f(\text{texture du sol, profondeur d'enracinement, taux d'éléments grossiers})$

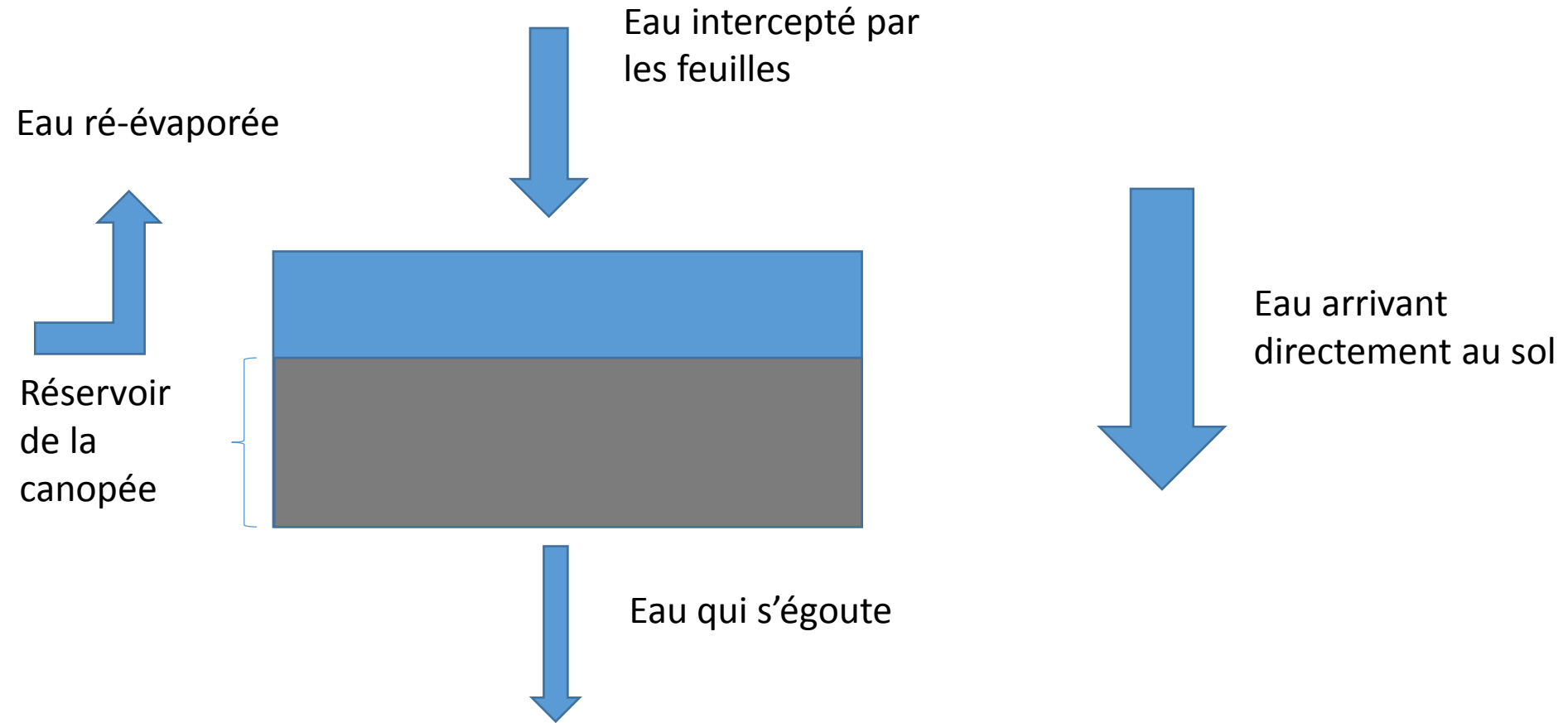


# Water interception





# Water interception



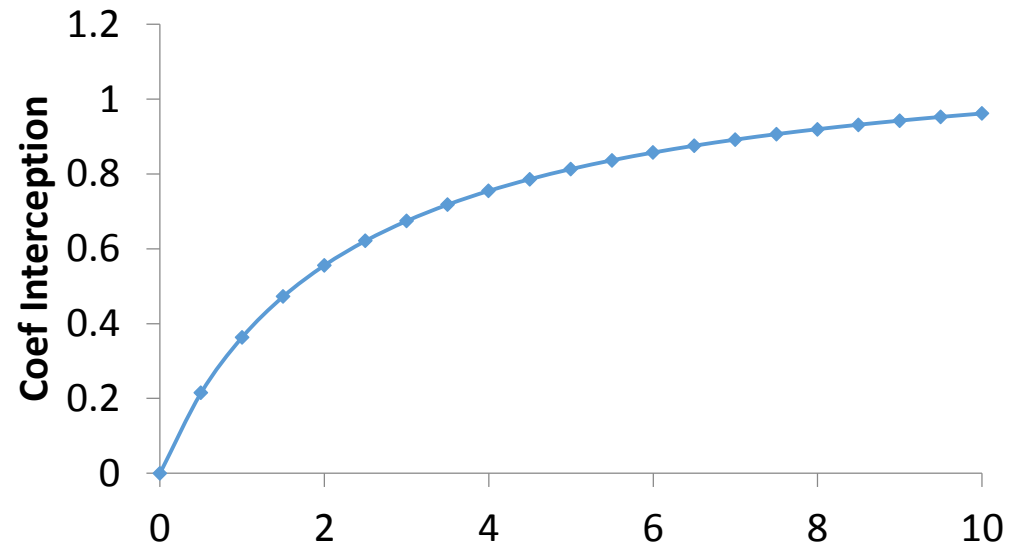
Interception brute =  $\text{Pluies} * f(\text{LAI}, \text{agrégation du couvert})$

Interception net =  $\text{Interception brute} * f(\text{réservoir de la canopée}, \text{évaporation})$

# Water interception

$$I_{\text{leaf}} = C_{\text{leaf}} \times P_i$$

$$\int C_{\text{leaf}} = \frac{\text{LAI}}{\text{LAI} \times C_{ia} + C_{ib}}$$



FmCanopyWaterReserves LAI waterInterception

**Estimation simplifiée du drainage** (Dufrêne et al., 2005; Davi et al., 2005):

1.  $DR = R_{sol} - R_{cc}$  (*draine instantanément toute l'eau au dessus de la capacité au champs*)
2.  $DR = (R_{sol} - R_{cc}) * (1/C)$  (*draine en un délai de C jours*)
3.  $DR = (R_{sol} - R_{cc}) * (1/C) + P_{ds} * MacroPorosité$  (*on rajoute une perte directe de la pluie arrivant au sol par les fissures ou macroporosité notamment en milieu karstique*)

**Le problème des écoulements latéraux:**

1. En surface cela dépend de la pente, de la capacité d'infiltration du sol et de la rugosité de la surface
2. En profondeur, il faut appliquer la loi de Darcy...
3. *Indice simplifiée: usage de la notion de convexité de la parcelle et de la pente*



**Le drainage dépend aussi de l'intensité des pluies arrivant au sol !!!**  
**L'apport par neige est différent**

# Evapotranspiration

ETR= Ev(arbres)+ Ev(sous étage)+**Ev(sol)**+TR(sous étage)+**TR(arbres)**

Evaporation = évaporation de l'eau libre à la surface des feuilles ou du sol

Transpiration= flux d'eau des racines vers les feuilles contrôlé par les stomates

$$ETR_{\text{canopy}} = \left( \frac{R_{\text{can}}}{R_{\text{canmax}}} \right) \times EP + \left( 1 - \frac{R_{\text{can}}}{R_{\text{canmax}}} \right) \times Tr$$

$$Tr = \frac{\Delta h \times R_{nveg} + \frac{\rho_{cp} \times C_{ph} \times VPD}{R_{ac}}}{\lambda h \times \left( \Delta h + \gamma \times \left( 1 + \frac{1}{g_c \times R_{ac}} \right) \right)}$$

# Evapotranspiration

$$Tr = \frac{\Delta h \times R_{nveg} + \frac{\rho_{cp} \times C_{ph} \times VPD}{R_{ac}}}{\lambda h \times \left( \Delta h + \gamma \times \left( 1 + \frac{1}{g_c \times R_{ac}} \right) \right)}$$

La formule de Pennann Monteith

**RnVeg= Rayonnement net du couvert végétal=**

**Rg (soleil) +Ra (thermique atmosphérique)- Rveg (thermique de la végétation)**

**Transpiration augmente quand la température et le rayonnement globale augmente !**

$$Tr = \frac{\Delta h \times R_{nveg} + \frac{\rho_{cp} \times C_{ph} \times VPD}{R_{ac}}}{\lambda h \times \left( \Delta h + \gamma \times \left( 1 + \frac{1}{g_c \times R_{ac}} \right) \right)}$$

La formule de Pennann Monteith

**VPD= Sécheresse de l'air=ea-es**

Transpiration augmente quand la sécheresse de l'air s'accroît!

$$Tr = \frac{\Delta h \times R_{nveg} + \frac{\rho_{cp} \times C_{ph} \times VPD}{R_{ac}}}{\lambda h \times \left( \Delta h + \gamma \times \left( 1 + \frac{1}{g_c \times R_{ac}} \right) \right)}$$

La formule de Pennann Monteith

**Rac= Résistance aérodynamique du couvert**

**Dépend du vent, la hauteur du couvert et de la rugosité de la surface**

Transpiration augmente quand Rac diminue: vent augmente, rugosité et hauteur diminuent



$$Tr = \frac{\Delta h \times R_{nveg} + \frac{\rho_{cp} \times C_{ph} \times VPD}{R_{ac}}}{\lambda h \times \left( \Delta h + \gamma \times \left( 1 + \frac{1}{g_c \times R_{ac}} \right) \right)}$$

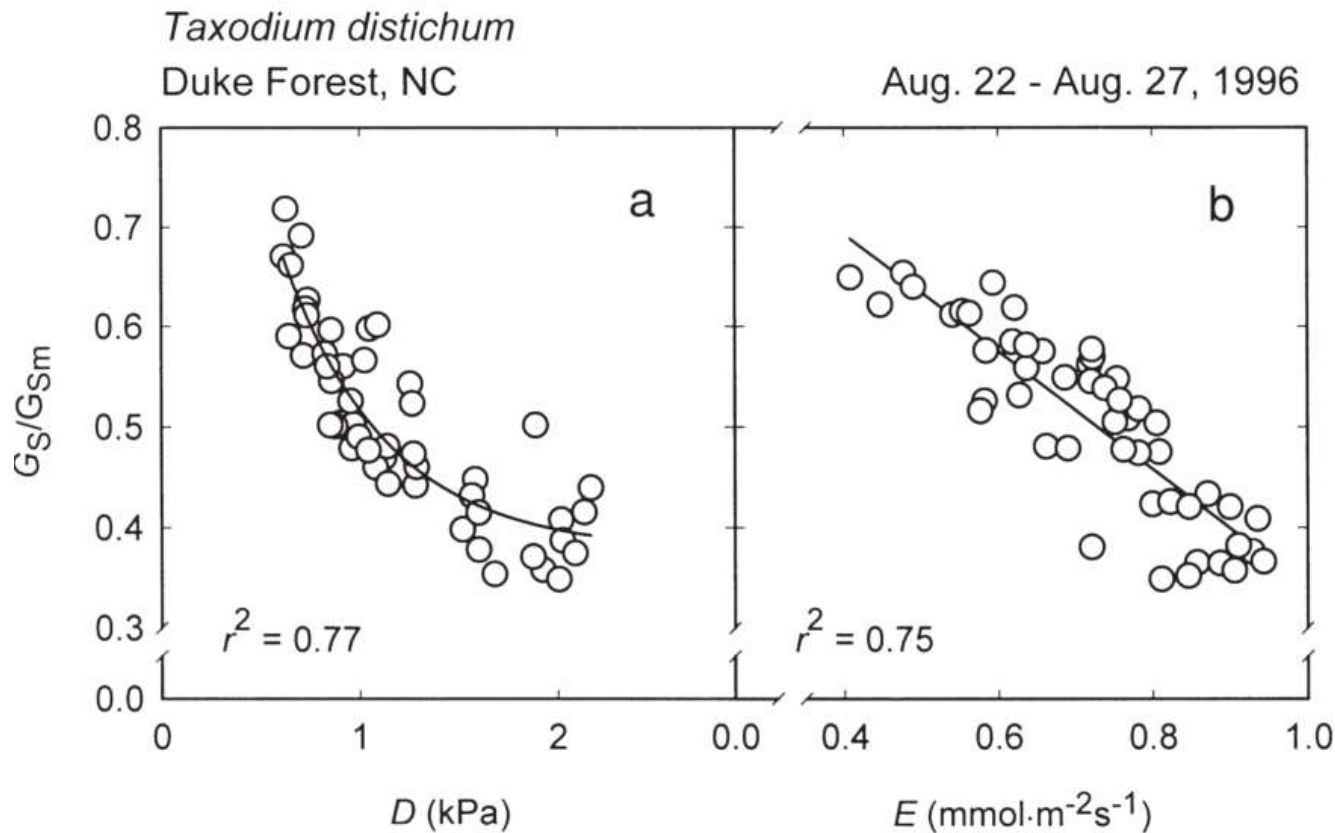
La formule de Pennann Monteith

**Gc= Conductance du couvert**

**Dépend de l'ouverture des stomates**

Transpiration augmente quand les stomates sont ouverts: sol humide, air humide, lumière et chaleur

# Evapotranspiration



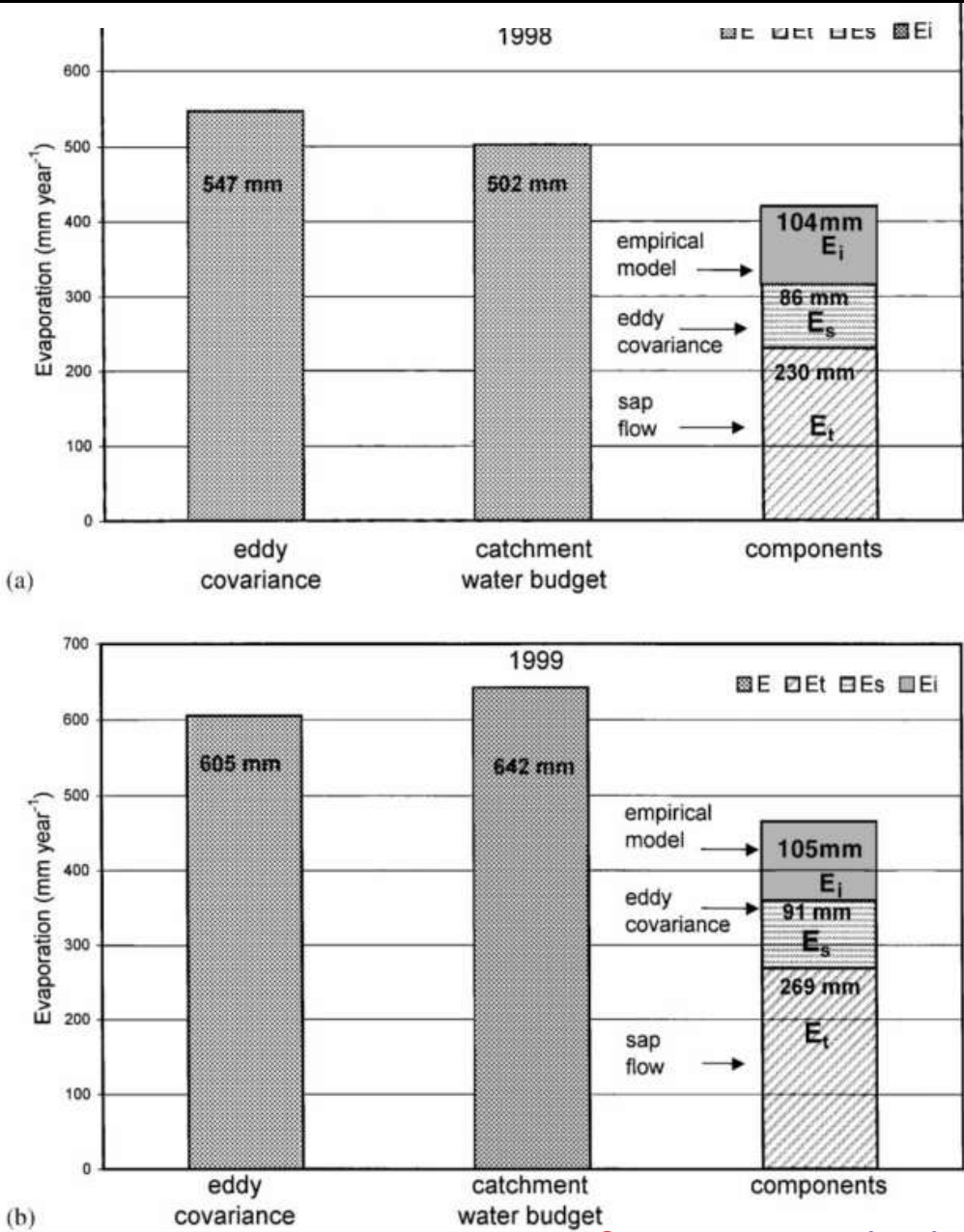
Source: Oren, R., J. S. Sperry, G. G. Katul, D. E. Pataki, B. E. Ewers, N. Phillips, et K. V. R. Schäfer.  
« Survey and Synthesis of Intra- and Interspecific Variation in Stomatal Sensitivity to Vapour Pressure Deficit ». *Plant, Cell & Environment* 22, n°. 12 (1999): 1515–1526.

# Evapotranspiration

Différentes composantes de l'évapotranspiration:  $E_v$ ,  $T_R$ ,  $E_v(\text{sol})$

Peuplement de chêne et érable des USA

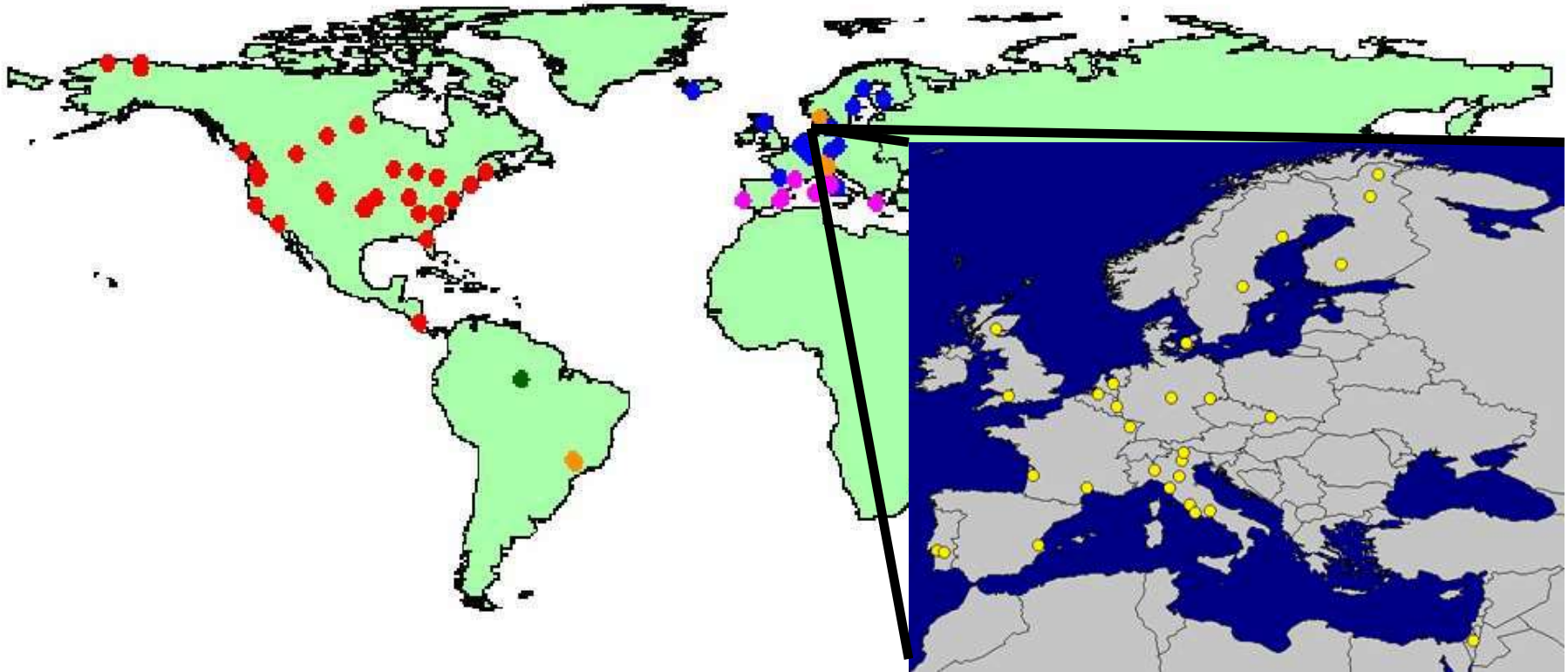
Source: Wilson, Kell B, Paul J Hanson, Patrick J Mulholland, Dennis D Baldocchi, et Stan D Wullschleger. « A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance ». *Agricultural and Forest Meteorology* 106, n°. 2 (janvier 27, 2001): 153-168.





# FLUXNET Sites

AmeriFlux(•), EUROFLUX(•), Medeflu(•),  
JapanNet(•), LBA(•), others(•)



Carbon and water flux estimation by eddy correlation method





Branch bag



sapflow



Gas exchange



Dendrometer



Biochemical



photos



LAI2000



photosynthesis

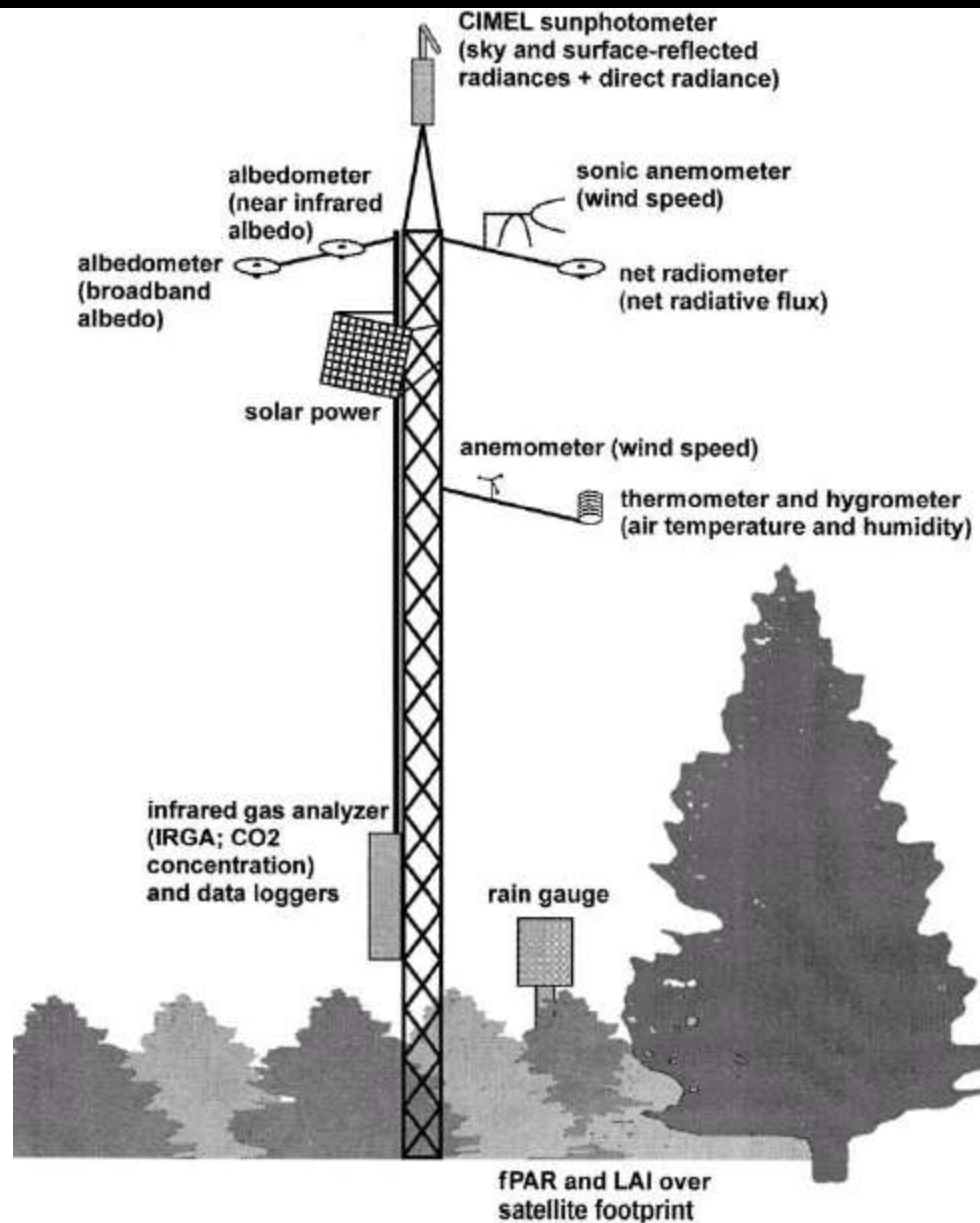


# Evaluation of CASTANEA model

## Tour à flux: mesure intégrative méthode des corrélations



*Les mesures intégratives*

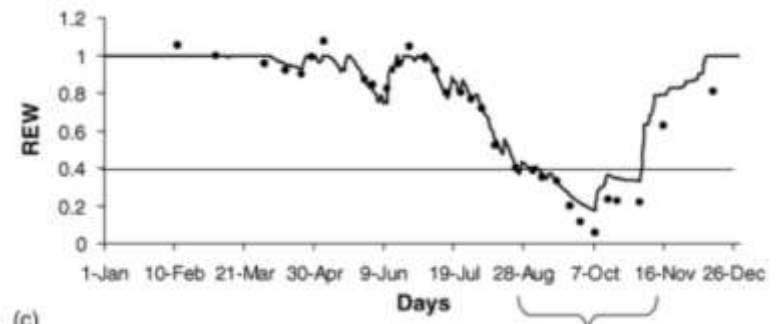
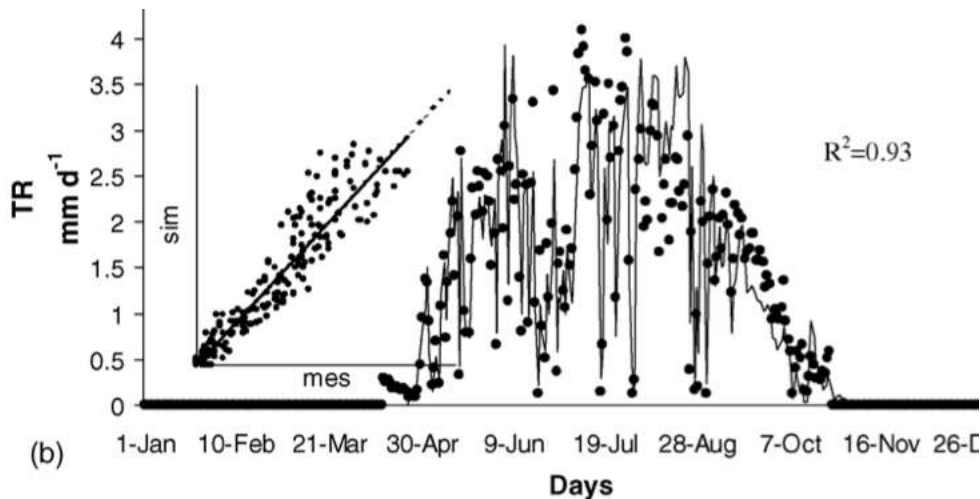
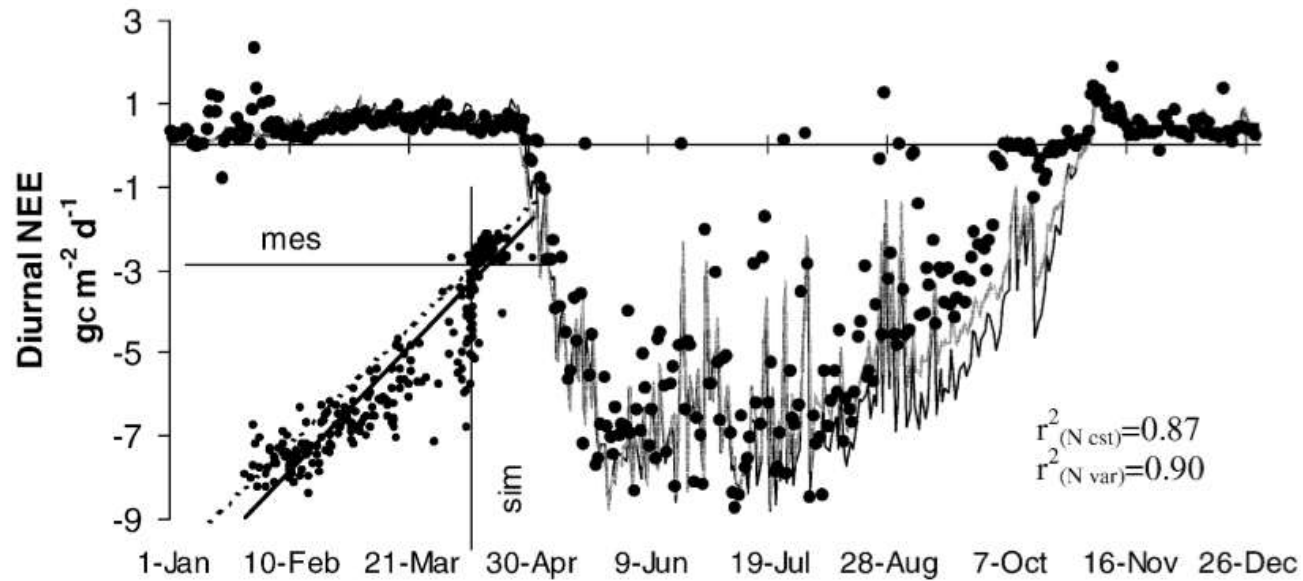


Running et al., 1999



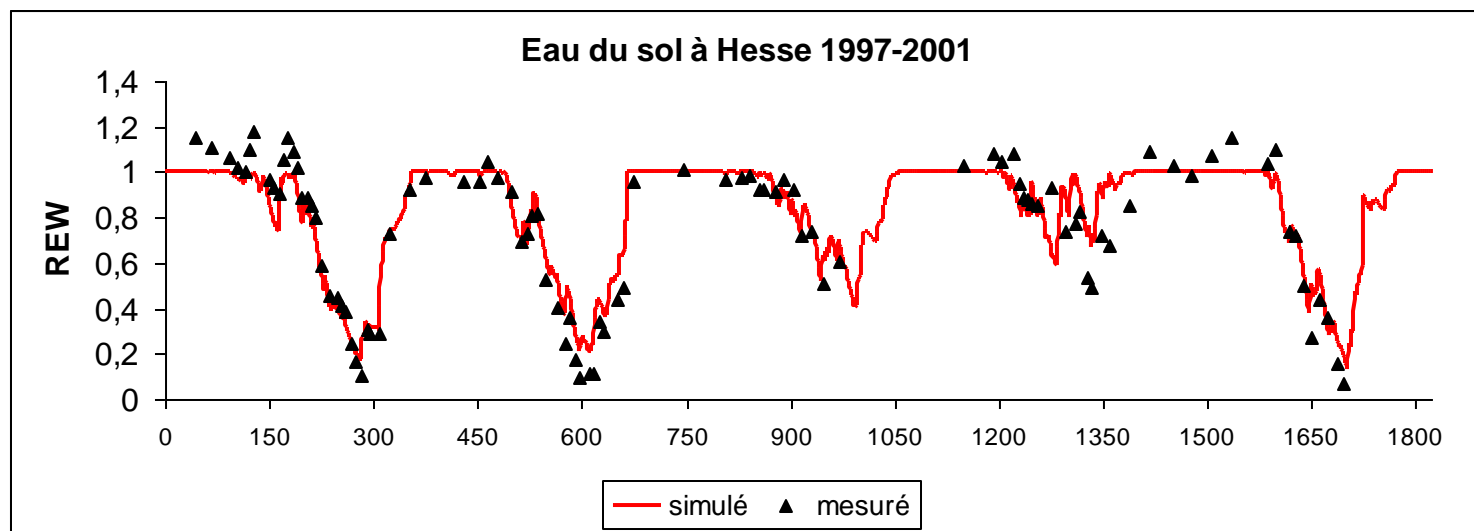
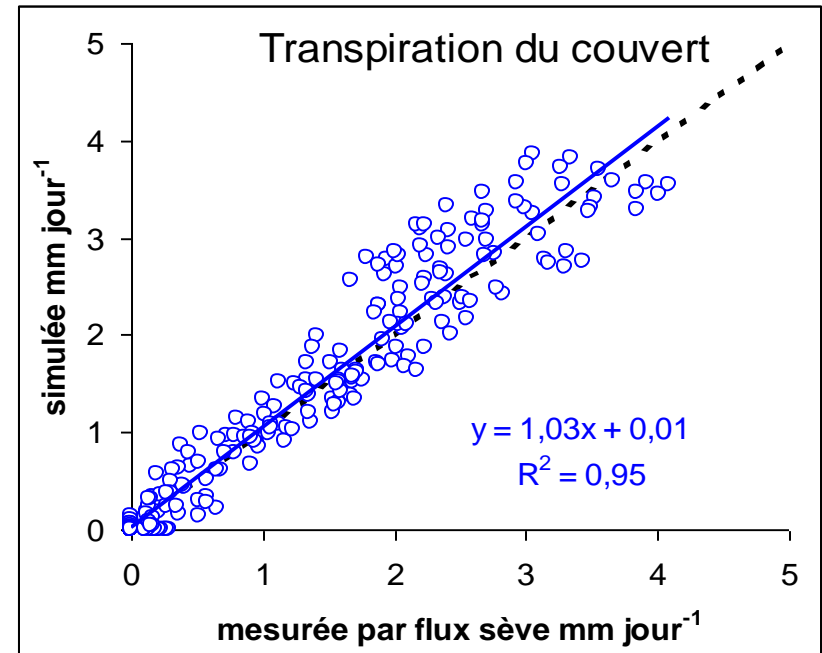
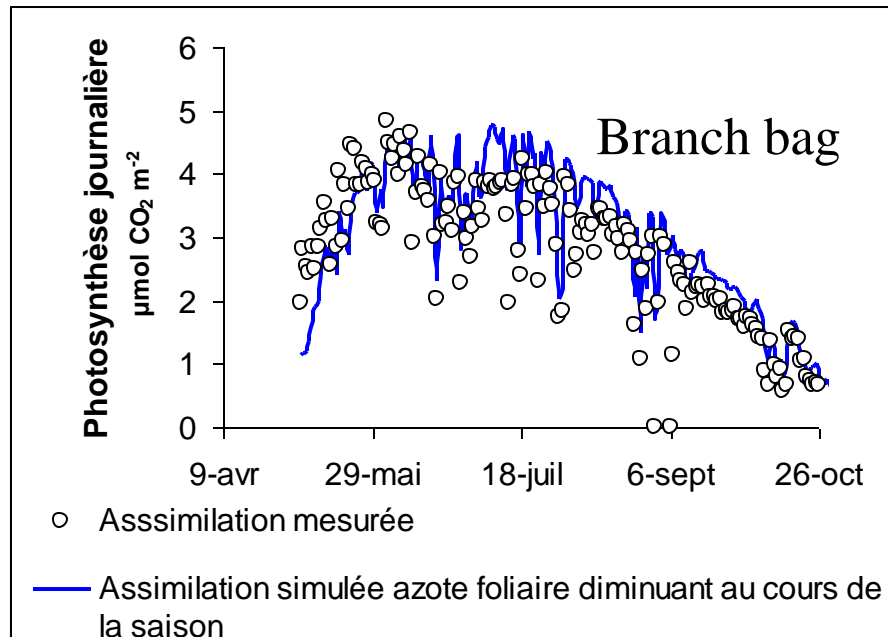
# Evaluation of CASTANEA model

Model evaluation on several processes (Davi et al. 2005)





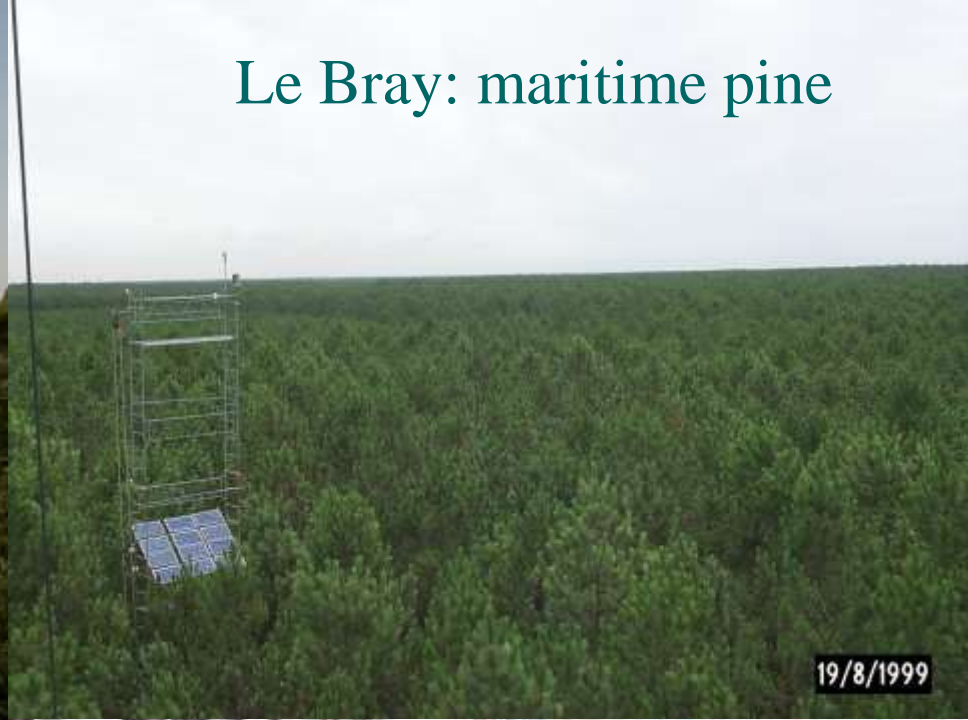
# Evaluation of CASTANEA model



Hesse: hêtre



Le Bray: maritime pine



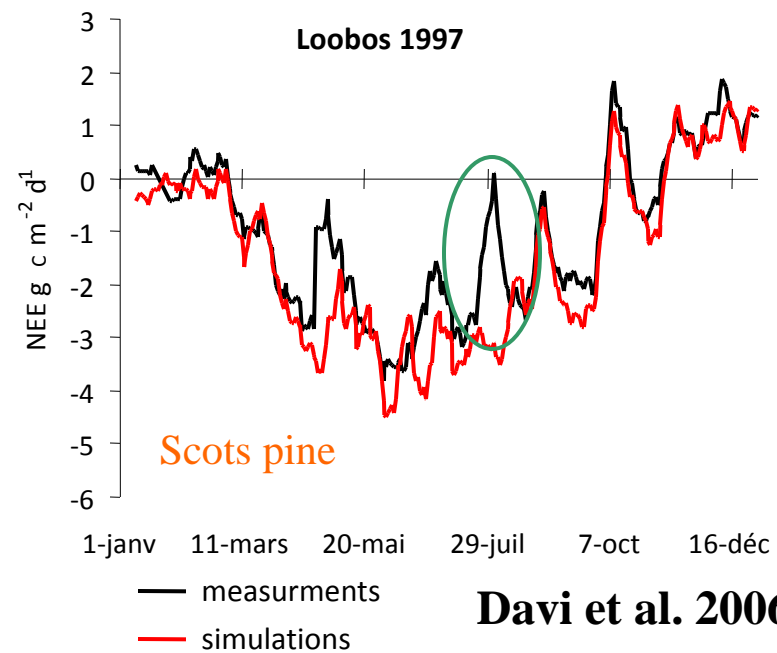
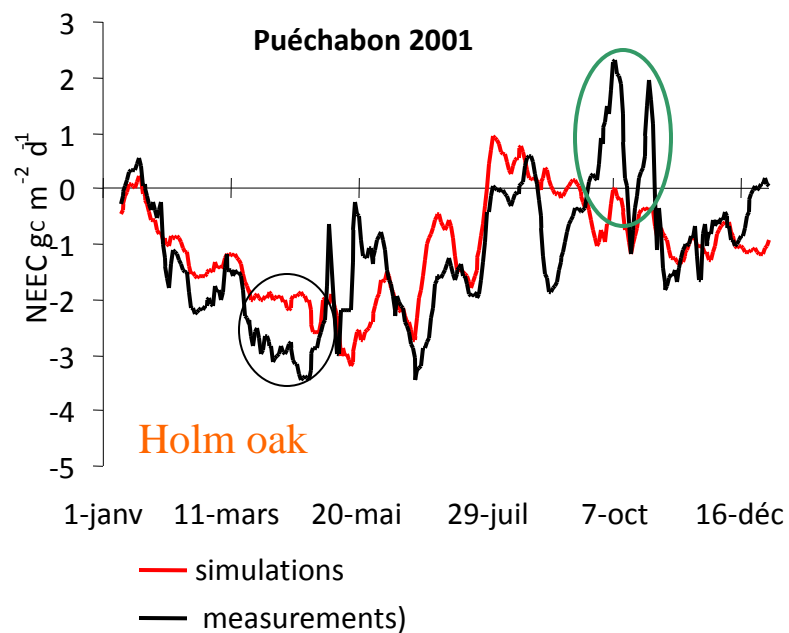
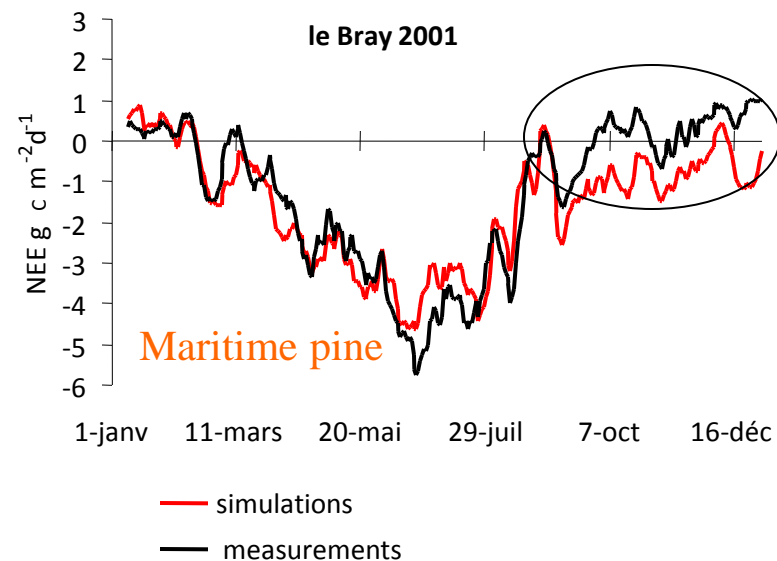
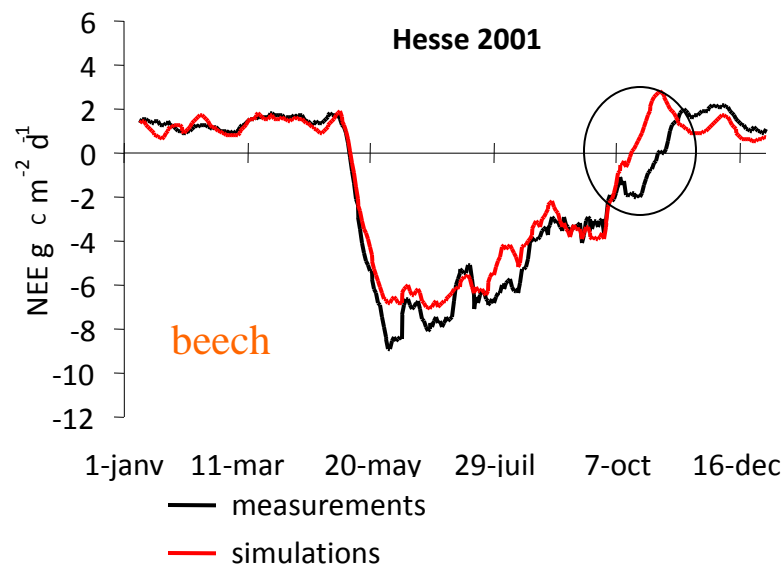
Puéchabon: Chêne vert



Loobos: Scots pine



# Evaluation of CASTANEA model



# Past uses of CASTANEA model

Tree Physiology 25, 859–872  
© 2005 Heron Publishing—Victoria, Canada

## Modeling annual production and carbon fluxes of a large managed temperate forest using forest inventories, satellite data and field measurements

GUERRIC LE MAIRE,<sup>1,2</sup> HENDRIK DAVI,<sup>1</sup> KAMEL SOUDANI,<sup>1</sup> CHRISTOPHE FRANÇOIS,<sup>1</sup> VALÉRIE LE DANTEC<sup>3</sup> and ERIC DUFRÊNE<sup>1</sup>

Scaling up from stand to large forest



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Agricultural and Forest Meteorology 141 (2006) 35–56

AGRICULTURAL  
AND  
FOREST  
METEOROLOGY

[www.elsevier.com/locate/agrformet](http://www.elsevier.com/locate/agrformet)

## Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems

H. Davi<sup>a,c,\*</sup>, E. Dufrêne<sup>a</sup>, C. Francois<sup>a</sup>, G. Le Maire<sup>a</sup>, D. Loustau<sup>b</sup>,  
A. Bosc<sup>b</sup>, S. Rambal<sup>c</sup>, A. Granier<sup>d</sup>, E. Moors<sup>f</sup>

Projection under IPCC scenarios

Global Change Biology (2009), doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01835.x

## Exceptional carbon uptake in European forests during the warm spring of 2007: a data–model analysis

N. DELPIERRE\*†‡, K. SOUDANI\*†‡, C. FRANÇOIS\*†‡, B. KÖSTNER§, J.-Y. PONTAILLER\*†‡, E. NIKINMAA¶, L. MISSON||, M. AUBINET\*\*, C. BERNHOFER§, A. GRANIER††, T. GRÜNWALD§, B. HEINESCH\*\*, B. LONGDOZ††, J.-M. OURCIVAL||, S. RAMBAL||, T. VESALA¶ and E. DUFRÊNE\*†‡

Disentangle various climatic effects explaining exceptional carbon uptake



# Current use and improvements of CASTANEA model

*Ecology Letters*, (2012)

doi: 10.1111/j.1461-0248.2012.01764.x

## Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty

Comparing process-based model and niche models

AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY 149 (2009) 349–361



ELSEVIER

available at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



journal homepage: [www.elsevier.com/locate/agrformet](http://www.elsevier.com/locate/agrformet)



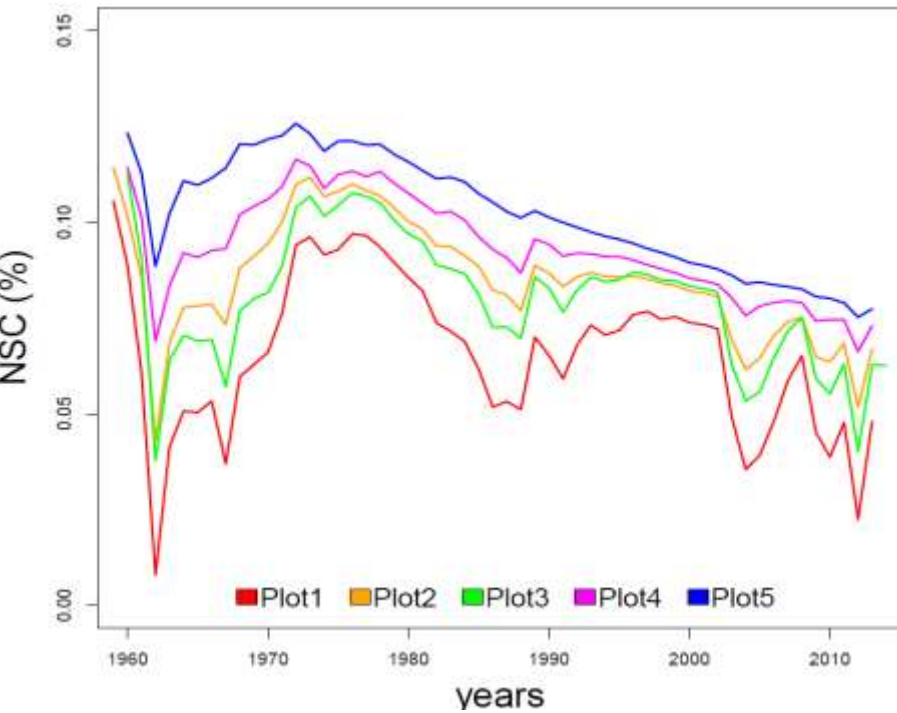
## The fundamental role of reserves and hydraulic constraints in predicting LAI and carbon allocation in forests

H. Davi<sup>a,\*</sup>, C. Barbaroux<sup>b</sup>, C. Francois<sup>a</sup>, E. Dufrêne<sup>a</sup>

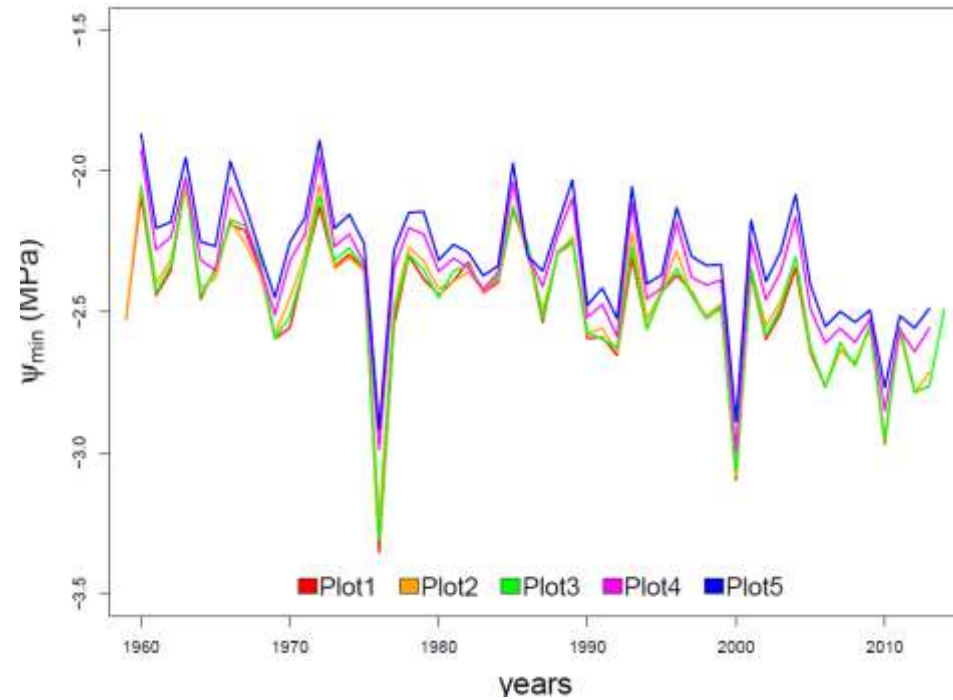
Modelling carbon allocation using functional rules and comparing simulated and measured tree ring increments

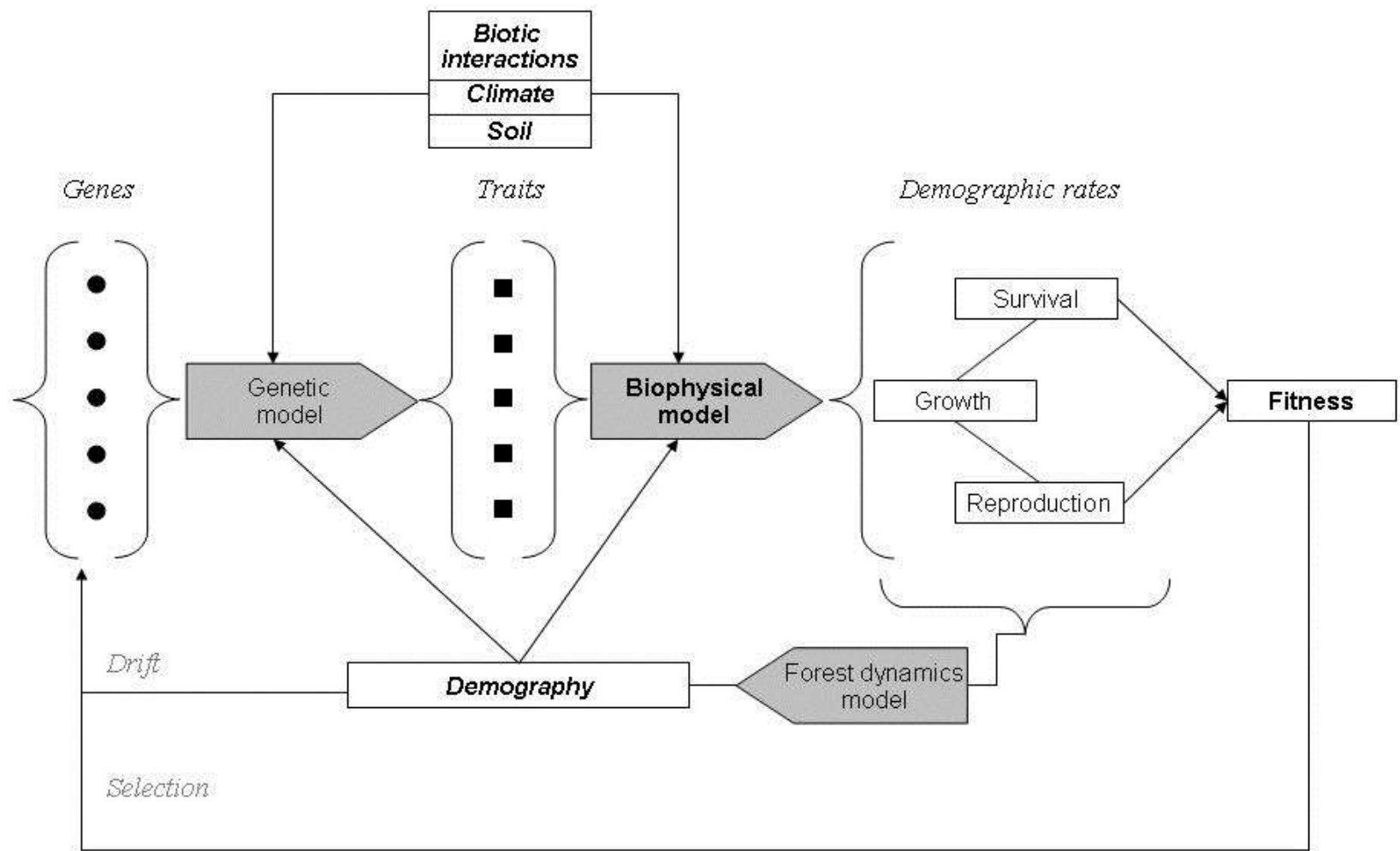
# Modélisation de la mortalité

Non-Structural Carbohydrate (NSC) concentration



Leaf water potential





# PDG, a new hybrid model

CASTANEA

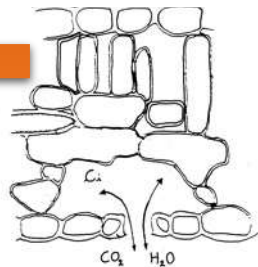
Dufrêne et al. 2005



$Fecundity = f(reserves)$



ADULTS



Growth/ mortality

Date of  
Budburst

ADULTS

Dispersal  
-pollen dispersal kernel

Mating system  
(2% selfing)

SEEDS



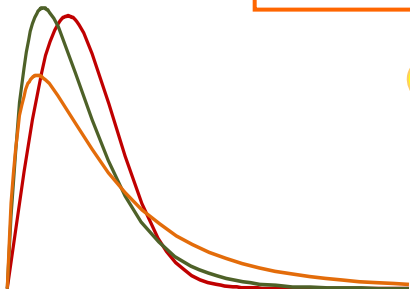
GENETICS

Rate of empty seed,  
germination, survival

Density-dependence  
mortality

SEEDLINGS

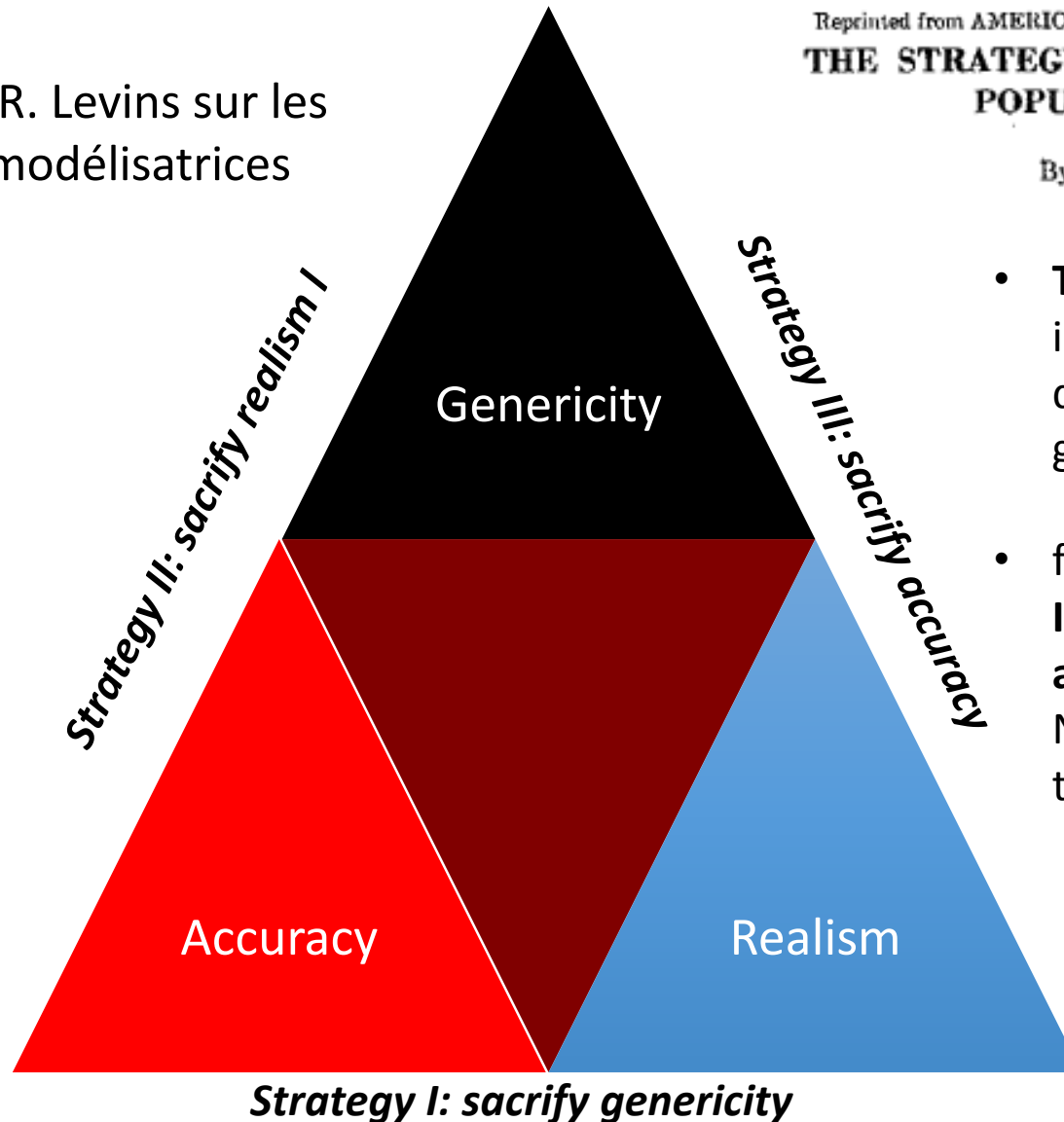
Dispersal





# Model classification

Triangle de R. Levins sur les  
approches modélisatrices  
(1966)

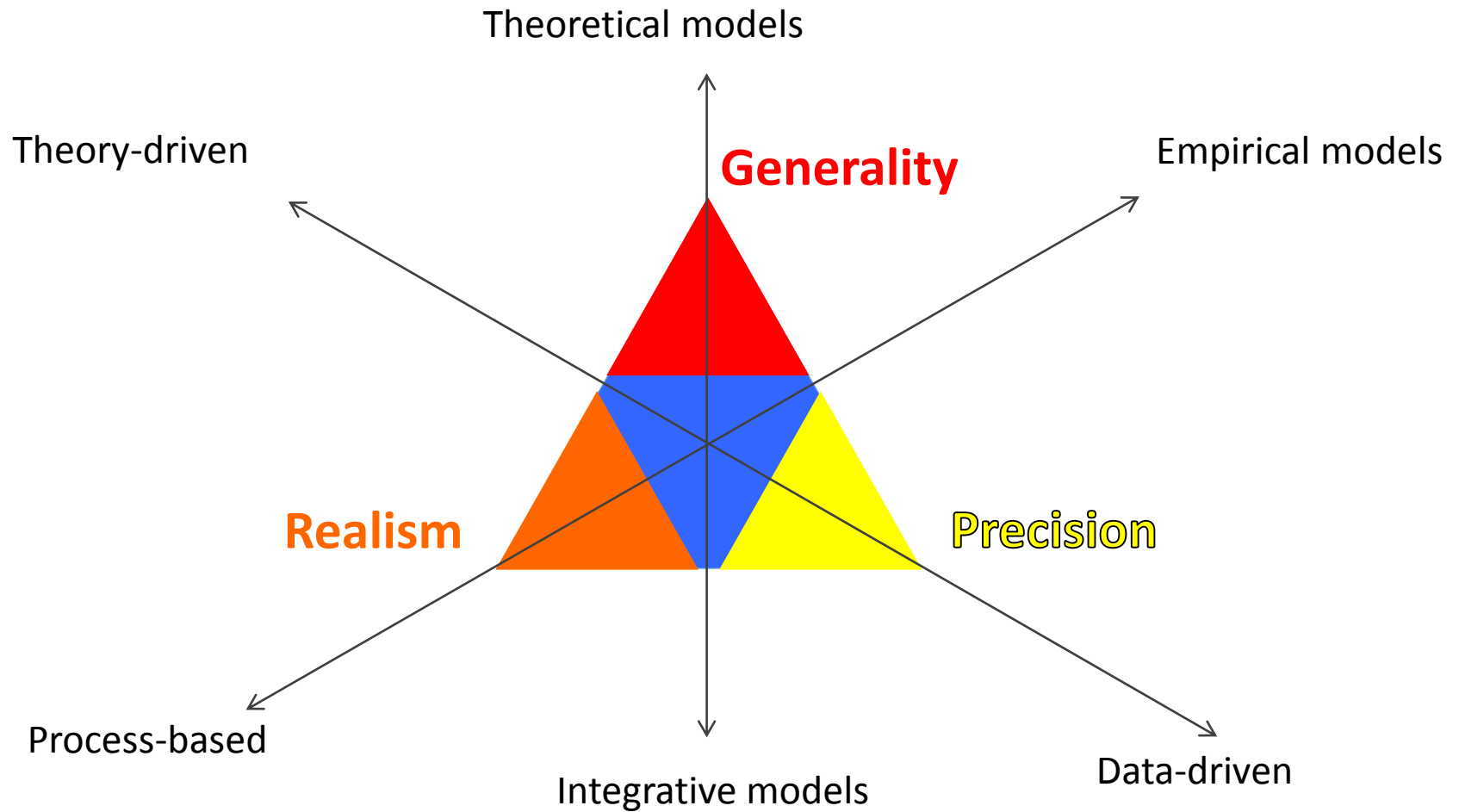


Reprinted from AMERICAN SCIENTIST, Vol. 54, No. 4, December 1966  
**THE STRATEGY OF MODEL BUILDING IN  
POPULATION BIOLOGY**

By RICHARD LEVINS

- **The question:** the importance of demography in population genetics
- for Levins **Illusion "brute force approach"**  
No model can reconcile the three properties

# Model classification



# Réflexions épistémiques et perspectives

Modèles empiriques

Modèles théoriques

Modèles de simulation

Proximité aux faits



Proximité

question/intention

Inductif

Médiation

Hypothetico-deductif

**Expérimentation:** Pour mieux confronter l'espace des concepts au monde, on **déforme** le monde en créant une expérience qui permet **d'éliminer certaines interactions** pour mieux tester des interactions majeures attendues

**Place de l'intentionnalité et la pluralité des modèles n'est pas une faiblesse mais une force, pluralité des modèles est absolument nécessaire !**

## Réponse et adaptation des communautés forestières au CC

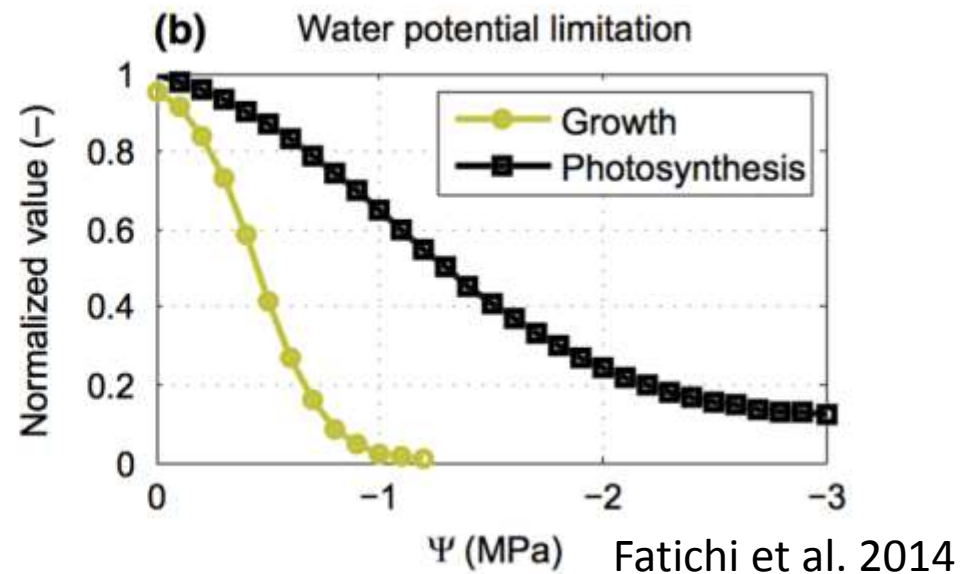
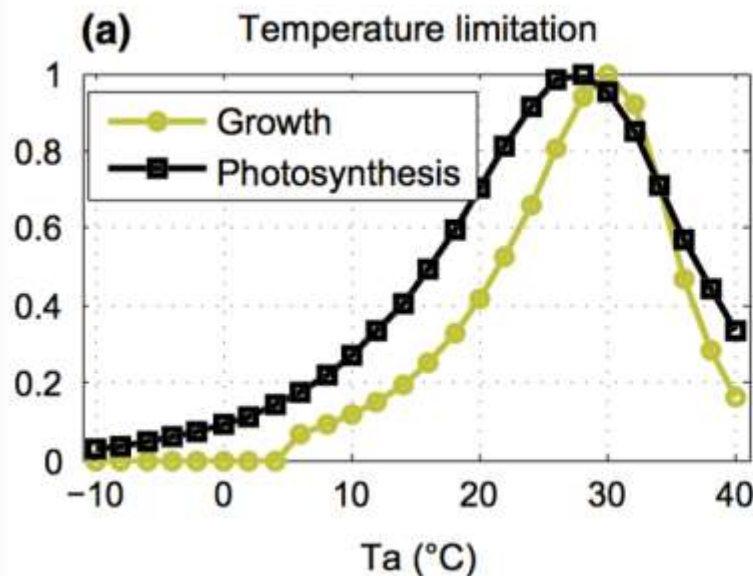
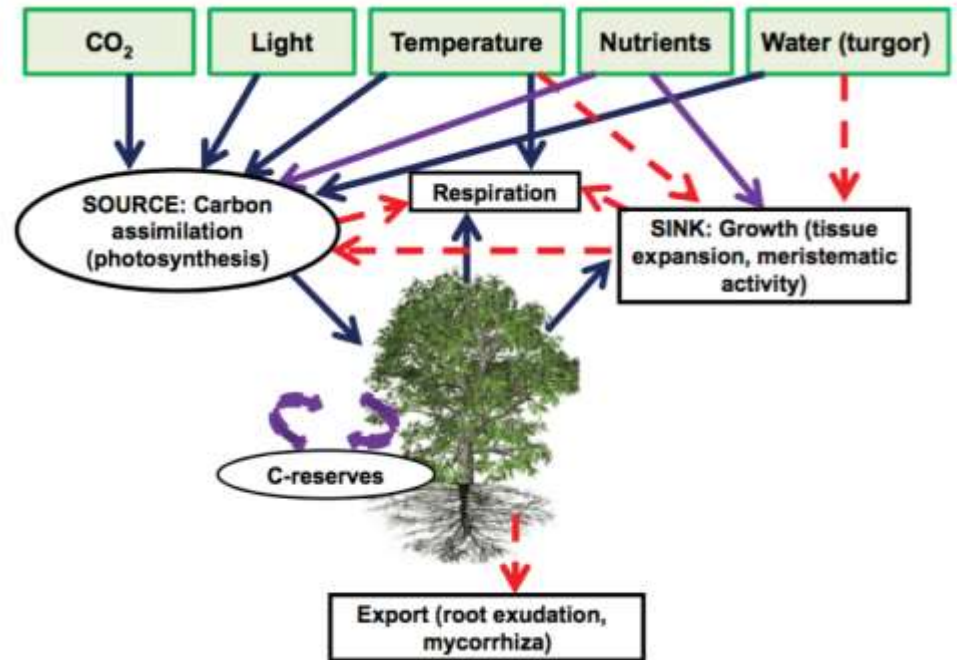
1. **Phénologie & Croissance:** Dormance, Phénologie de la croissance, cycle N, allocation aux racines, liens avec les modèles architecturaux
2. **Mortalité:** architecture hydraulique & étude des syndromes de traits conférant la résistance au stress hydrique
3. **Reproduction:** Allocation du carbone à la reproduction (sujet de thèse déposé)
4. **Physio-Démo-génétique:** Application de PDG pluri-sites- sur plusieurs questions => effet des  $\Delta$  locales de RU

## Développer des outils d'aide à la décision

1. Développer des indicateurs du CC (en lien avec le projet de portail)
2. Développer une version de CASTANEA et de PDG à destination des gestionnaires => prise en compte des itinéraire sylvicoles
3. Construire des BDD permettant de mieux qualifier l'autécologie des espèces et  $\Delta$  intraspécifique
4. Qualification des usages de la forêts et lien avec le monde économique

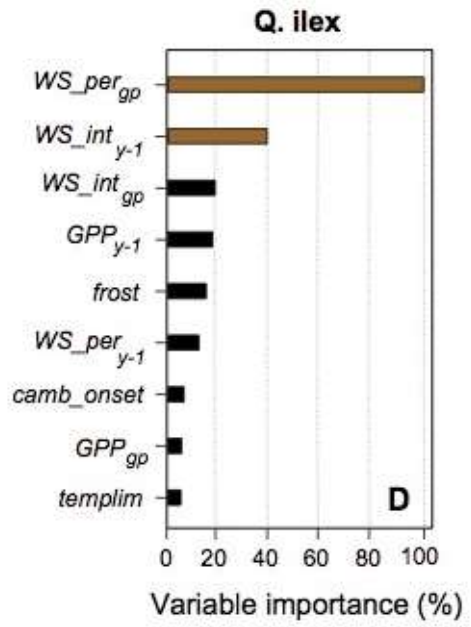
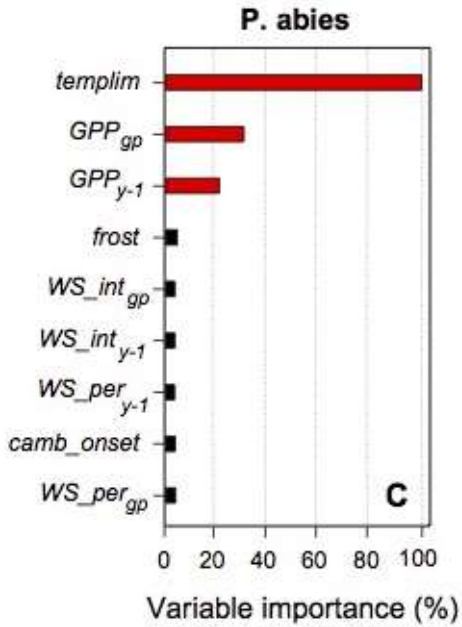
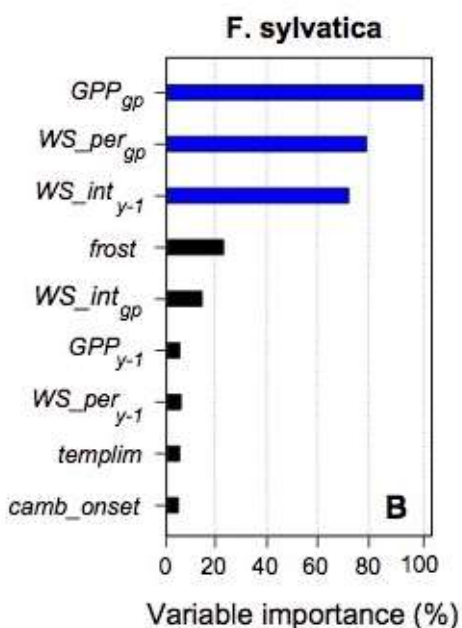
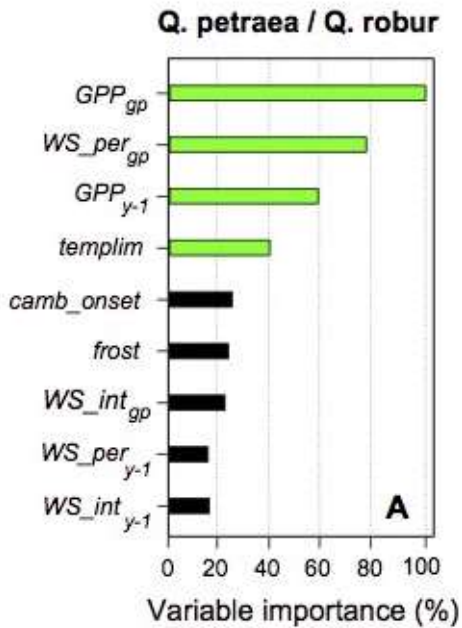
# Le fonctionnement des puits

Modèle d'allocation tenant compte des réponses des puits aux variations climatiques



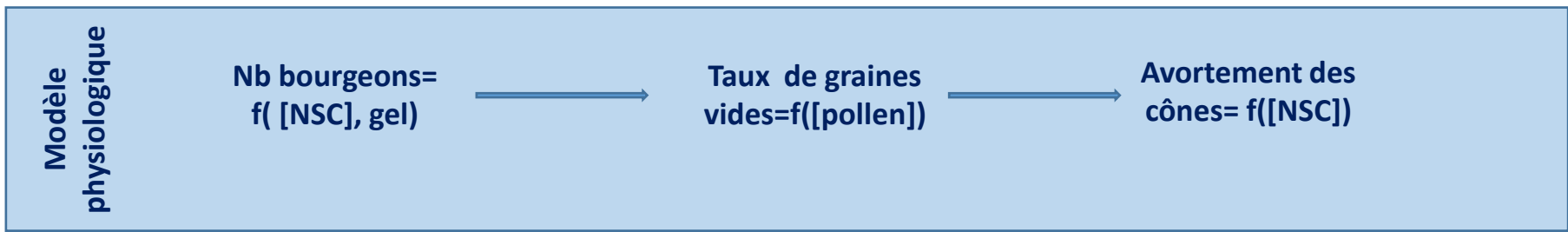
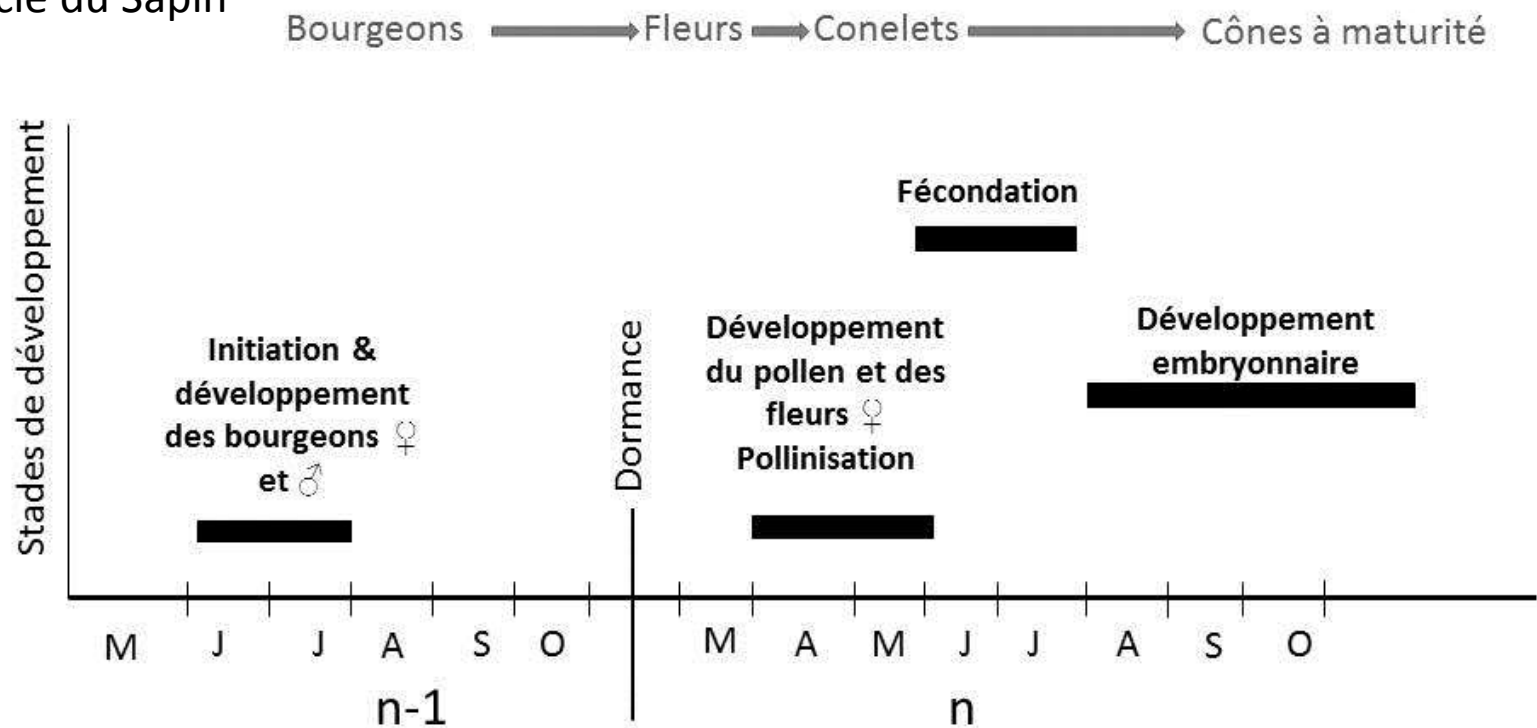
# Le fonctionnement des puits

Guillemot et al., 2015



# La modélisation de la reproduction

## Cycle du Sapin





# La modélisation de la reproduction

1. Données de production de pollen  
=> données RNSA + piégeage
2. Phénologie de la reproduction =>  
données GDR phénologie + suivi  
caméra

## Phénologie d'*Abies alba*, débourrement, floraison et fructification



Début de la période de réceptivité

macro 06 fleurs femelles 2015-05-02 (09H00) M

macro 06 fleurs femelles 2015-05-06 (13H00) M

macro 06 fleurs femelles 2015-05-10 (09H00) M

macro 06 fleurs femelles 2015-05-13 (04H00) M



Fin de la période de réceptivité

macro 06 fleurs femelles 2015-05-15 (04H00) M

macro 06 fleurs femelles 2015-05-20 (04H00) M

macro 06 fleurs femelles 2015-05-05 (11H00) M

macro 06 fleurs femelles 2015-05-12 (09H00) M



macro 06 fleurs femelles 2015-06-03 (19H00) M

macro 06 fleurs femelles 2015-06-29 (15H00) M

macro 06 fleurs femelles 2015-06-10 (17H00) M

macro 06 fleurs femelles 2015-06-10 (09H00) M



macro 06 fleurs femelles 2014-10-12 M

macro 06 fleurs femelles 2014-10-15 (17H00) M

macro 06 fleurs femelles 2014-10-20 (09H00) M

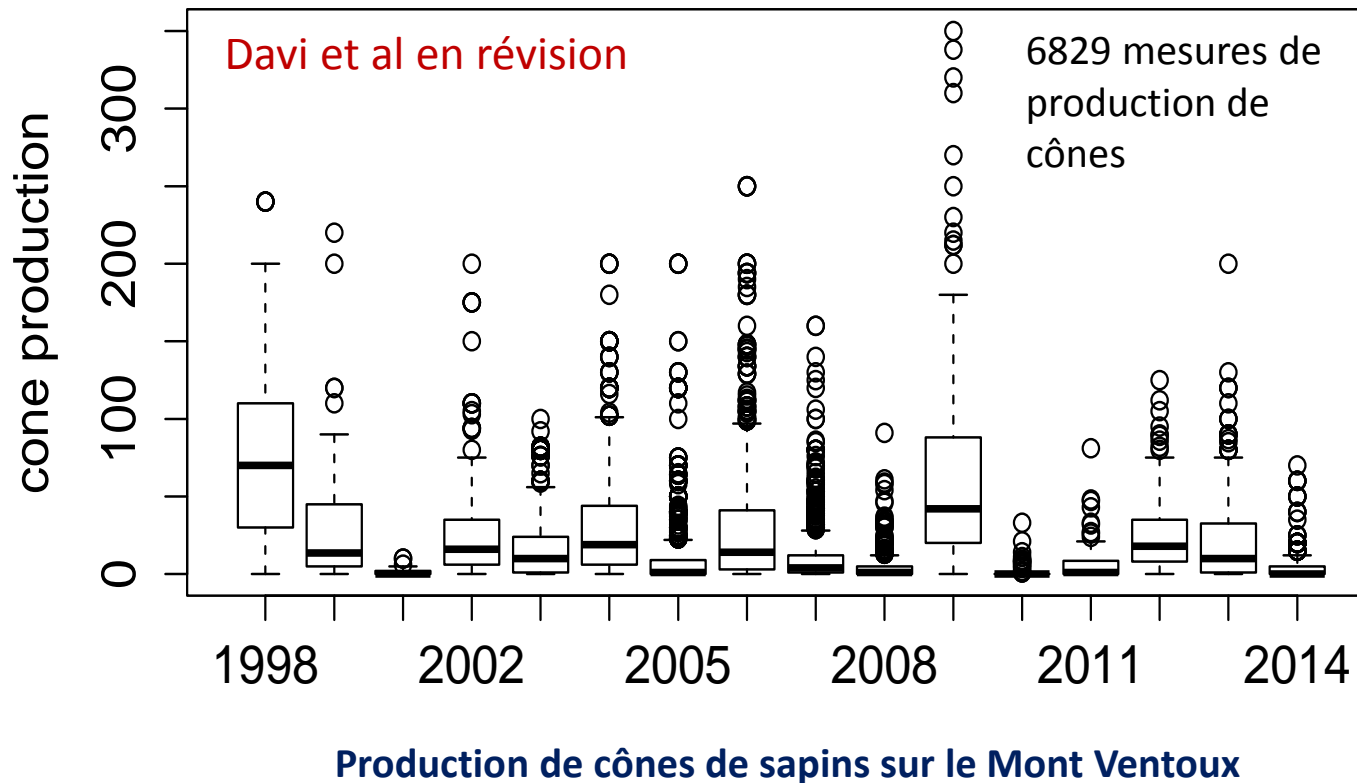
macro 06 fleurs femelles 2014-11-04 (11H00) M



# La modélisation de la reproduction

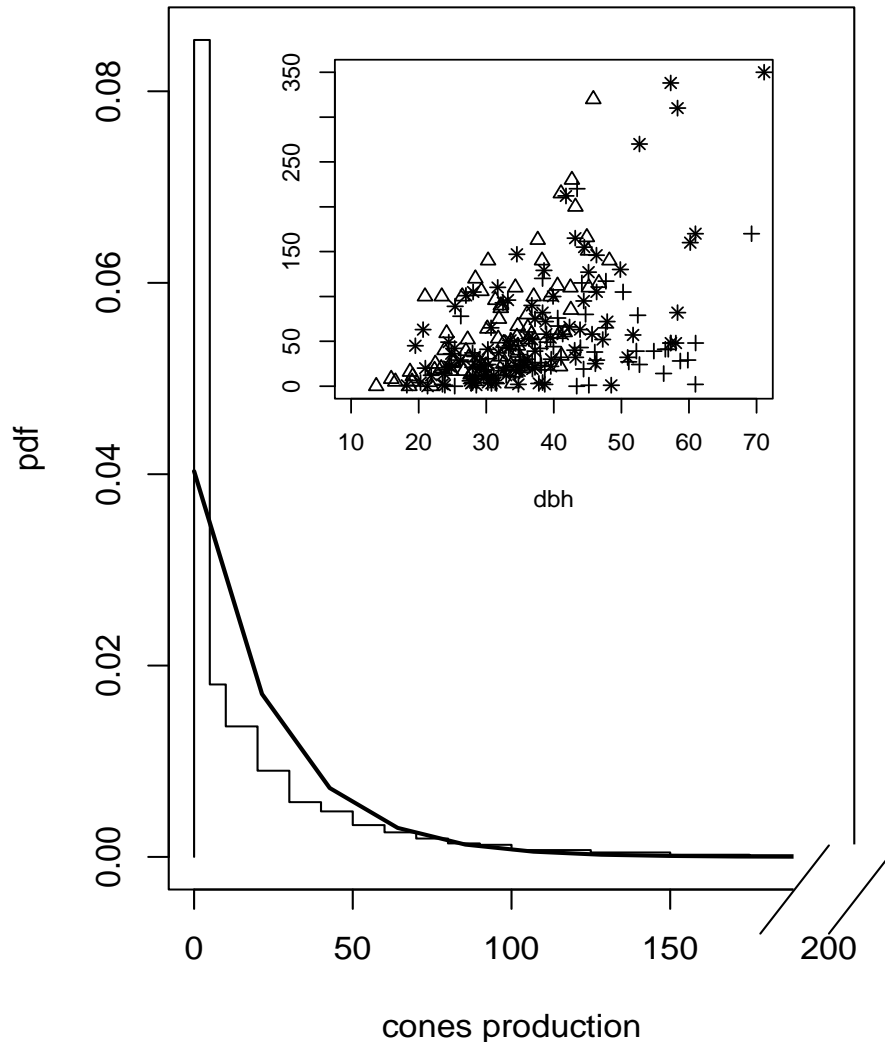
**Masting = synchronisation dans le temps et dans l'espace de la fructification**

1. Causes fonctionnelles: baisse des réserves
2. Stratégies d'évitement des prédateurs



# La modélisation de la reproduction

*Davi al., 2017*



1. Effet positif de la taille (44%)
2. Effet négatif de la croissance passée (11%)
3. Effet site (12%)
4. Effet non linéaire de l'altitude
5. Effet non linéaire de la défoliation



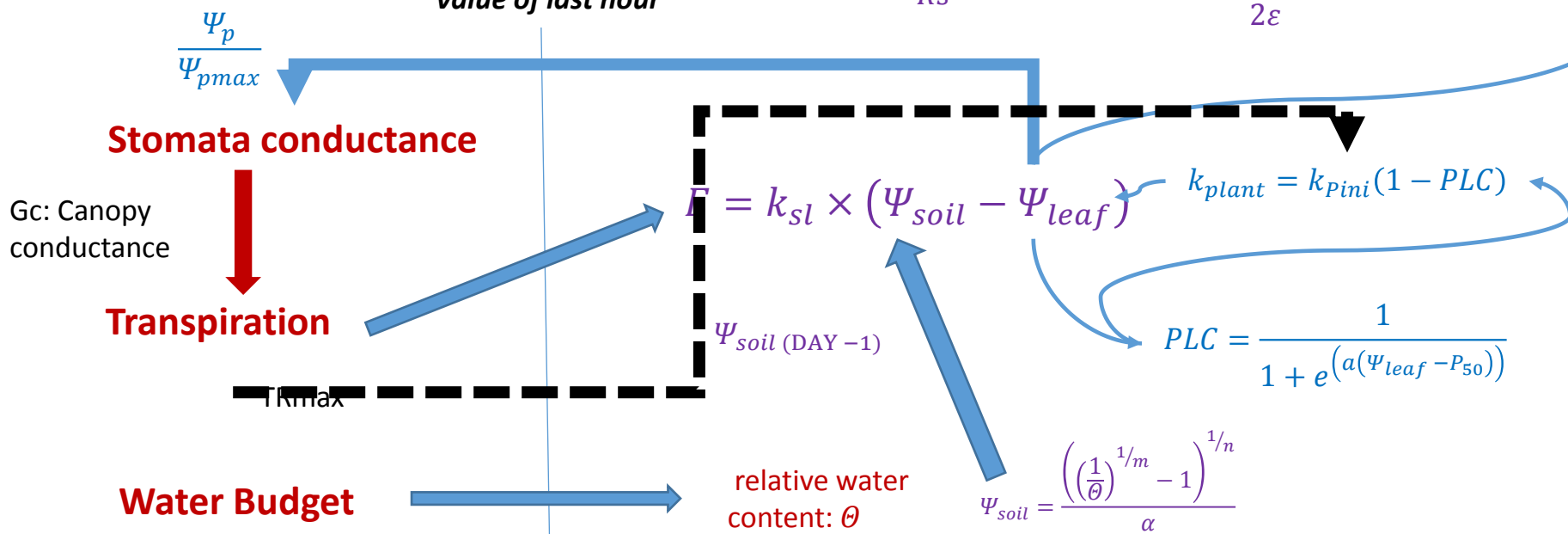
**Variations de la production cônes de sapins sur le Mont Ventoux**

# Couplage avec le modèle hydraulique (version N. Martin)

Library CASTANEA

We can add a loop between photosynthesis to transpiration to find optimal value or use the value of last hour

Hydraulic model



Coupling with hydraulics model

RS = contenu en eau des feuilles, important pour le feu