

Modéliser le fonctionnement et l'évolution des écosystèmes forestiers

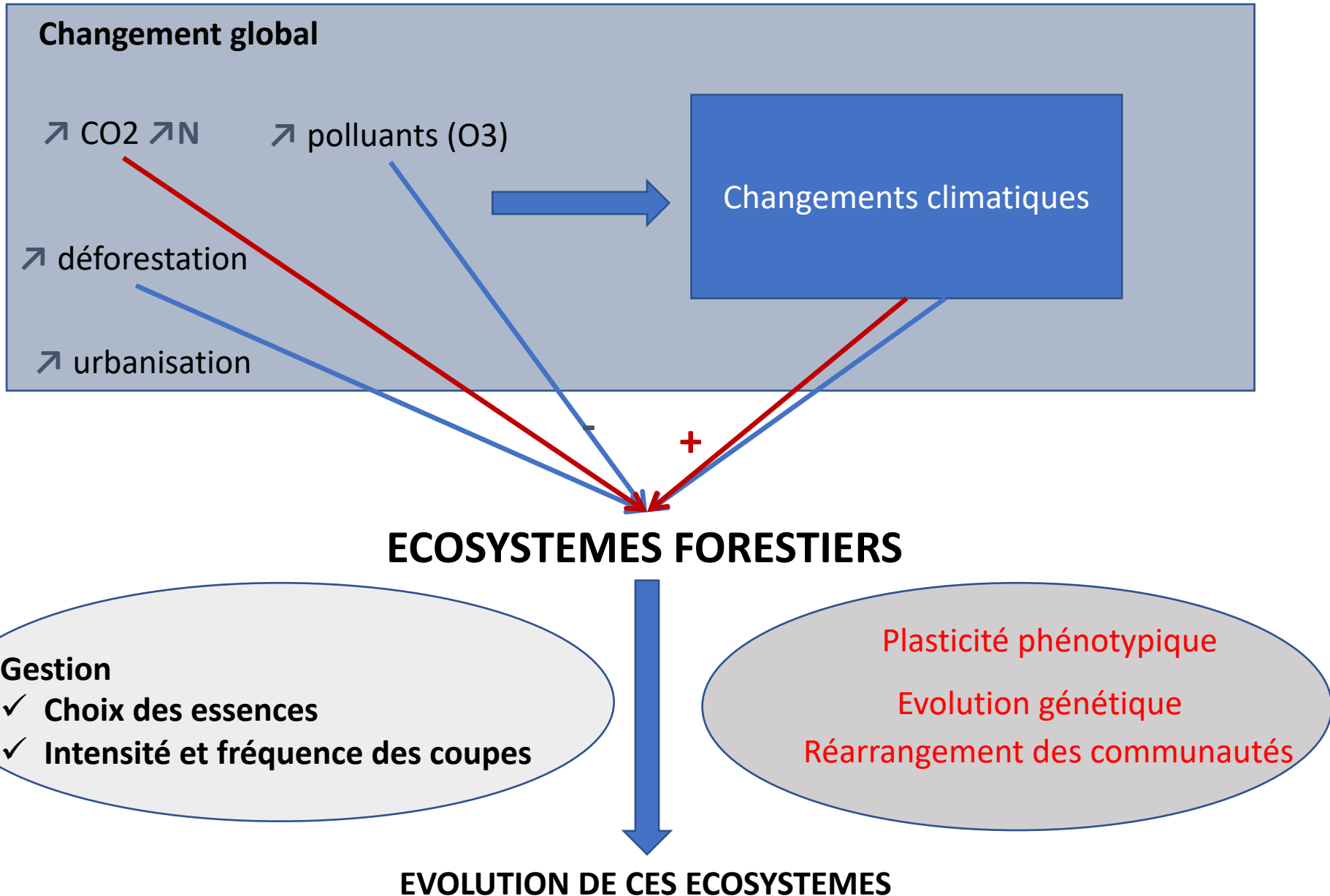


H. Davi Directeur de Recherche
INRA, Ecologie des Forêts Méditerranéennes

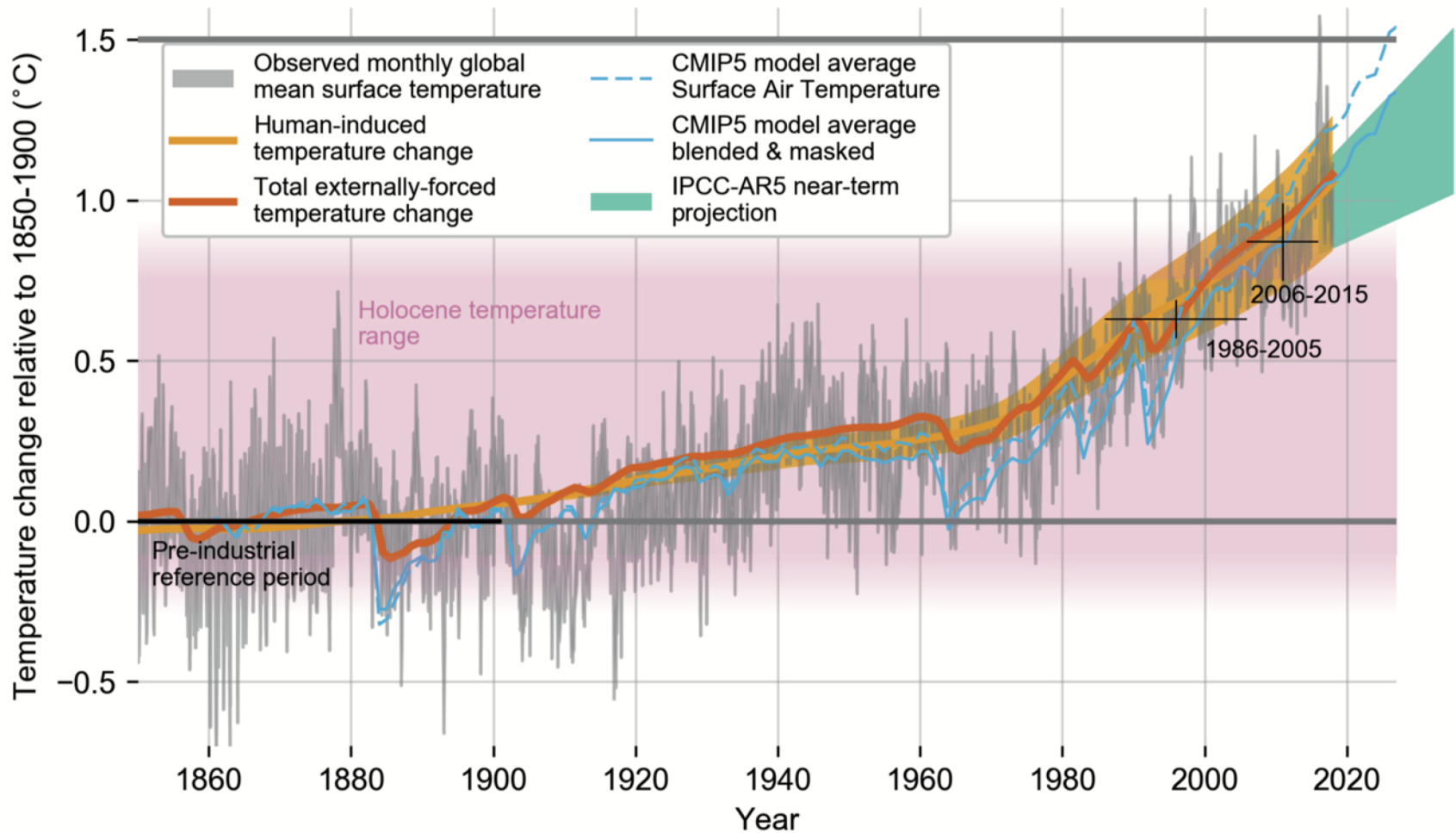
Plan

1. Impact des changements globaux sur les forêts
2. Introduction à la modélisation
3. Modéliser le fonctionnement des forêts (CASTANEA)
4. Modéliser l'adaptation des forêts (PDG)

Impact des changements globaux sur les forêts



Impact des changements globaux sur les forêts

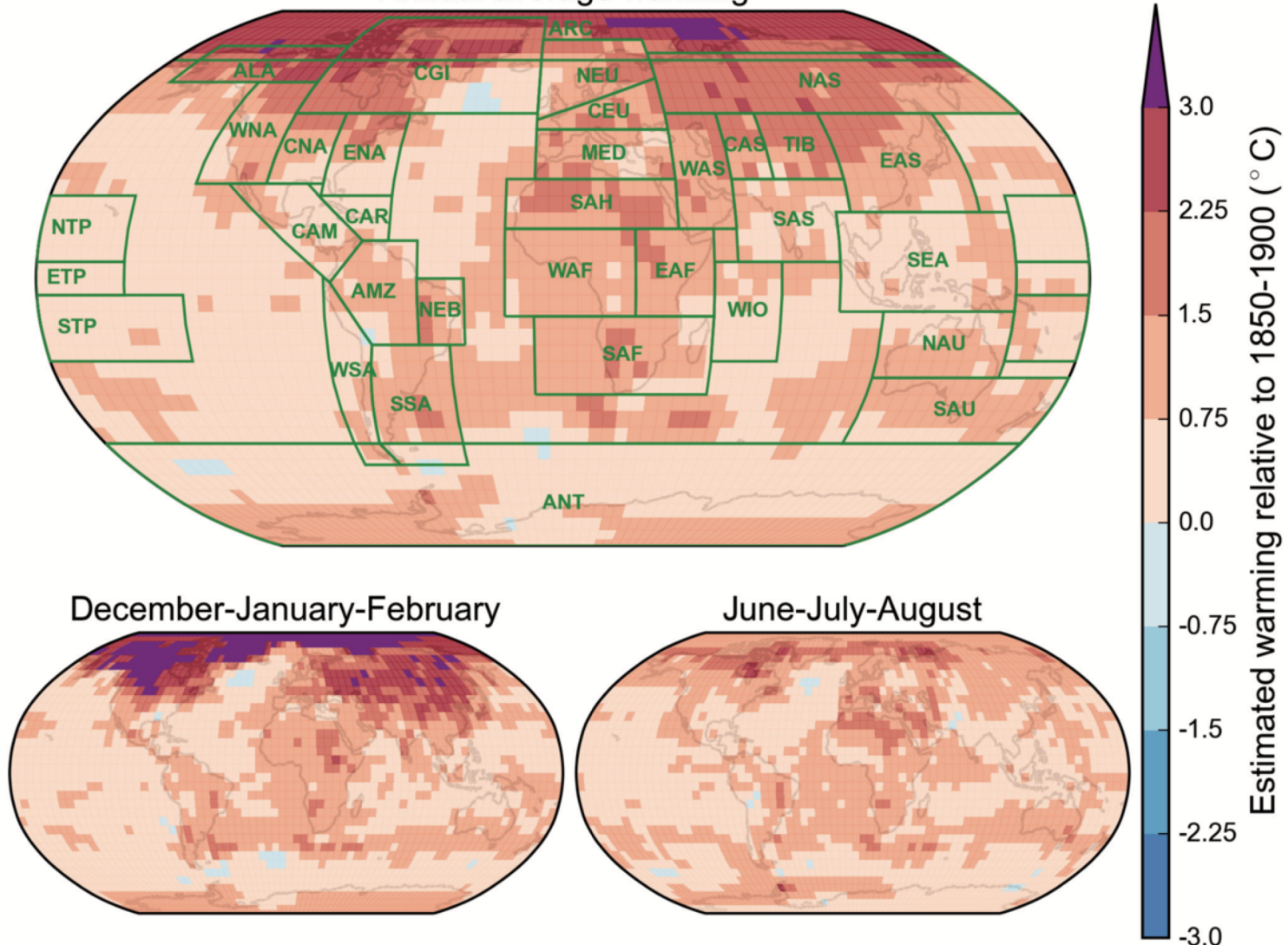


Variations temporelle forte et dynamique non linéaires dans le temps

Impact des changements globaux sur les forêts

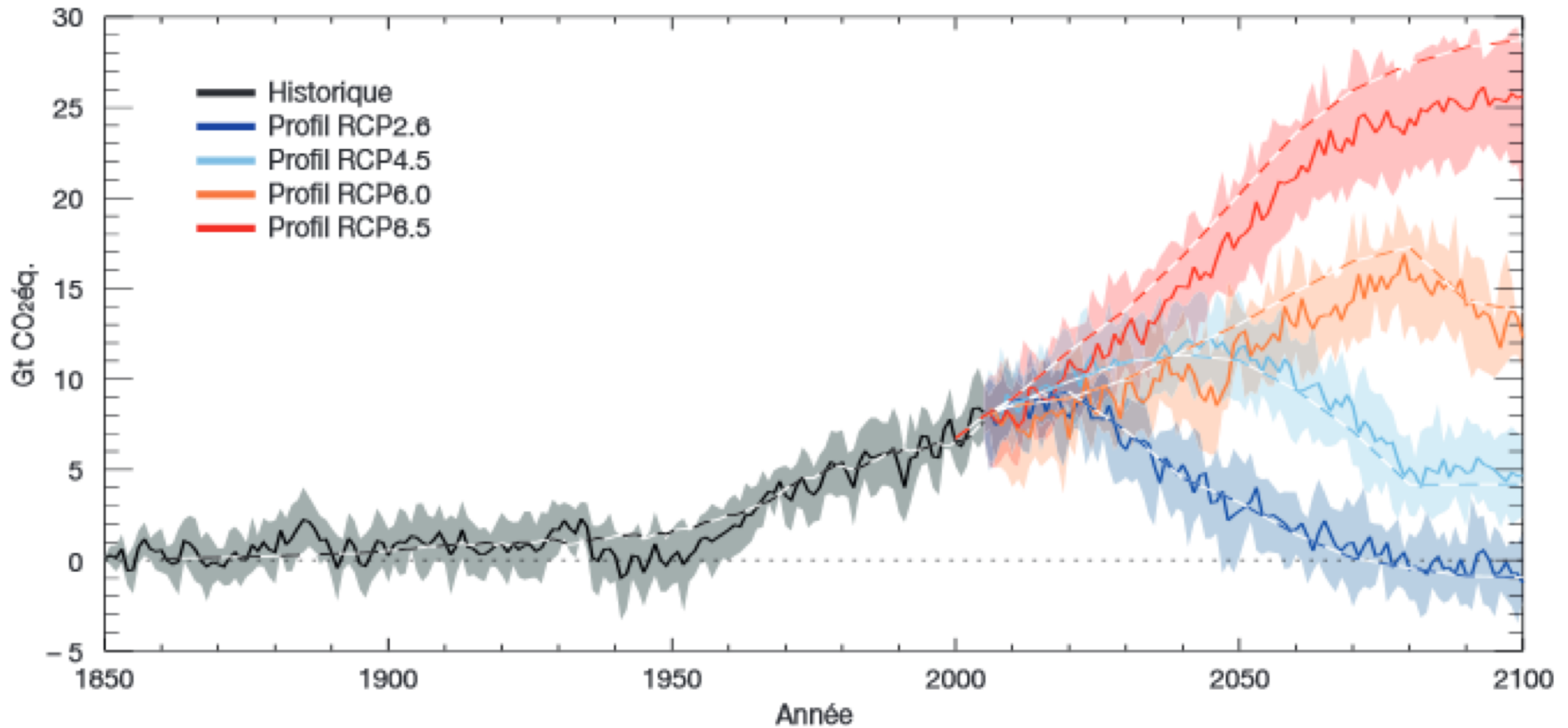
Regional warming in the decade 2006-2015 relative to preindustrial

Annual average warming



Impact des changements globaux sur les forêts

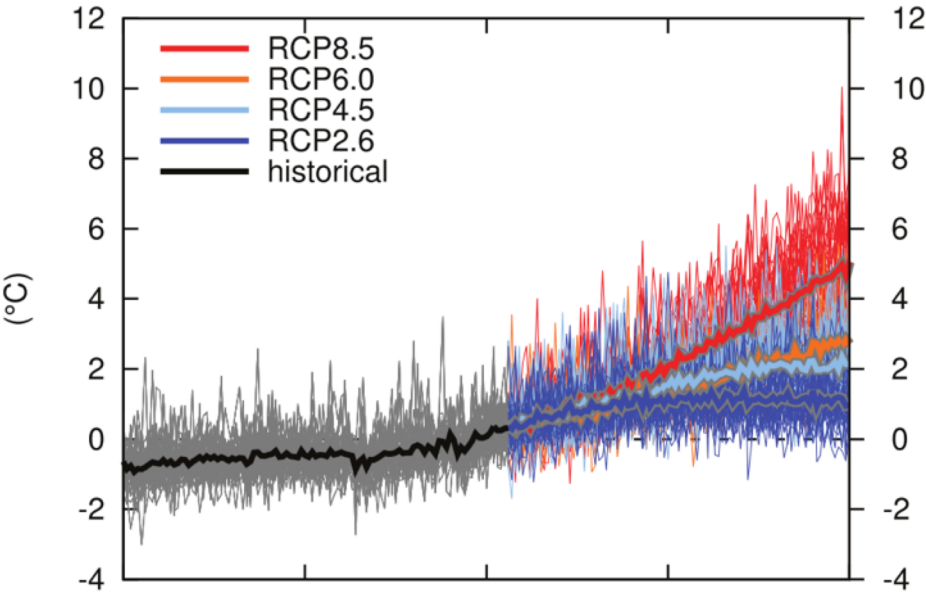
Projection des émissions liées aux énergies fossiles suivant les quatre profils d'évolution de GES (RCP) du Giec



Source : Giec, 1^{er} groupe de travail, 2013

Impact des changements globaux sur les forêts

Temperature change Amazon December-February

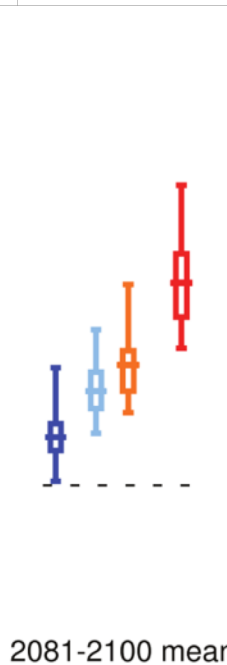
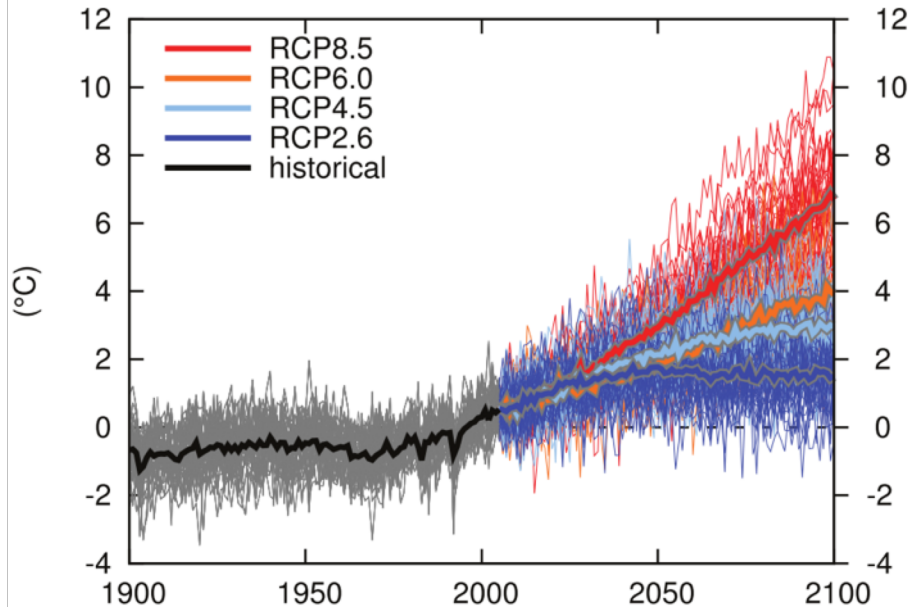


≈ Précipitations stable en Amazonie

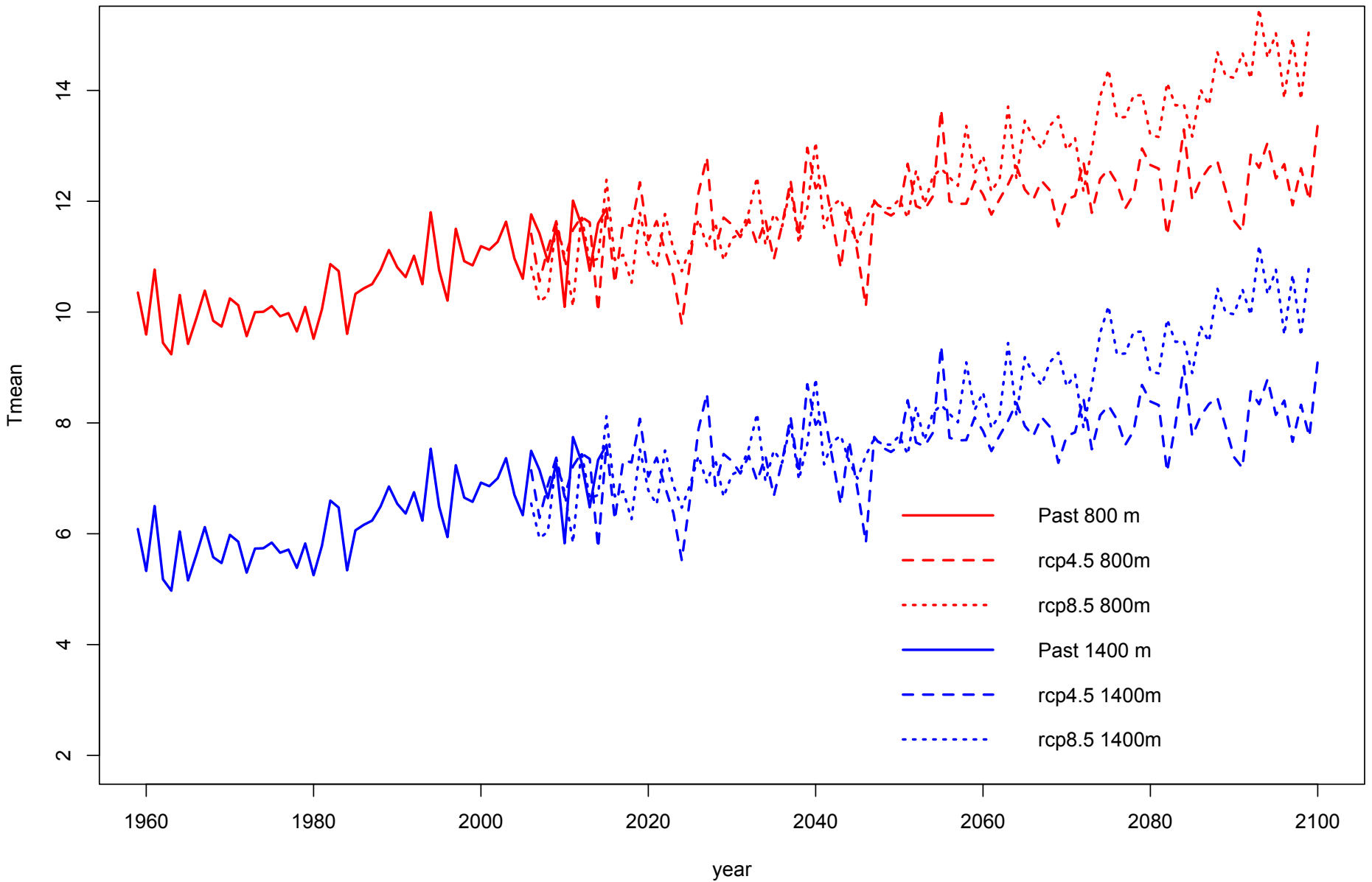
↘ Précipitations estivales Europe du Nord
≈ Précipitations hivernale Europe du Nord

↘ Précipitations estivales Europe du Sud
↘ Précipitations hivernales Europe du Sud

Temperature change South Europe/Mediterranean June-August



Impact des changements globaux sur les forêts



Impact des changements globaux sur les forêts

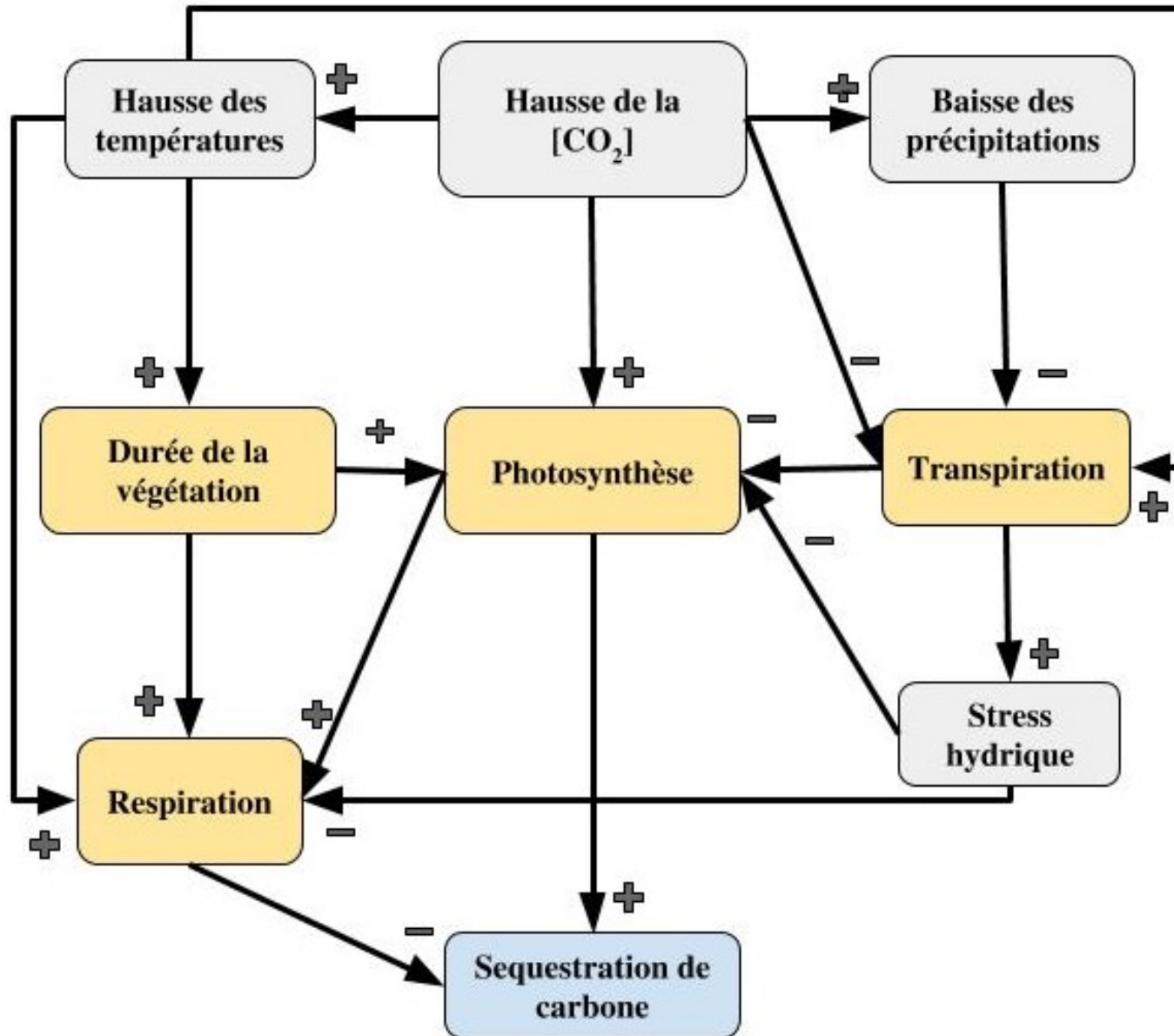
Services « écosystémiques »

- Bois énergie, bois d'œuvre, bois industrie
- Tourisme
- Biodiversité
- Erosion des sols
- Recharge des nappes

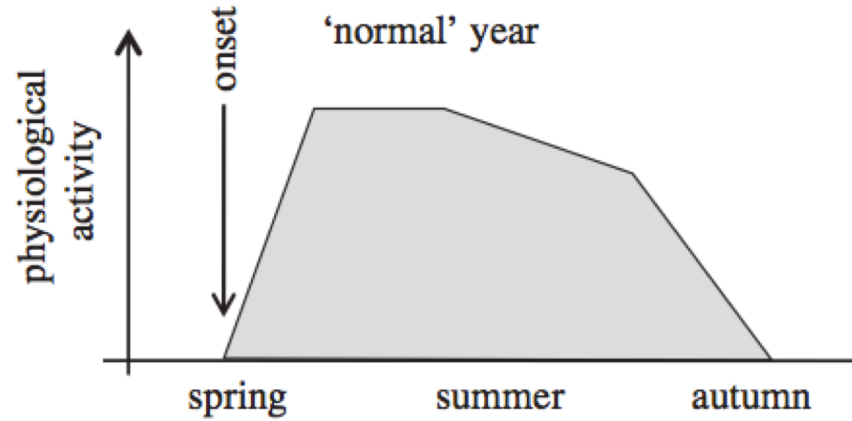


Causes	Impacts	
Sécheresse	Perte de productivité	Mortalité
Attaques biotiques	Perte de productivité	Mortalité
Feux	Mortalité	Risques humains
Tempêtes	Mortalité	Risques humains
Inondations	Mortalité	
Gelées tardives	Perte de productivité	
Neiges lourdes	Perte de productivité	

Impact des changements globaux sur les forêts



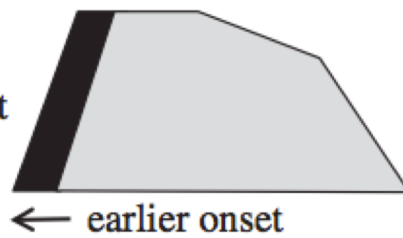
Impact des changements globaux sur les forêts



'early spring' year scenarios

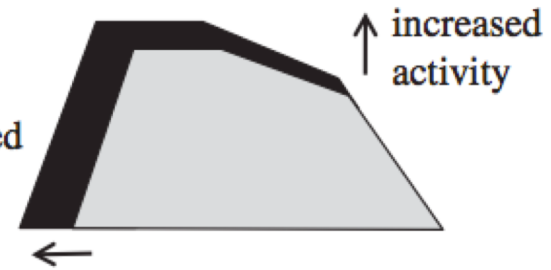
(a)

direct effect



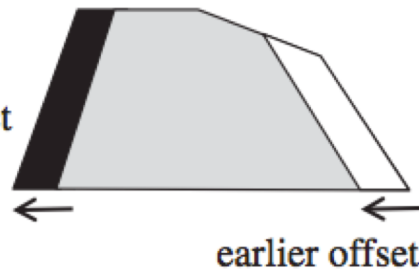
(b)

direct and positive lagged



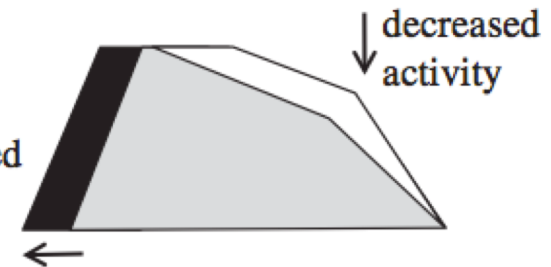
(c)

direct and negative indirect

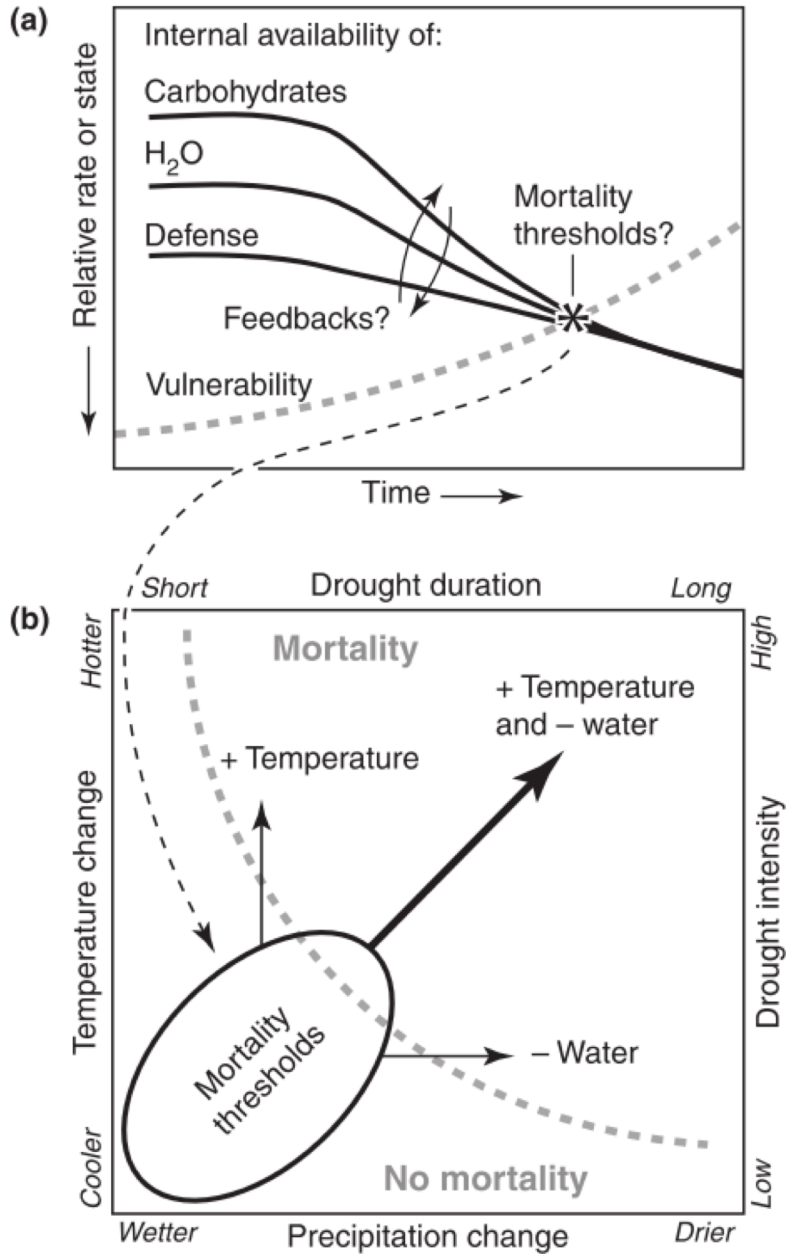


(d)

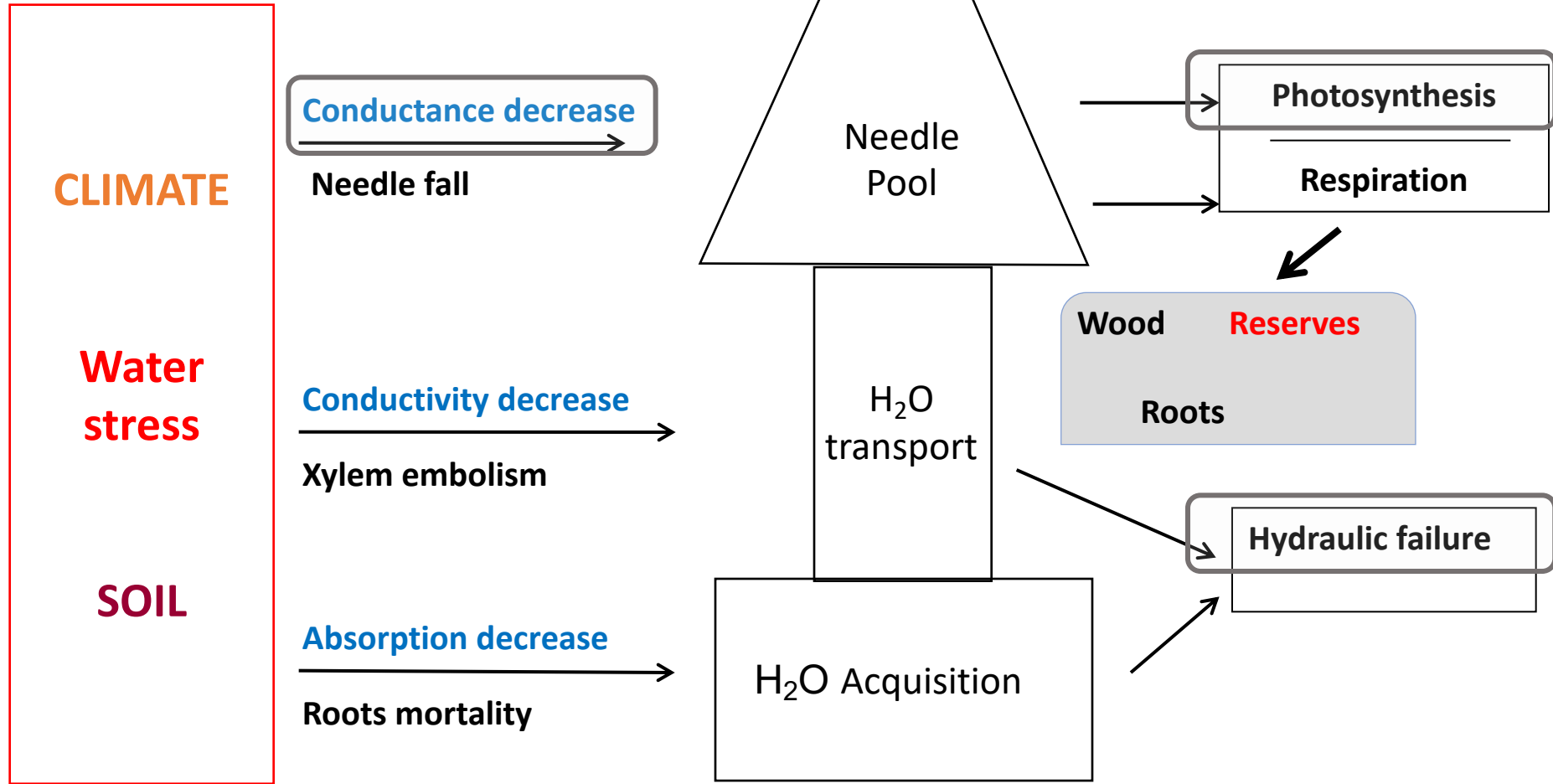
direct and negative lagged



Impact des changements globaux sur les forêts



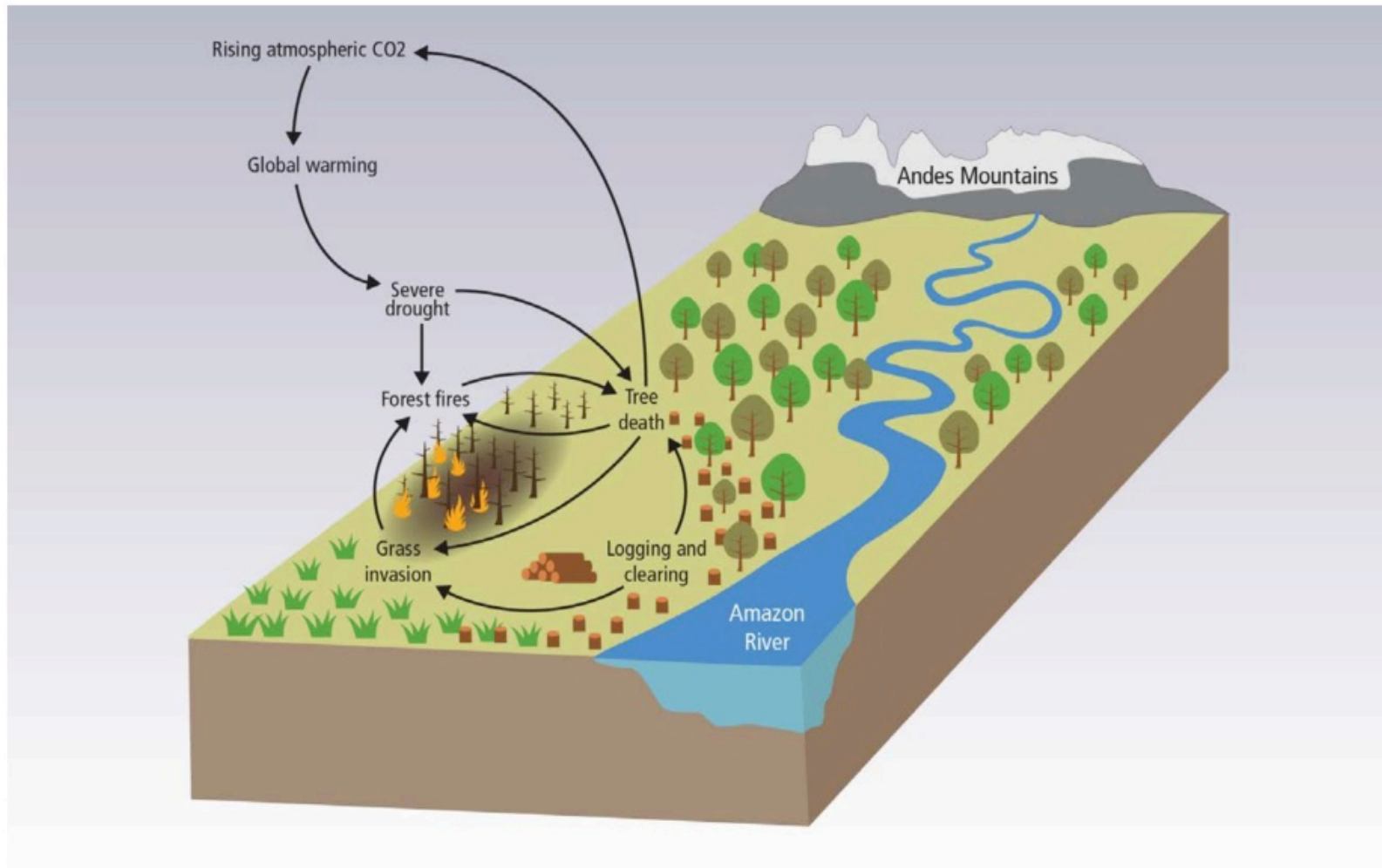
Impact des changements globaux sur les forêts



- Temporal scale of response (hour, year, decade)
- hydraulic .vs. carbon starvation

Impact des changements globaux sur les forêts

Enchaînement de risques: boucles négatives

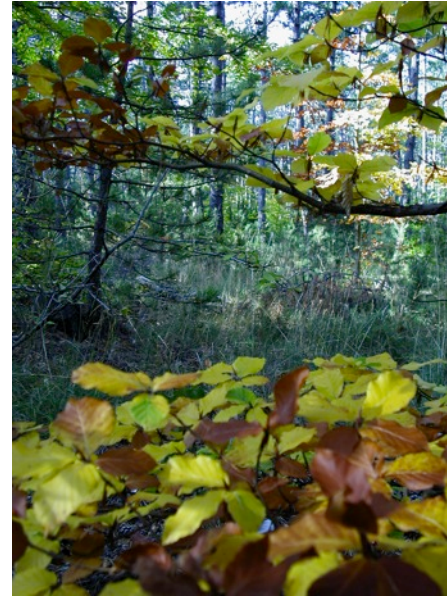


Introduction à la modélisation



Champ de recherches scientifiques

Question(s)
Spécifique(s)



Réalité



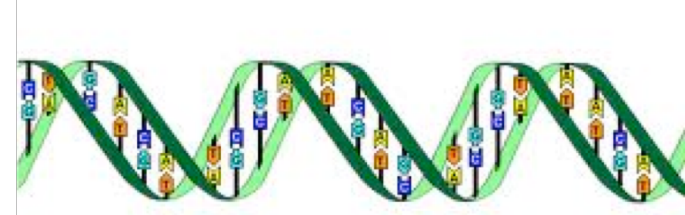
Modéliser

Construire une abstraction d'une réalité
en définissant un système

Introduction à la modélisation

Recherche fondamentale
dont les barrières
disciplinaires sautent

Données « haut débit »



Accroissement des capacités de calcul

Pression sociétale: transfert entre recherche
fondamentale et recherche appliquée:
comprendre pour prédire



Introduction à la modélisation

Les modèles de simulation permettent:

1. De connecter des champs disciplinaires variées (e.g modèles climatiques)
2. D'absorber une importante quantité de données (e.g satellite, images diverses, génomes)
3. De prédire l'évolution des systèmes et d'être des outils d'aide à la décision et à la gestion adaptative

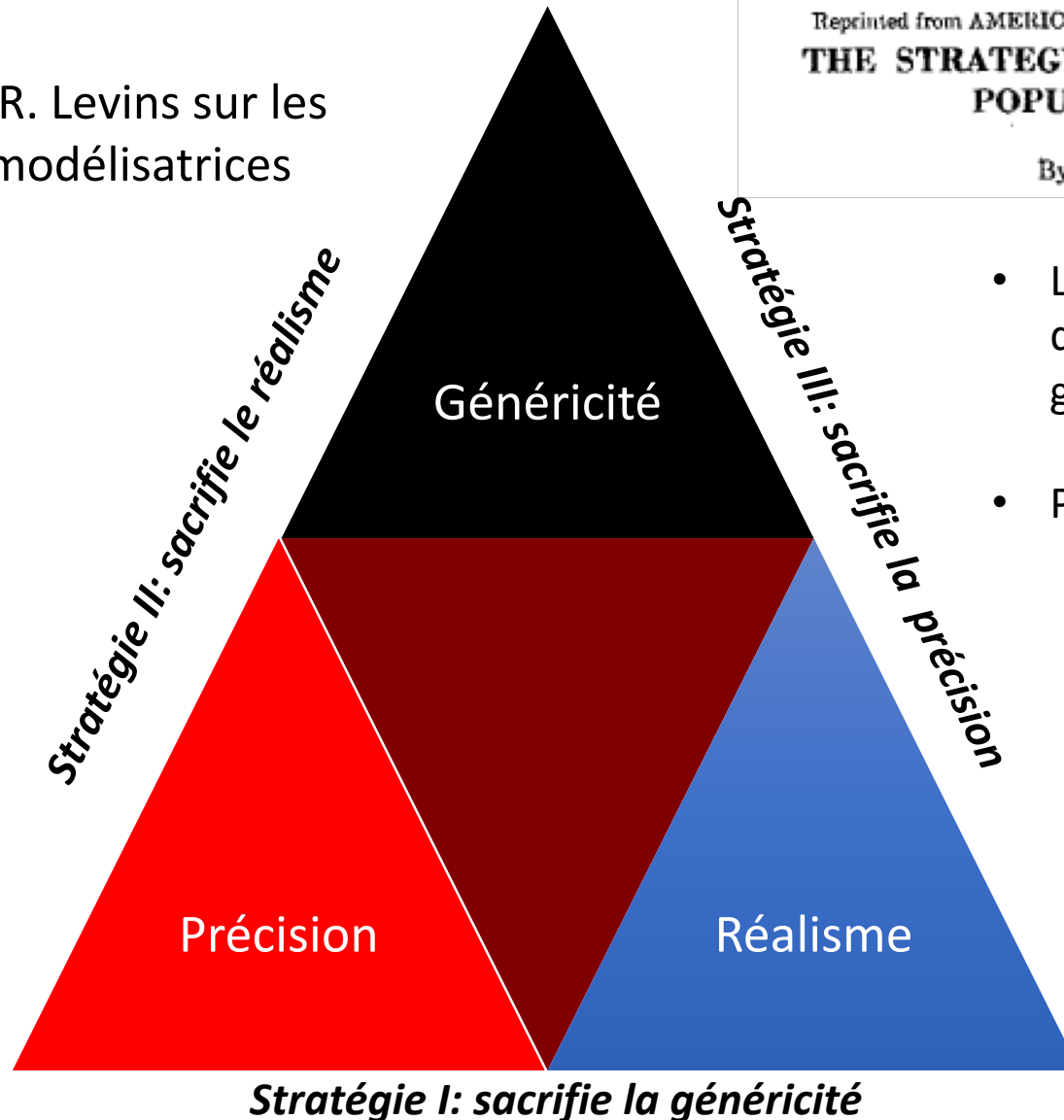


Introduction à la modélisation

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

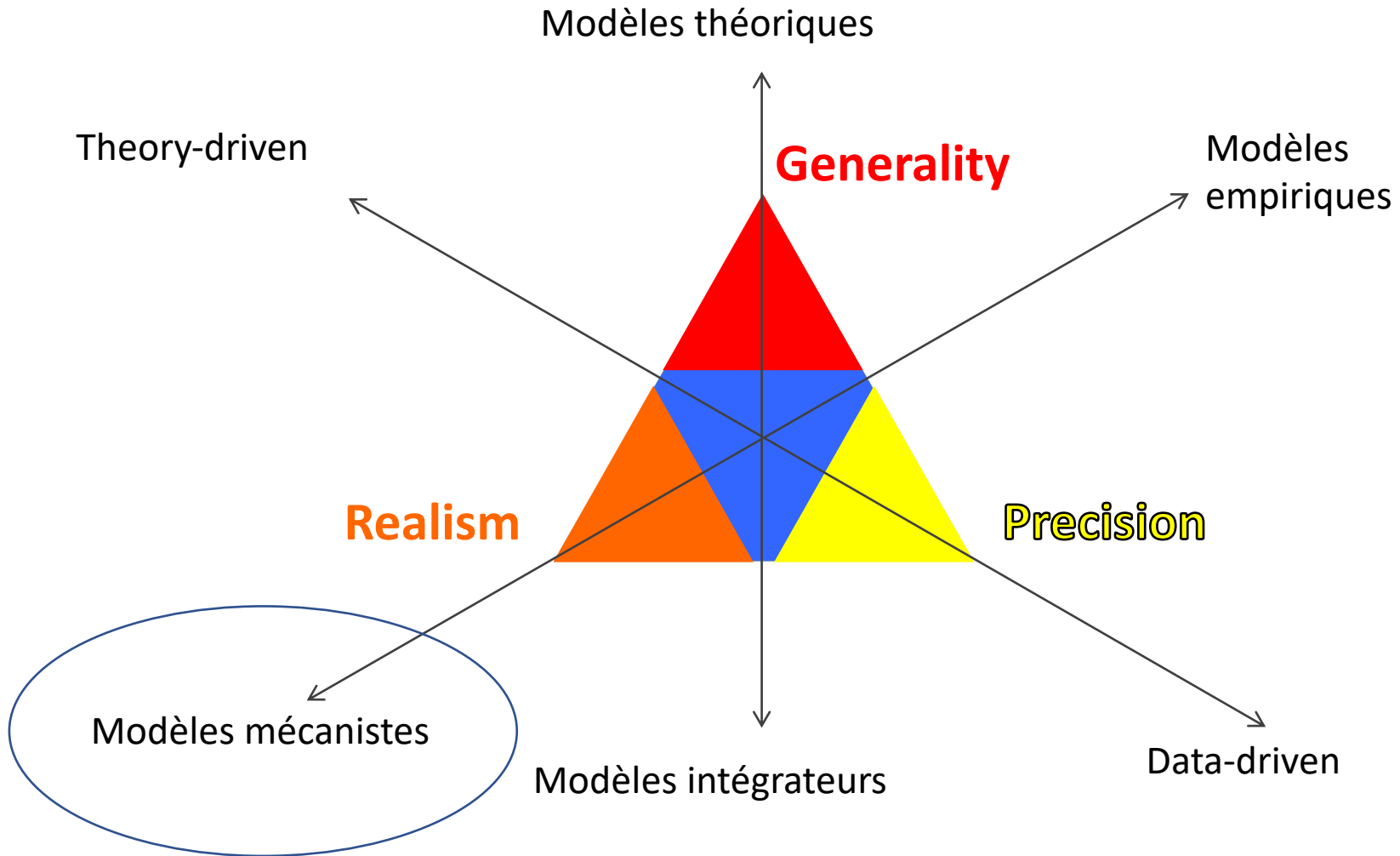
By RICHARD LEVINS

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



- La **question**: l'importance de la démographie en génétique des populations
- Pour Levins
 - Illusion de « brute force approach »
 - Aucun modèle ne peut concilier les trois propriétés

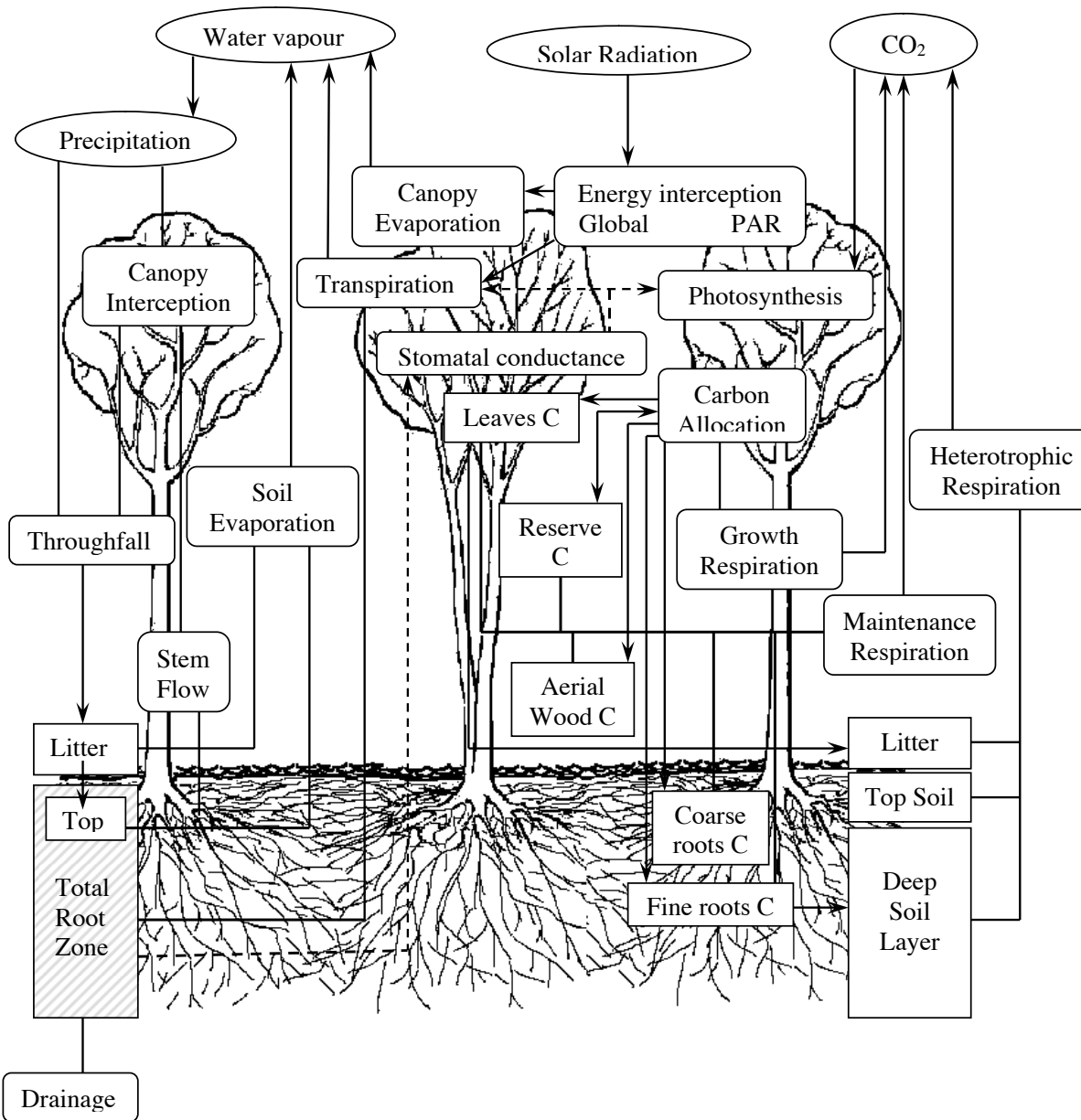
Introduction à la modélisation



Modéliser le fonctionnement des forêts

Water Balance Model

Carbon Balance Model



Canopy photosynthesis
Farquhar model coupled with Ball & Berry

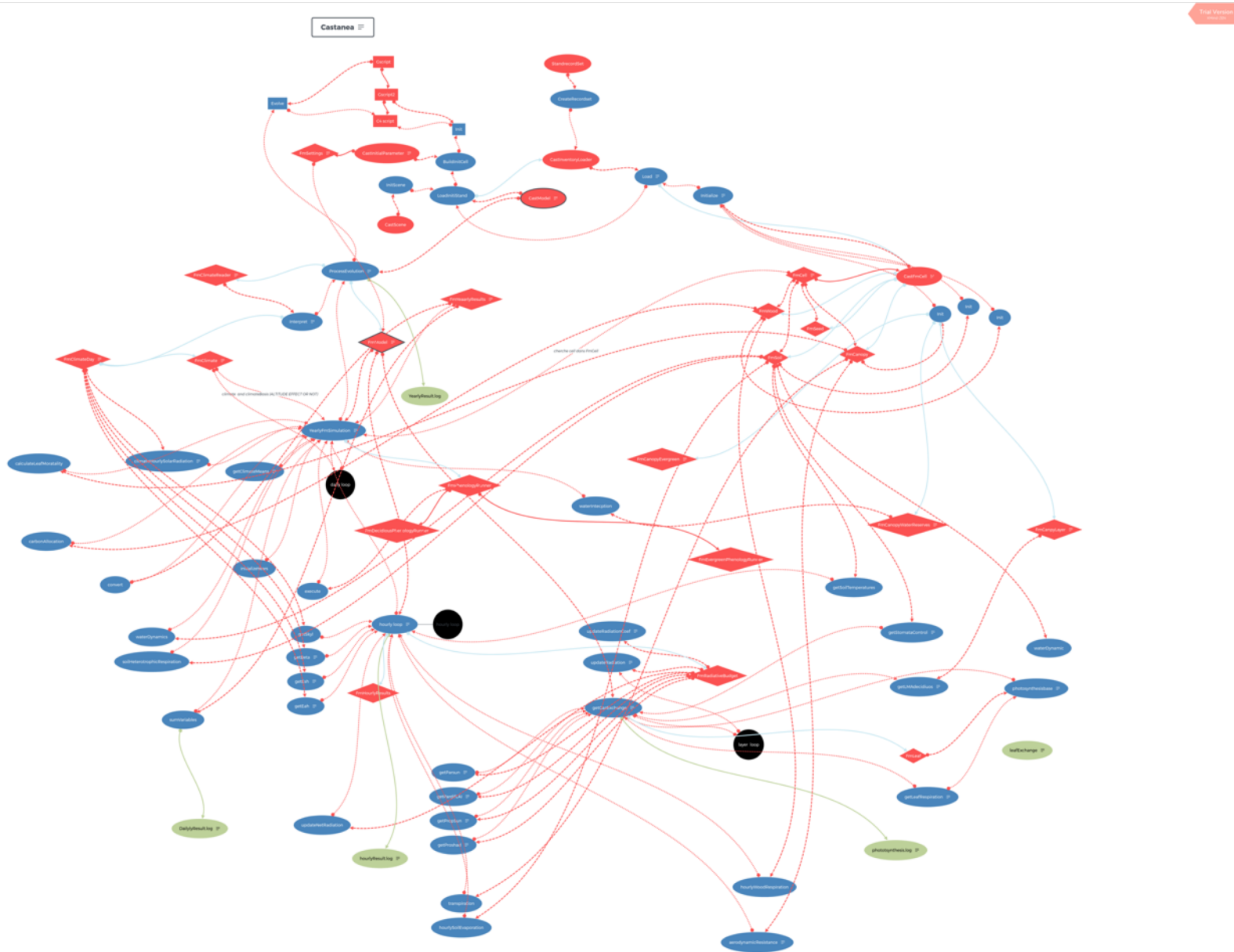
Leaves respiration
Q10, Nitrogen, Biomass

Wood respiration
Q10, Nitrogen, alive biomass

Water interception
LAI, clumping, leaves/needle reserves

Transpiration
Penman Monteith

Modéliser le fonctionnement des forêts



Modéliser le fonctionnement des forêts

Modèle arbre moyen

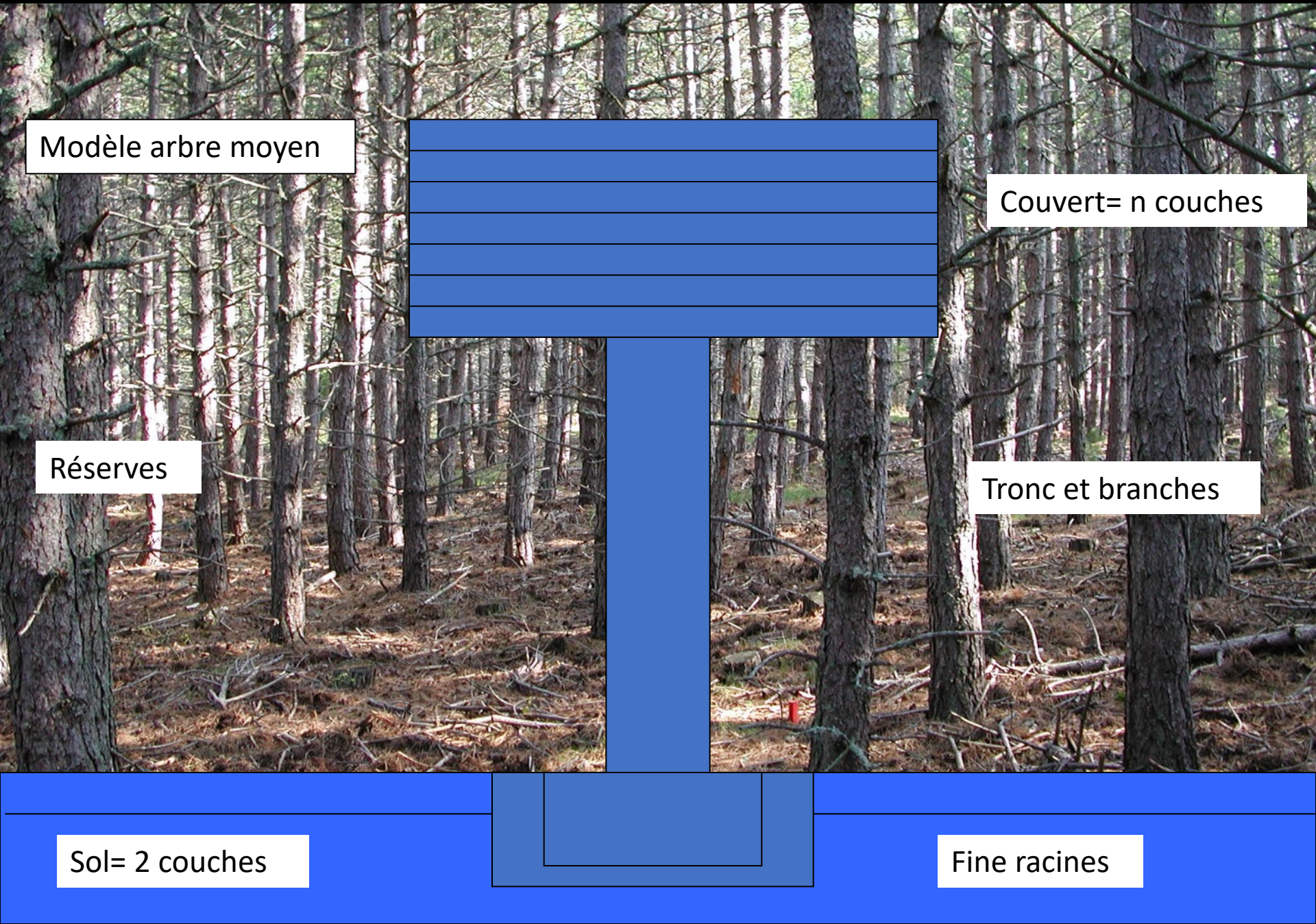
Couvert= n couches

Réserves

Tronc et branches

Sol= 2 couches

Fine racines



Modéliser le fonctionnement des forêts

Feuilles

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

Bois aérien

Biomasse (B_{bois})

Les paramètres clés de l'écosystème

Racines

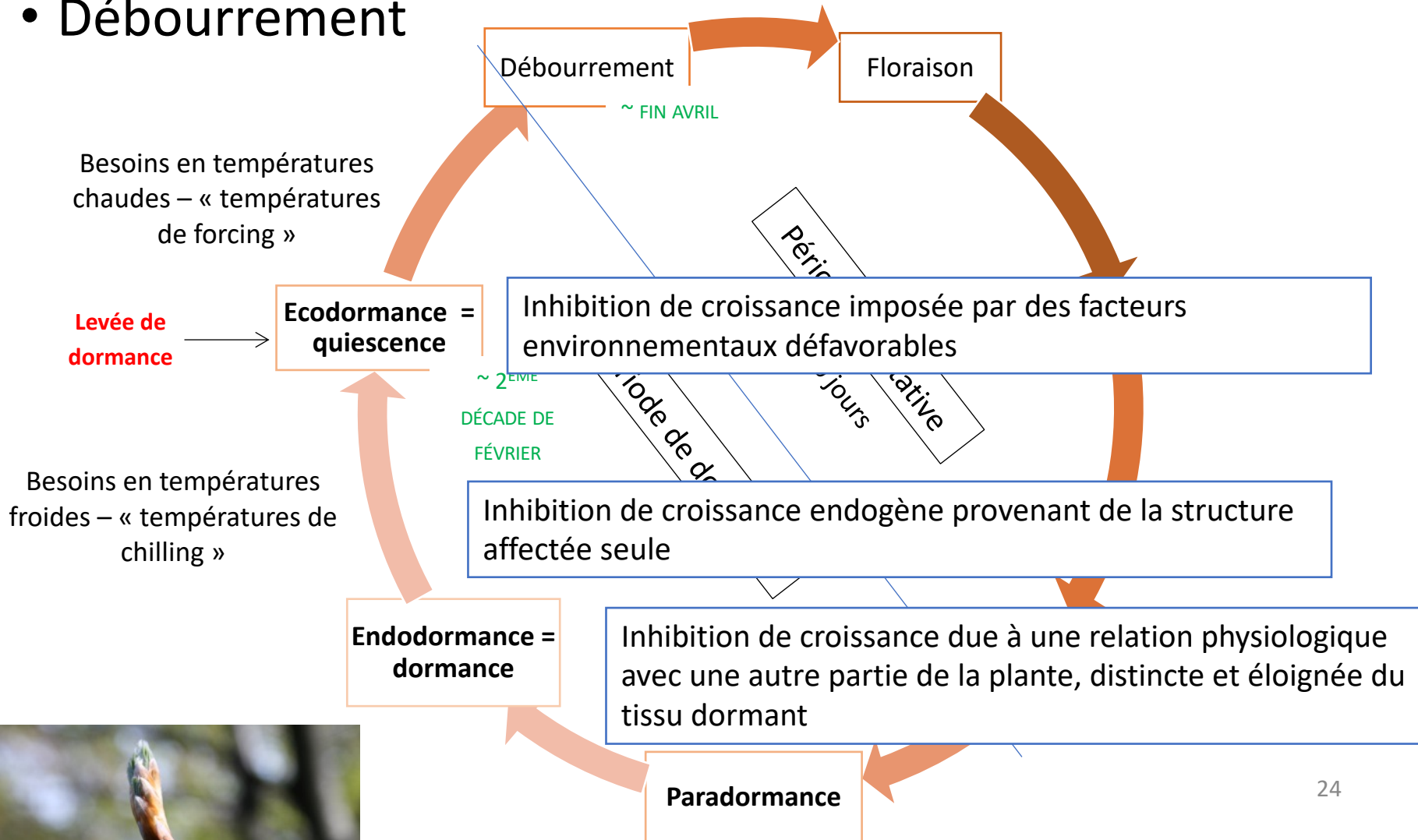
Biomasse (B_{racines})

Réserve utile en eau
(RU)

Matière organique du sol
(C_{sol})

Modéliser le fonctionnement des forêts: phénologie

• Débourrement



Modéliser le fonctionnement des forêts: phénologie

Dufrêne et al., 2005

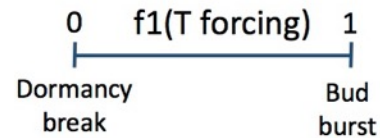
$$S_{\text{frcBB}} = \sum_{N_{\text{START1}}}^N R_{\text{frcBB}} \quad \text{if} \quad S_{\text{frcBB}} < F_{\text{critBB}}$$

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

Gäuzere & Chuine

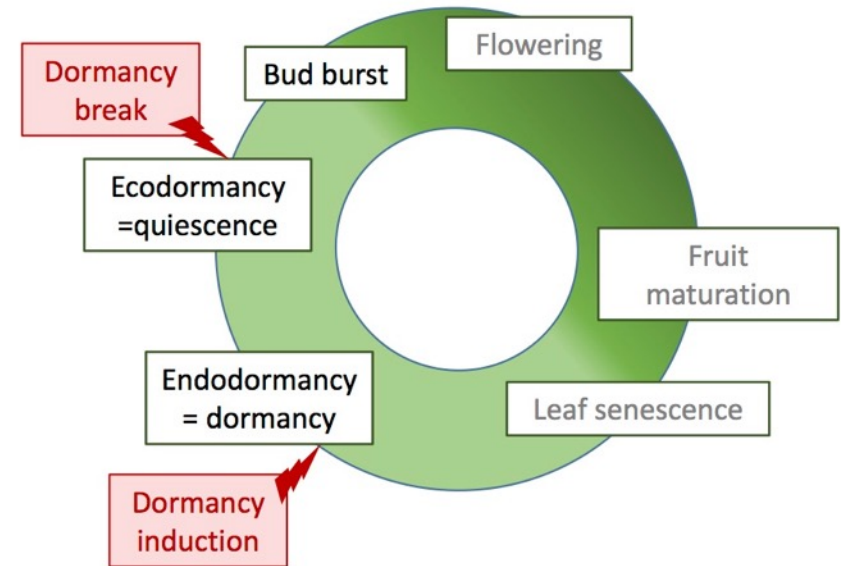
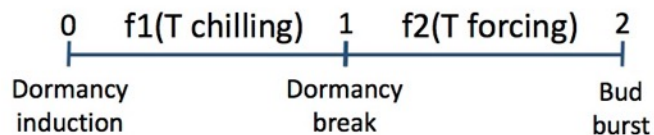
- **One-phase models** (e.g. “UniForc”)

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



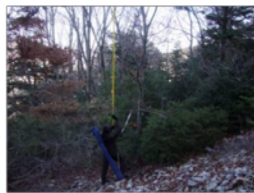
- **Two-phases models** (e.g. “UniChill”)

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



Modéliser le fonctionnement des forêts: phénologie

Comment détermine-t-on la date de levée de dormance ?



Prélèvement de novembre à mars de rameaux de hêtre



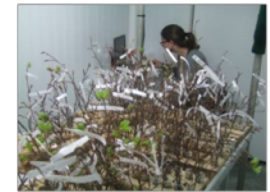
Recoupe des rameaux dans l'eau pour éviter l'embolie des vaisseaux conducteurs



Rassemblement dans un contenant unique des rameaux d'un même arbre



Identification précise de chaque échantillon prélevé



Suivi du débournement de chaque rameau en chambre climatique (23°C 16 h de lumière)

Résultats observés en 2012 sur le site atelier du Mont Ventoux (84)

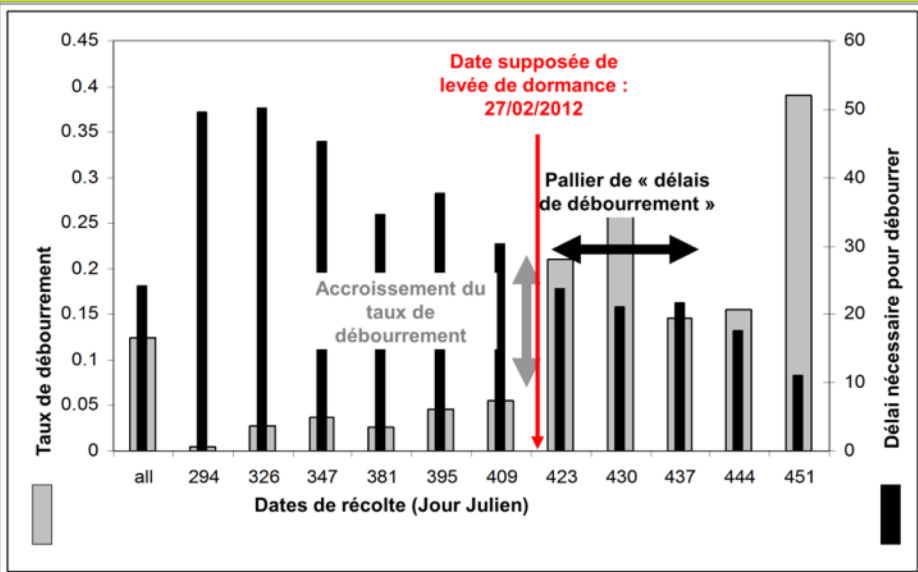
Détermination de la date supposée de levée de dormance par :

➤ l'accroissement du taux de débournement

et

➤ la diminution du délais moyen de débourrement se stabilisant autour d'un premier pallier

en conditions optimales de croissance



Modéliser le fonctionnement des forêts: phénologie

Gäuzere & Chuine

- “Photoperiod model”

1 phase model

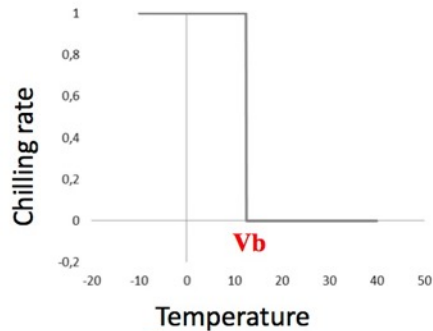
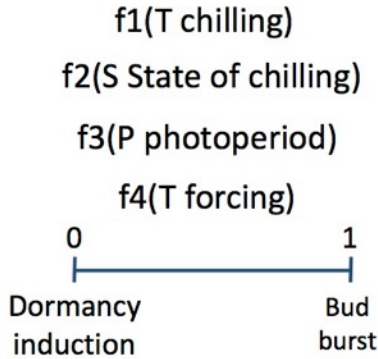
$f1 = \text{threshold}$

$f2 = \text{sigmoid inverse}$

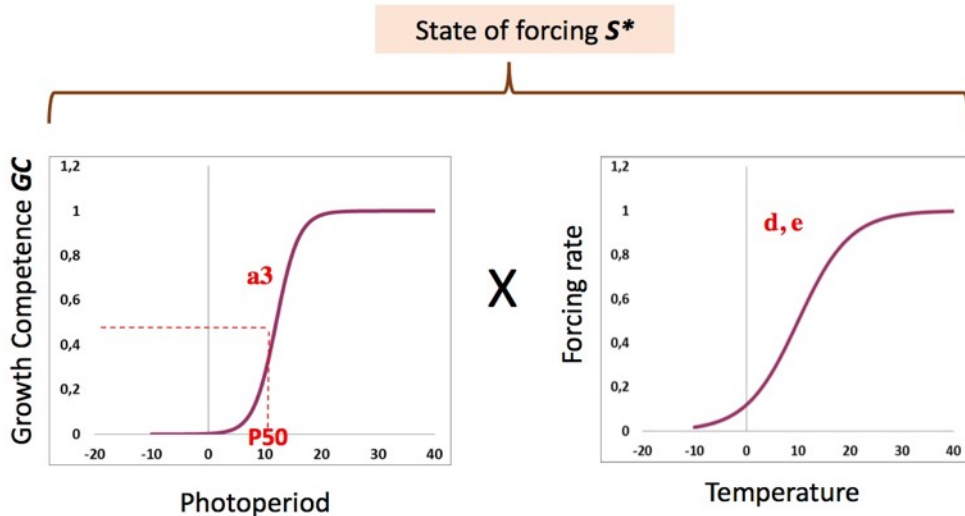
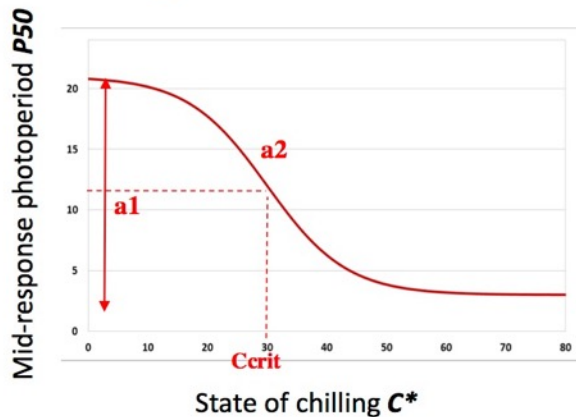
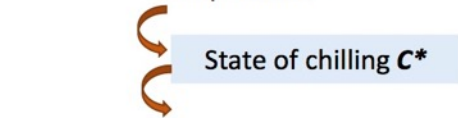
$f3 = \text{sigmoid}$

$f4 = \text{sigmoid}$

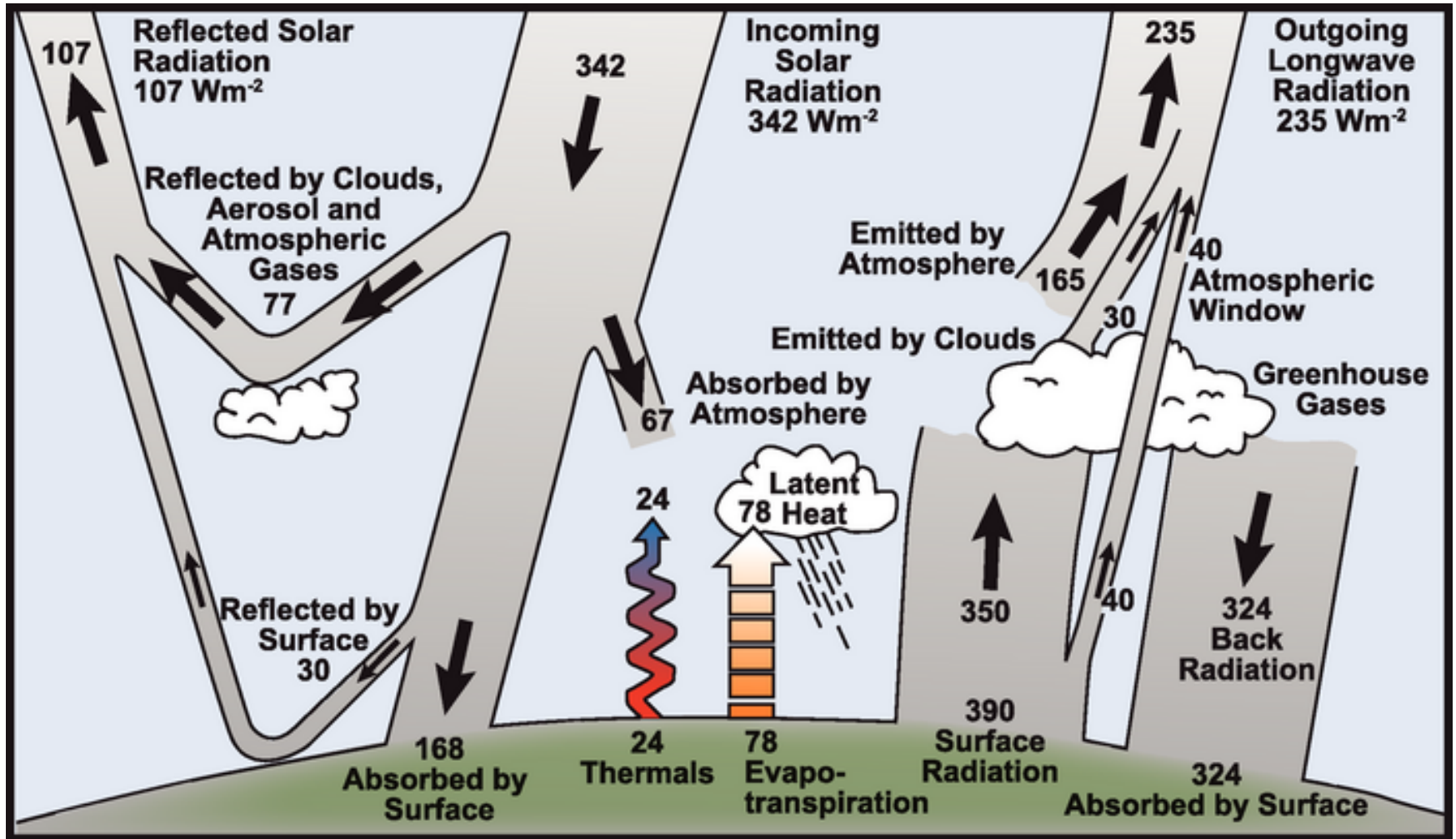
9 parameters



details...

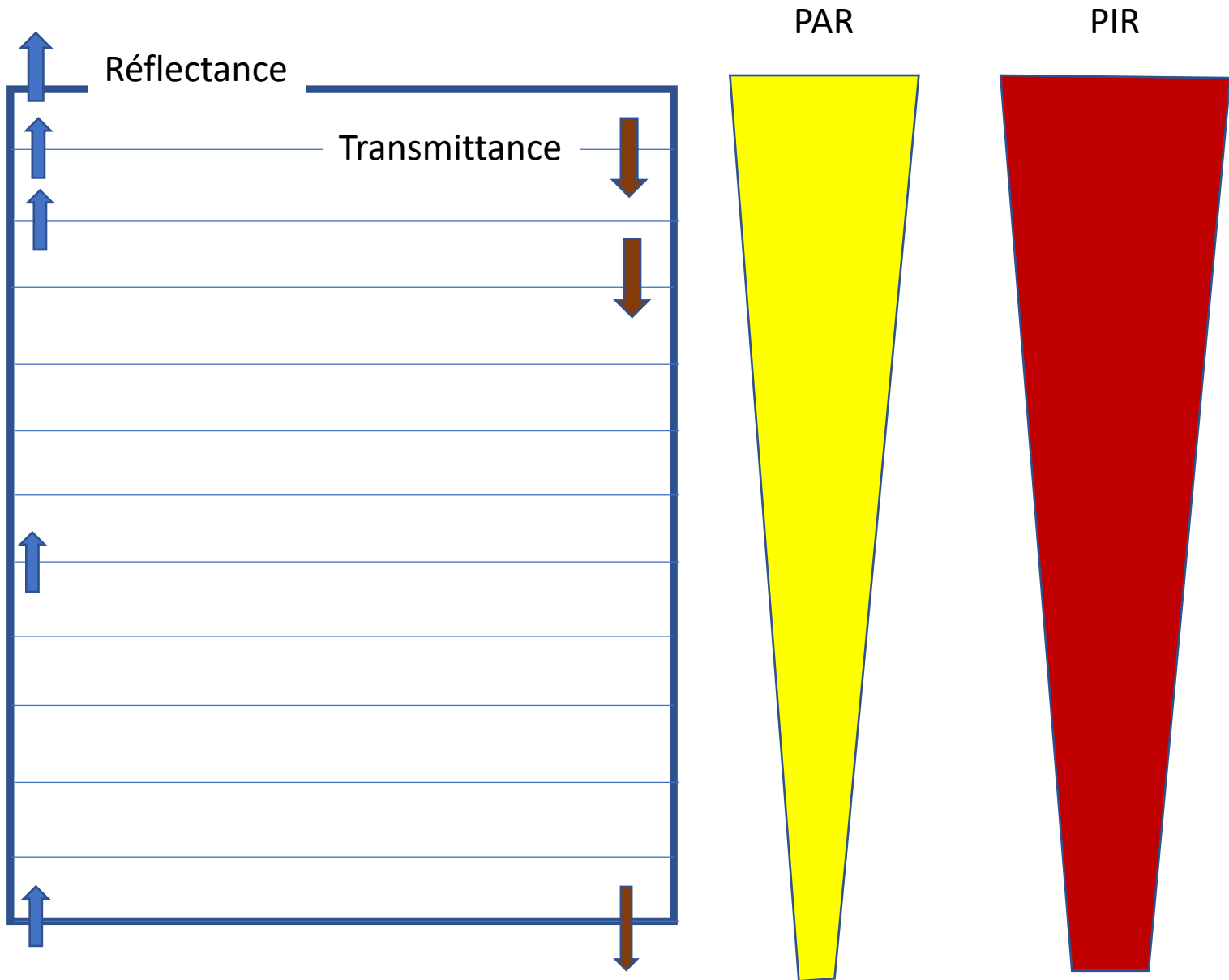


Modéliser le fonctionnement des forêts: Energie



Modéliser le fonctionnement des forêts: Energie

Pour le PAR: séparation du diffus et du direct



Modéliser le fonctionnement des forêts: Energie

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

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

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

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

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

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

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

Deux 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)*

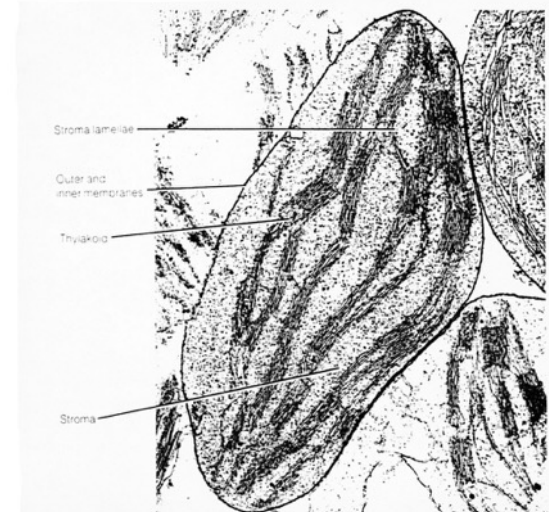
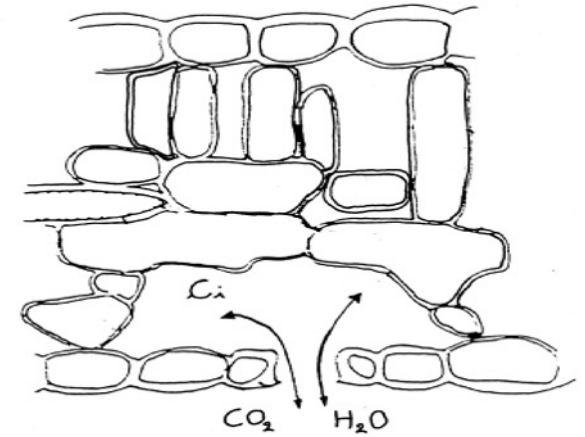
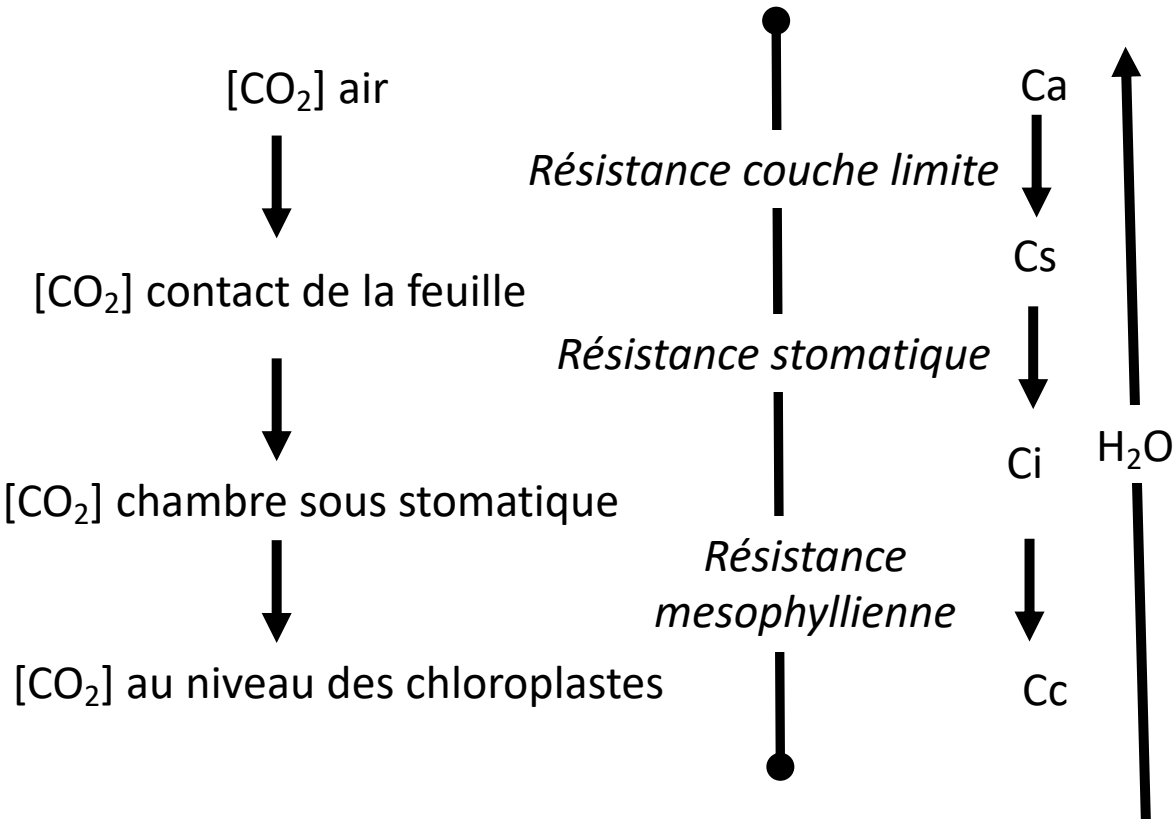
$Rvsh = stefan^{(Ta + 273.15, 4)}$

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

Emst, emst, wt: emisivités

Modéliser le fonctionnement des forêts: Photosynthèse

A] Stomata closure and CO₂ path



Ouverture stomatique dépend de la turgescence des cellules des gardes



Contrôle le flux entrant en CO₂
Flux sortant en H₂O

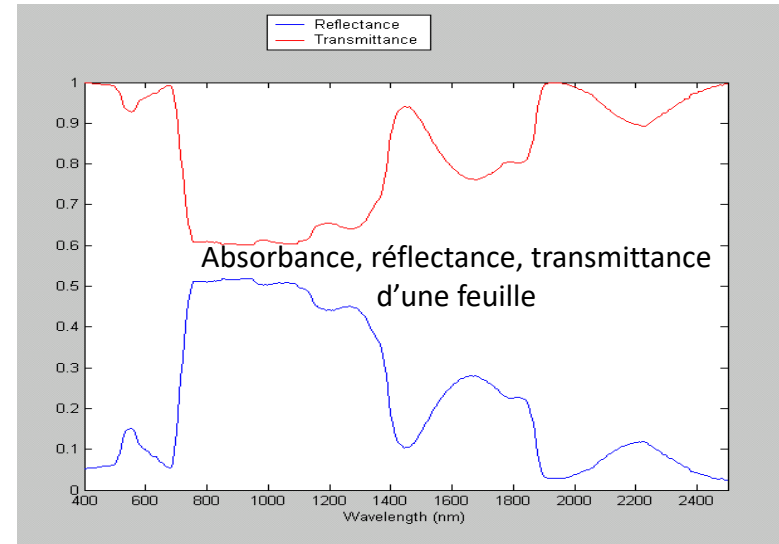
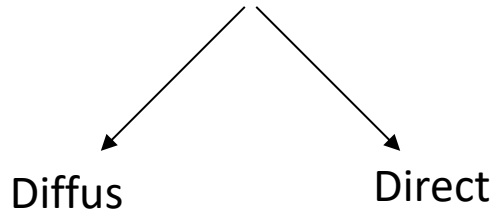
Modéliser le fonctionnement des forêts: Photosynthèse

B] Light

Quantité et qualité de la lumière absorbée

PAR: Rayonnement photosynthétiquement actif

Polarisation de la lumière



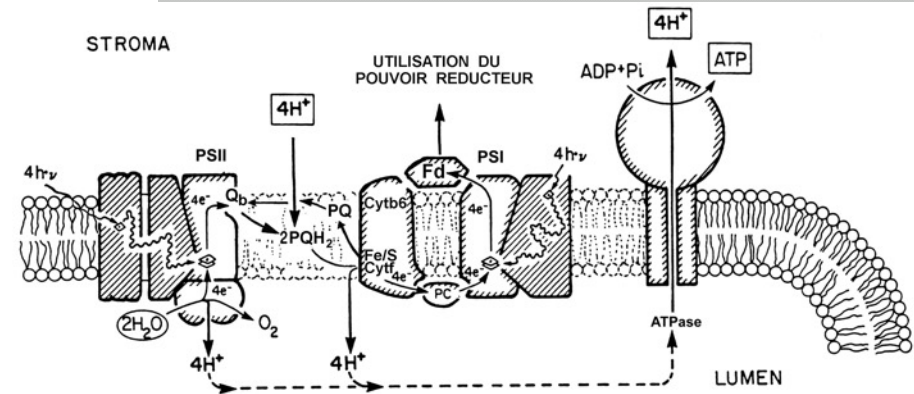
Chaîne de transport d'électrons

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

PQ Plastoquinone

PSII Photosystème II

PQH_2 Plastoquinone réduite

Fe/S
Cyt f Cytochrome f

Q_b Plastoquinone fixée sur le PS_2
pour accepter les e^-

e^- électrons

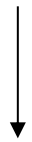
Fd Ferredoxine

Centre réactionnel

Modéliser le fonctionnement des forêts: Photosynthèse

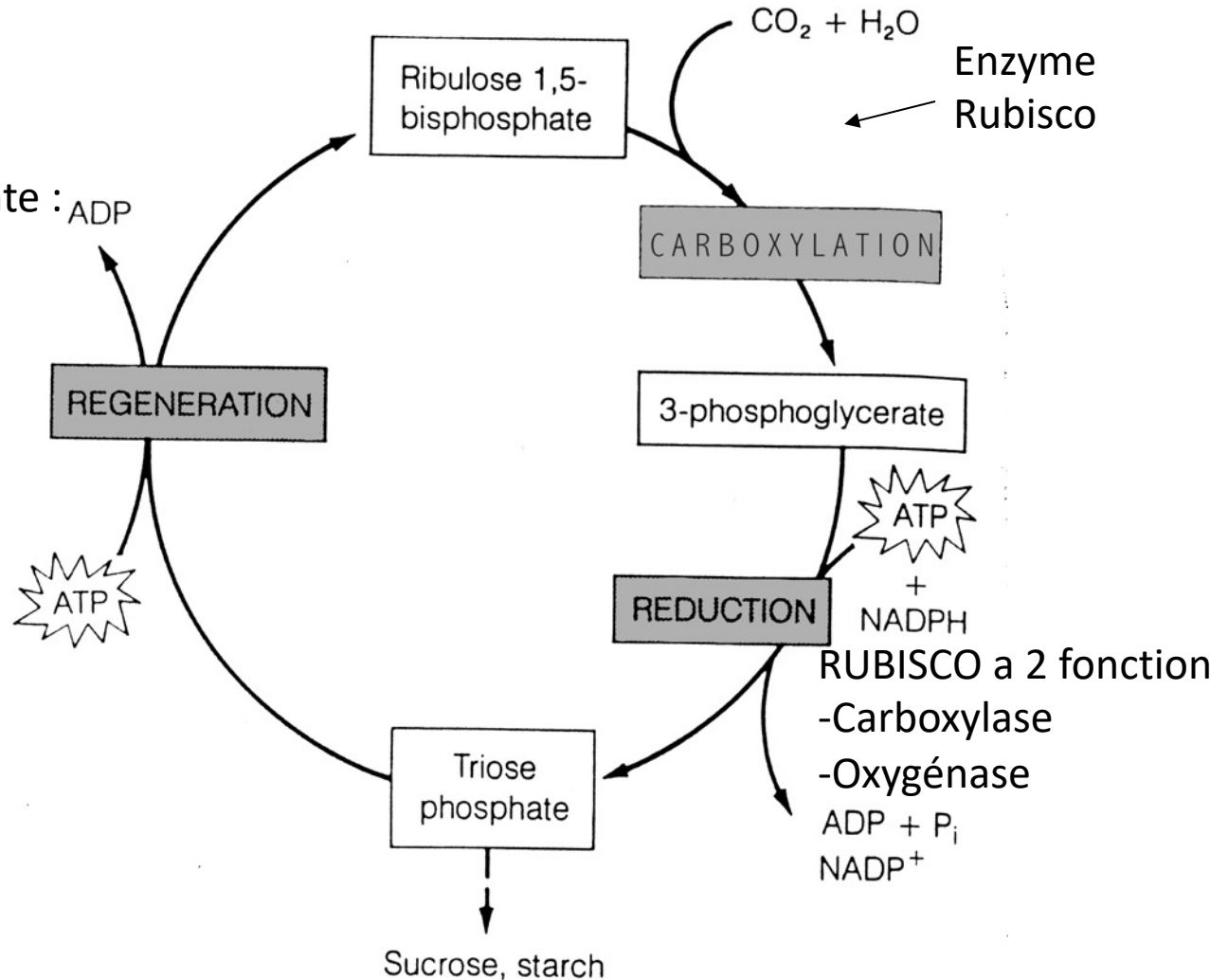
C] La carboxylation

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



COUPLAGE

Production de trioses phosphate :
cycle de Calvin



Modéliser le fonctionnement des forêts: Photosynthèse

D] Les étapes limitant l'assimilation

La carboxylation peut être limitée par

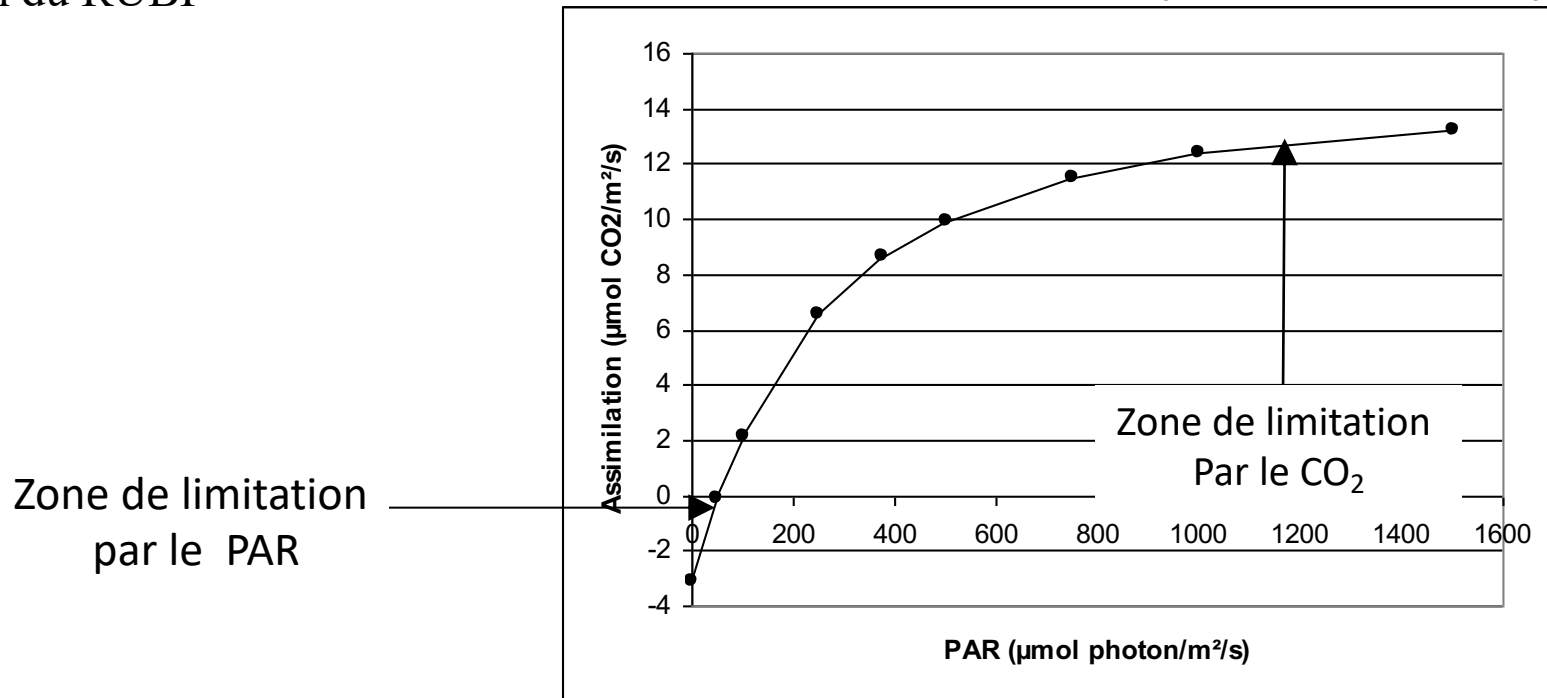
I] Apport en substrat CO_2 $C_c=f(R_{\text{CO}_2})$ ouverture stomatique

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)**



Modéliser le fonctionnement des forêts: Photosynthèse

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 electrons $\mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$

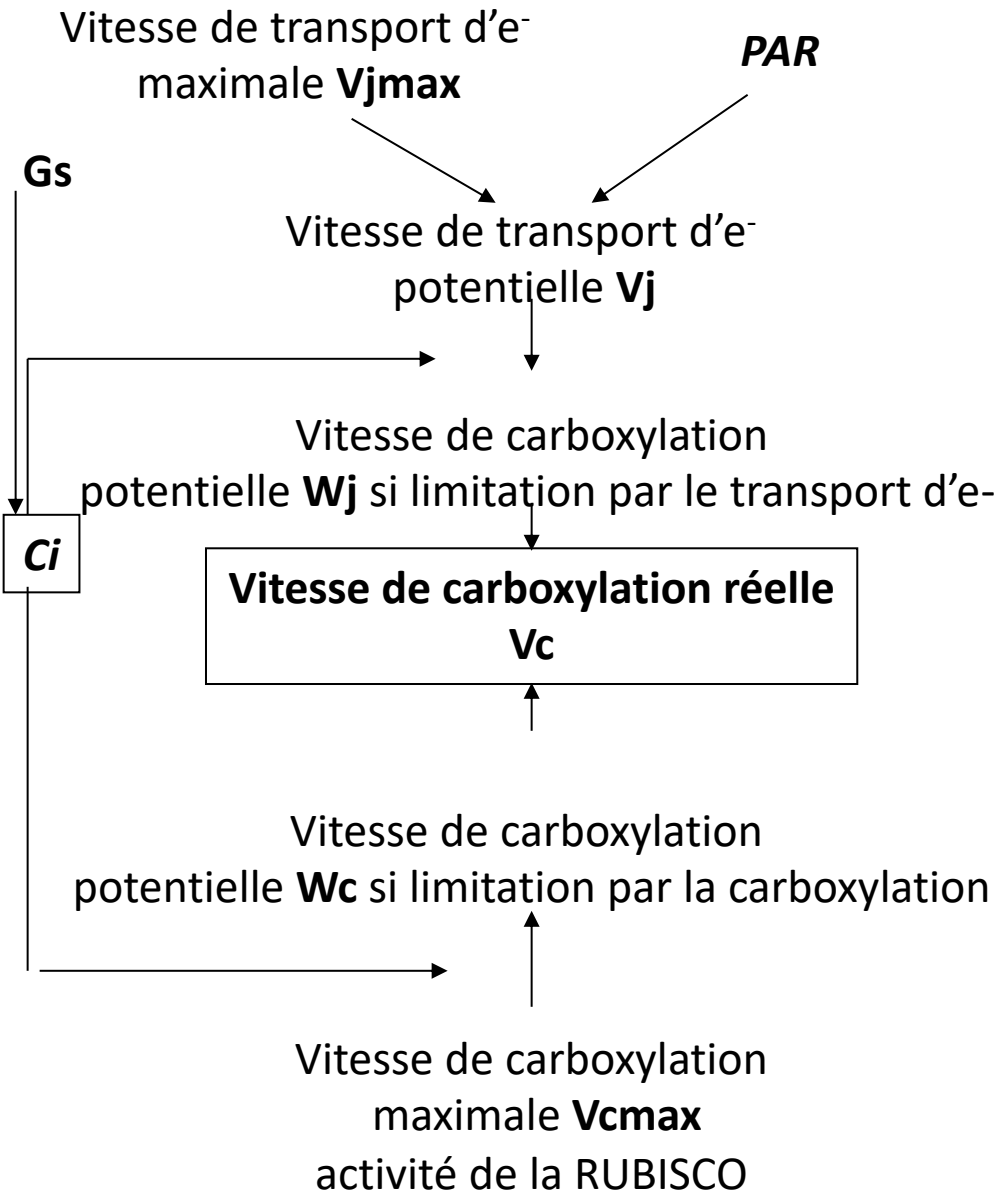
Vcmax= vitesse maximale de carboxylation de la RUBISCO $\mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$

α = rendement quantique

Γ^* = point de compensation au CO_2 sans respiration

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

Modéliser le fonctionnement des forêts: Photosynthèse



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 $G_s = f(\text{PAR}, \text{VPD}, T)$

Modéliser le fonctionnement des forêts: Photosynthèse

Équation de carboxylation

$$A = V_c - R_d$$

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

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

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

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

Modéliser le fonctionnement des forêts: Photosynthèse

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 Γ^*

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

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

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

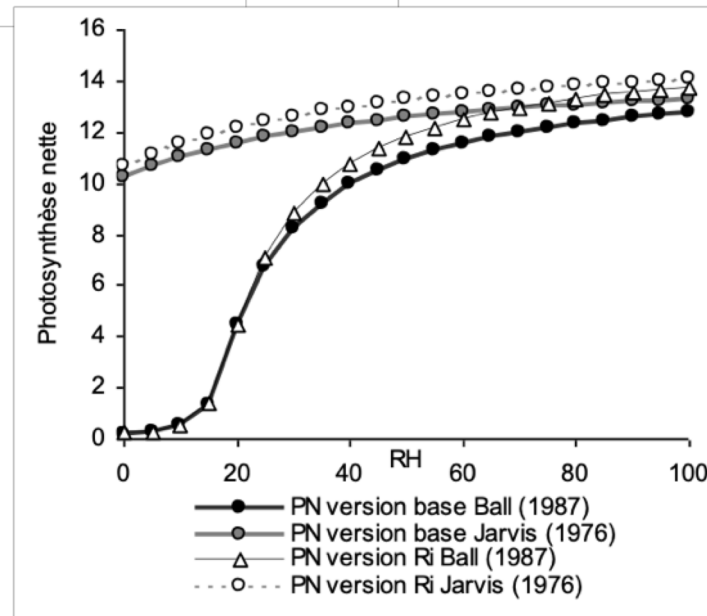
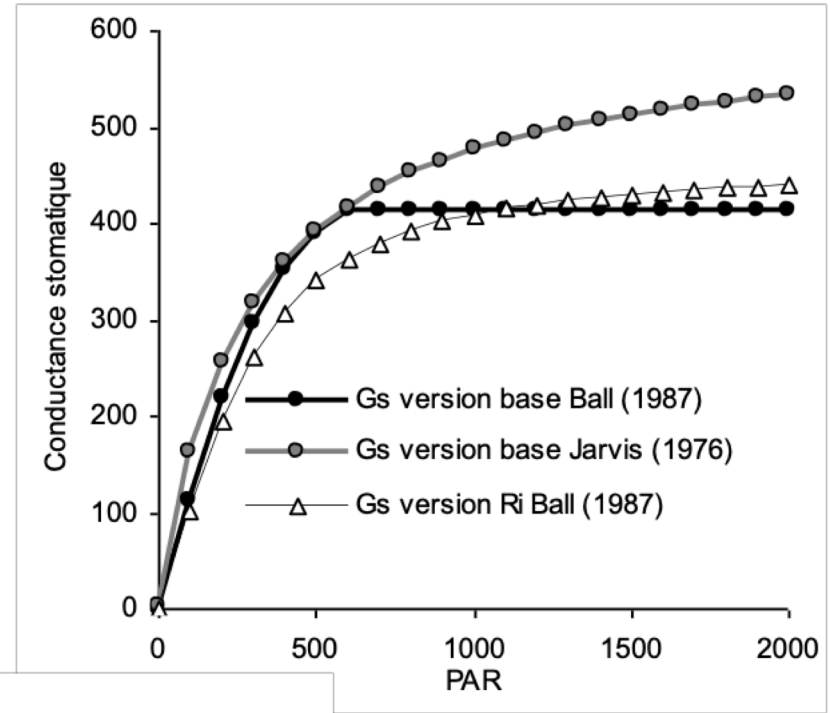
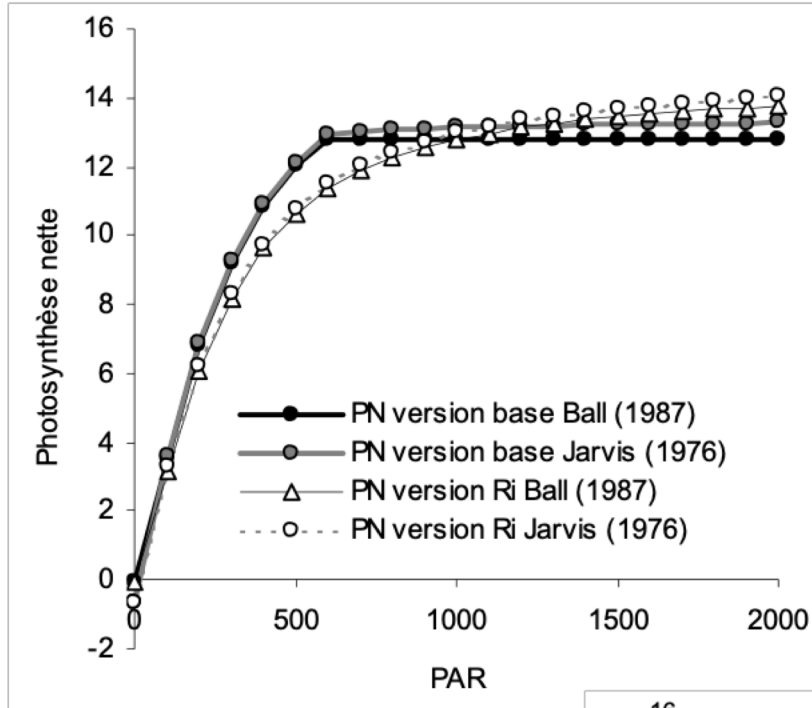
$$V_{J_{max}} = V_{J_{max0}} \times \frac{\exp\left(\frac{E_a V_j \times (T_a - 25)}{298 \times R \times (T_a + 273)}\right)}{(1 + \exp(ETT \times (T_a + 273) - JMT)) \times R \times (T_a + 273)}$$

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

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

$$O_i = \frac{O_{i0}}{0.026934} \times (0.047 - 0.0013087 \times T_a + 2.5603 \times (0.1)^5 \times T_a^2 - 2.1441 \times 10^{-7} \times T_a^3)$$

Modéliser le fonctionnement des forêts: Photosynthèse



Modéliser le fonctionnement des forêts: Photosynthèse

Détermination de différents paramètres et constantes

Les constantes inter-spécifiques ou spécifiques

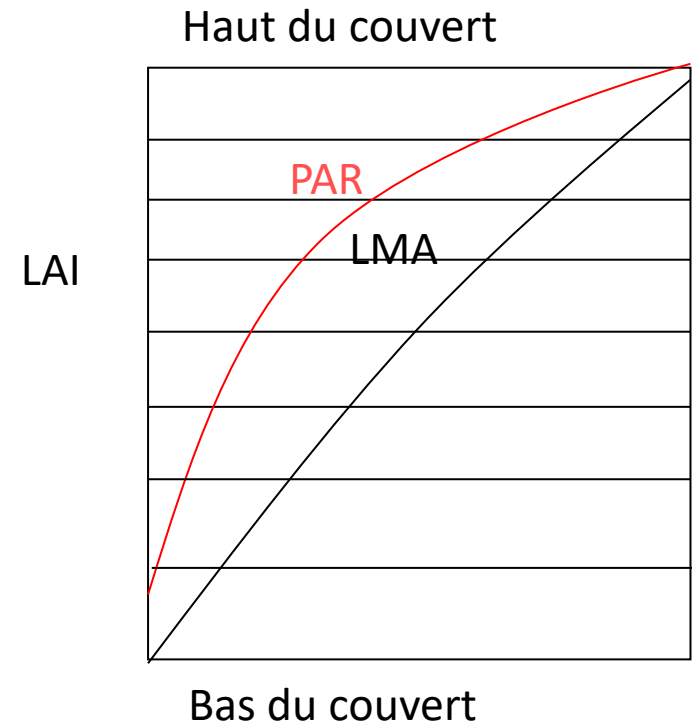
- effet température
- les paramètres de caractérisation enzymatique
- rendement quantique ?

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

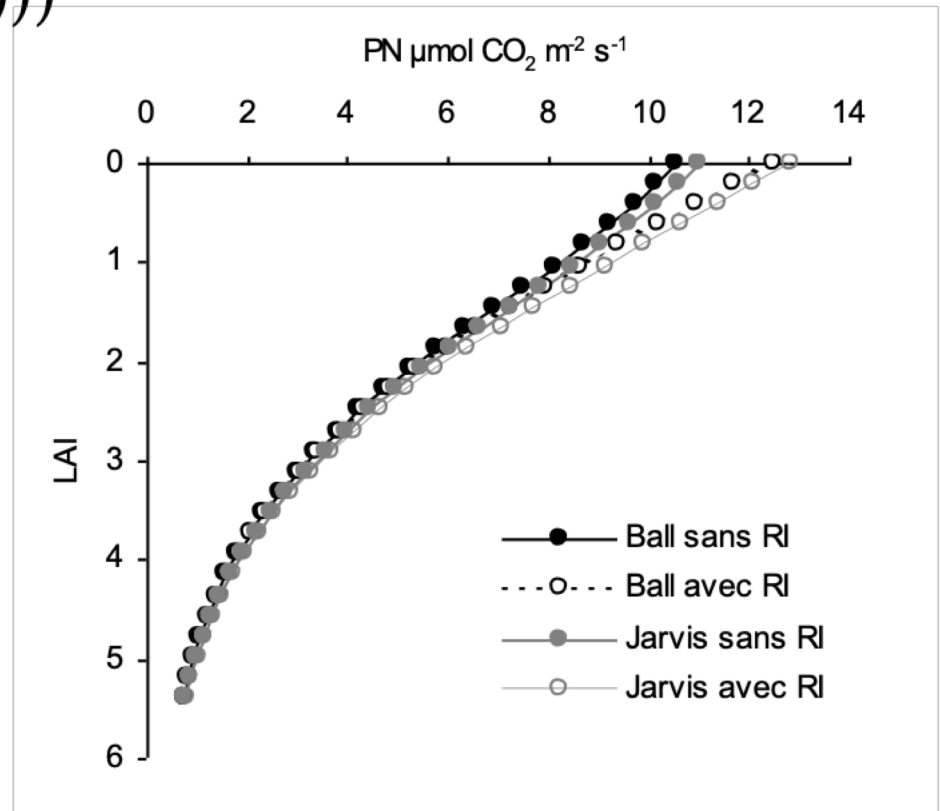
Modéliser le fonctionnement des forêts: Photosynthèse

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

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

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

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



Modéliser le fonctionnement des forêts: Respiration

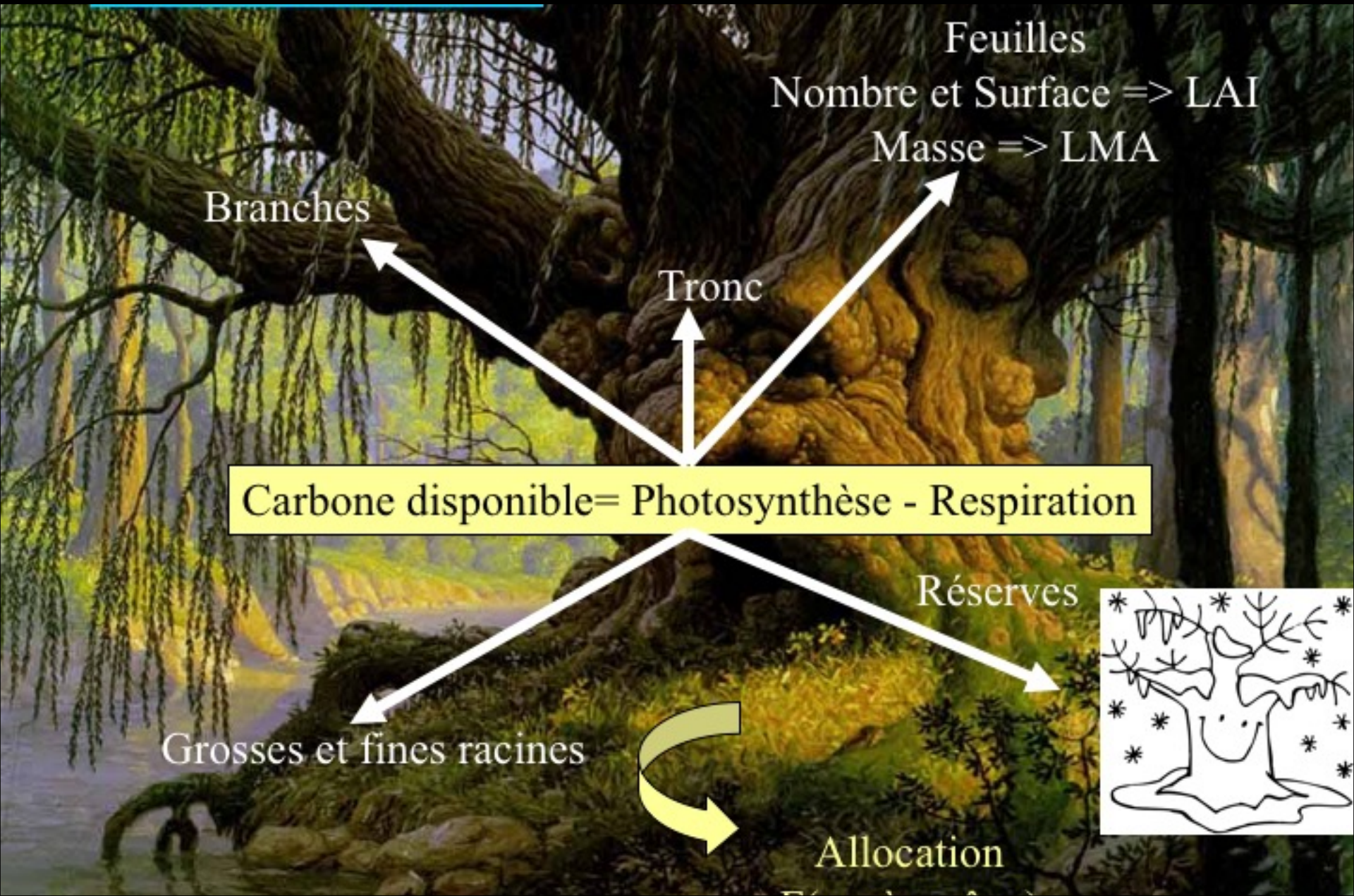
$$RM_{organ} = B_{aliveorgan} \times MRN \times N_{morgan} \times Q_{10organ}^{\left(\frac{T_{suf} - T_{MR}}{10}\right)}$$

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

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

Modéliser le fonctionnement des forêts: Allocation du C



Modéliser le fonctionnement des forêts: Allocation du C

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

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

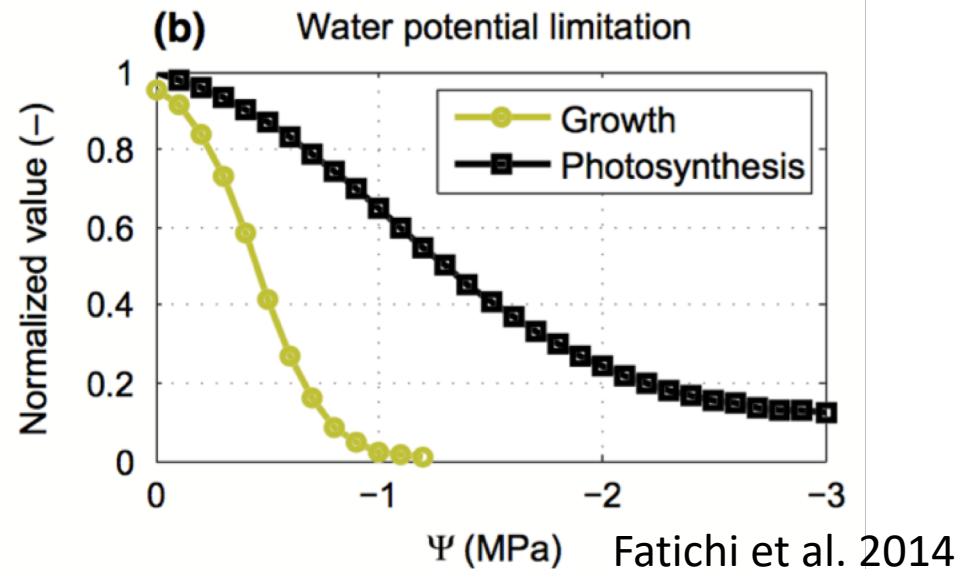
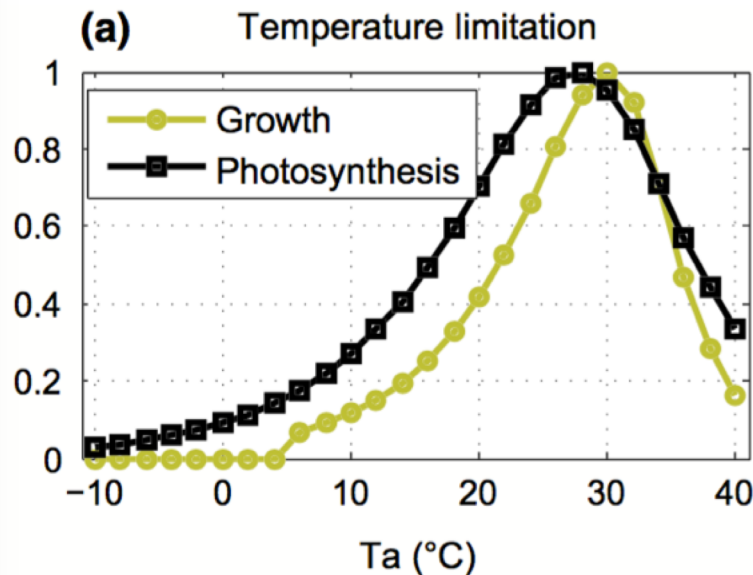
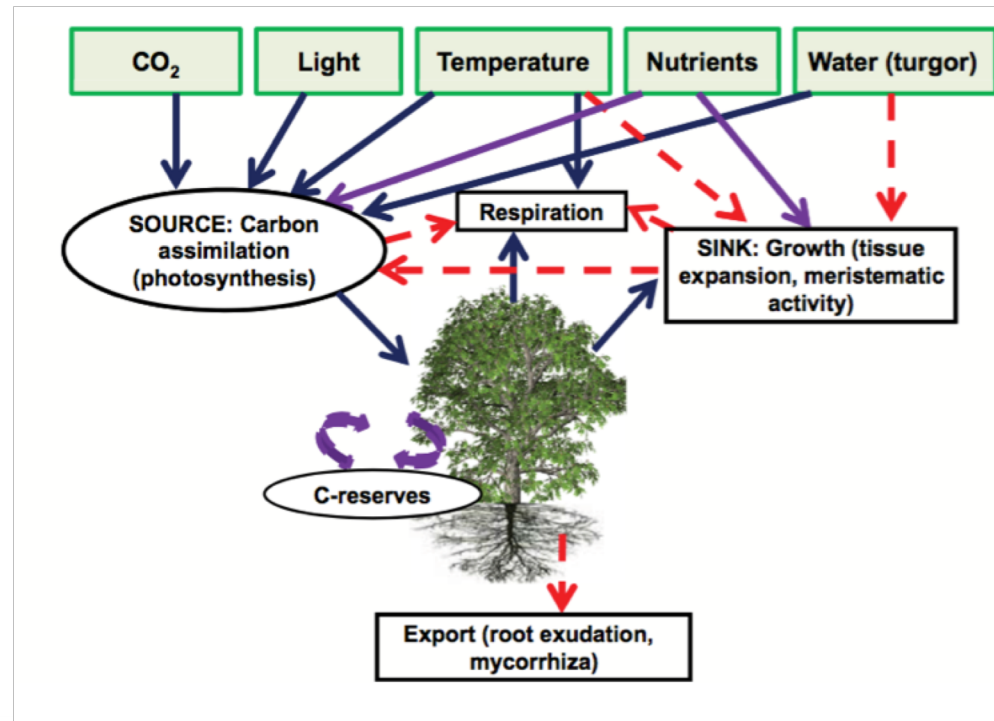
Ag_{organ} = calculé avec homéostasie des réserves et ratio racines fines/feuilles pour maintenir la constance des résistances hydrauliques (Davi et al., 2009)

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

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

Modéliser le fonctionnement des forêts: Allocation du C

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



Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique

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

Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique

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** θ 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 θ , 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.

Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique

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

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

Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique

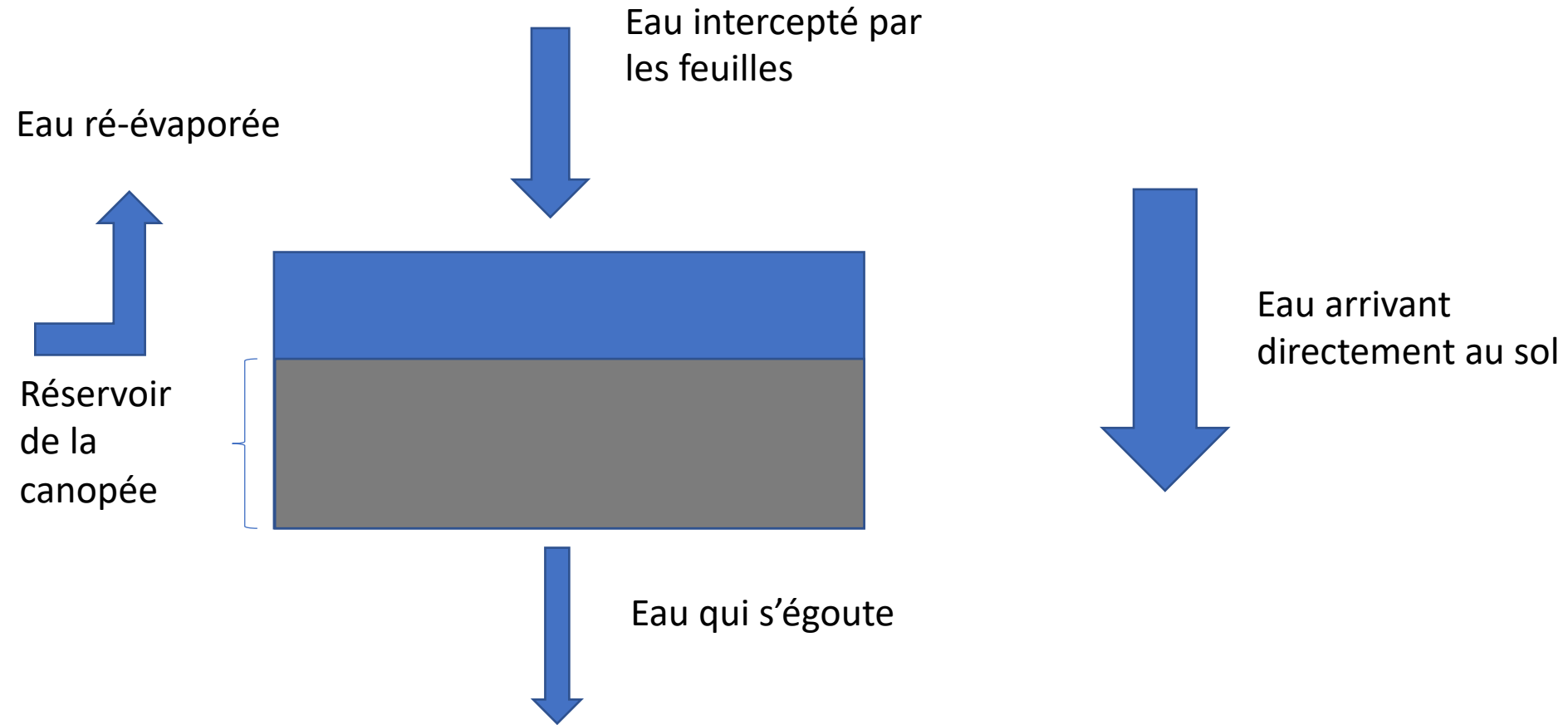
La partie de l'image avec l'ID de relation r102 n'a pas été trouvée dans le fichier.

La partie de l'image avec l'ID de relation r102 n'a pas été trouvée dans le fichier.

La partie de l'image avec l'ID de relation r102 n'a pas été trouvée dans le fichier.

La partie de l'image avec l'ID de relation r102 n'a pas été trouvée dans le fichier.

Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique



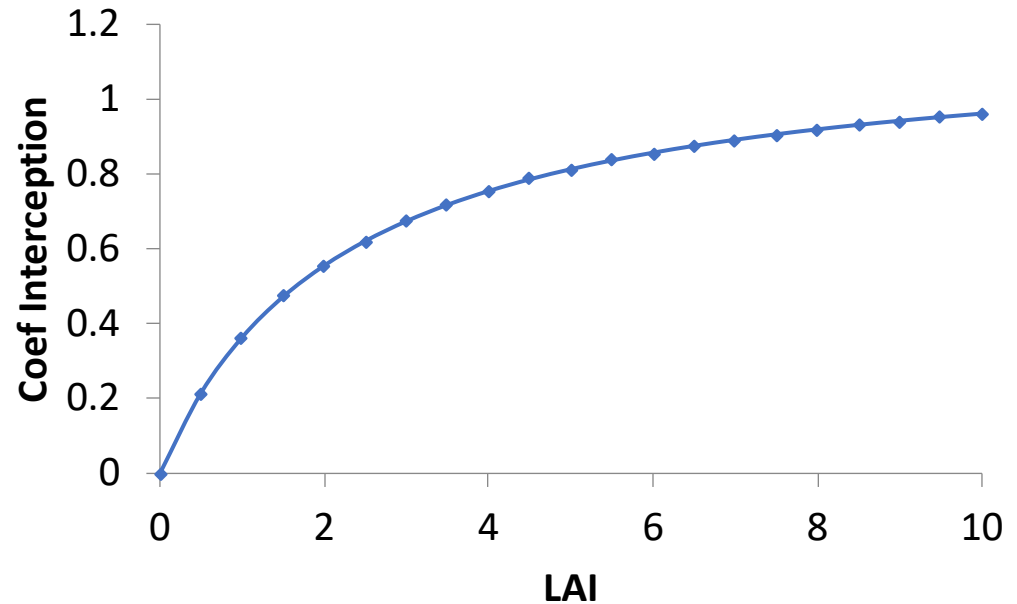
Interception brute = Pluies * f(LAI, agrégation du couvert)

Interception net = Interception brute * f(réservoir de la canopée, évaporation)

Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique

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

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



Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique

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**

Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique

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

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

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

Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique

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

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 !

Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique

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

La formule de Pennann Monteith

VPD= Sécheresse de l'air=ea-es

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

Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique

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

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

Modéliser le fonctionnement des forêts: Bilan hydrique

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

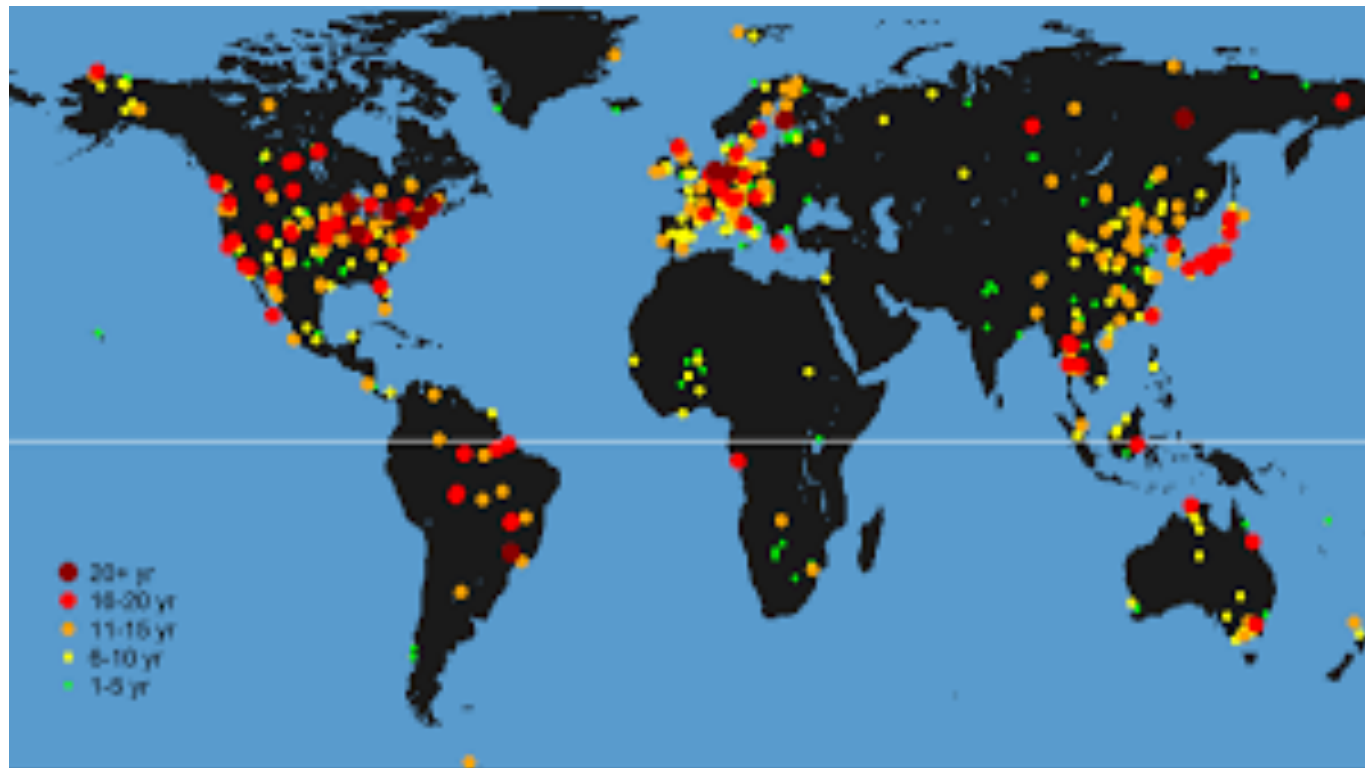
La formule de Pennann Monteith

Gc= Conductance du couvert

Dépend de l'ouverture des stomates

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

Modéliser le fonctionnement des forêts: Evaluation



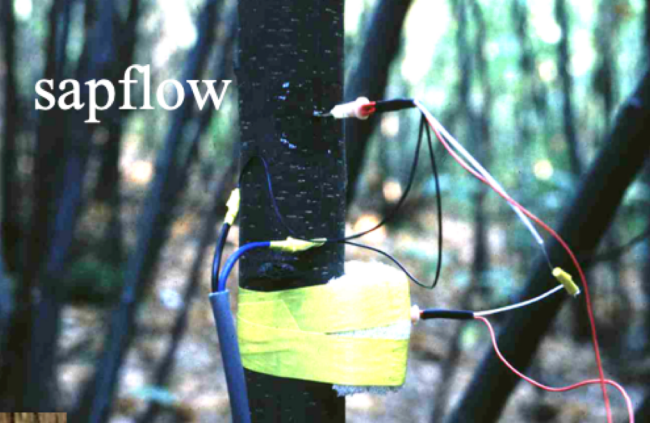
Carbon and water flux estimation by eddy correlation method



Branch bag



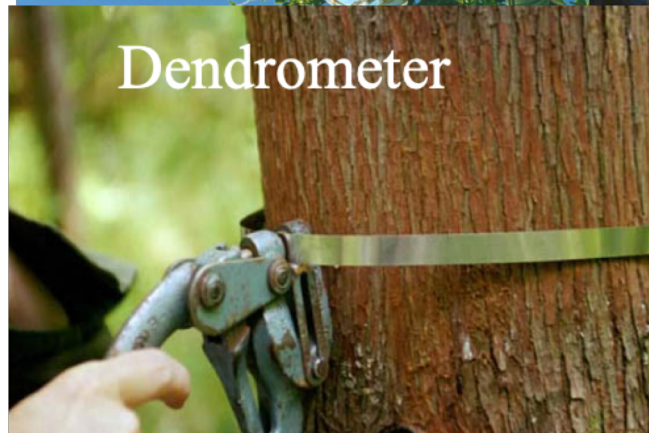
sapflow



Gas exchange



Dendrometer



Biochemical



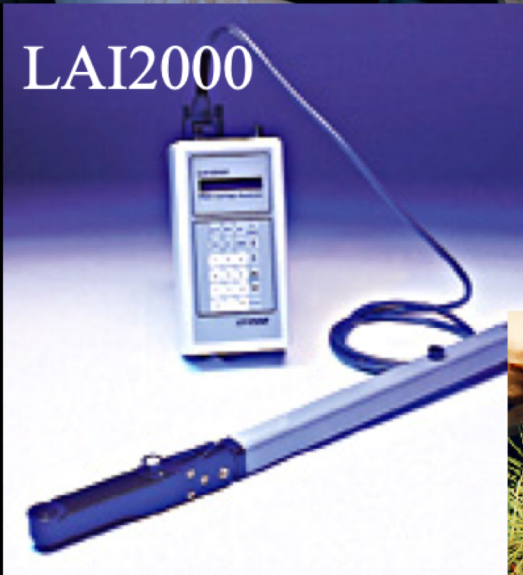
photosynthesis



photos

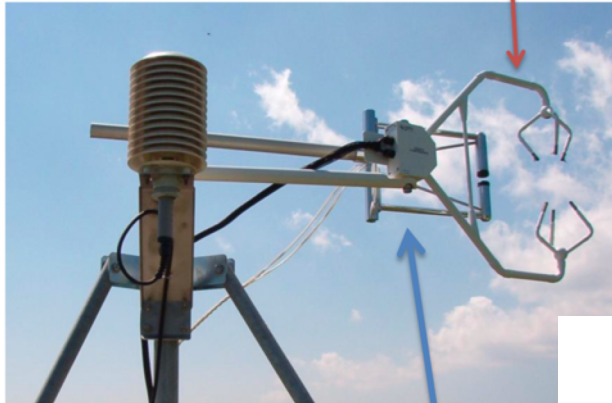


LAI2000



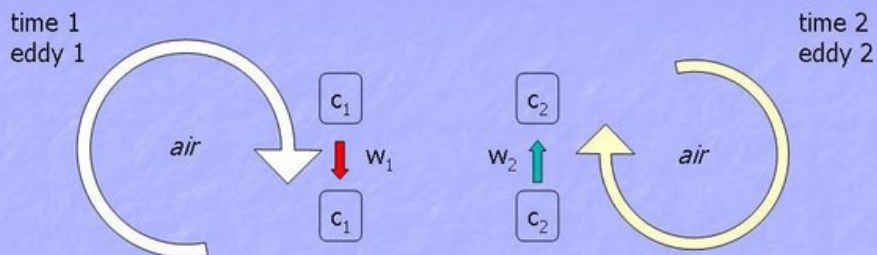
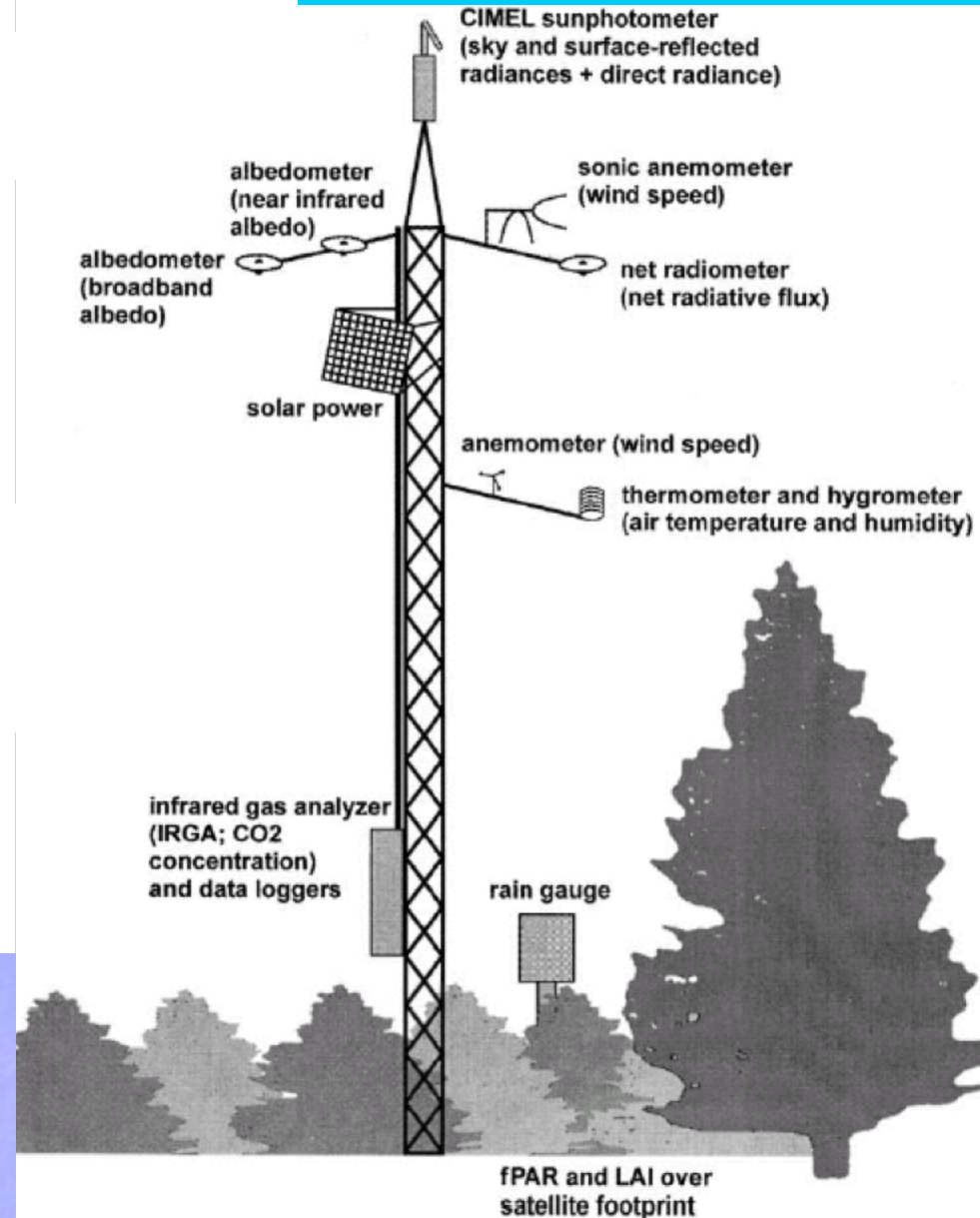
Modéliser le fonctionnement des forêts: Evaluation

Anémomètre sonique à 3D
(u, v, w, T)



Hygromètre optique

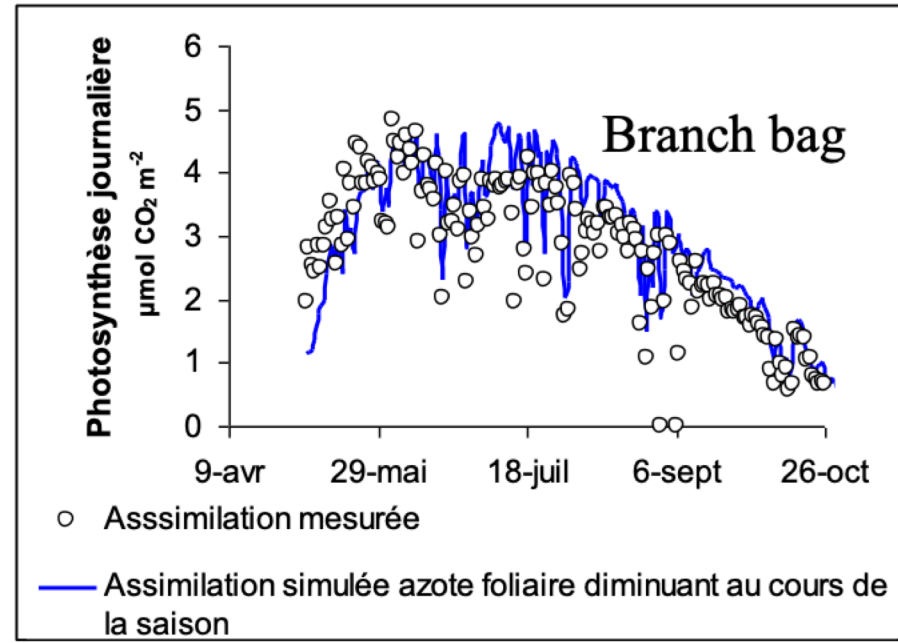
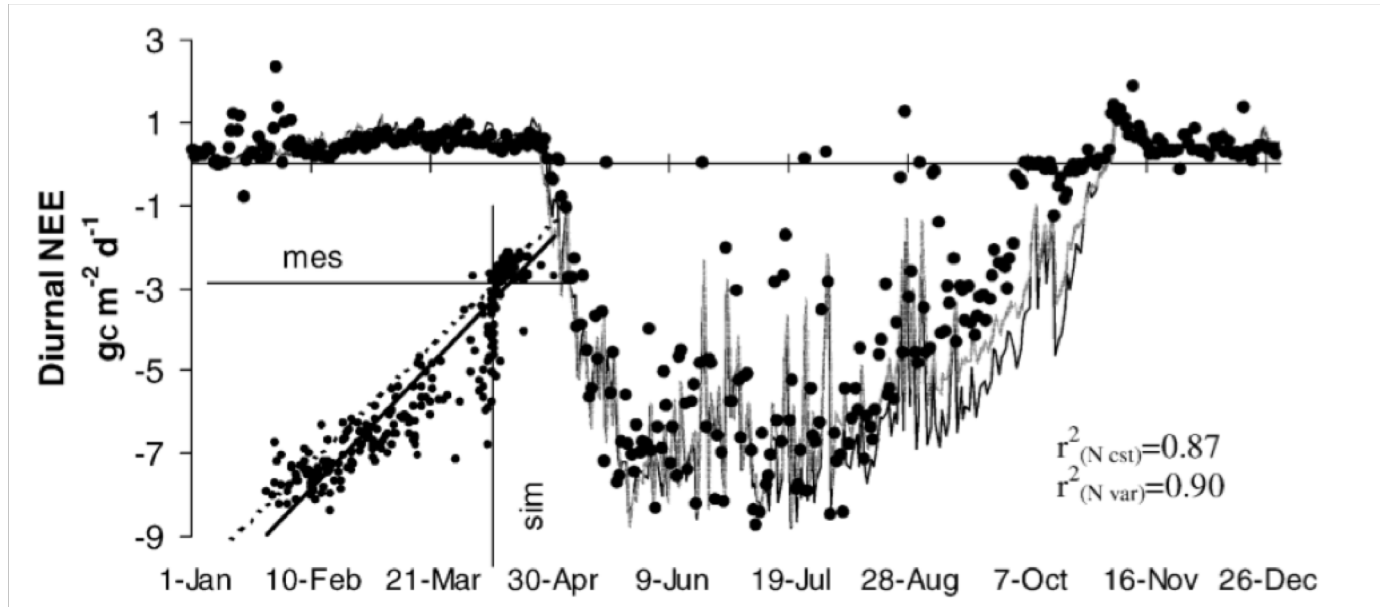
Les mesures intégratives



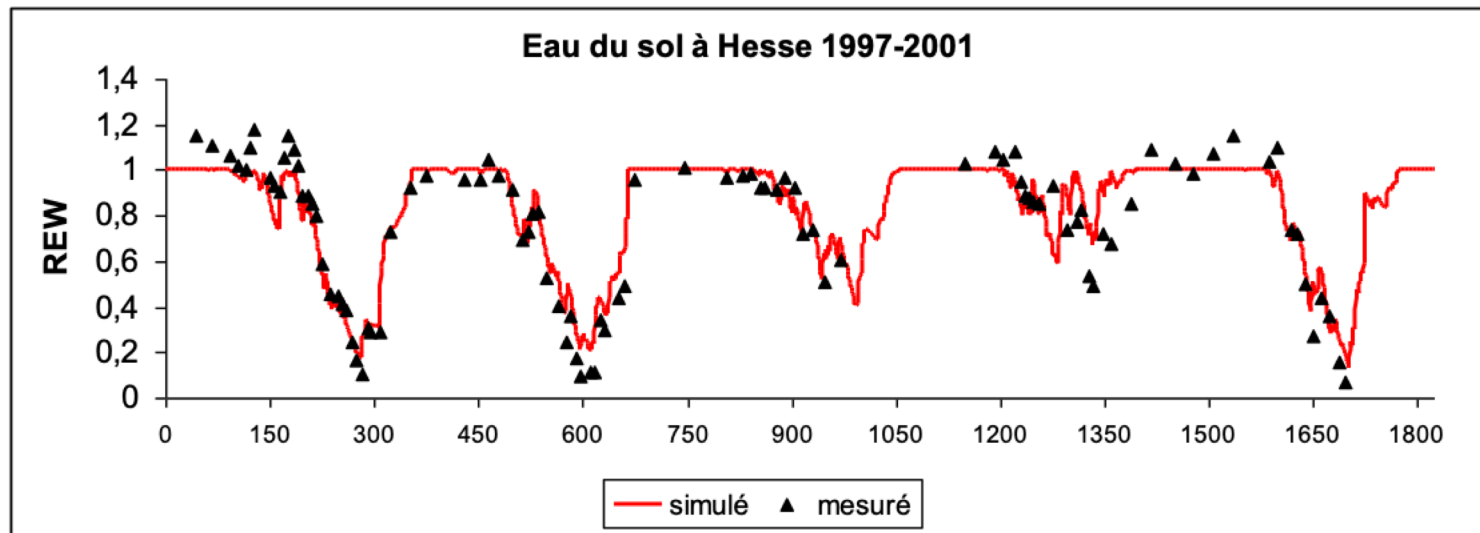
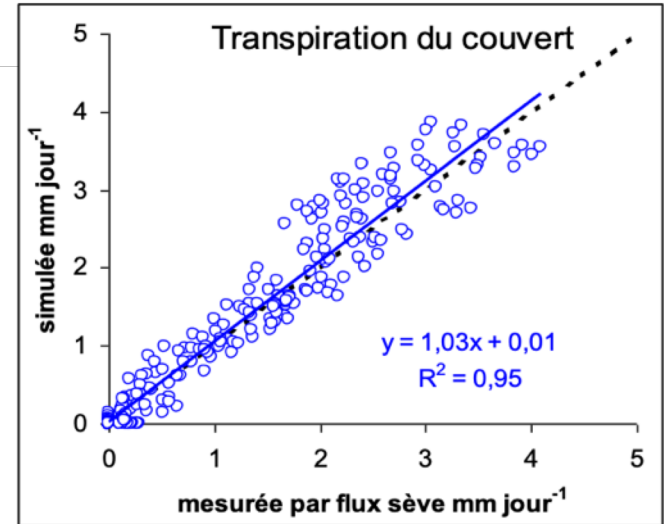
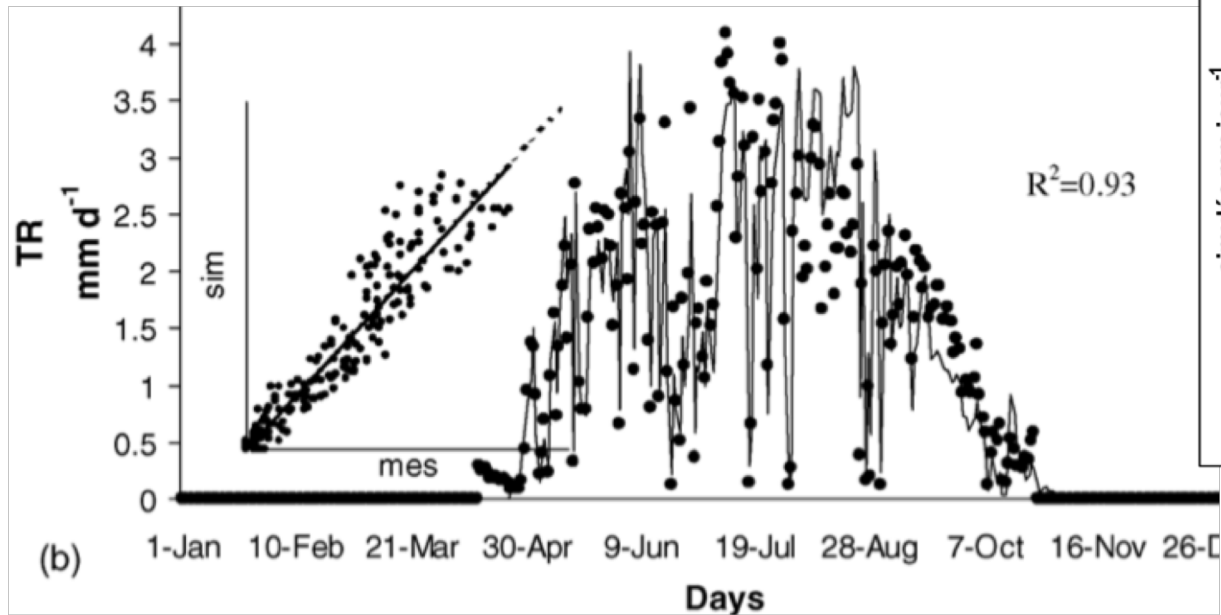
Running et al., 1999

Modéliser le fonctionnement des forêts: Evaluation

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



Modéliser le fonctionnement des forêts: Evaluation



Hesse: hêtre



Le Bray: maritime pine



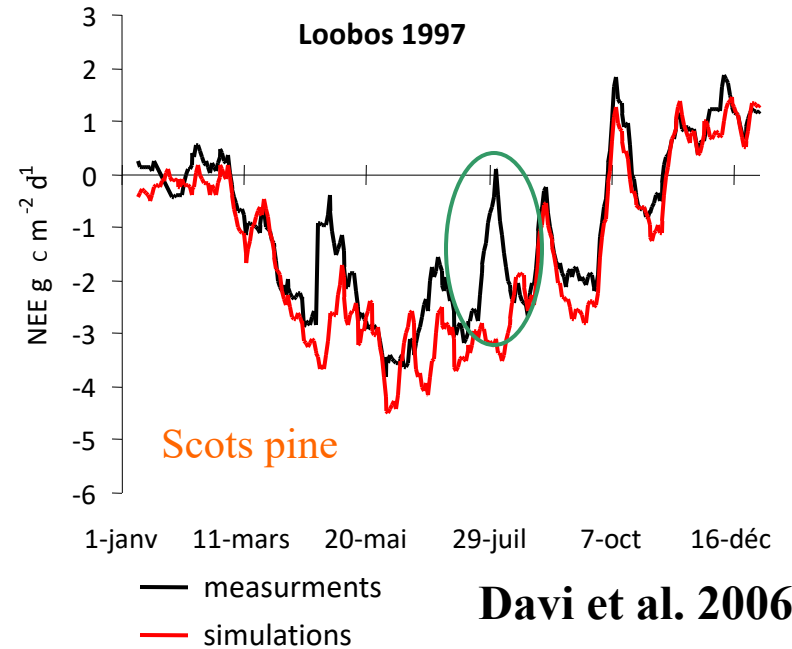
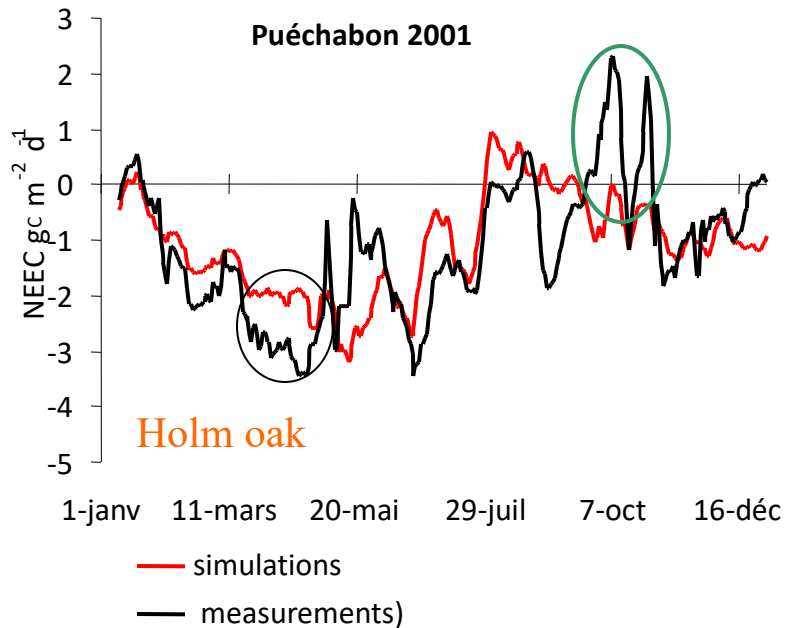
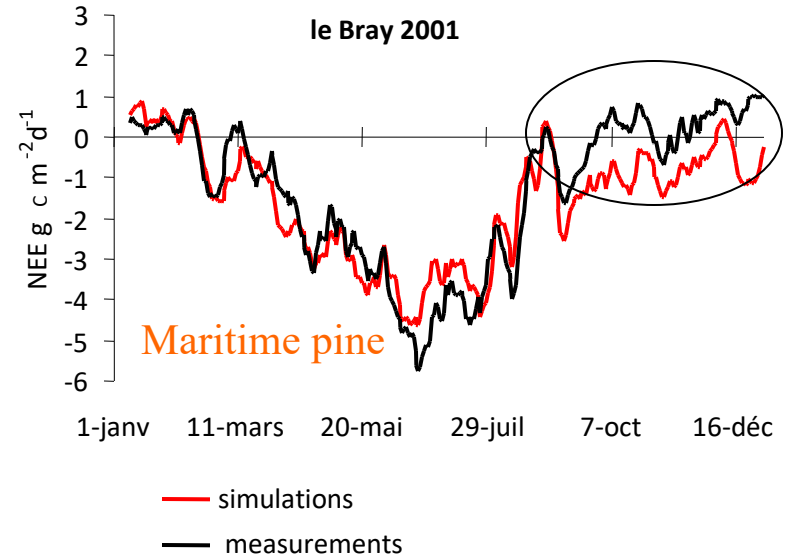
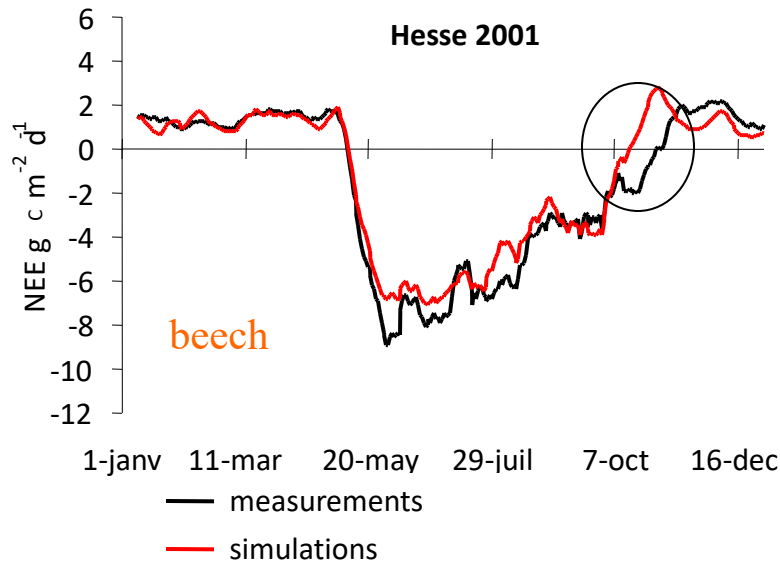
Puéchabon: Chêne vert



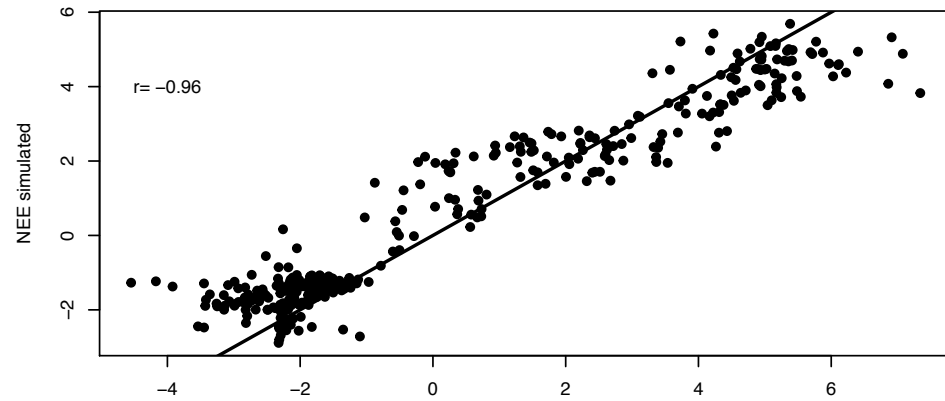
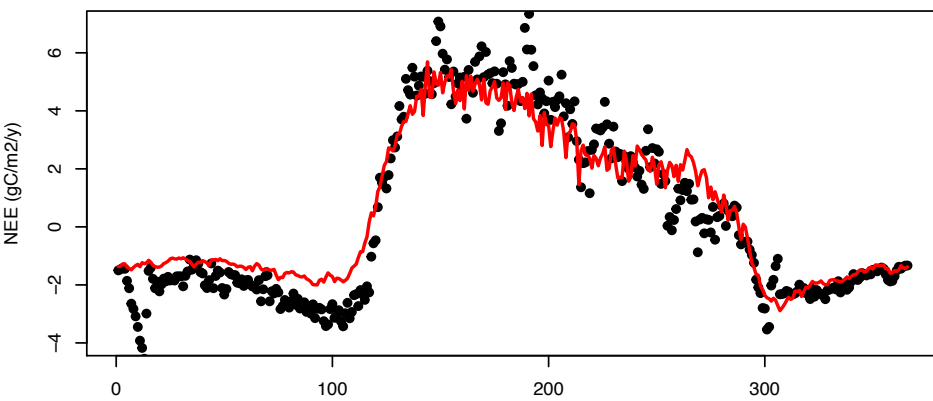
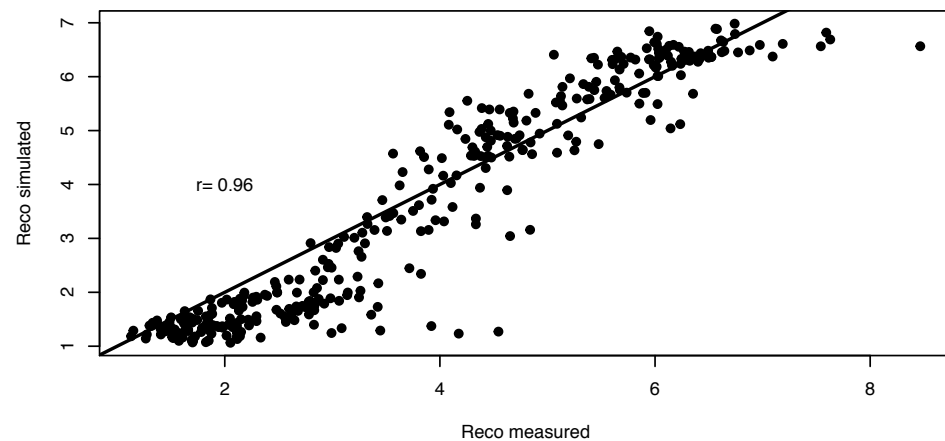
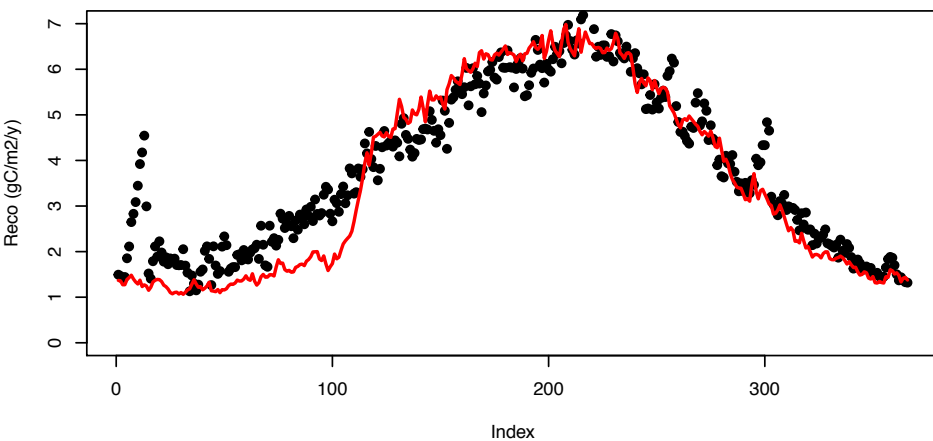
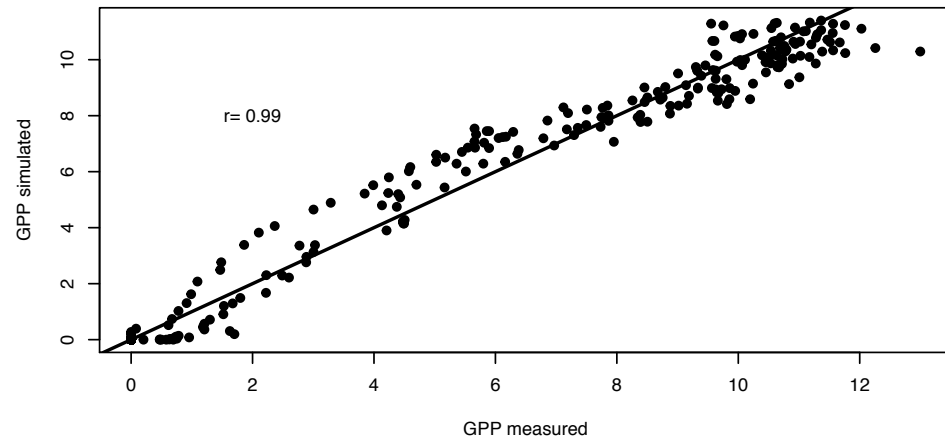
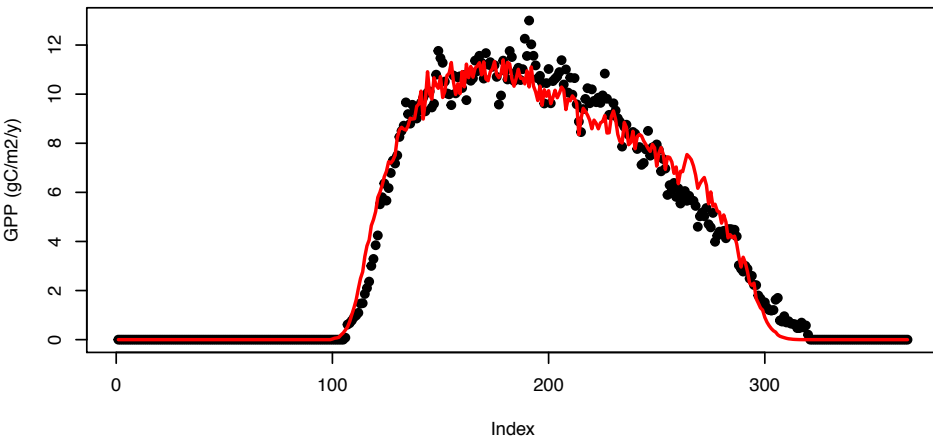
Loobos: Scots pine



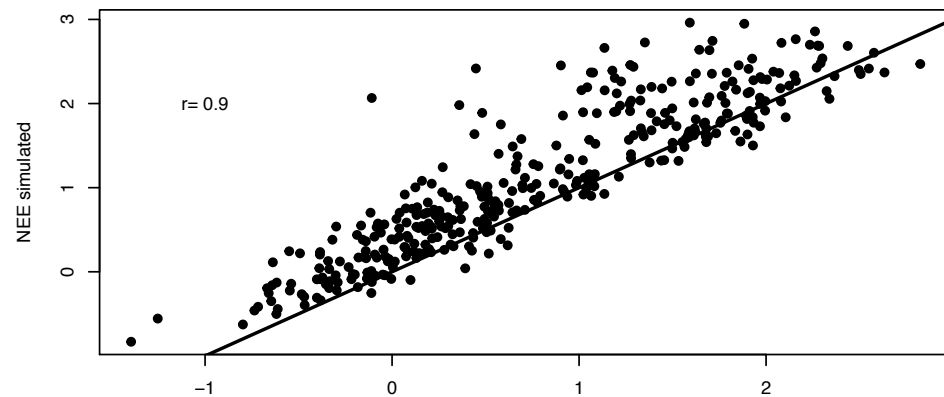
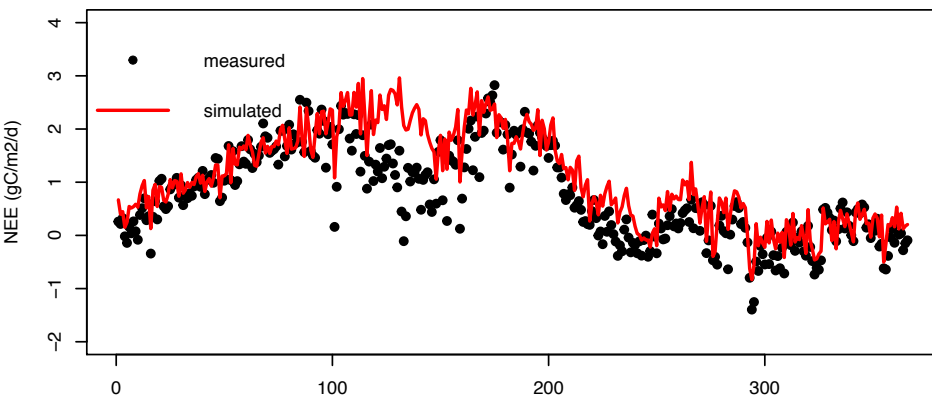
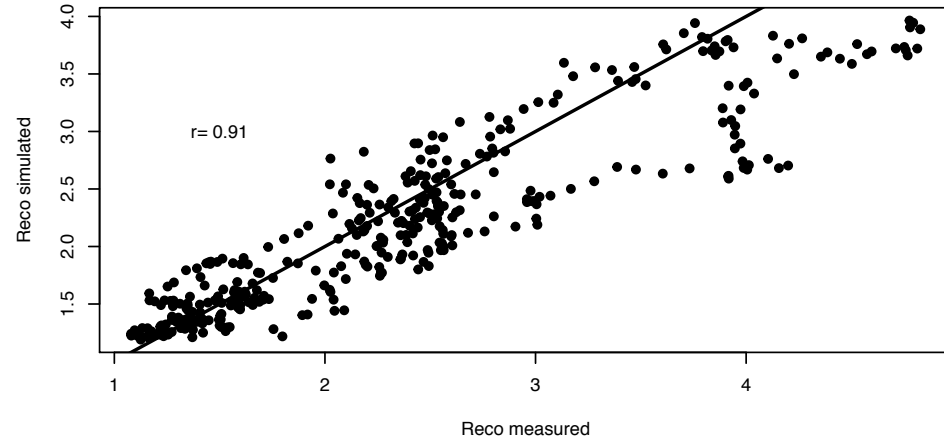
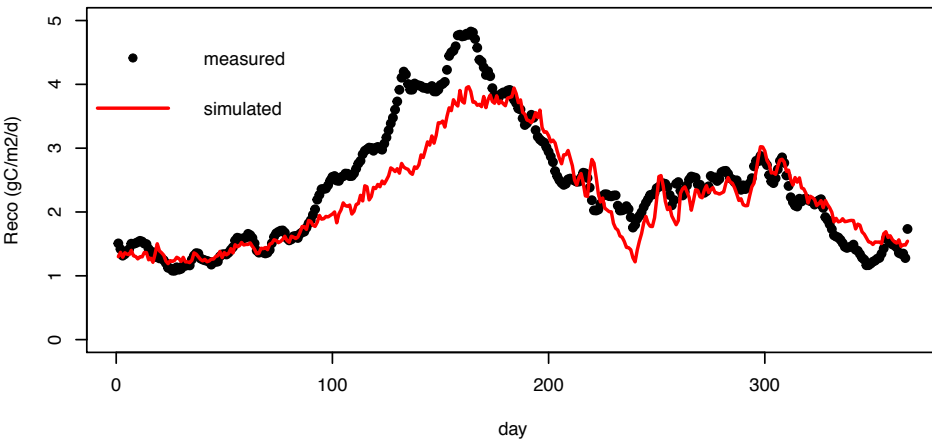
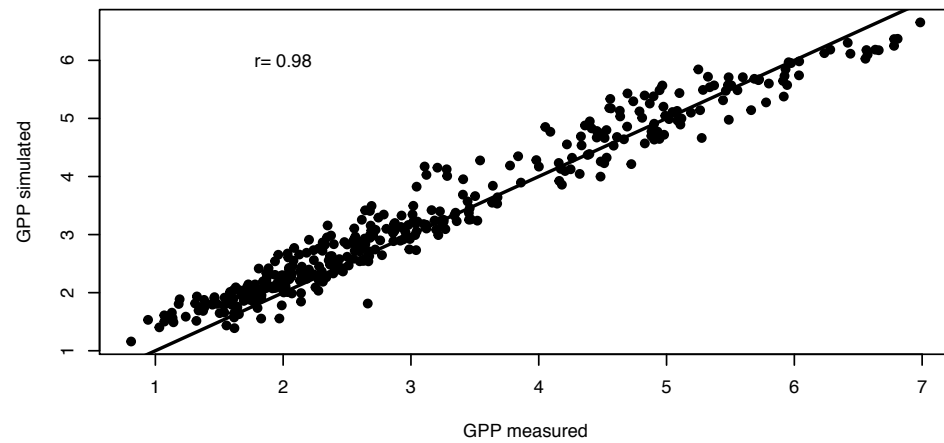
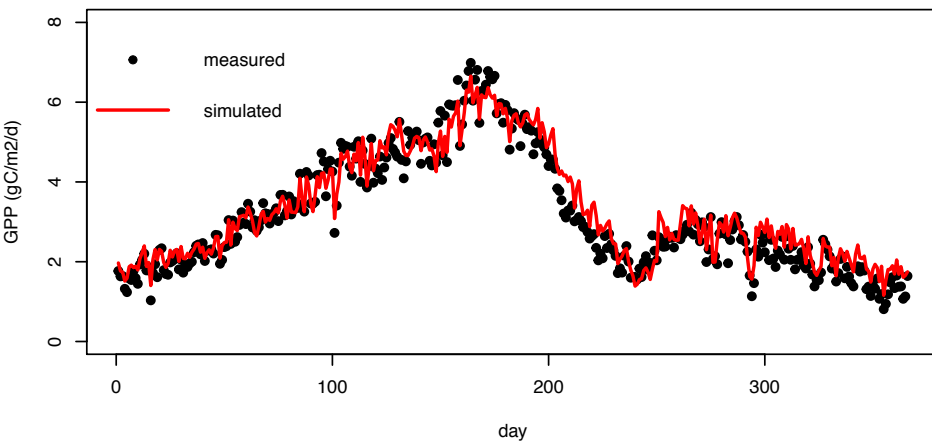
Modéliser le fonctionnement des forêts: Evaluation



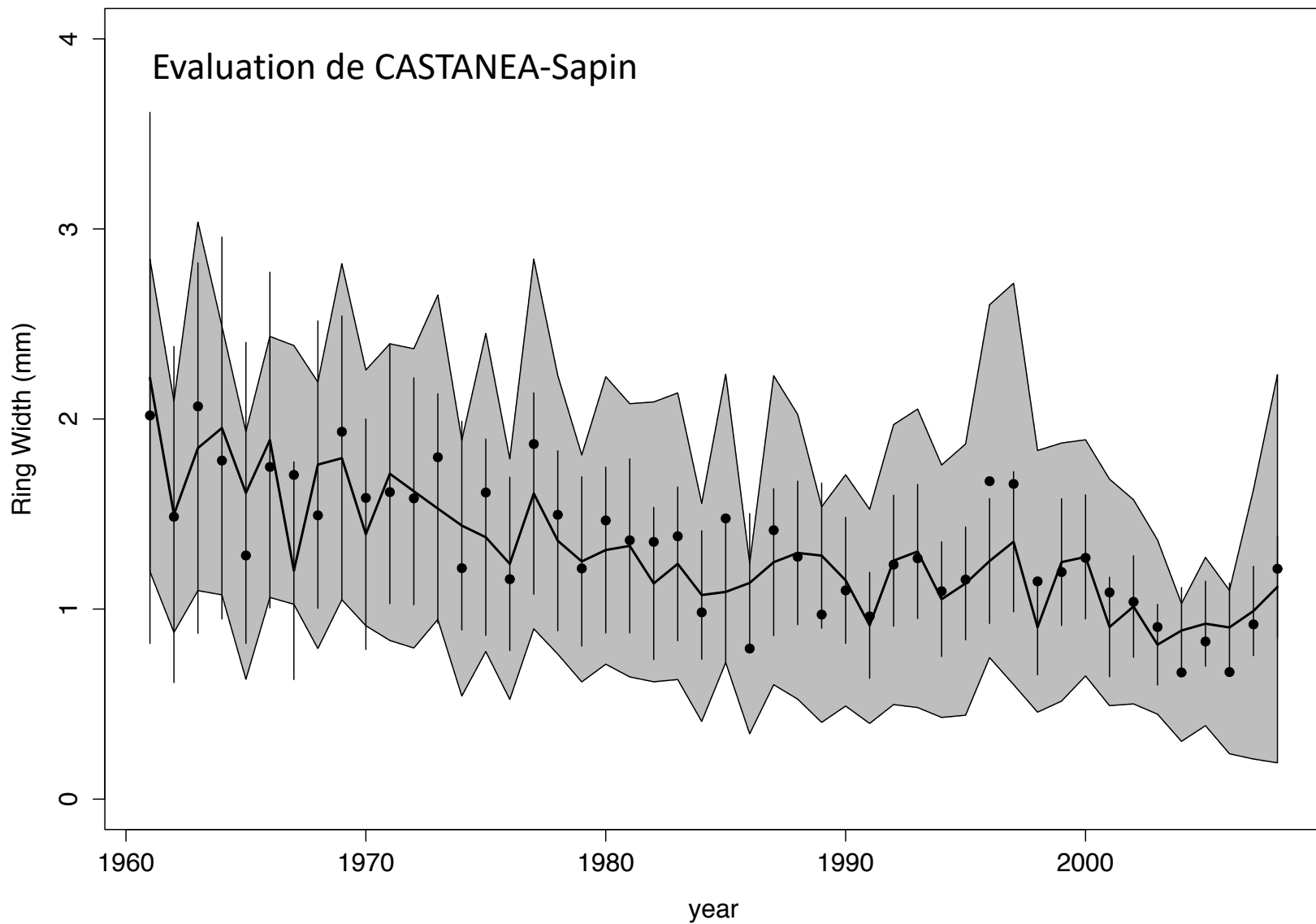
Modéliser le fonctionnement des forêts: Evaluation



Modéliser le fonctionnement des forêts: Evaluation



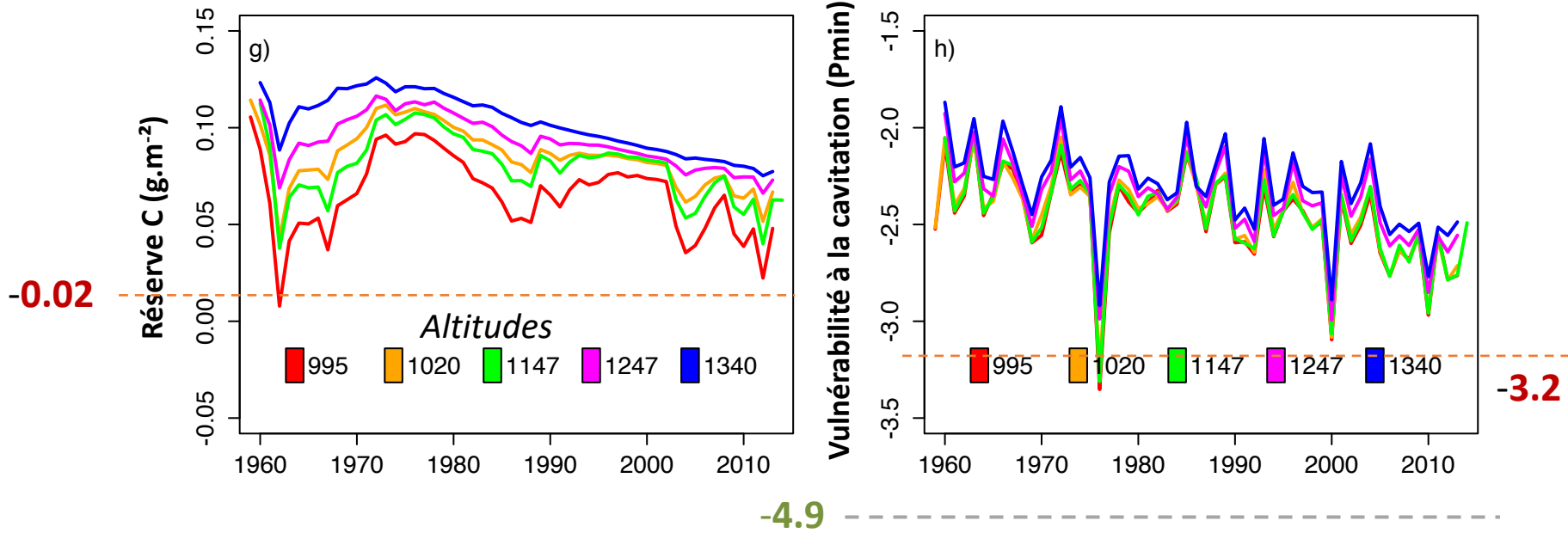
Modéliser le fonctionnement des forêts: Evaluation



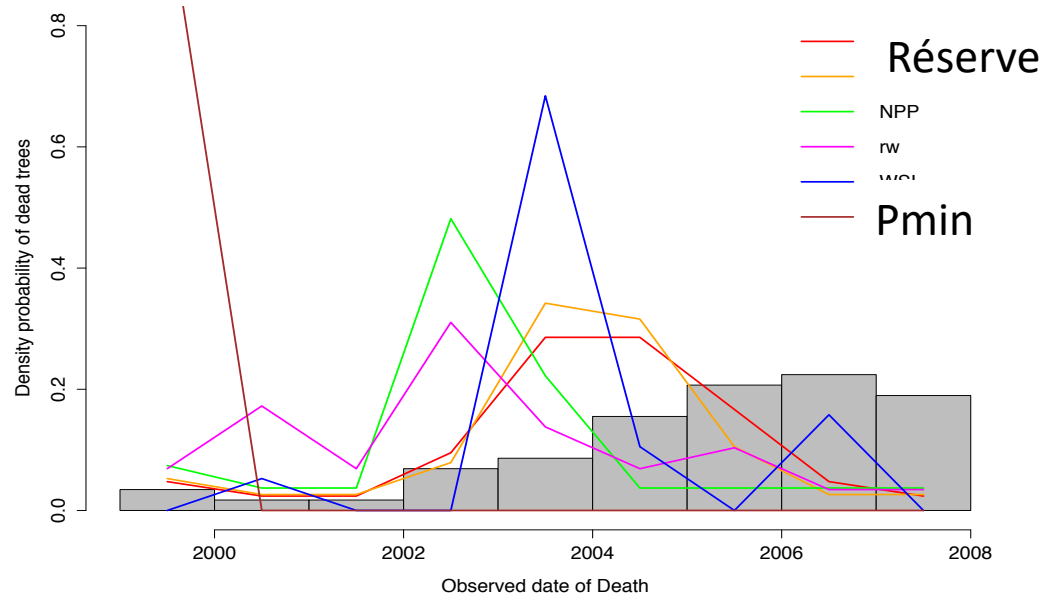
Davi & Cailleret 2017

Modéliser le fonctionnement des forêts: Utilisation

Simulations CASTANEA du fonctionnement de populations de sapin (Davi & Cailleret, 2017 AFM)

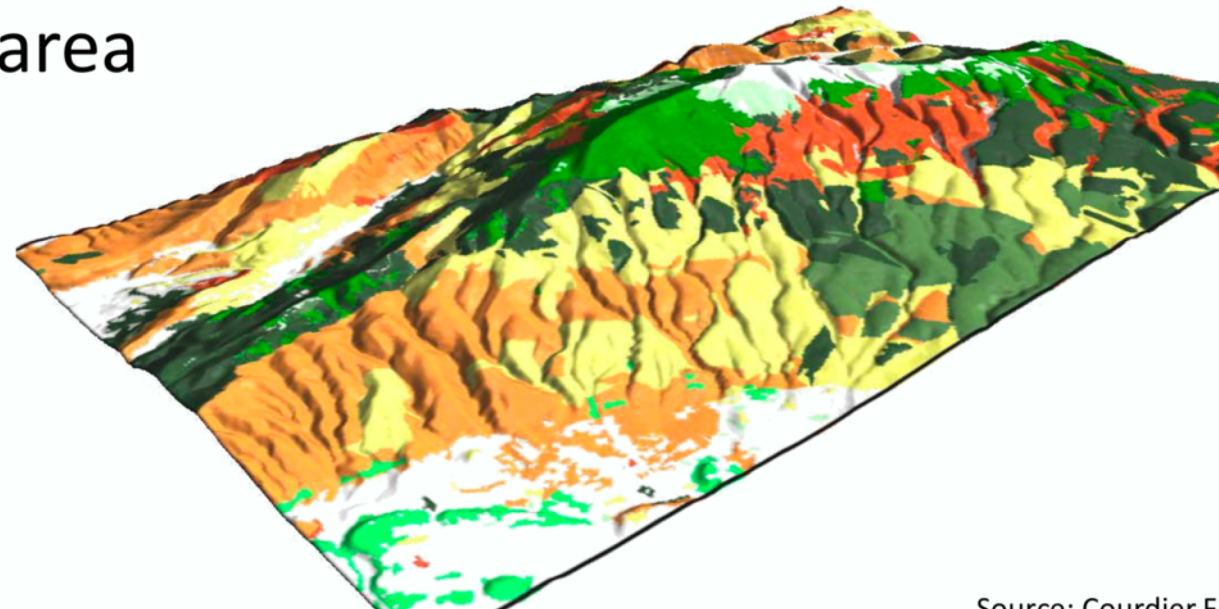
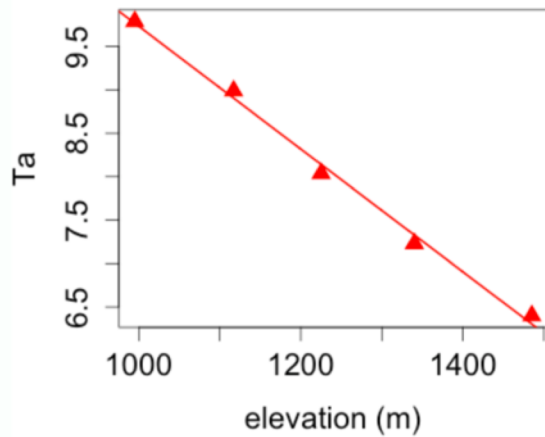
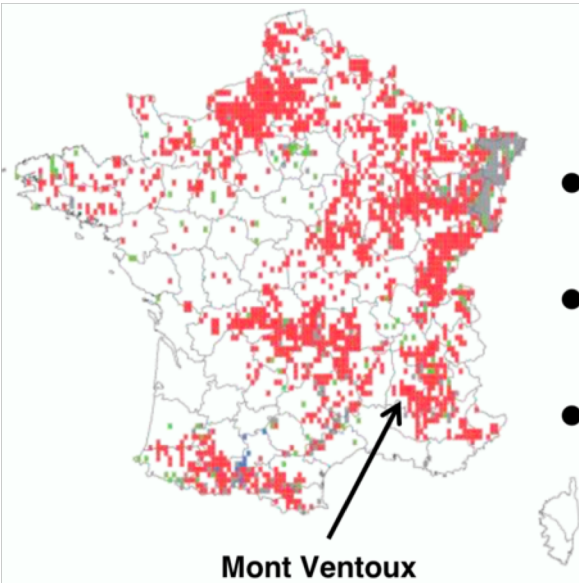


Le niveau de réserve est un meilleur prédicteur de la variation spatiale et temporelle de mortalité
 → Soutient l'hypothèse de mortalité par manque de C



Mont Ventoux, Regional Natural Park

- South-eastern France
- 91600 ha
- 9% of urban area, 34% of agricultural area, 57% of natural area



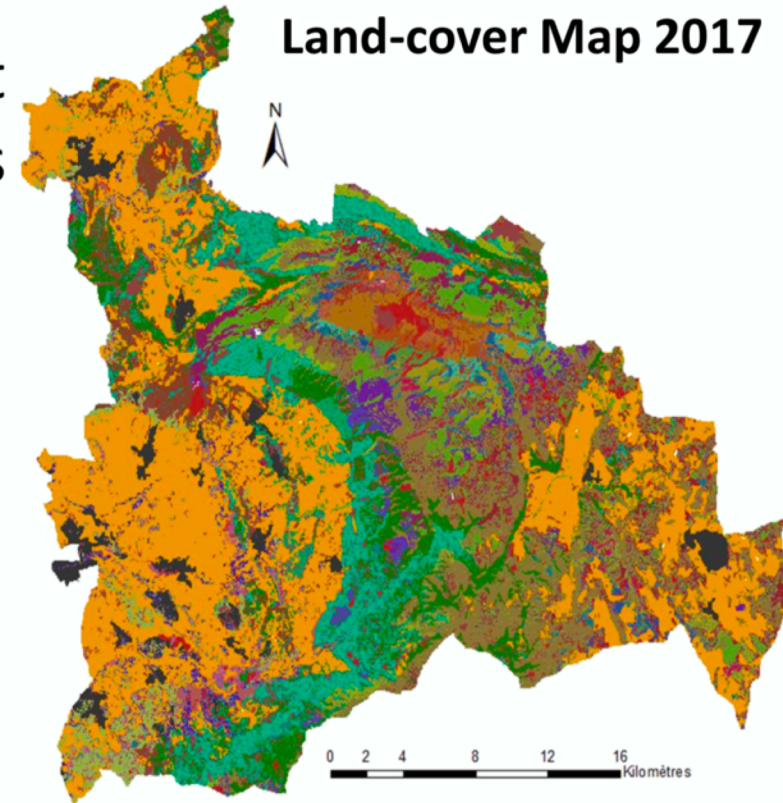
Source: Courcier E

Study area: Mont Ventoux

Mosaic of farmland and forest composed of coniferous, deciduous and sclerophyllous evergreen species



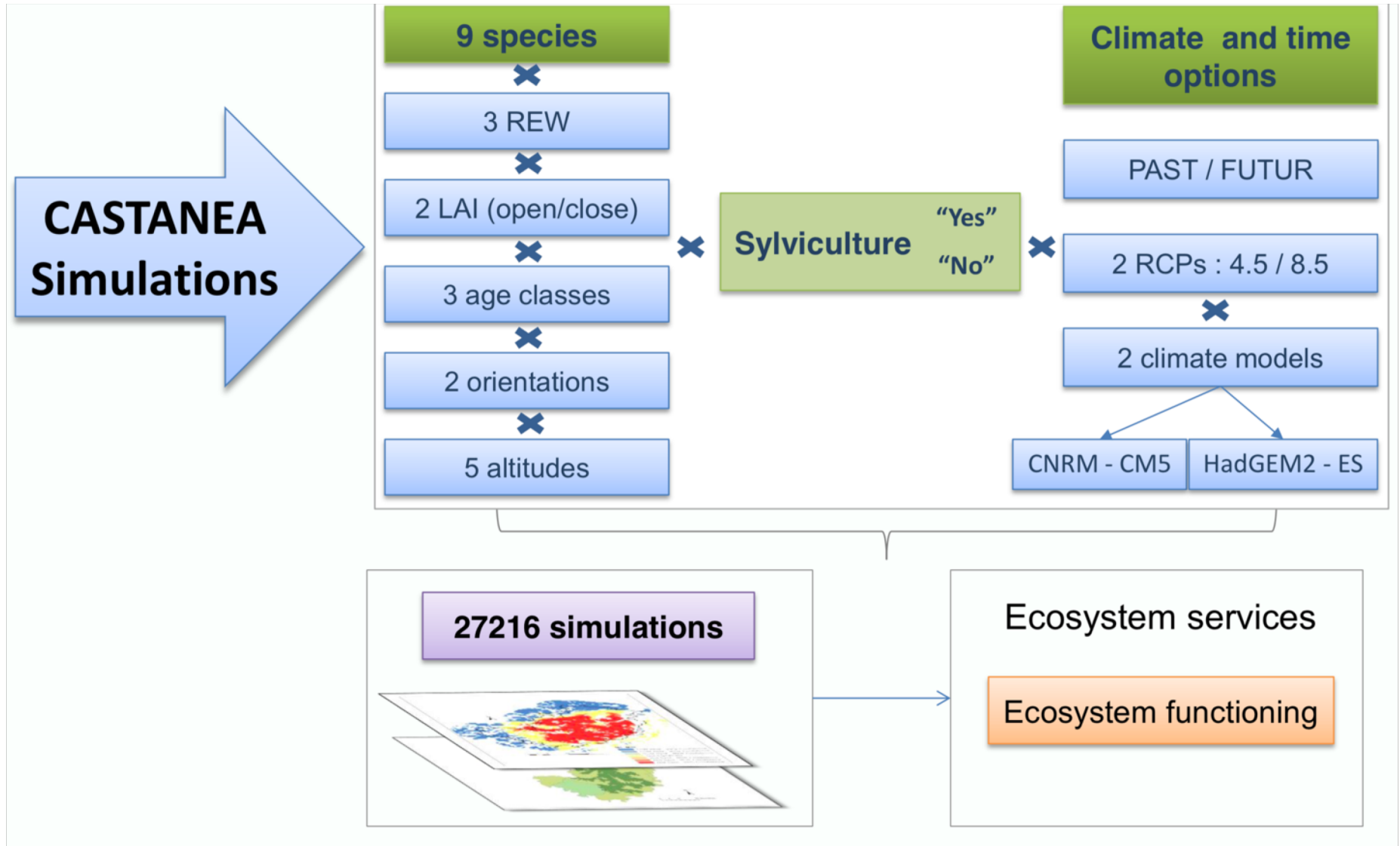
Page 10 sur 38



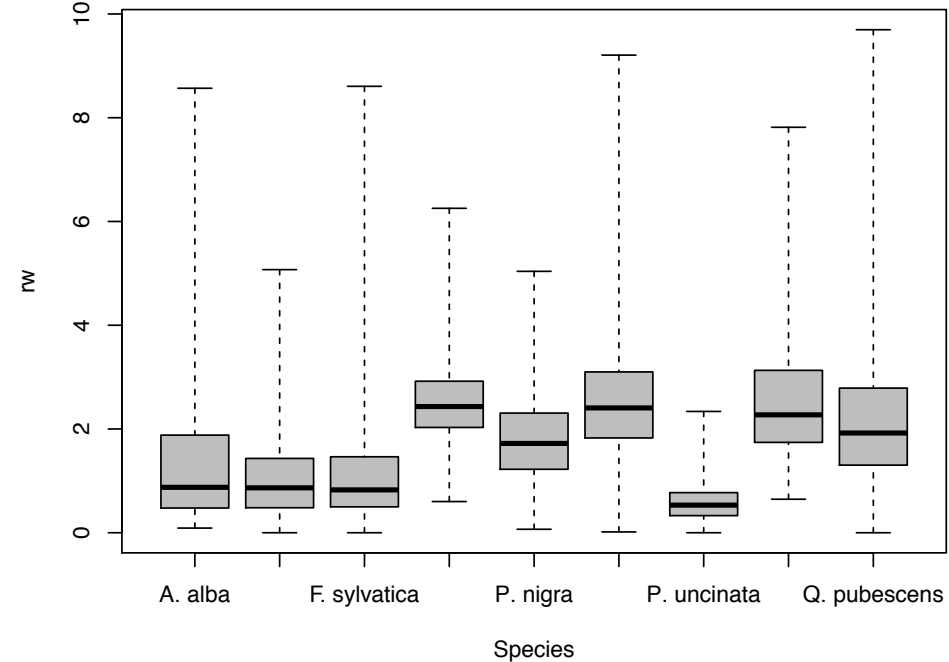
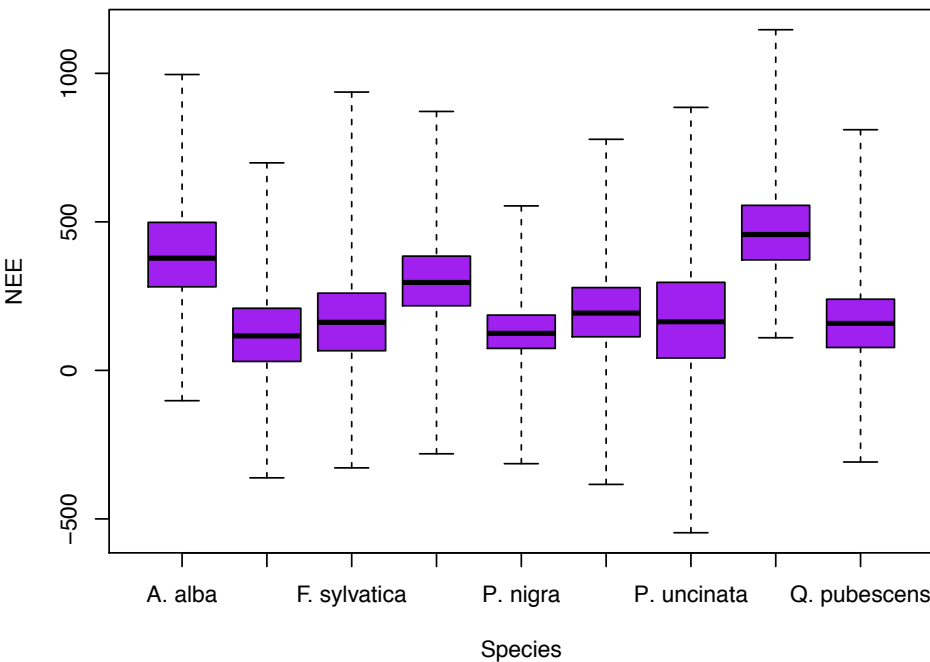
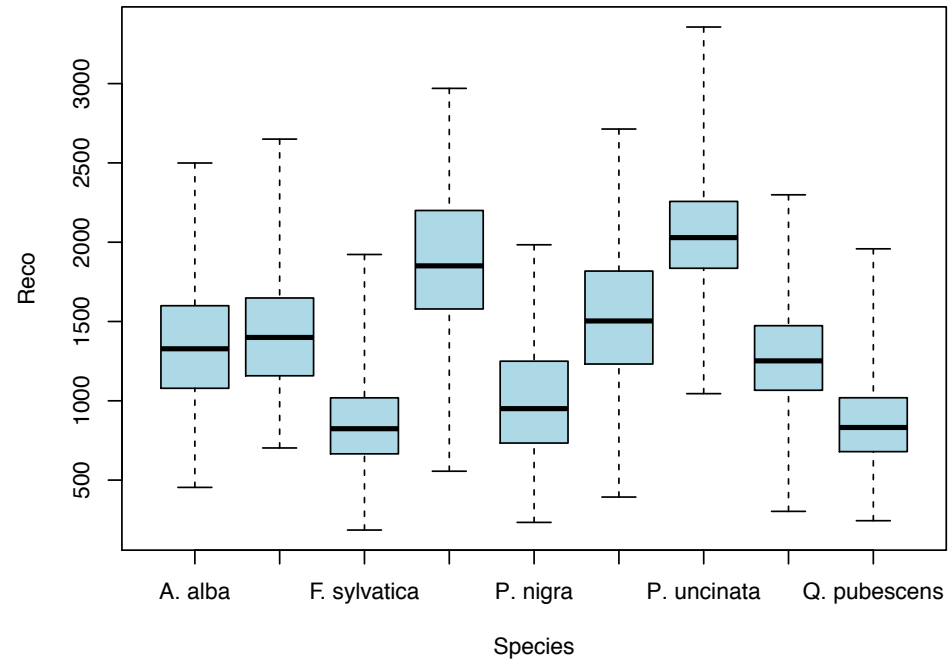
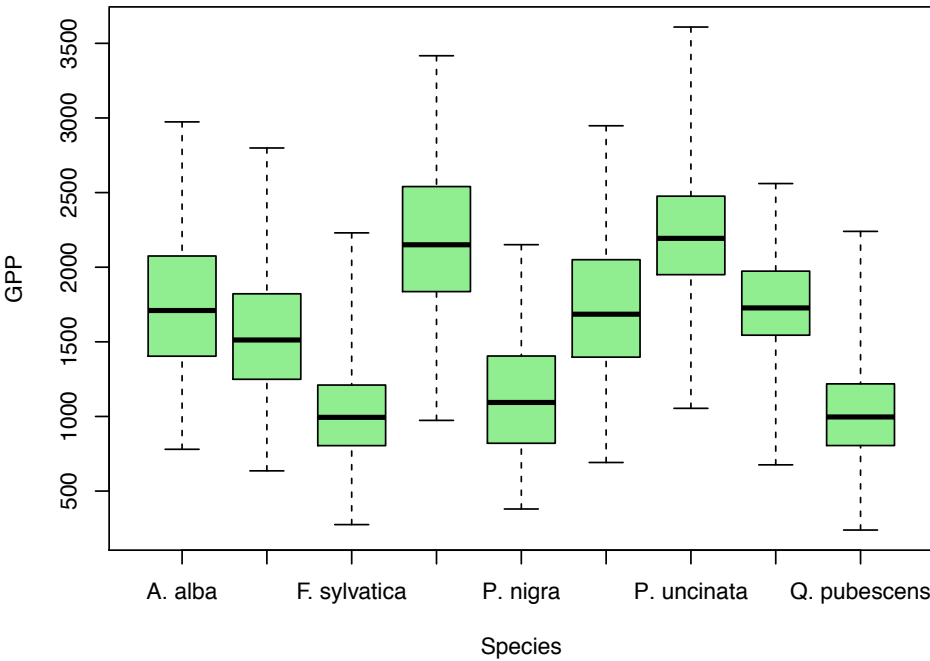
➤ **37 types of Land-covers**
(9 species, 5 altitudinal gradients,
5 aggregate land-covers)

Source: Tuffery L.

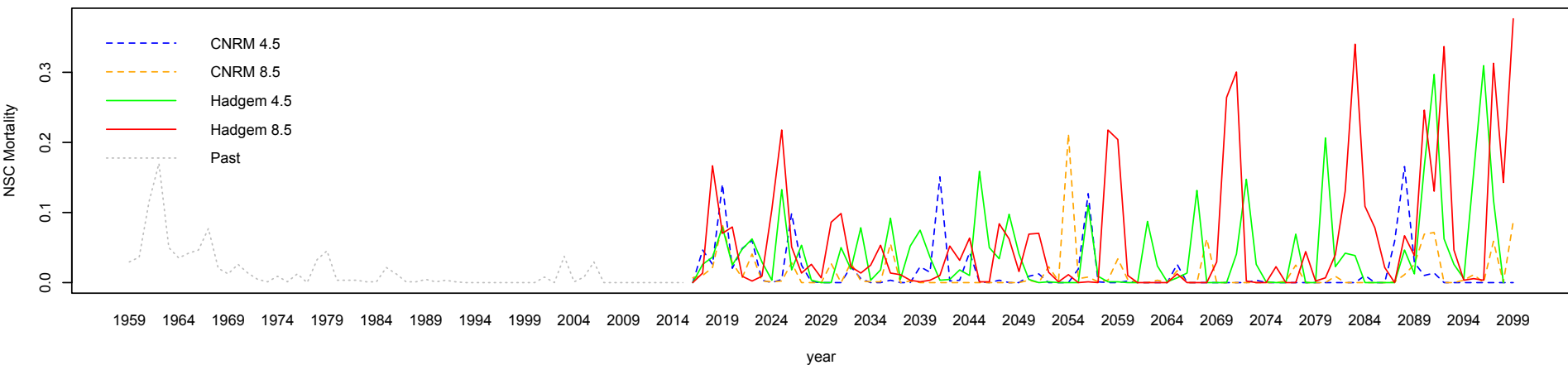
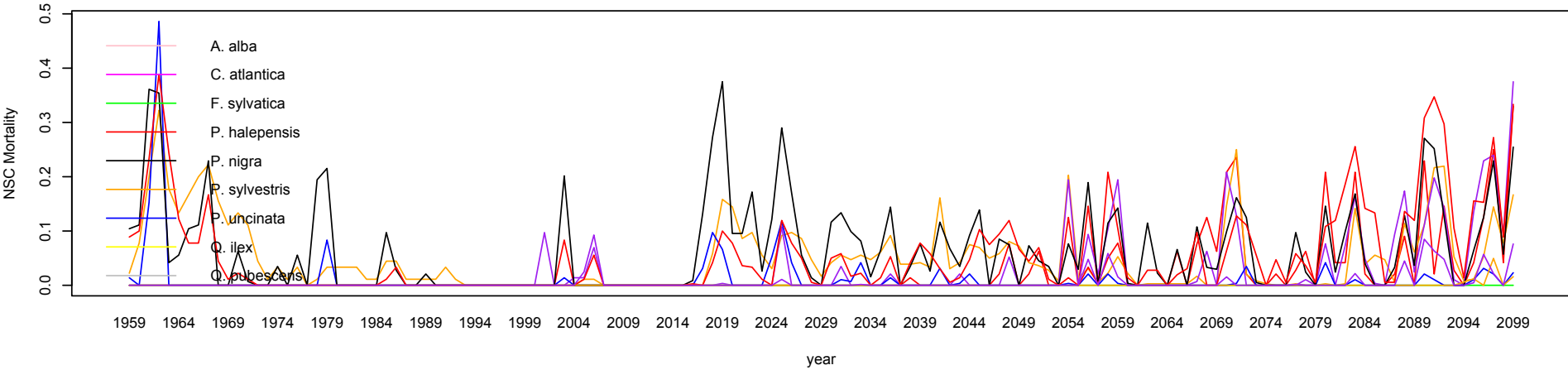
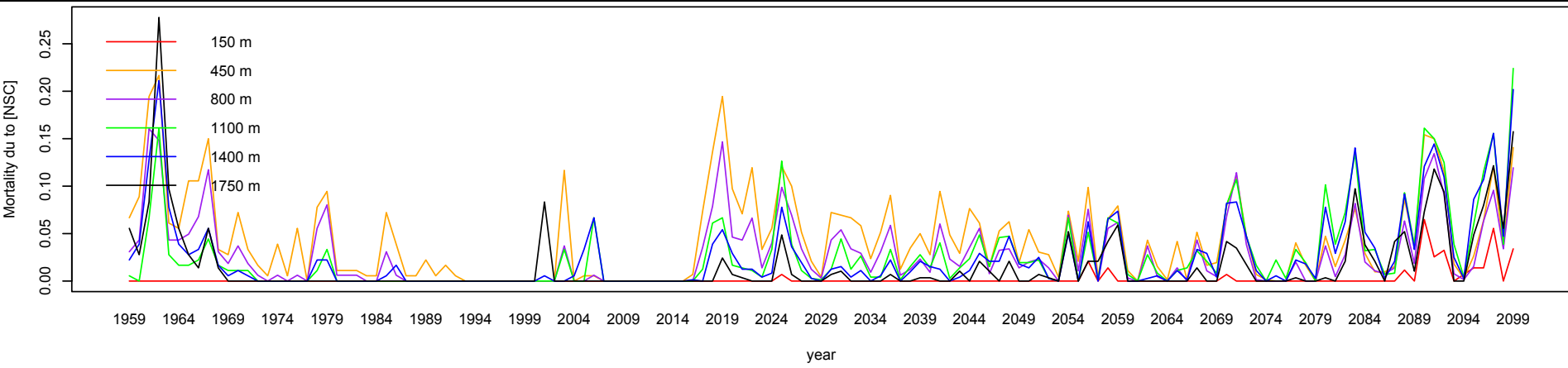
Modéliser le fonctionnement des forêts: Utilisation



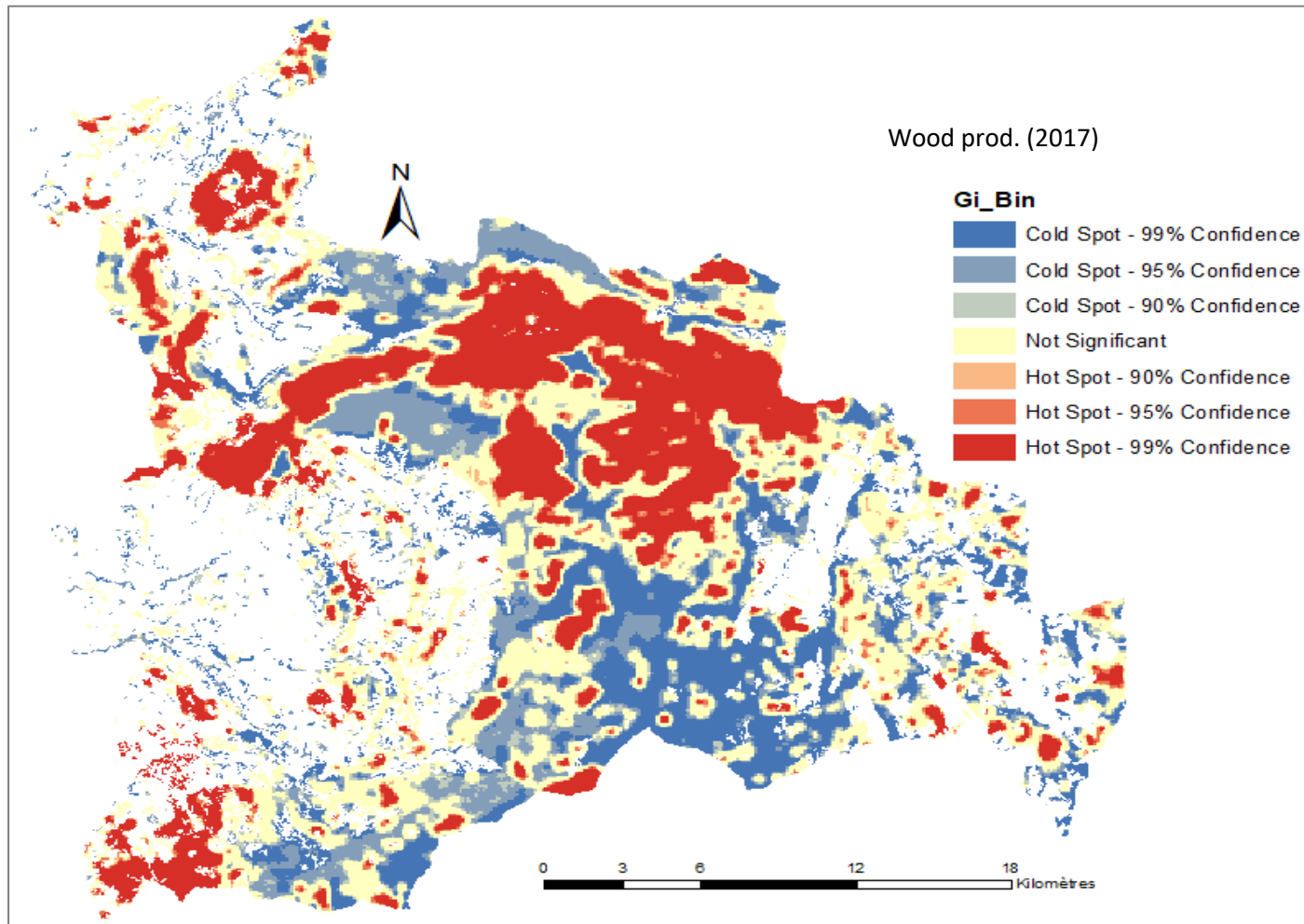
Modéliser le fonctionnement des forêts: Utilisation



Modéliser le fonctionnement des forêts: Utilisation



Modéliser le fonctionnement des forêts: Utilisation



Modéliser l'adaptation des forêts

Plasticité adaptative face au changement climatique (notamment le stress hydrique)

Processus	Effet
Baisse des capacités photosynthétiques	Ajuste les capacités
Baisse de la croissance radiale	Limite le risque de mortalité
Chute des feuilles	Limite la transpiration
Débourrement plus précoce	Rallonge la saison de végétation
Accroissement des racines	Augmente les capacités à puiser l'eau



Effet de la sécheresse sur la chute des feuilles

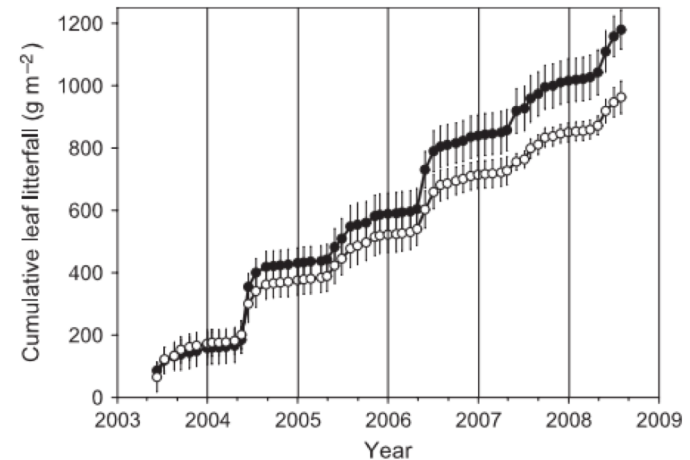
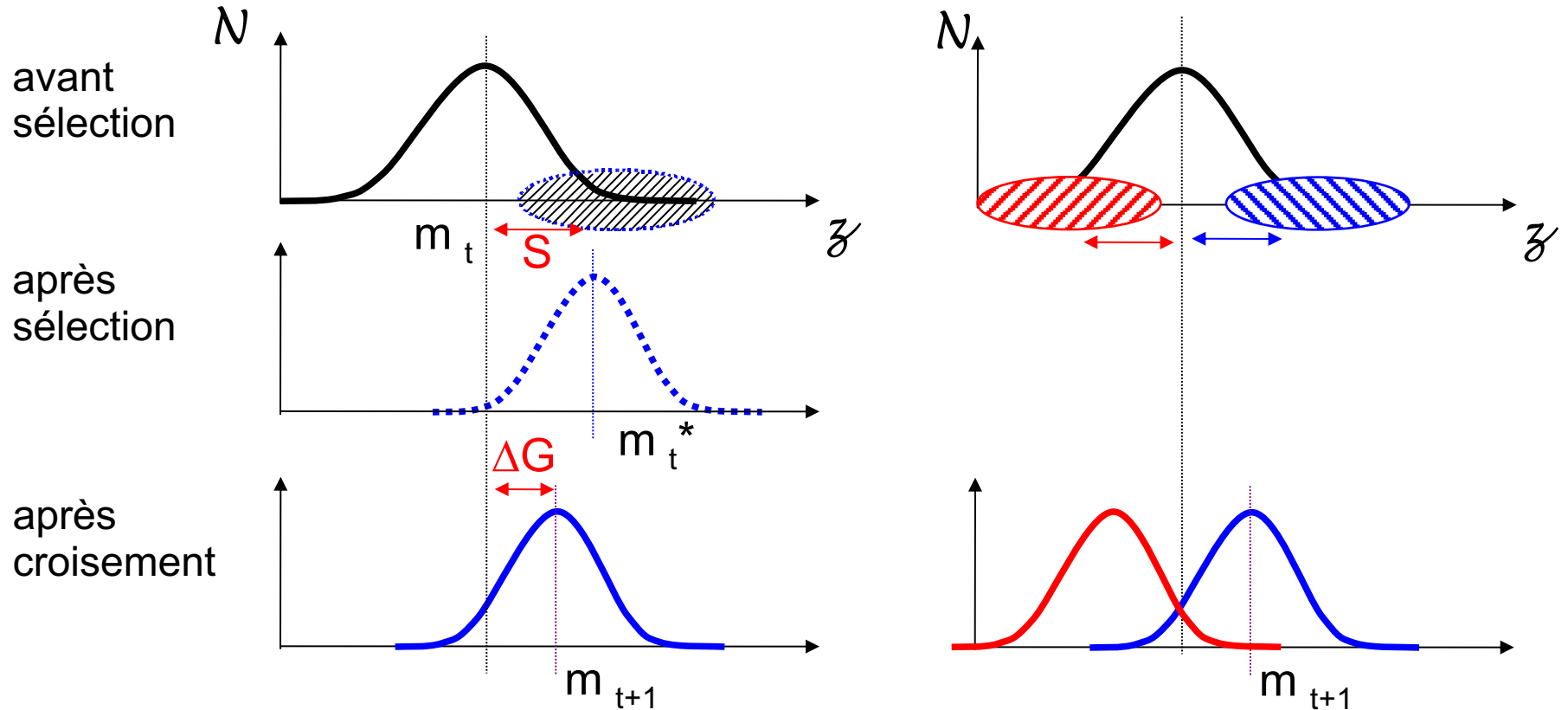


Fig. 8 Cumulative amount of leaf litter fall in the control (closed symbols) and dry treatment (open symbols) from 2003 to 2008. Error bars are standard deviations.

Modéliser l'adaptation des forêts

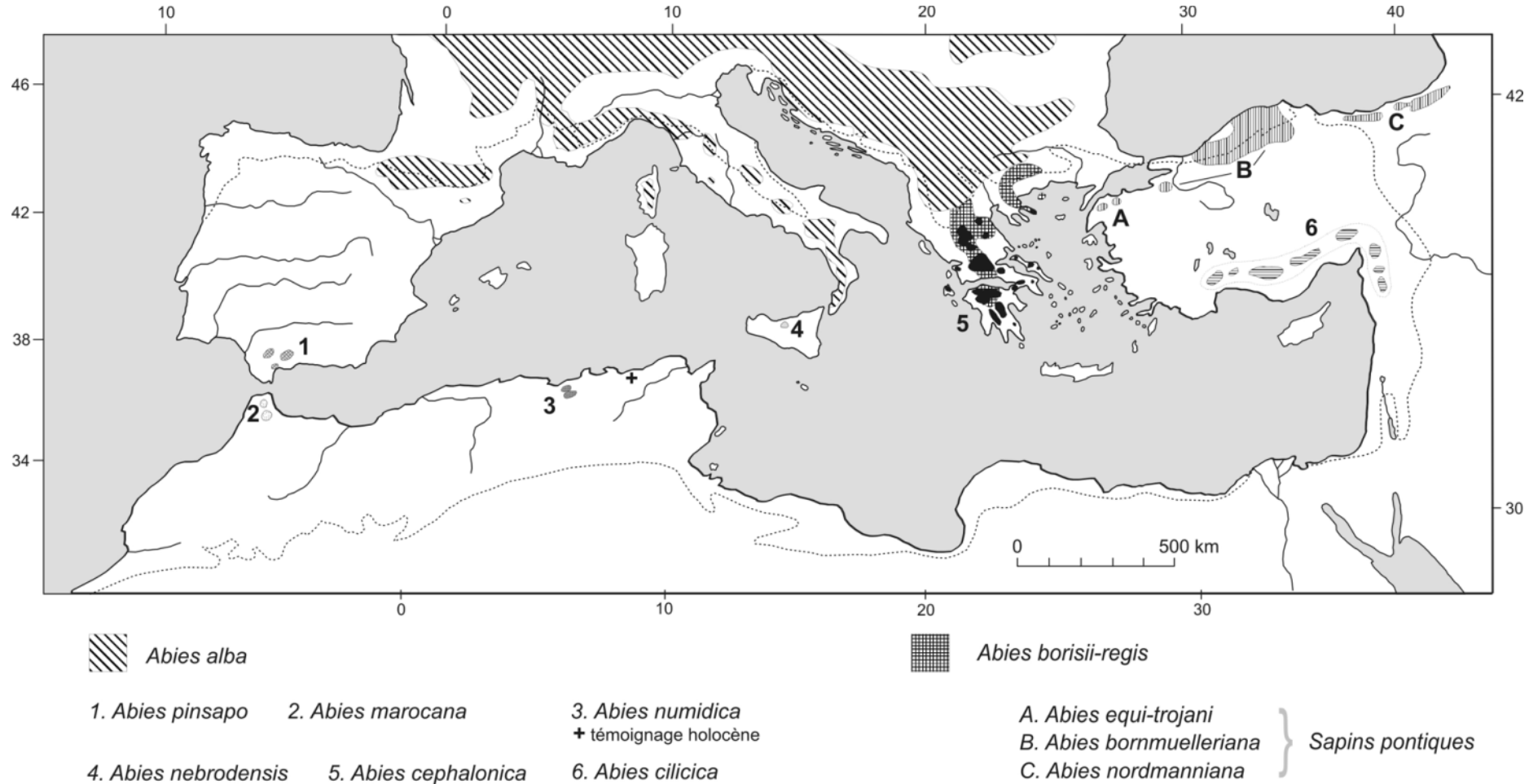
La sélection: un processus populationnel



Fitness différentes: taux survie adultes, reproduction des adultes, survie des semis

Modéliser l'adaptation des forêts

Les sources de la variabilité



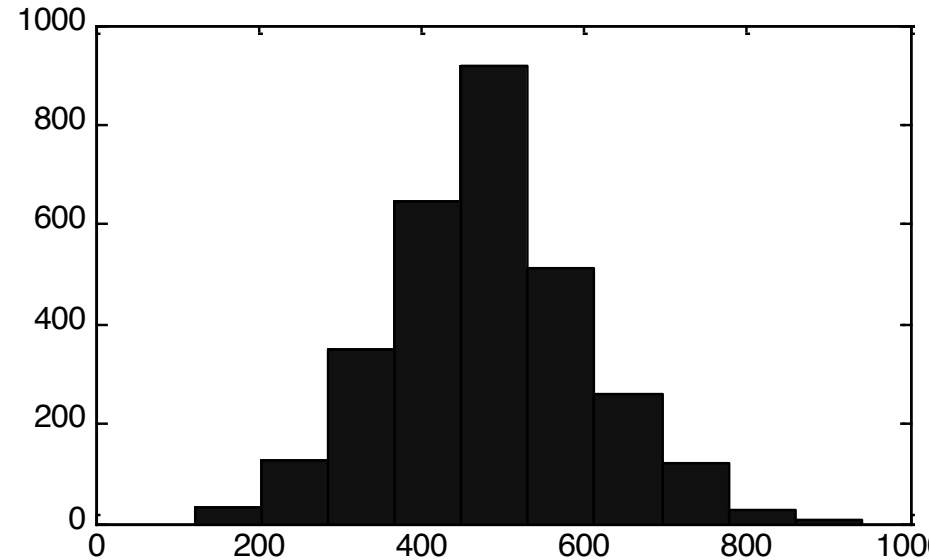
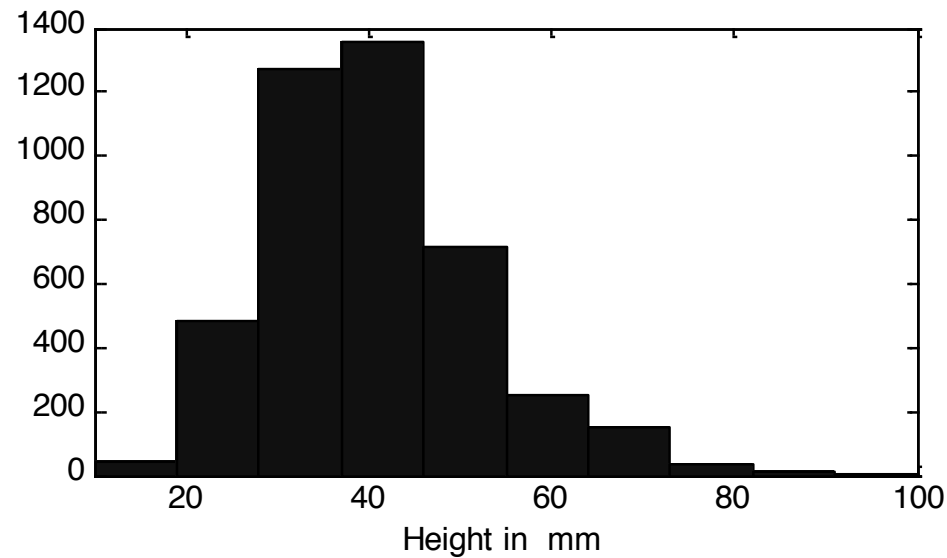
Variations entre individus, populations, espèces
d'origine génétique ou environnementale

Modéliser l'adaptation des forêts

Les sources de la variabilité

Distribution des hauteurs à 4 ans dans une plantation comparative de Sapin de Céphalonie

Distribution des hauteurs à 21 ans dans une plantation comparative de Sapin de Céphalonie

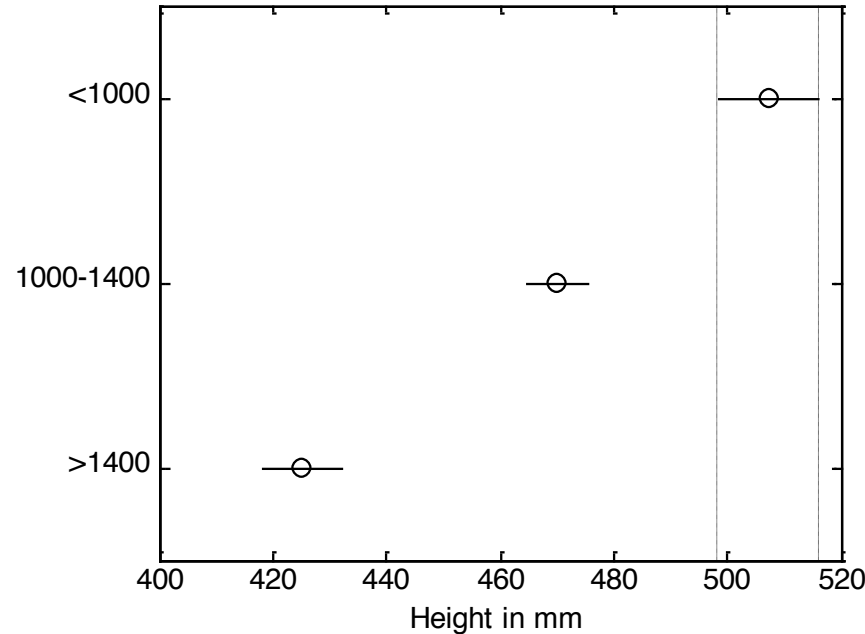
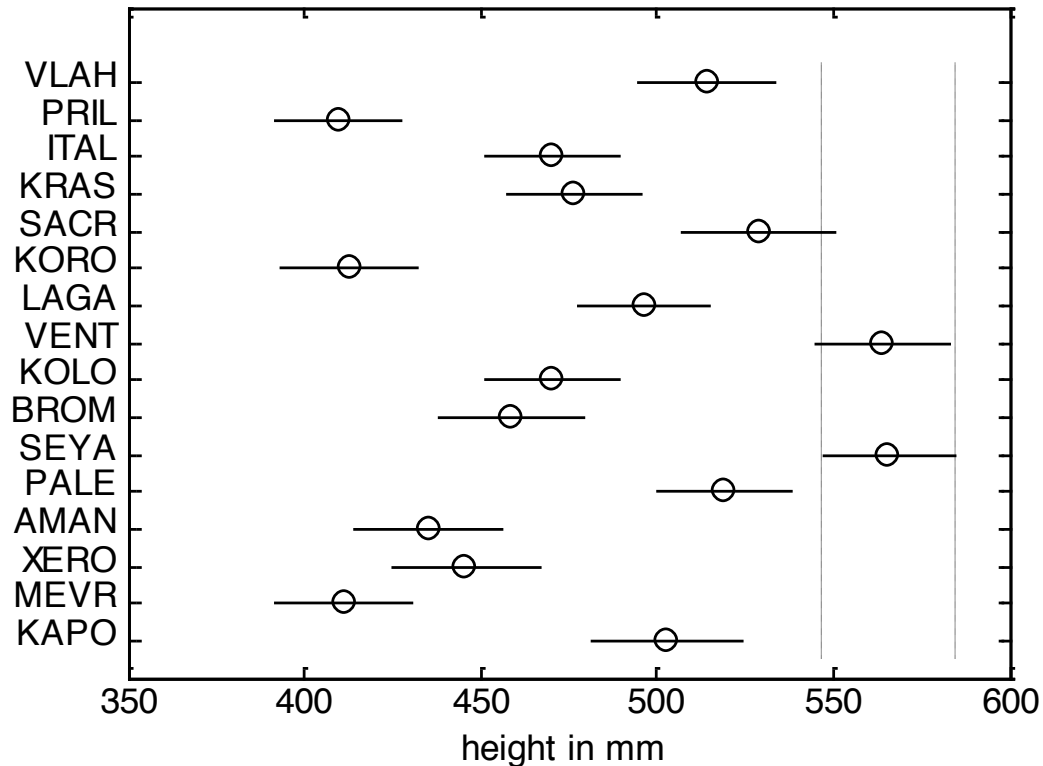


Cela va de 10 cm à 1m avec $\text{std}=1.8$ cm

Cela va de 1 m à 9m

Modéliser l'adaptation des forêts

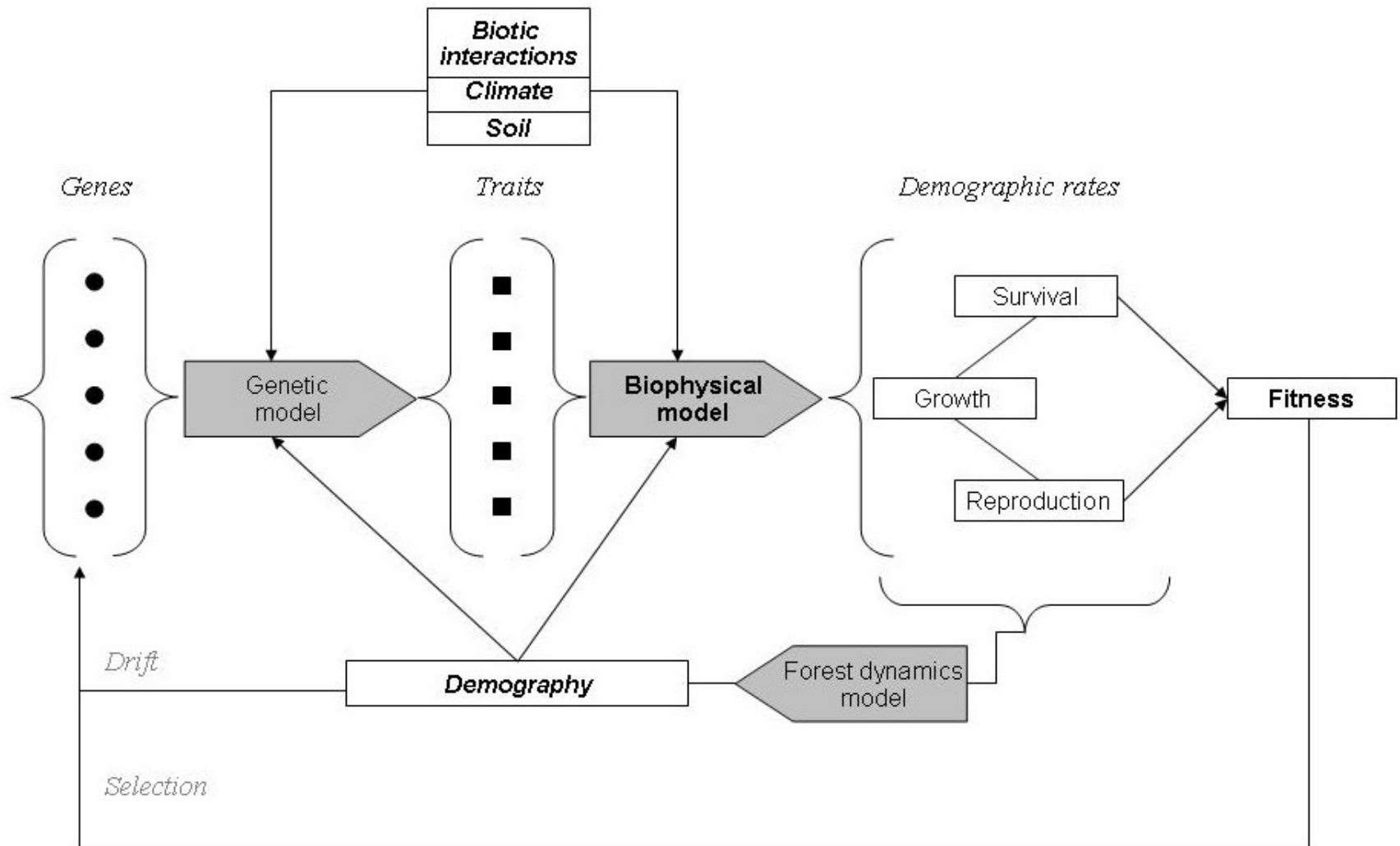
Les sources de la variabilité



Effet altitude de la provenance

Les provenances de basses altitudes ont eu une meilleur croissance juvénile en hauteur en plantation comparative

Modéliser l'adaptation des forêts



PDG, a new hybrid model

CASTANEA

Dufrêne et al. 2005

La partie de l'image avec l'ID de relation r04 n'a pas été trouvée dans le fichier.

La partie de l'image avec l'ID de relation r04 n'a pas été trouvée dans le fichier.

La partie de l'image avec l'ID de relation r04 n'a pas été trouvée dans le fichier.

La partie de l'image avec l'ID de relation r04 n'a pas été trouvée dans le fichier.

La partie de l'image avec l'ID de relation r04 n'a pas été trouvée dans le fichier.

Fecundity = f(reserves)

ADULTS

Ovules

Pollen

Growth/ mortality

Date of Budburst

ADULTS

Dispersal

-pollen dispersal kernel

Density-dependence mortality

Mating system (2% selfing)

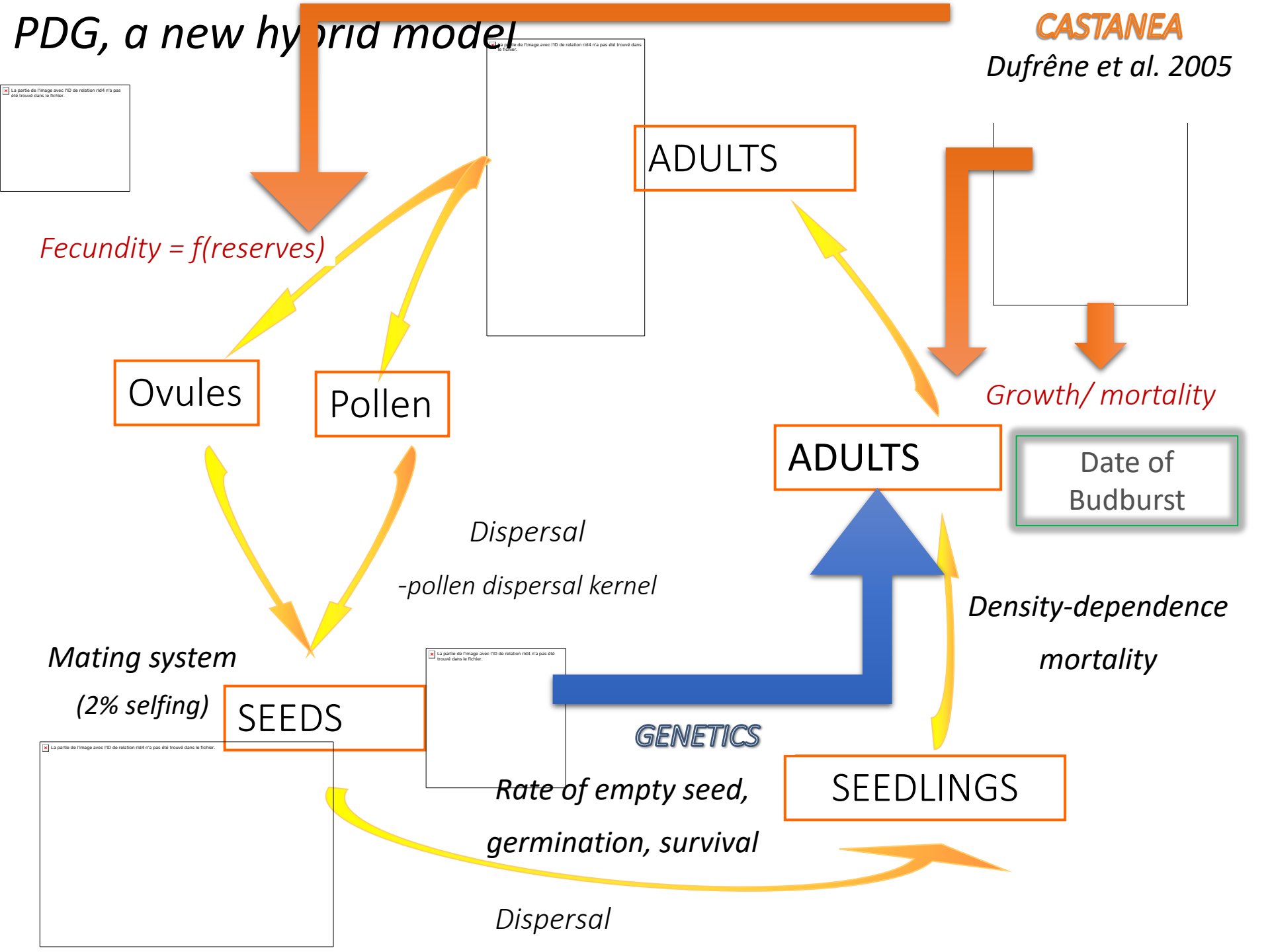
SEEDS

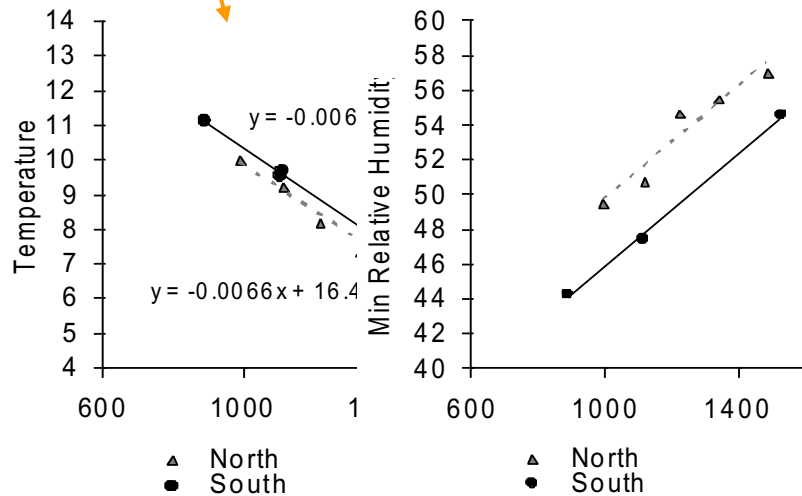
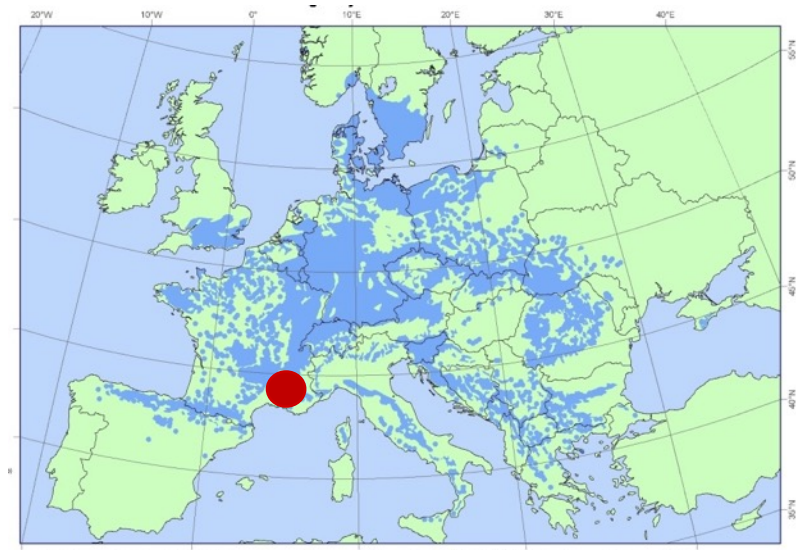
GENETICS

Rate of empty seed, germination, survival

SEEDLINGS

Dispersal





Date de débourrement (TBB)

Early trees (\searrow TBB)

↗ saison de croissance

↗ gel tardif



Efficience d'utilisation de l'eau (EUE)

↗ EUE => conservation des ressources

↘ EUE => acquisition des ressources

Modéliser l'adaptation des forêts

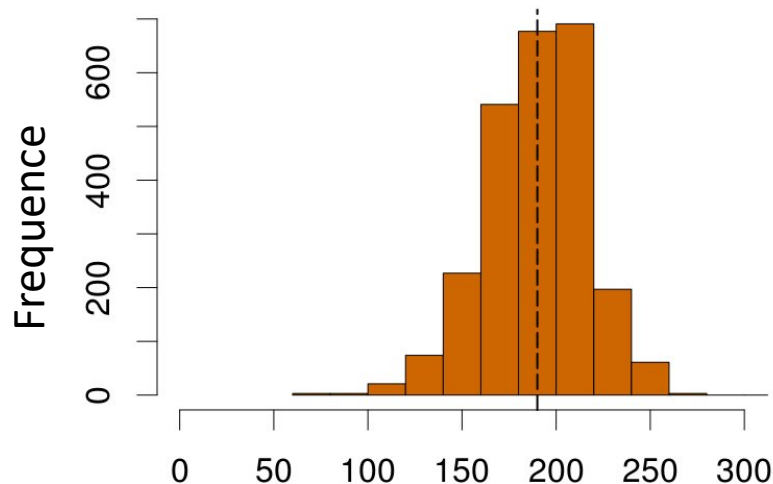
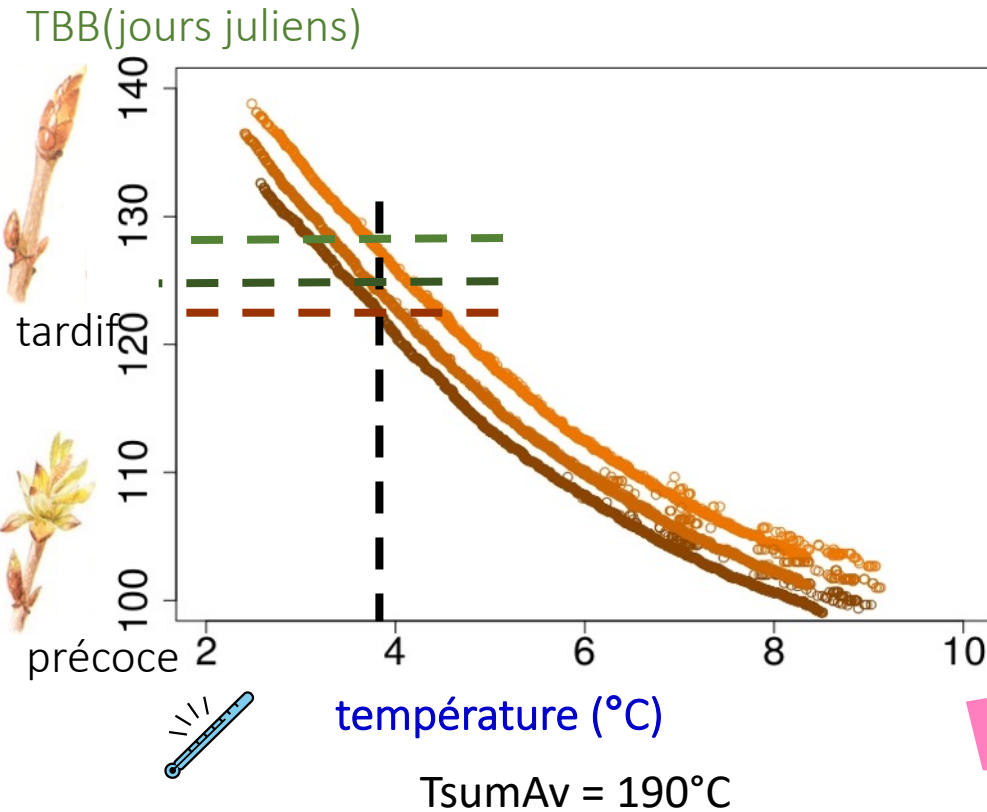
Differentes somme des températures requis pour débourrer

Tsum= 210

Tsum= 190

Tsum= 170

$$TBB = f(T + Tsum)$$

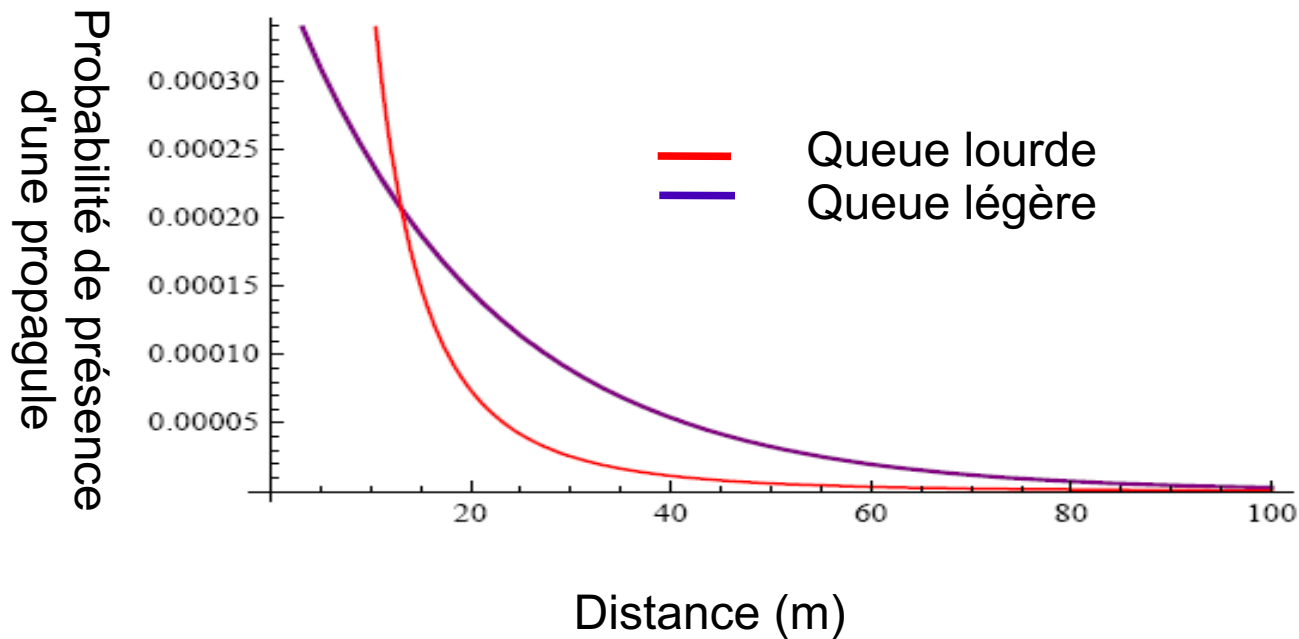


The parameter Tsum of the biophysical model is genetically based and variable

- 10 gènes non liés, 2 allèles /gene (=10 SNPs)
- Effet de chaque gène suit une distribution gaussienne

Modéliser l'adaptation des forêts

Densité de probabilité de la position finale de la propagule émise (pollen ou graine) relativement à la position de l'adulte dont elle est issue.



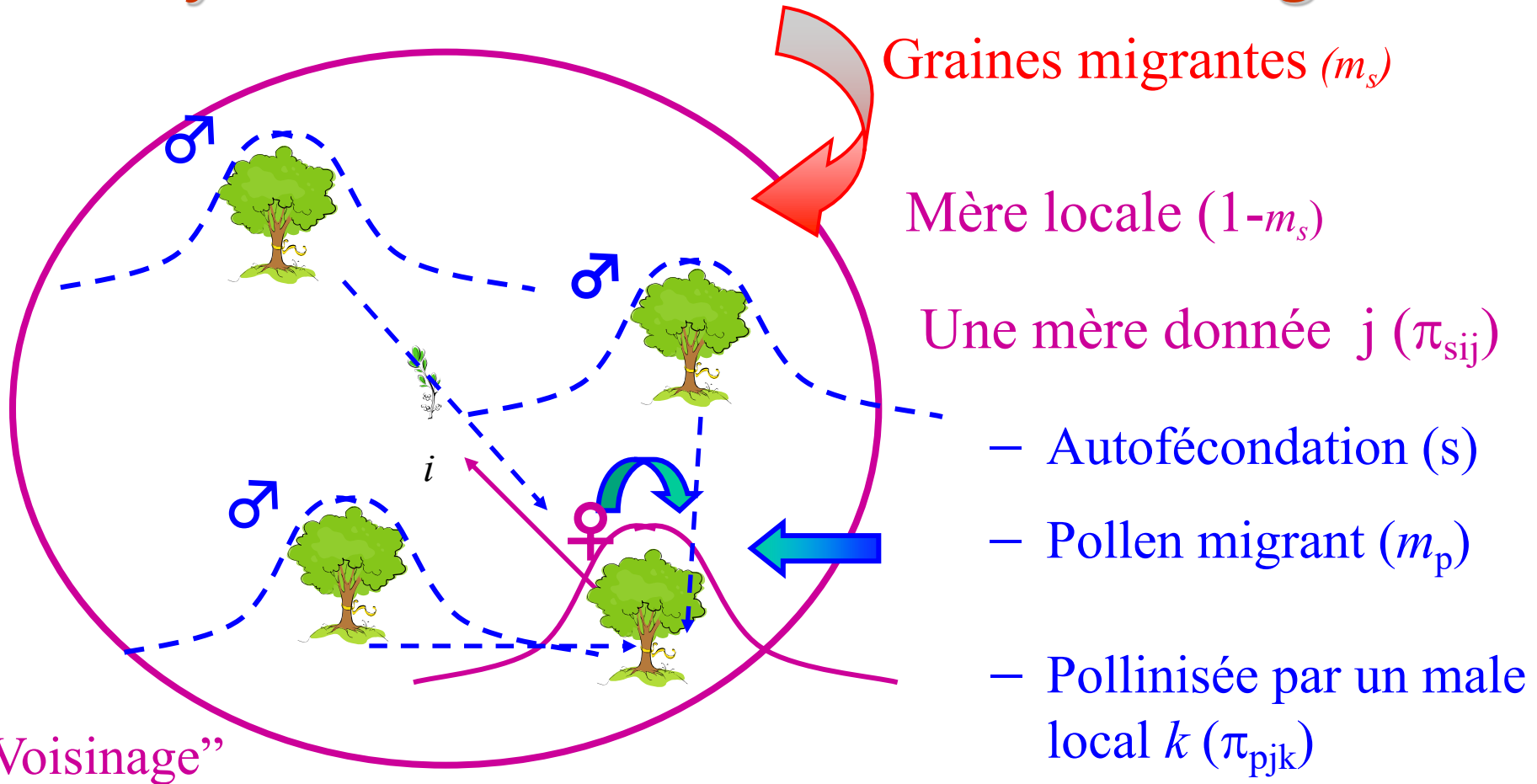
Famille des exponentielles puissance

$$p(a, b; x, y) = \frac{b}{2\pi^2 a^2 \Gamma(2/b)} \exp\left(-\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{a}\right)^b\right)$$

b = paramètre de forme

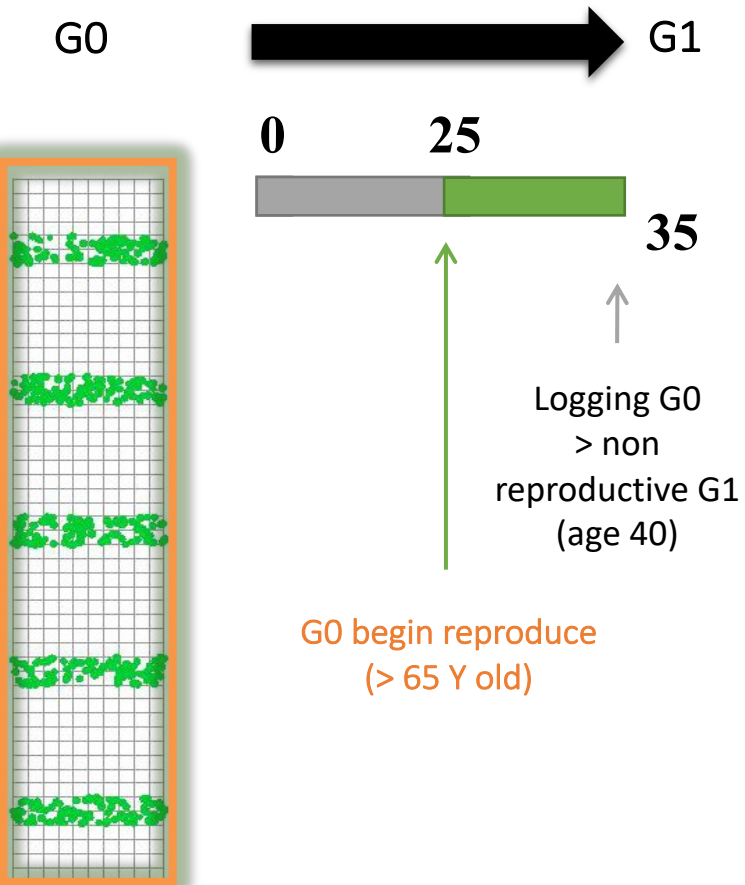
a = paramètre d'échelle,
proportionnel à D , distance
moyenne de dispersion

Analyse de croisement dans le voisinage



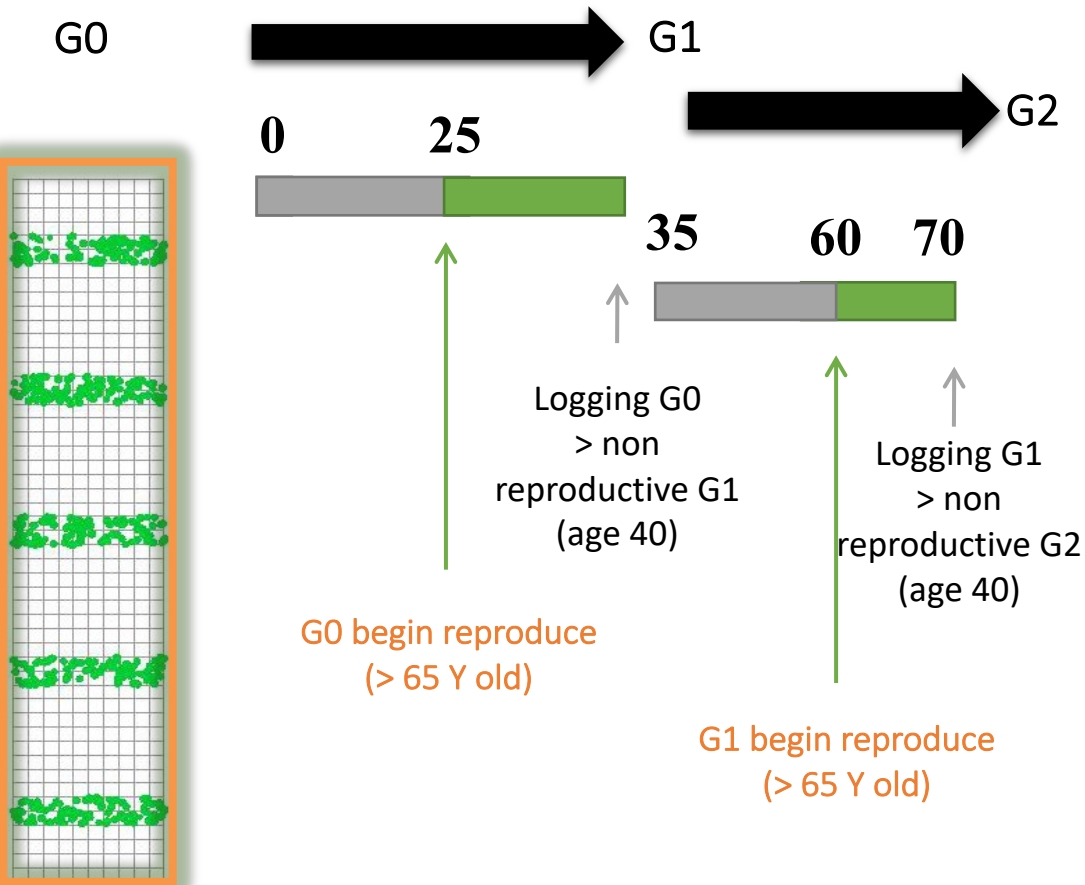
⇒ Estimation des fonctions de dispersion et de tous les paramètres à partir des données de génotypes et coordonnées spatiales des semis, sachant les génotypes et coordonnées des adultes

Modéliser l'adaptation des forêts



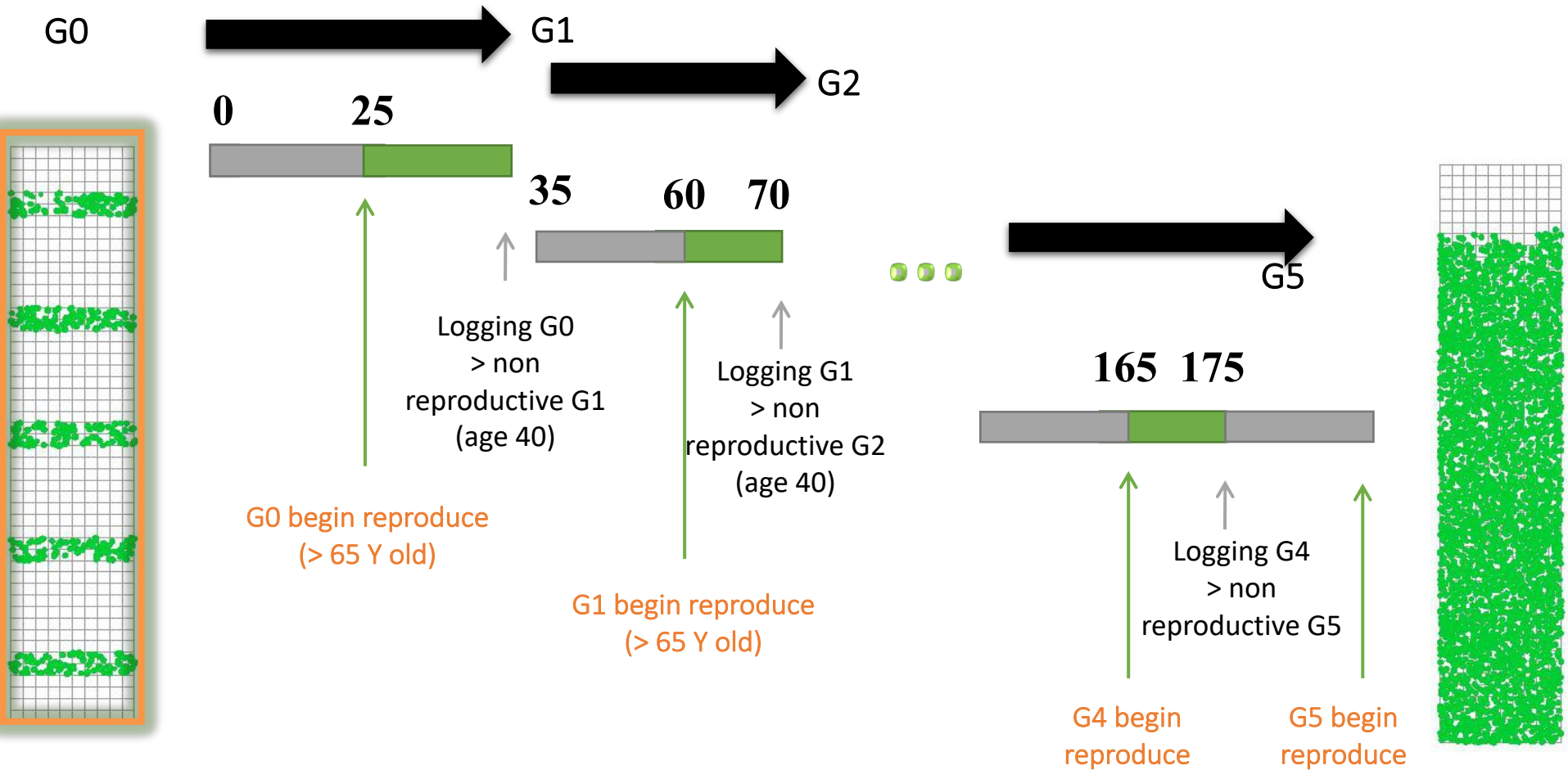
Plan de simulation: générations non chevauchantes

Modéliser l'adaptation des forêts



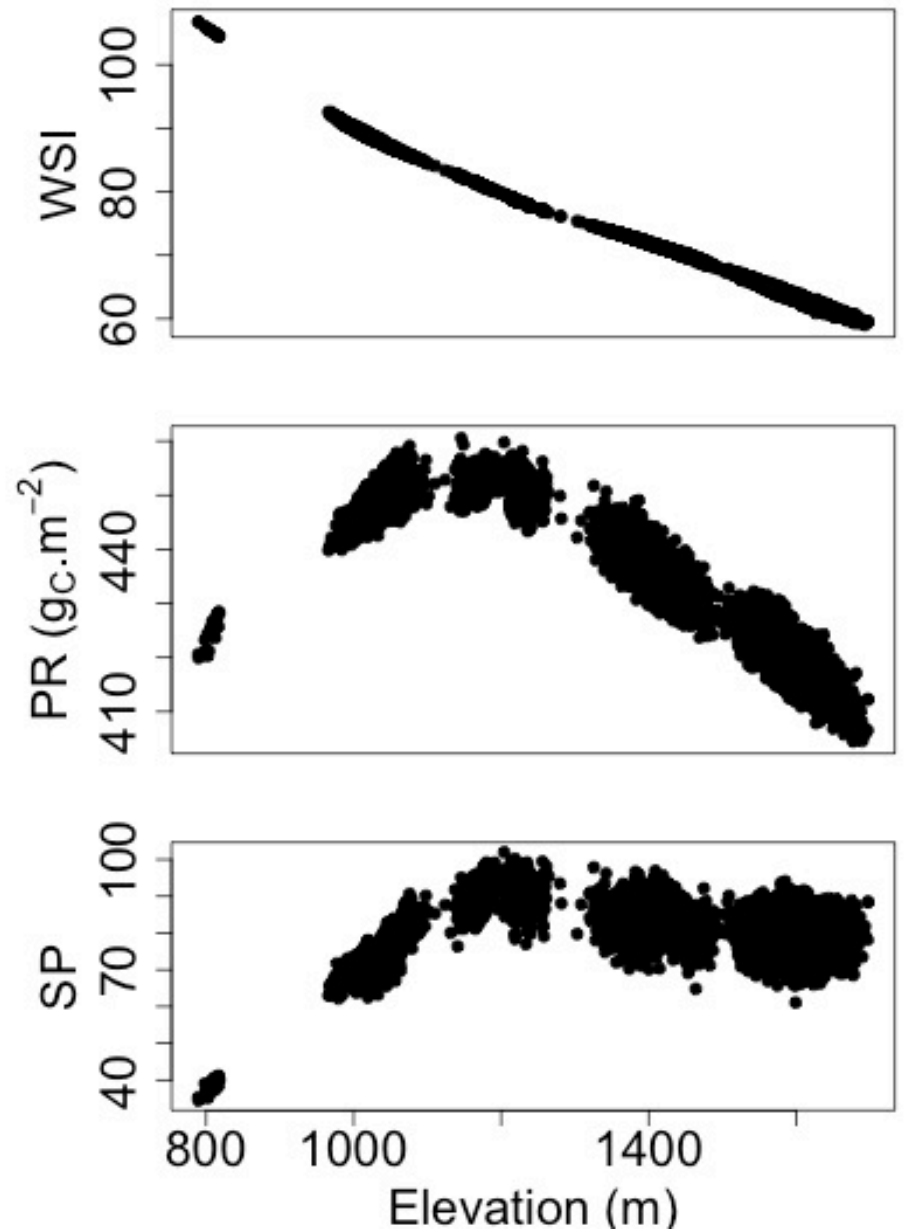
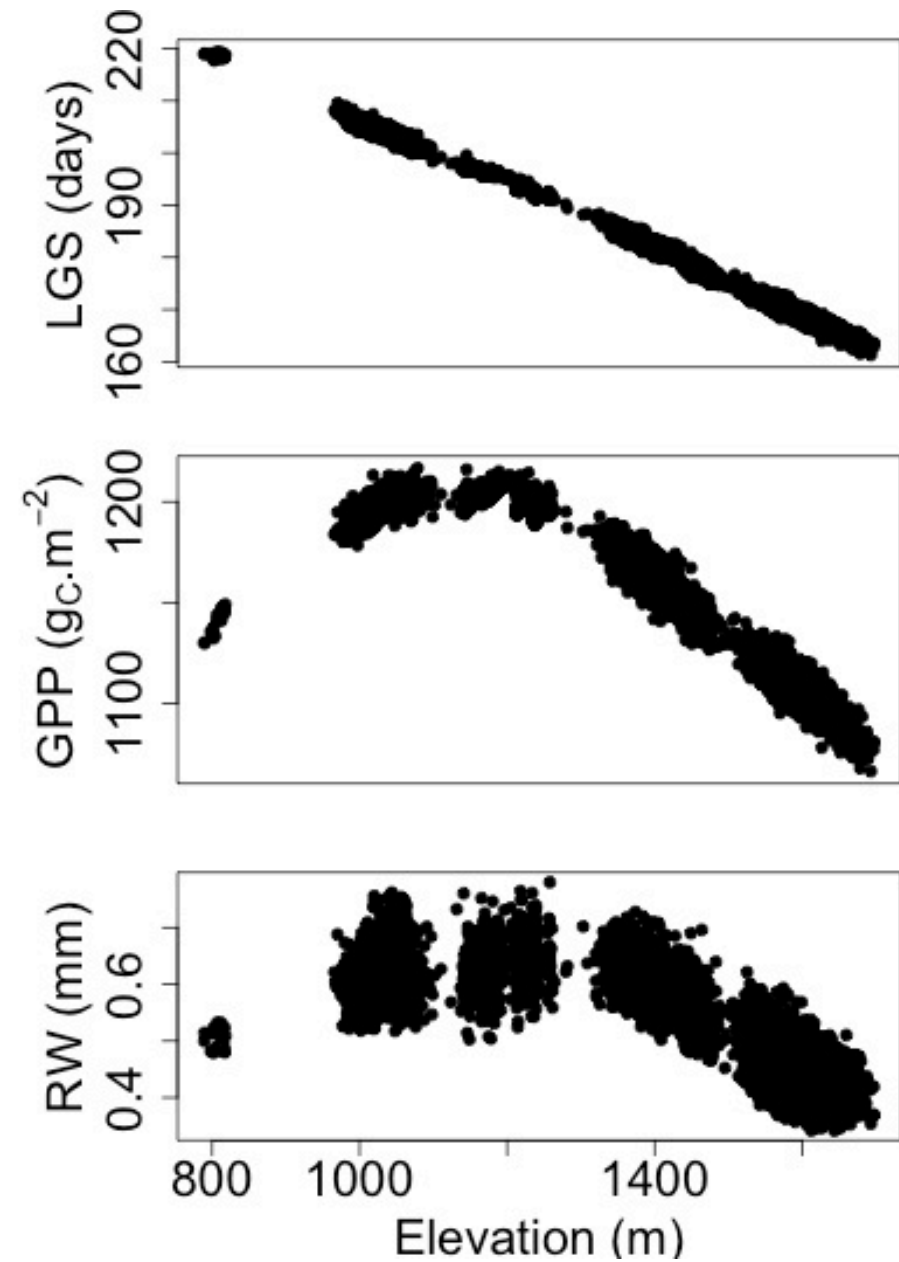
Plan de simulation: générations non chevauchantes

Modéliser l'adaptation des forêts



Plan de simulation: générations non chevauchantes

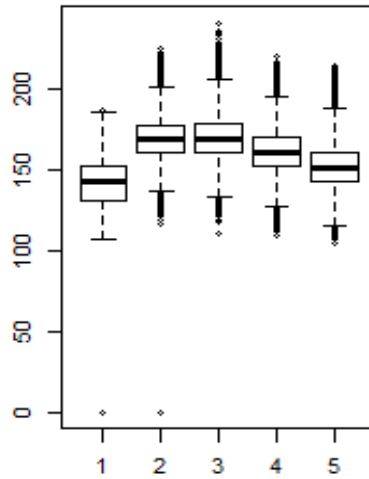
Modéliser l'adaptation des forêts



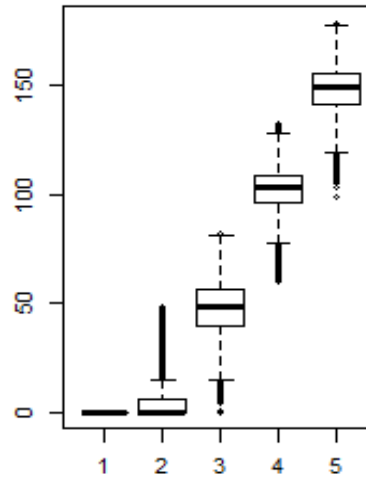
Modéliser l'adaptation des forêts

Production de graines

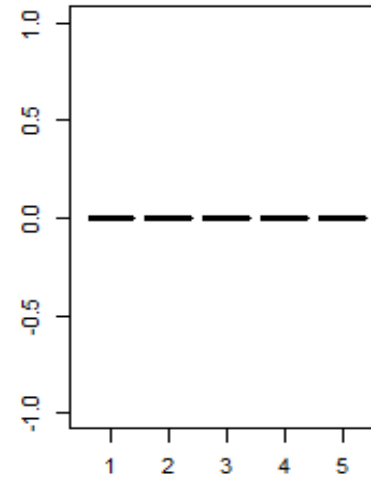
2002



2003

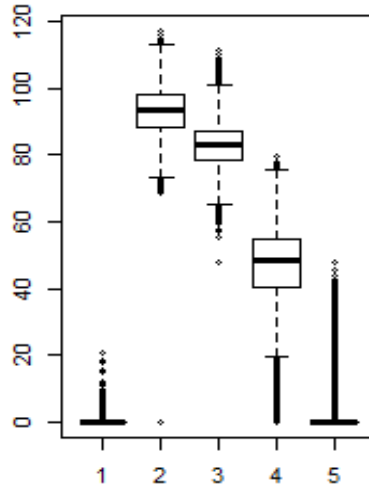


2004

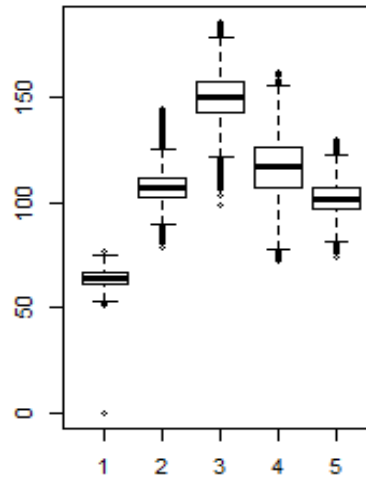


Populations 800->1600 m

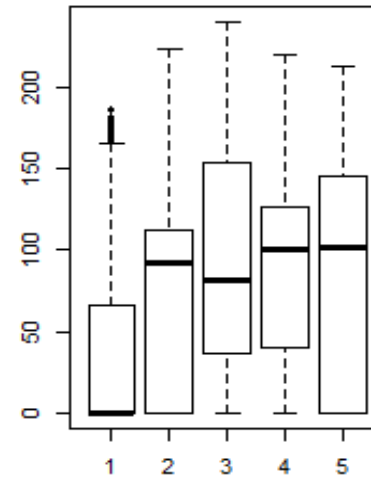
2005



2006



all years

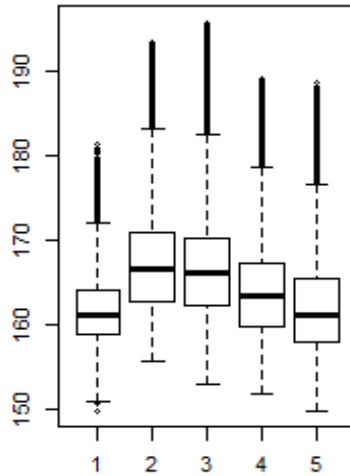


Populations 800->1600 m

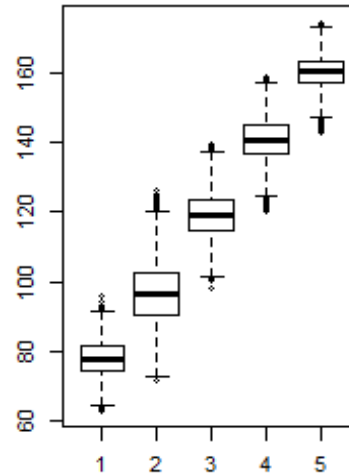
Modéliser l'adaptation des forêts

Réserves carbonées à la fin de l'année

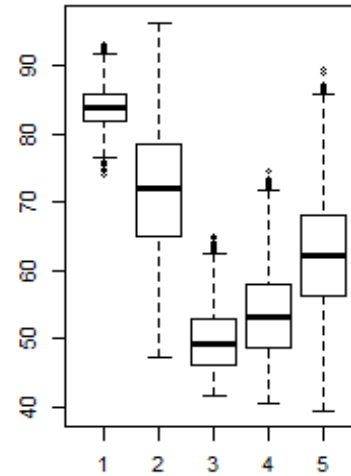
2002



2003

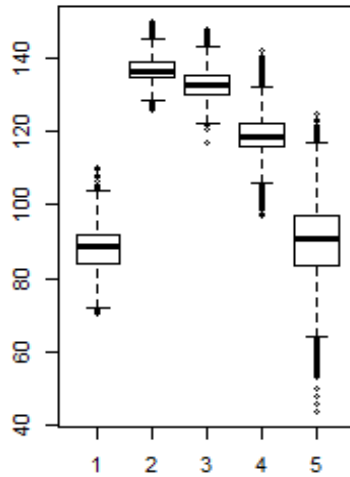


2004

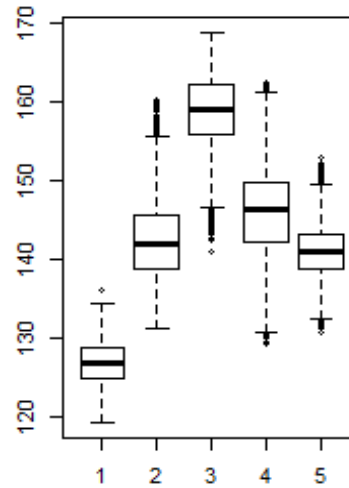


Populations 800->1600 m

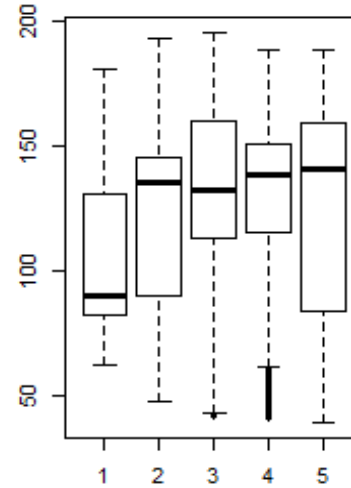
2005



2006



all years



Populations 800->1600 m

Modéliser l'adaptation des forêts

Différents scénarios

A: sans évolution $h^2=0$

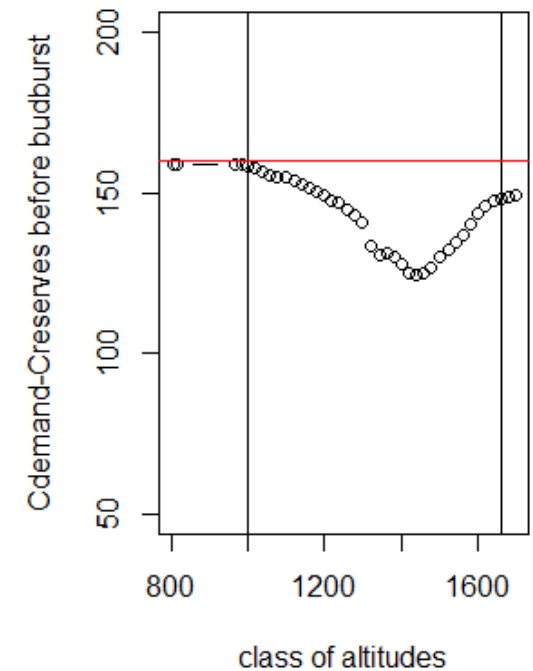
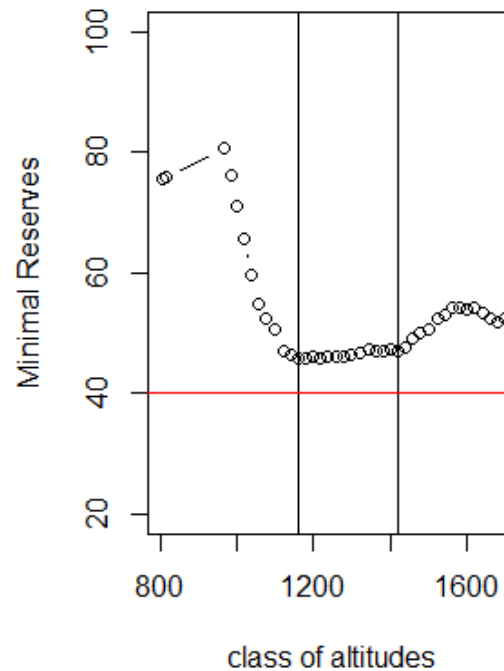
B: avec évolution

C: mortalité identique

D: reproduction identique

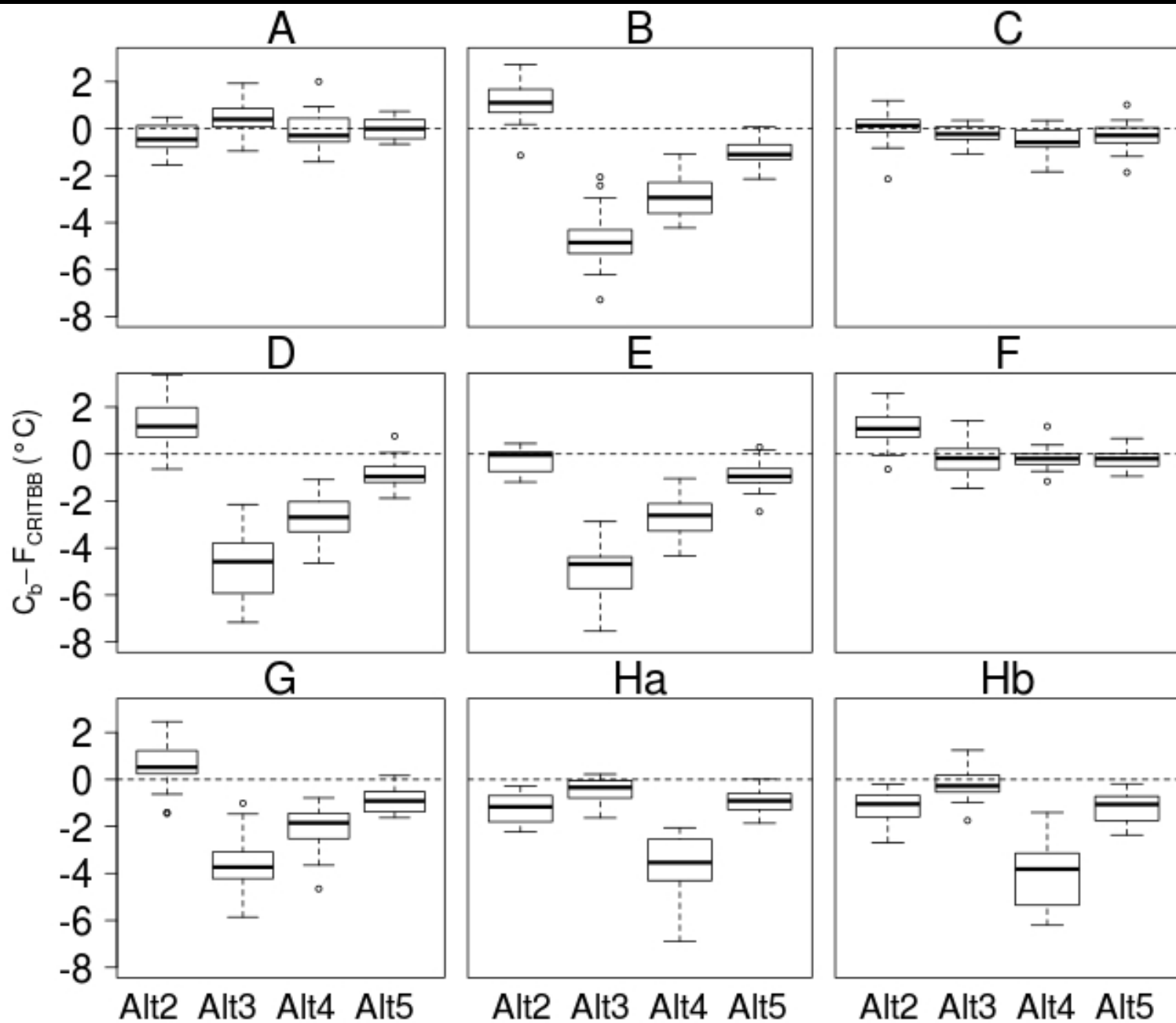
E: mortalité réserve hiver

F: mortalité réserve débourrement



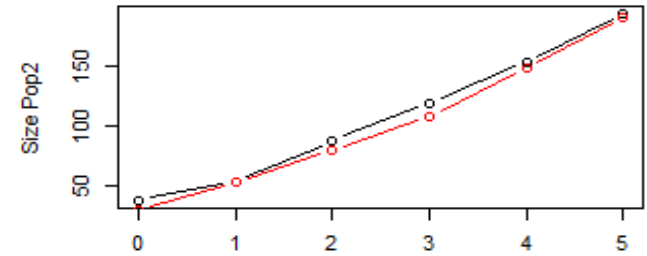
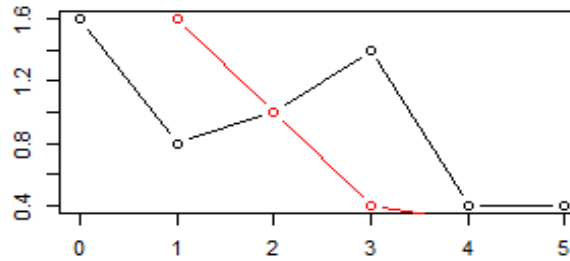
Modéliser l'adaptation des forêts

Taux d'évolution de G0 à G5



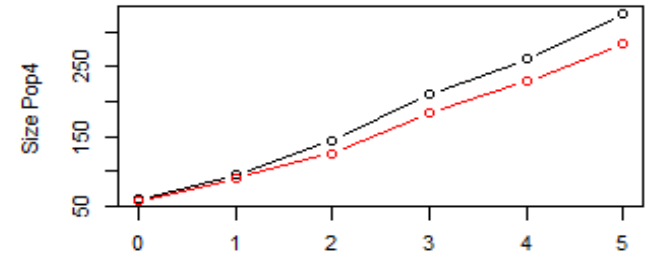
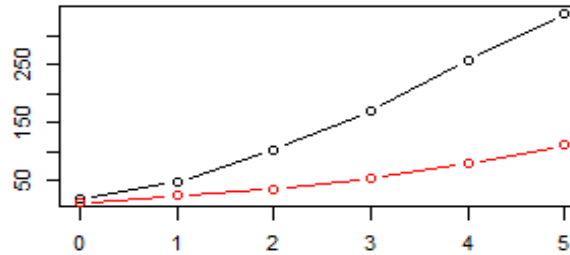
Modéliser l'adaptation des forêts

Rouge : sans adaptation
Noir : avec adaptation

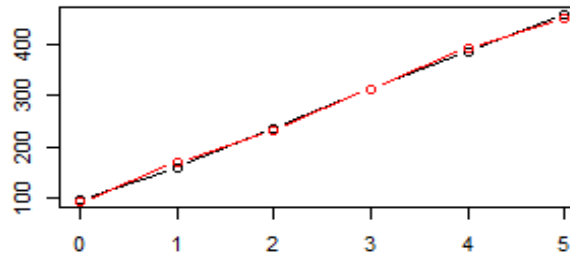


Génération

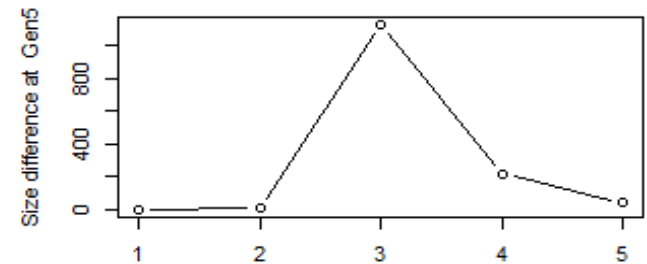
Taille des populations



Génération



Génération



Populations 800->1600 m

Modéliser l'adaptation des forêts

1. Rapidité de l'adaptation .vs. Contraintes de développement et de l'environnement

- Immense variabilité génétique (surtout pour les arbres)
- Toutes les structures et les modes de réponse à l'environnement ne sont pas possibles: avant tout on a une sélection dans l'existant

Proc. R. Soc. Lond. B 205, 581–598 (1979)

581

Printed in Great Britain

The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm:
a critique of the adaptationist programme

BY S. J. GOULD AND R. C. LEWONTIN

*Museum of Comparative Zoology, Harvard University,
Cambridge, Massachusetts 02138, U.S.A.*

Modéliser l'adaptation des forêts



Modéliser l'adaptation des forêts

Mesures	Effets
Diminution de la densité du peuplement	Baisse des pertes en eau
Augmentation de la vitesse de rotation	Augmente le stockage de carbone Diminue les risques de mortalité
Exploitation du bois mort	Diminue les risques d'attaques de scolytes et les risques de feux
Enrichir génétiquement avec des populations méridionales	Augmente l'adaptation des populations à un climat plus chaud
Favoriser la régénération naturelle d'essences plus résistantes à la sécheresse	Limite le risque de mortalité
Favoriser le mélange	Limite les risques
Plantation de provenances plus résistantes à la sécheresse	Limite le risque de mortalité
Plantation d'essences plus résistantes à la sécheresse	Limite le risque de mortalité