



**HAL**  
open science

## Perspectives ouvertes par une approche intégrée des processus de dynamique, de fonctionnement et de diversité: le cas du Mont Ventoux

Francois Lefèvre, Hendrik Davi, Philippe Dreyfus, Francois Rouault de Coligny, Sylvie Oddou-Muratorio, Christian Pichot

### ► To cite this version:

Francois Lefèvre, Hendrik Davi, Philippe Dreyfus, Francois Rouault de Coligny, Sylvie Oddou-Muratorio, et al.. Perspectives ouvertes par une approche intégrée des processus de dynamique, de fonctionnement et de diversité: le cas du Mont Ventoux. Séance commune Académie Agriculture et Académie des Sciences, Académie d'Agriculture de France (AAF). FRA., 2013, Paris, France. 34p. hal-01837332

**HAL Id: hal-01837332**

**<https://hal.science/hal-01837332>**

Submitted on 6 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Perspectives ouvertes par une approche intégrée des processus de dynamique, de fonctionnement et de diversité, le cas du Mont Ventoux.

F. Lefèvre<sup>1</sup>, H. Davi<sup>1</sup>, Ph. Dreyfus<sup>1,2</sup>, F. de Coligny<sup>3</sup>,  
S. Oddou-Muratorio<sup>1</sup>, C. Pichot<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *INRA, Avignon, Ecologie des Forêts Méditerranéennes (URFM)*

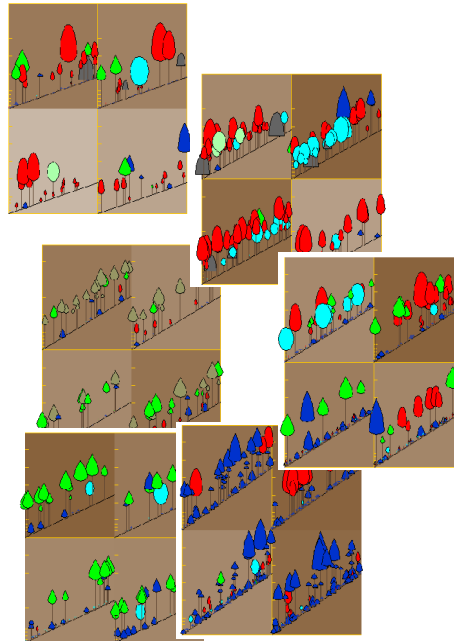
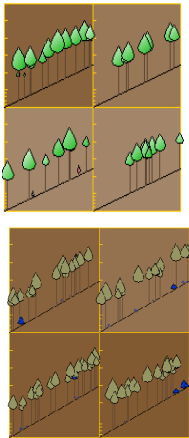
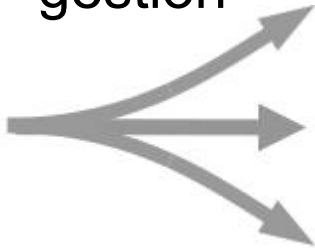
<sup>2</sup> *adresse actuelle : ONF, Avignon, Département R&D*

<sup>3</sup> *INRA, Montpellier, Botanique et Bioinformatique de l'Architecture des Plantes (UMR AMAP)*

# Adaptation : polysémie et incertitudes



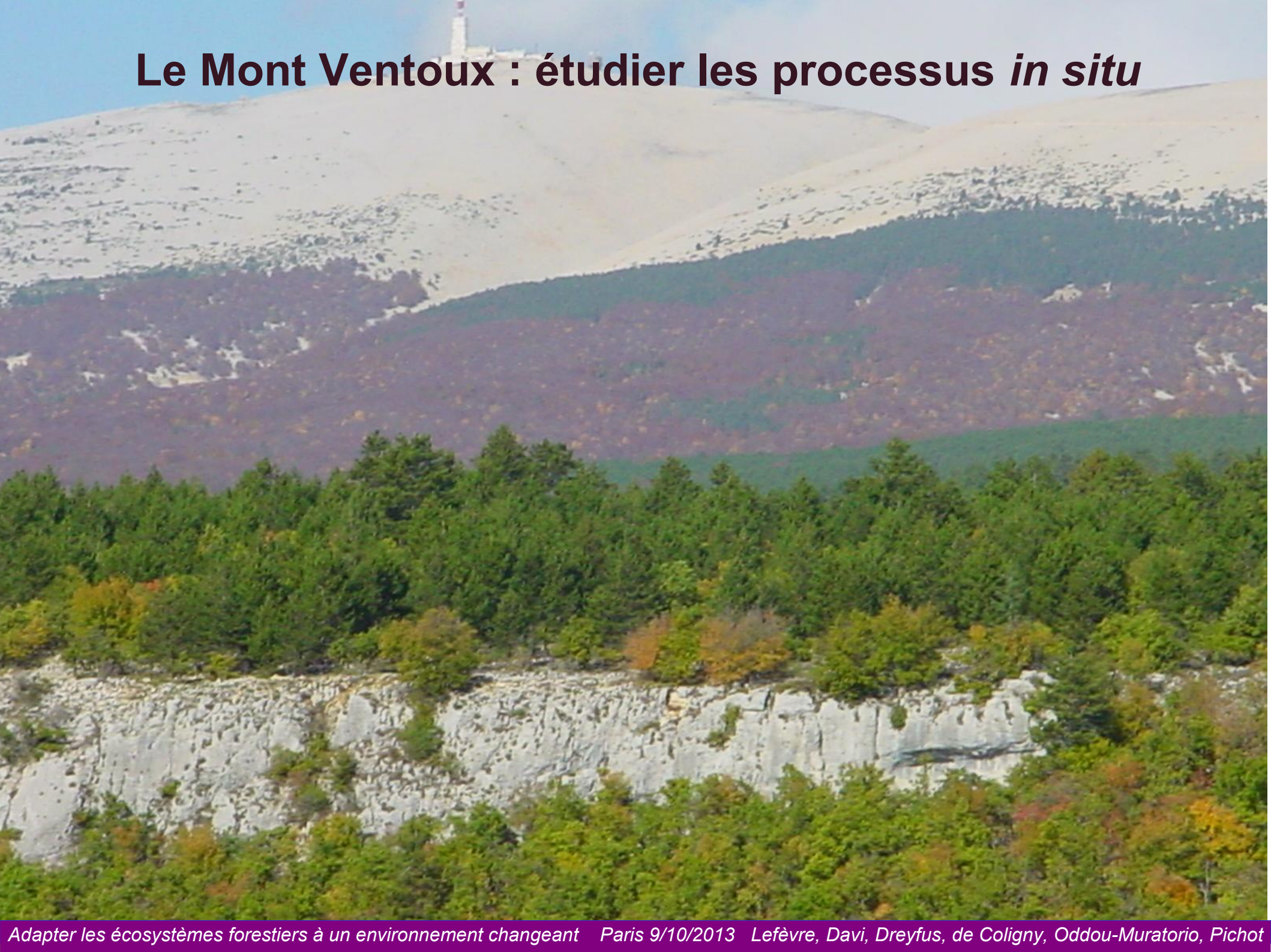
processus  
écologiques  
x  
gestion



gérer les transitions, les trajectoires  
plutôt que chercher à figer un idéal

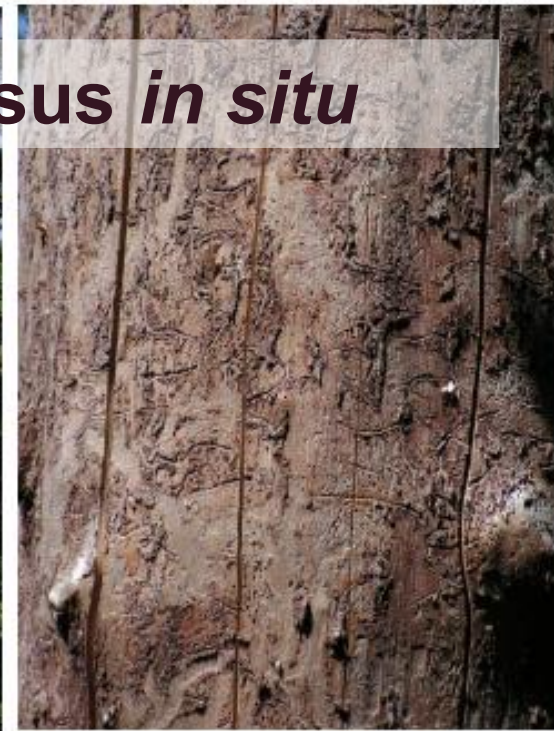
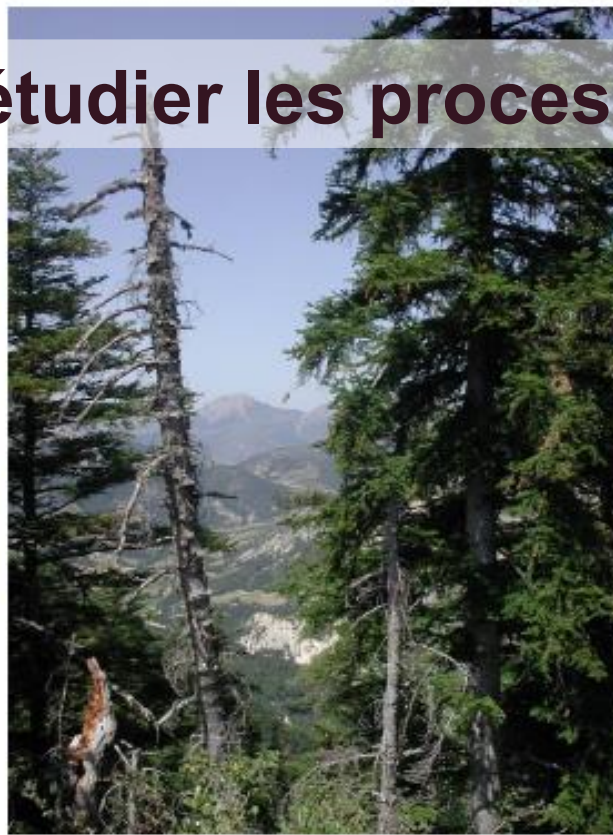


# Le Mont Ventoux : étudier les processus *in situ*





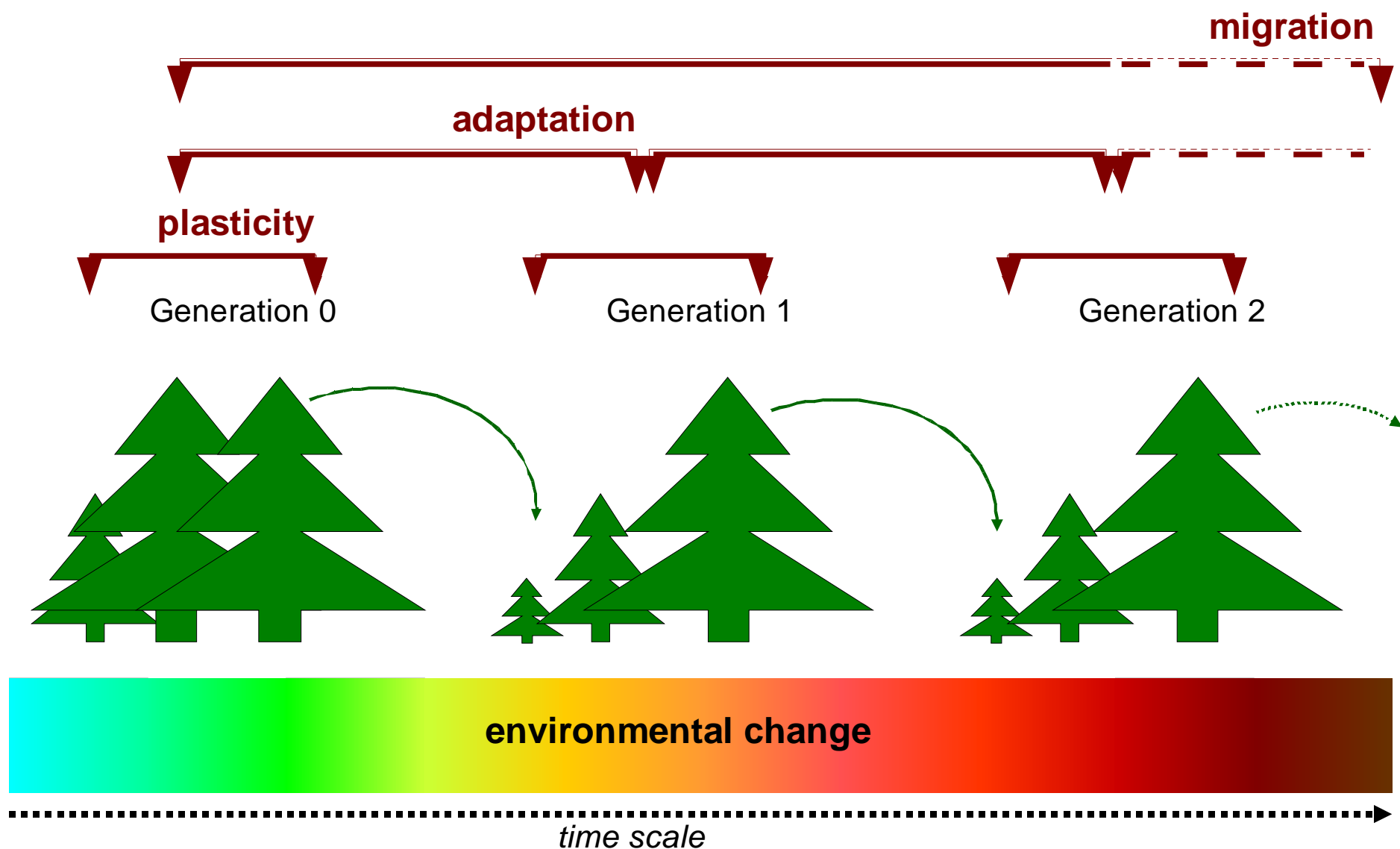
# Le Mont Ventoux : étudier les processus *in situ*



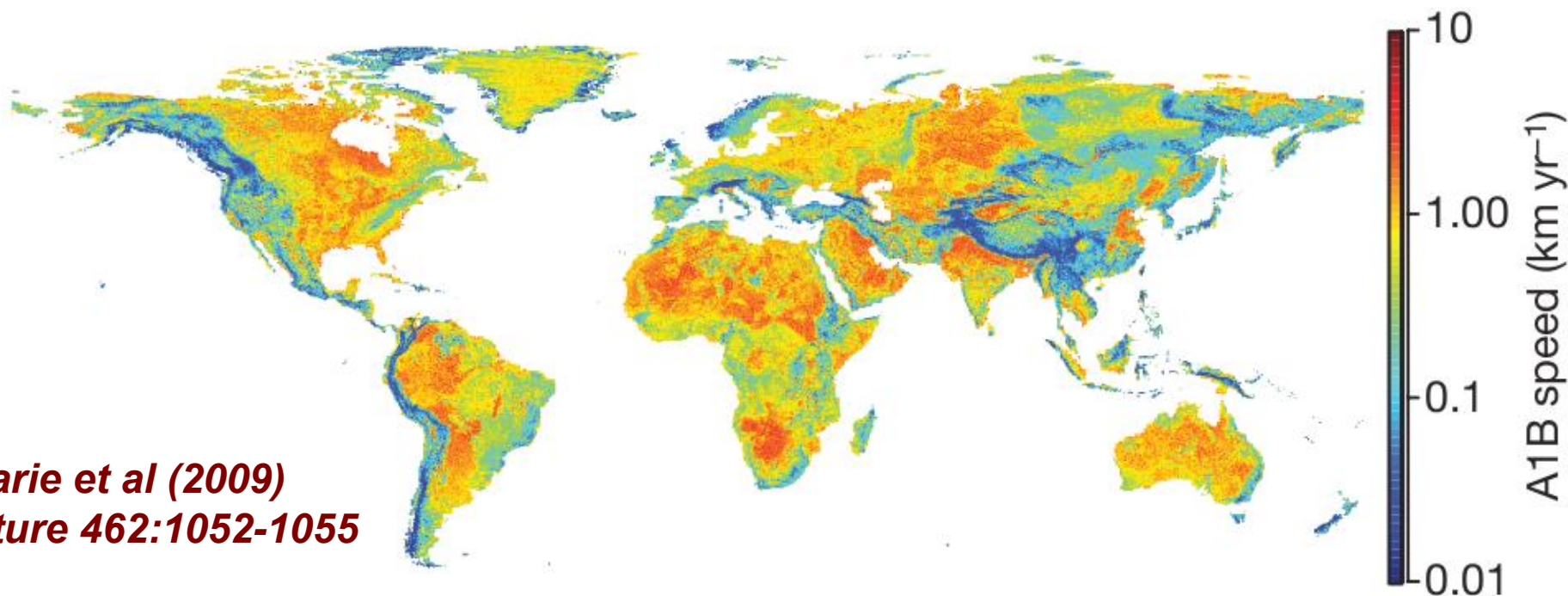


# Les échelles de temps de l'adaptation en forêt

temps du changement ~ temps de l'action à son effet ~ temps de génération



# Notion de vitesse du changement climatique



*Loarie et al (2009)  
Nature 462:1052-1055*

**vélocité (kms.an<sup>-1</sup>)**

$$\frac{(\text{°C}, \text{mm}).\text{an}^{-1}}{(\text{°C}, \text{mm}).\text{km}^{-1}}$$

**temps de résidence (an)**

$$\frac{\text{aire non fragmentée (km)}}{\text{vitesse (km.an}^{-1}\text{)}}$$

14 biomes (moy)      0.08 – 1.26

1.1 – 74.6

Mt Ventoux

prédit IPCC A1B      0.01

140 ans

Observé 1980-2006      0.04

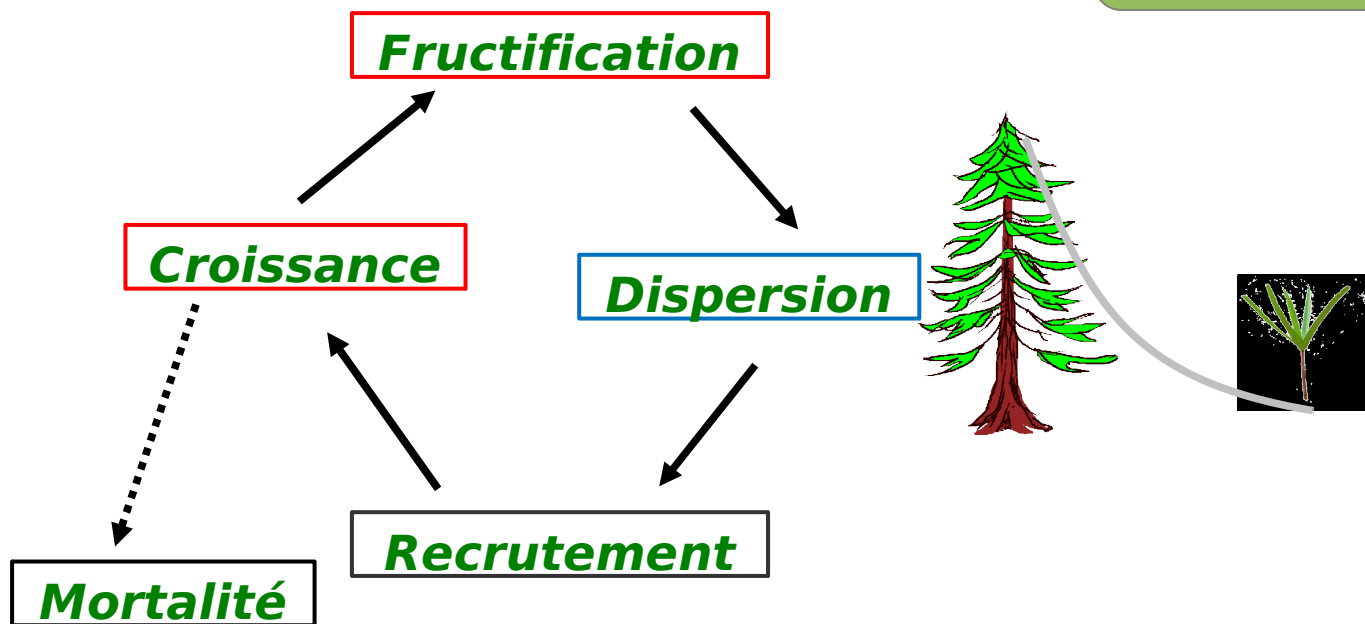
36 ans

# Évaluer le potentiel de migration

1. Identification et calibration des processus

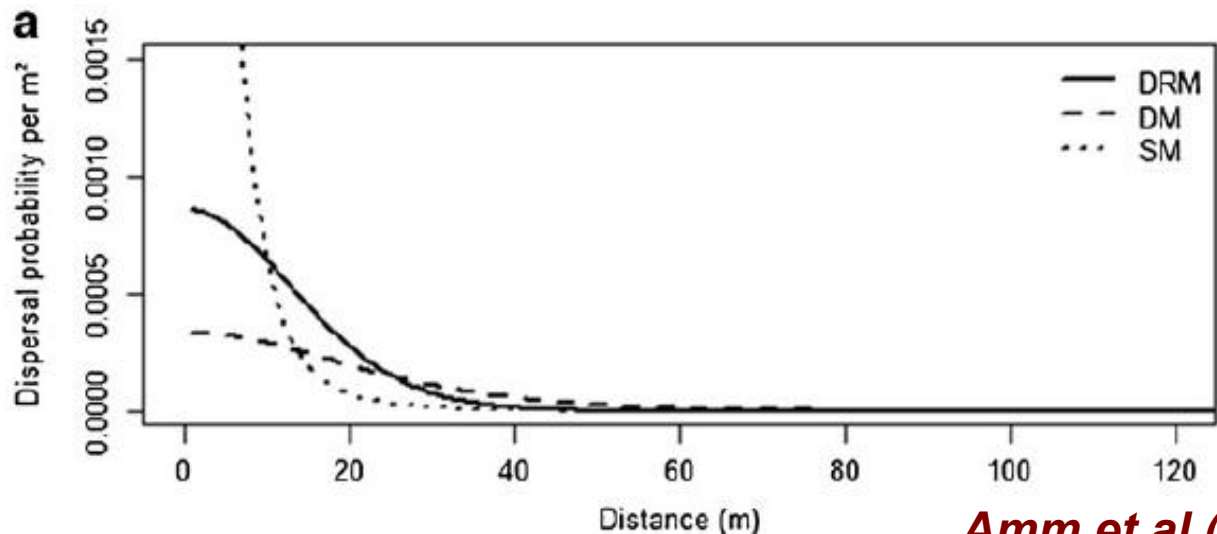
2. Modélisation et simulation

3. Scénarios d'évolution





# Évaluer le potentiel de migration



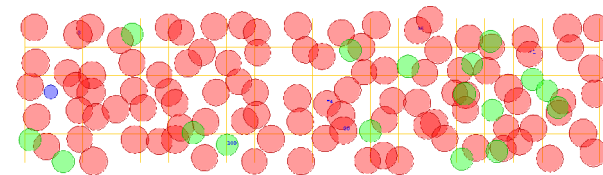
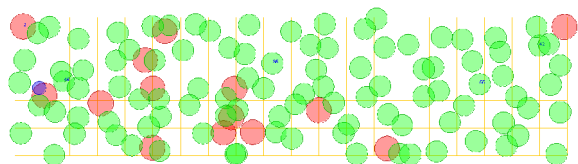
*Amm et al (2012)*  
*Ann For Sci 69:845-856*



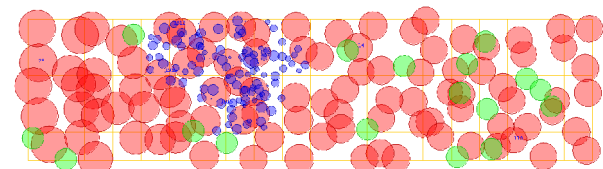
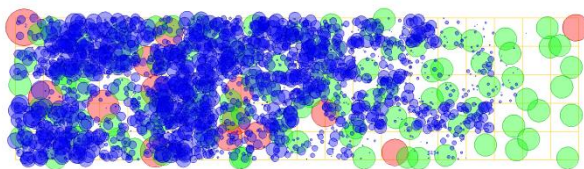
Le **sapin** se disperse dans du **pin**

Le **sapin** se disperse dans du **hêtre**

1975



2100

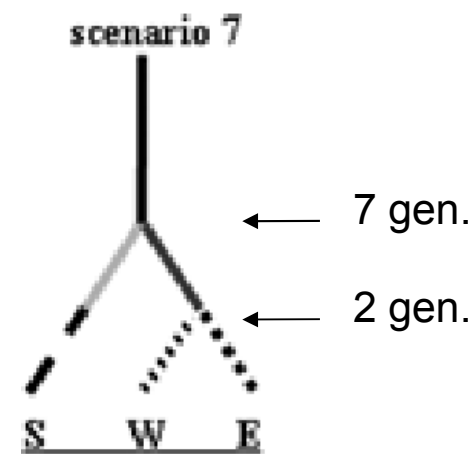
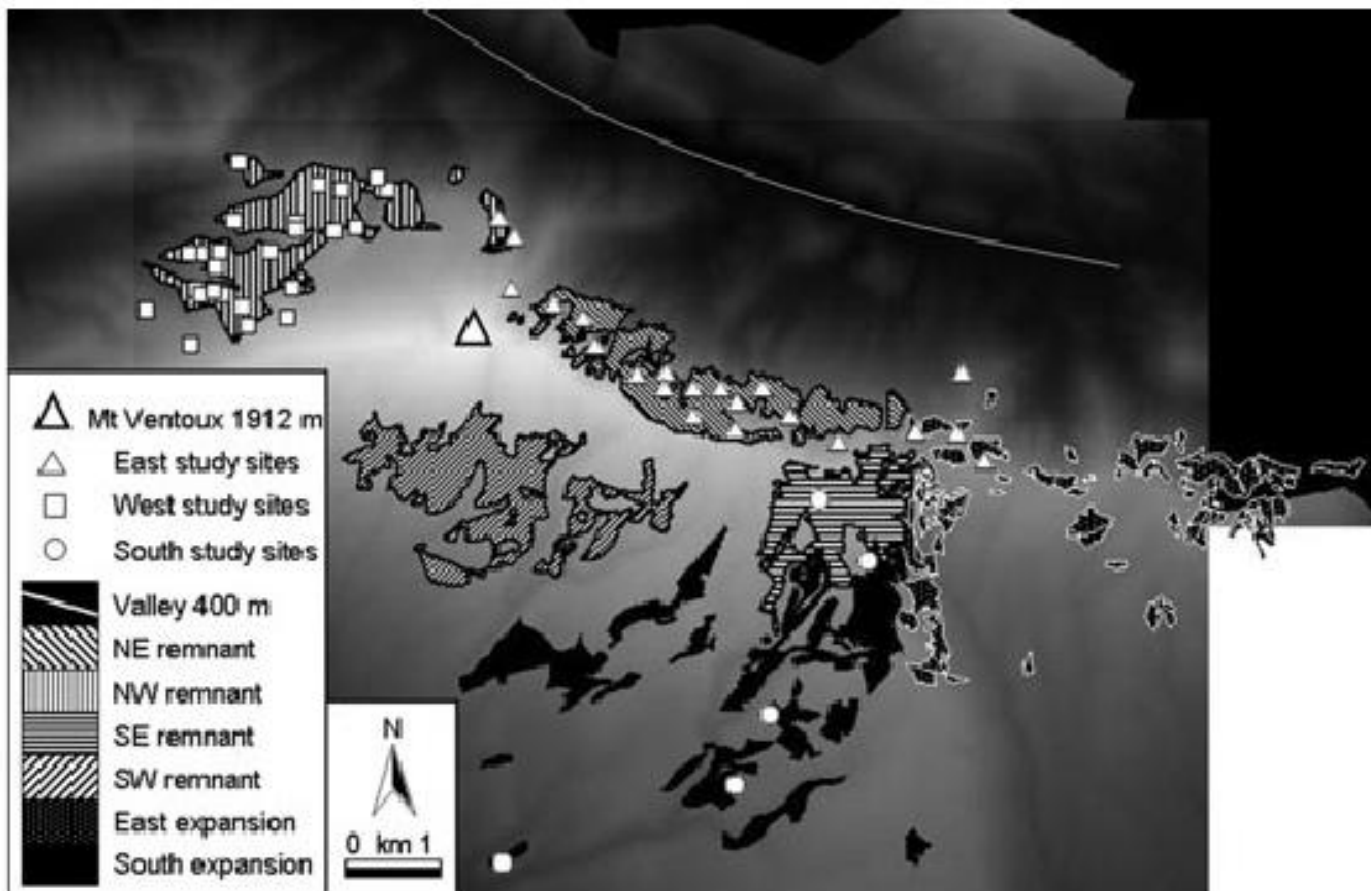


**Forte colonisation**

**Faible colonisation**

# Évaluer le potentiel de migration

Analyse rétrospective de la recolonisation du Mont Ventoux par le hêtre entre 1845 et 2000 :  
combiner archives historiques et données génétiques (méthode ABC)

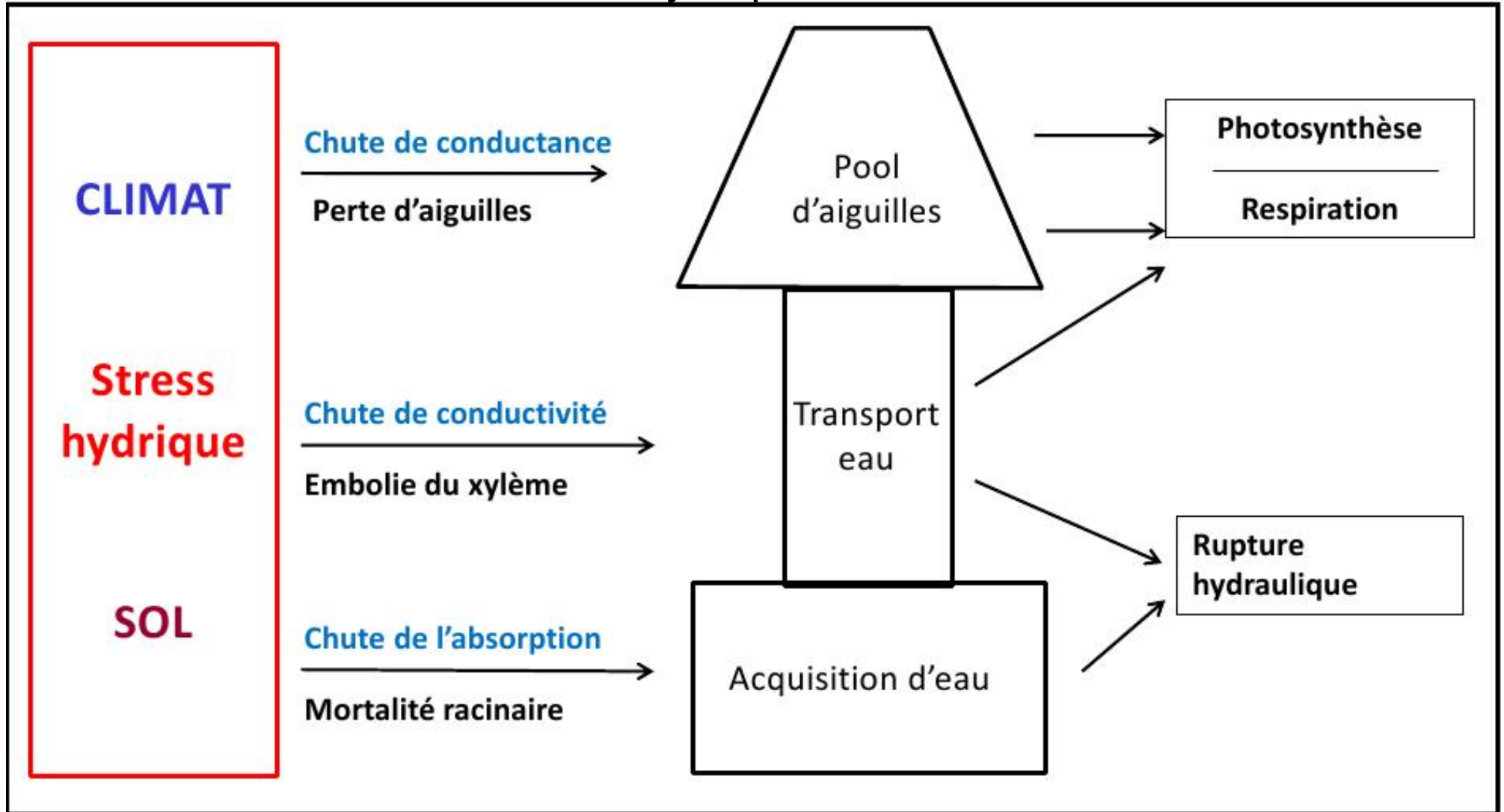


**Lander et al. (2011) Mol Ecol 20:5182-5196**



# Etude *in situ* de la réponse aux aléas climatiques

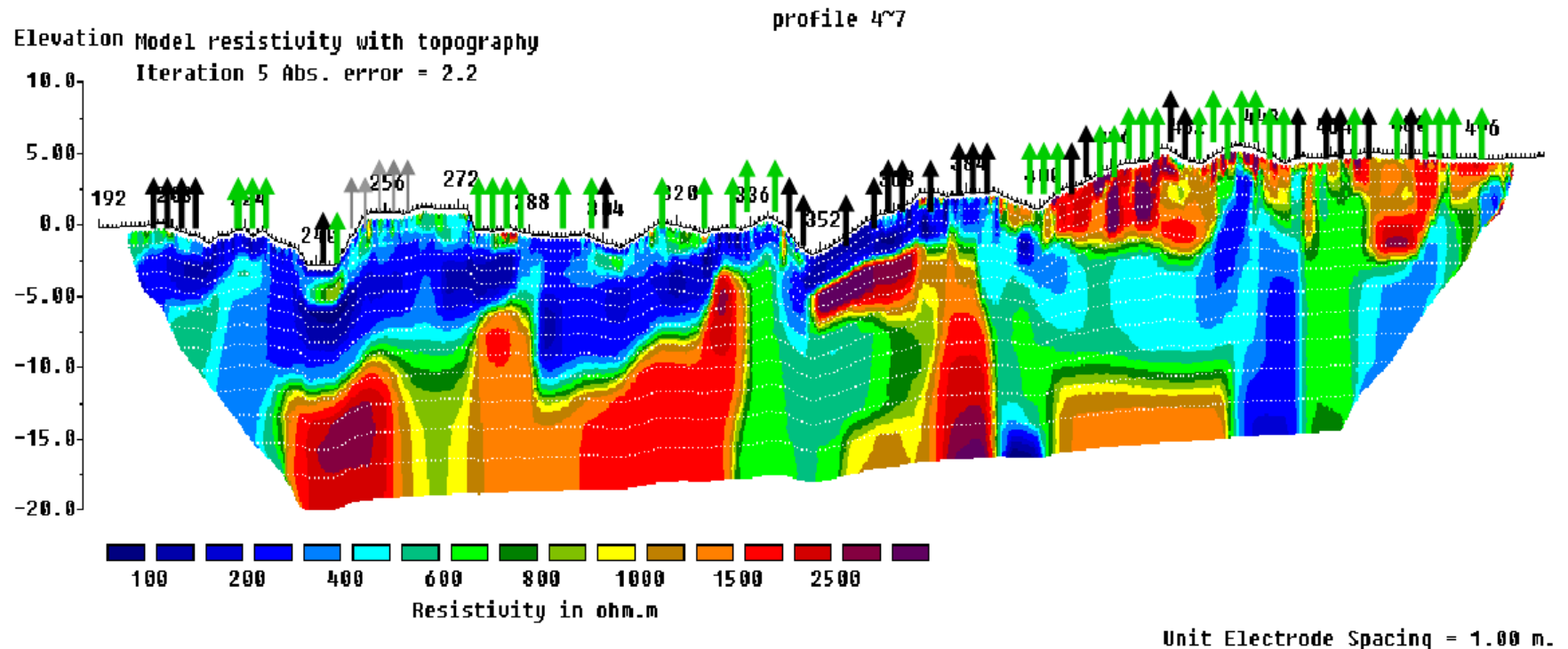
## Effet du stress hydrique sur les arbres



réponse rapide / long terme et manque de carbone / problème hydraulique

# Etude *in situ* de la réponse aux aléas climatiques

Estimation des capacités hydriques du sol par sa résistivité (texture)



Horizontal scale is 3.01 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 2.69  
First electrode is located at 192.0 m.  
Last electrode is located at 318.0 m.

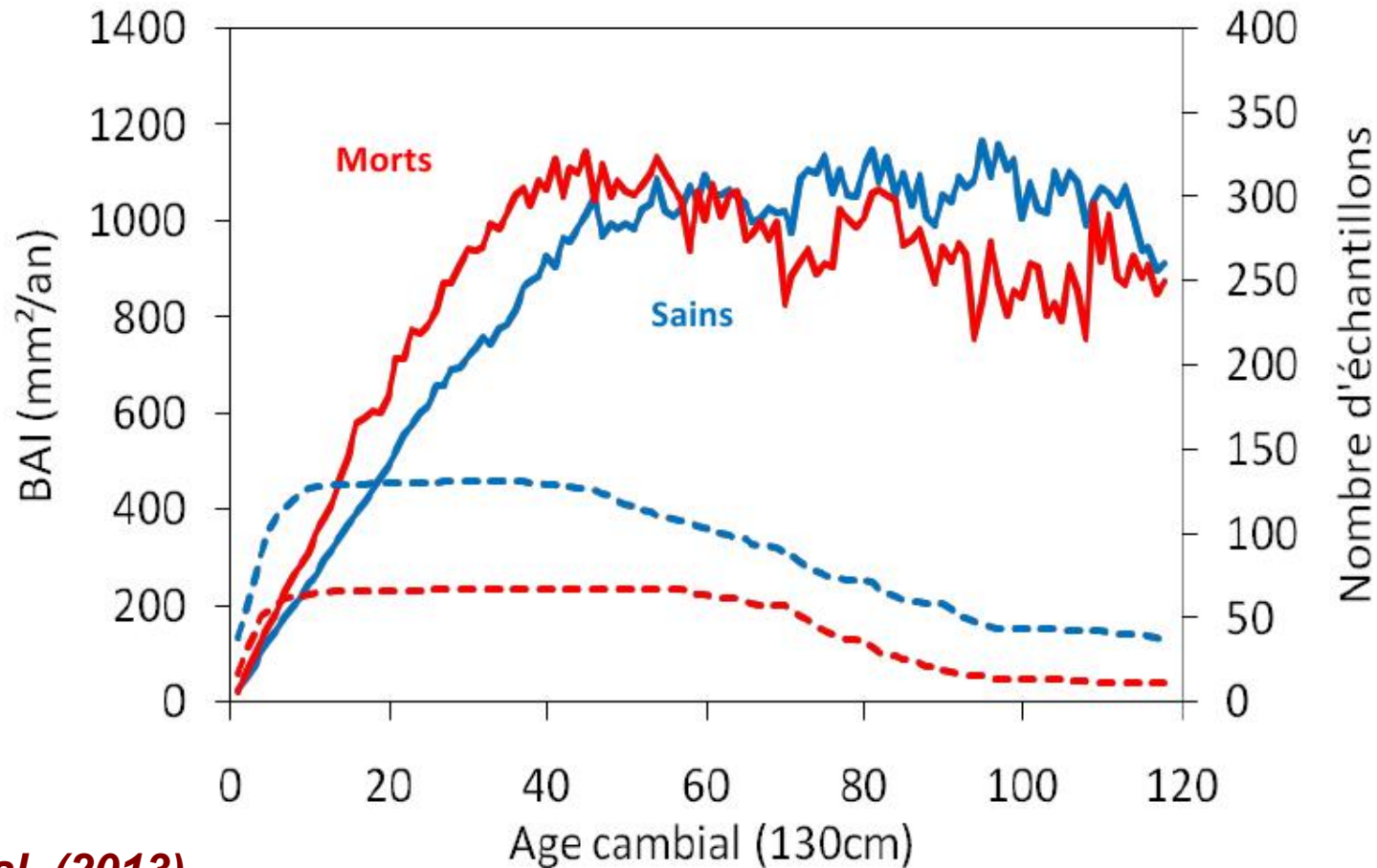
**Nourtier et al. (2013)**  
**Ann For Sci doi:10.1007/s13595-012-0229-9.**

Les arbres morts ne sont pas toujours situés sur les zones où le sol est le plus résistif



# Etude *in situ* de la réponse aux aléas climatiques

Analyse rétrospective de la croissance par dendrochronologie



**Cailleret et al. (2013)**

**Ann For Sci doi:10.1007/s13595-013-0265-0.**

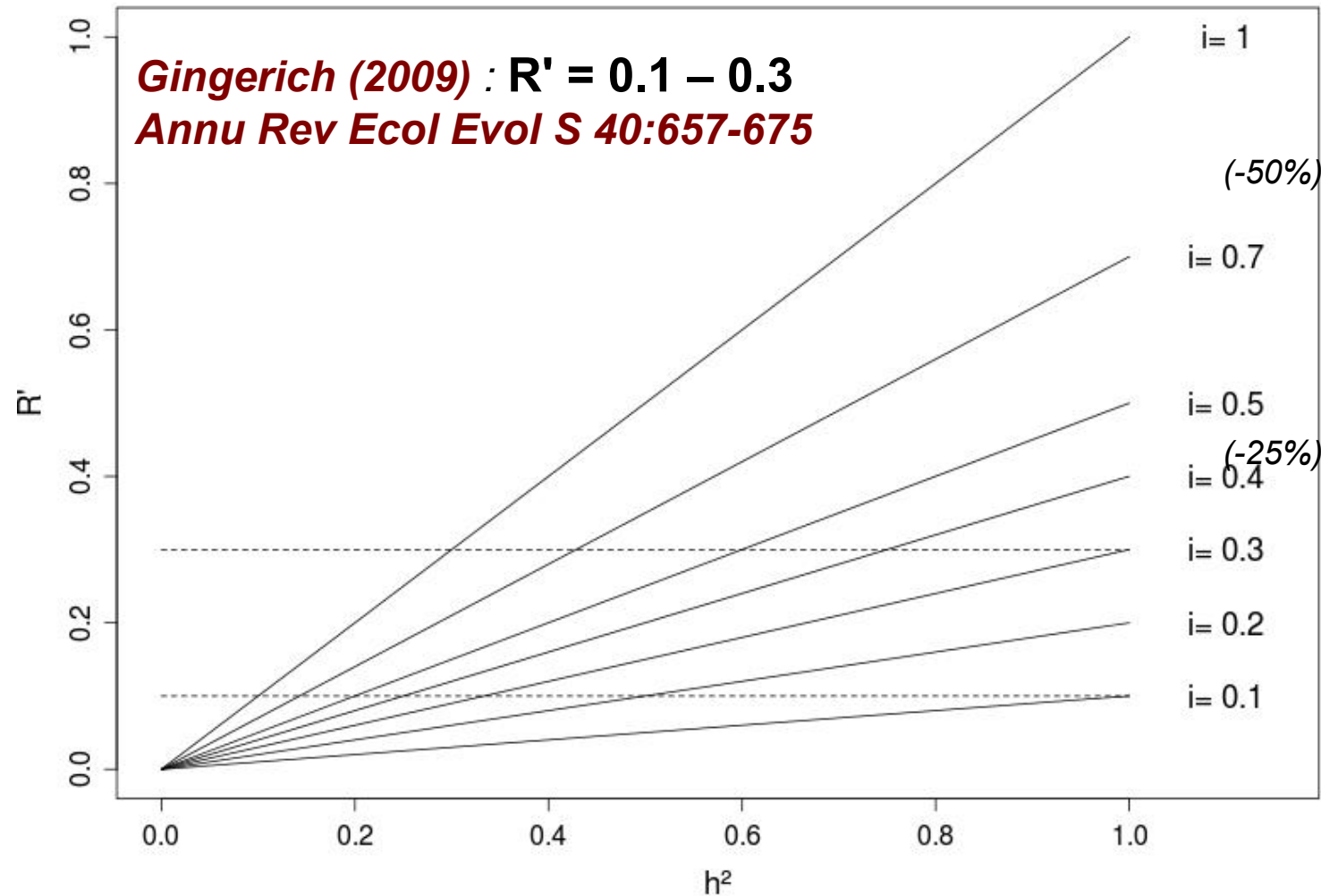
Les arbres morts avaient une croissance juvénile supérieure

# Etude *in situ* du potentiel de réponse à la sélection

Réponse à la sélection par génération :

sélection directe  $R = i.h.\sigma_A$  ou  $R' = R/\sigma_P = i.h^2$

sélection naturelle  $R = \beta.\sigma_A$  ou  $R' = \beta.h$





# Etude *in situ* du potentiel de réponse à la sélection

Estimation *in situ* des paramètres génétiques ( $h^2$ ,  $Cov_G$ )

Similarité phénotypique  
entre arbres  $i$  et  $j$

$$Z_{ij} = (Y_i - \mu)(Y_j - \mu) / \sigma_P^2$$

$$Z_{ij} = 2 r_{ij} h^2 + b d_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

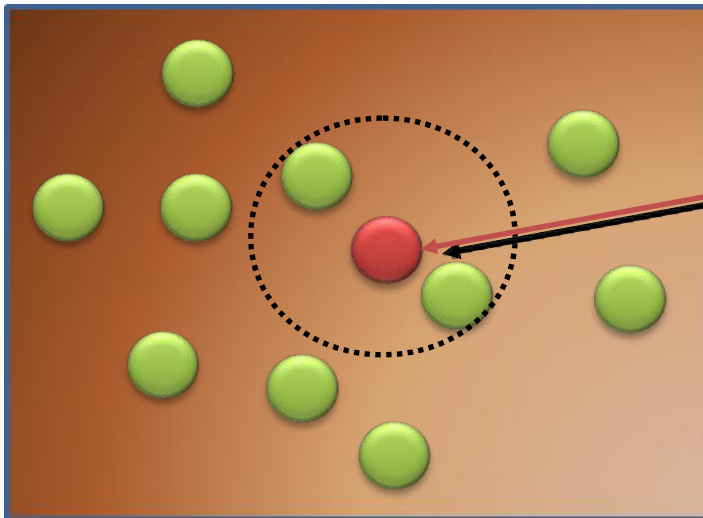
**Ritland (1996)**  
***Evolution* 50:1062-1073**

**Effet génétique**

**Effet environnement commun**

$r_{ij}$  = coefficient d'apparentement

$d_{ij}$  : distance entre arbres  $i$  et  $j$



**Concentrer sur un voisinage pour**

- augmenter le nb d'apparentés
- minimiser la confusion entre apparentement et environnement commun

# Etude *in situ* du potentiel de réponse à la sélection

Estimation *in situ* des paramètres génétiques ( $h^2$ ,  $Cov_G$ )

Cas du hêtre au Mont Ventoux : traits foliaires sur arbres adultes, 19 SSR



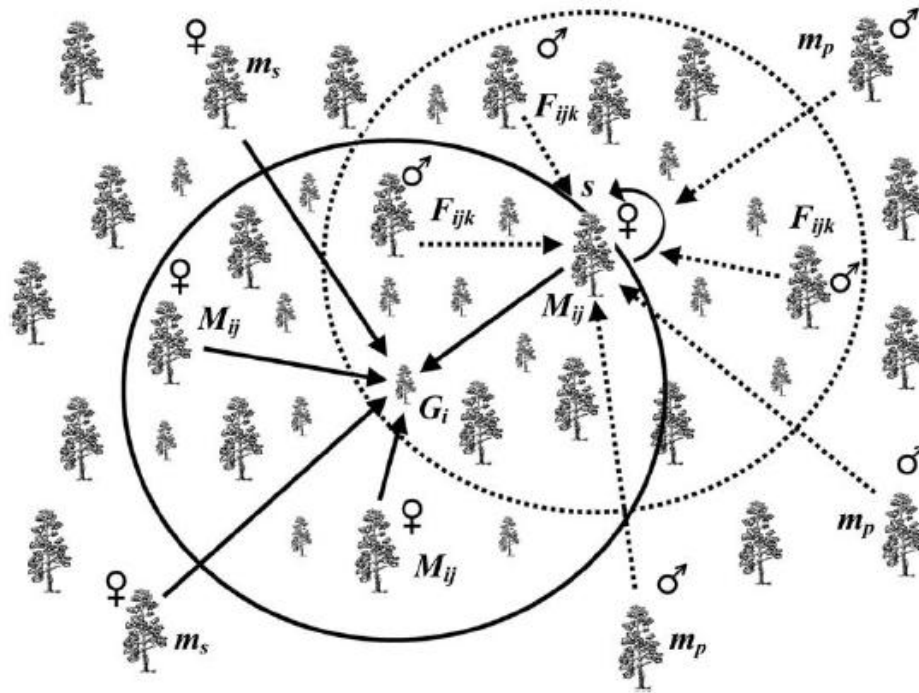
	PSS	LMA	$\delta^{13}\text{C}$	$N_{\text{mass}}$
$\sigma^2_P$	27.77	215.80	0.61	0.07
$h^2$	0.26*	-0.09	0.28*	0.31*

*Bontemps et al, en préparation*



# Etude *in situ* du potentiel de réponse à la sélection

Estimation *in situ* du succès reproducteur et gradients de sélection ( $\beta$ )



**Oddou-Muratorio & Klein (2008)**  
**Mol Ecol 17:2743-2754**

$$P(G_i) = m_s T(G_i | BAF) + (1 - m_s) \sum_{j \in N} \pi_{s_{ij}} \left[ s T(G_i | M_j, M_j) + m_p T(G_i | M_j, BAF) + (1 - s - m_p) \sum_{k \in N} \pi_{p_{j,k}} T(G_i | M_j, F_k) \right]$$

$G_i$  : génotype du semis en position  $i$

$M_{ij}$  : arbre-mère potentiel  $j$

$F_{ijk}$  : pollinisateur possible  $k$  de la mère  $j$

$s$  : taux d'auto-fécondation

$m_p(m_s)$  : taux de migration de l'extérieur de la parcelle par pollen (graines)

$\pi_s$  : succès reproducteur femelle

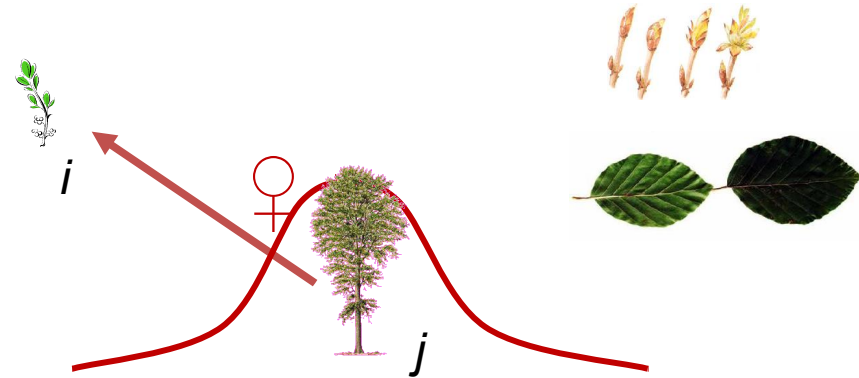
$\pi_p$  : succès reproducteur mâle

# Etude *in situ* du potentiel de réponse à la sélection

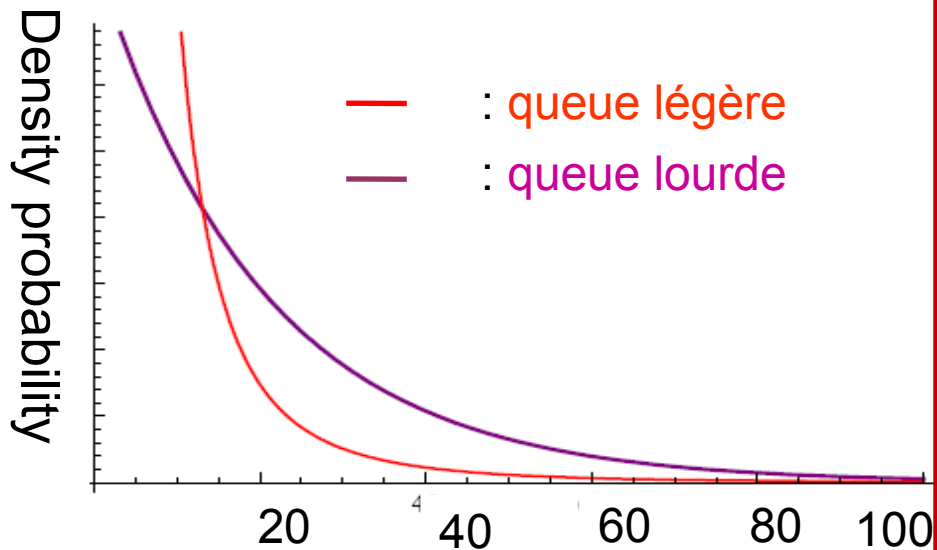
Application au hêtre sur le Mont Ventoux

*Bontemps et al, en préparation*

$$\pi_{S_{ij}} = \frac{\theta_s(d_{i_j}) \times F_j}{\sum_{k \in N} \theta_s(d_{i_k}) \times F_k}$$



Position des semenciers et noyau de dispersion



Fécondité intrinsèque (fitness)

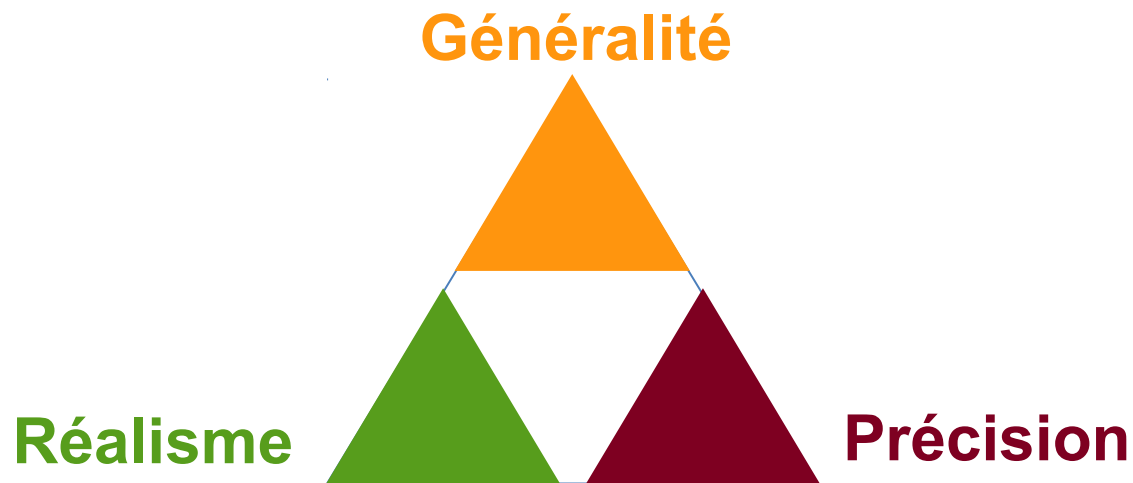
Pour chaque caractère T :

$$F_{Tj} = e^{\beta T_j + \gamma (T_j - \bar{T})^2}$$

Gradient de sélection multi-caractère

# Modélisation et scénarisation

Qualité des modèles pour produire des scénarios d'adaptation au CC

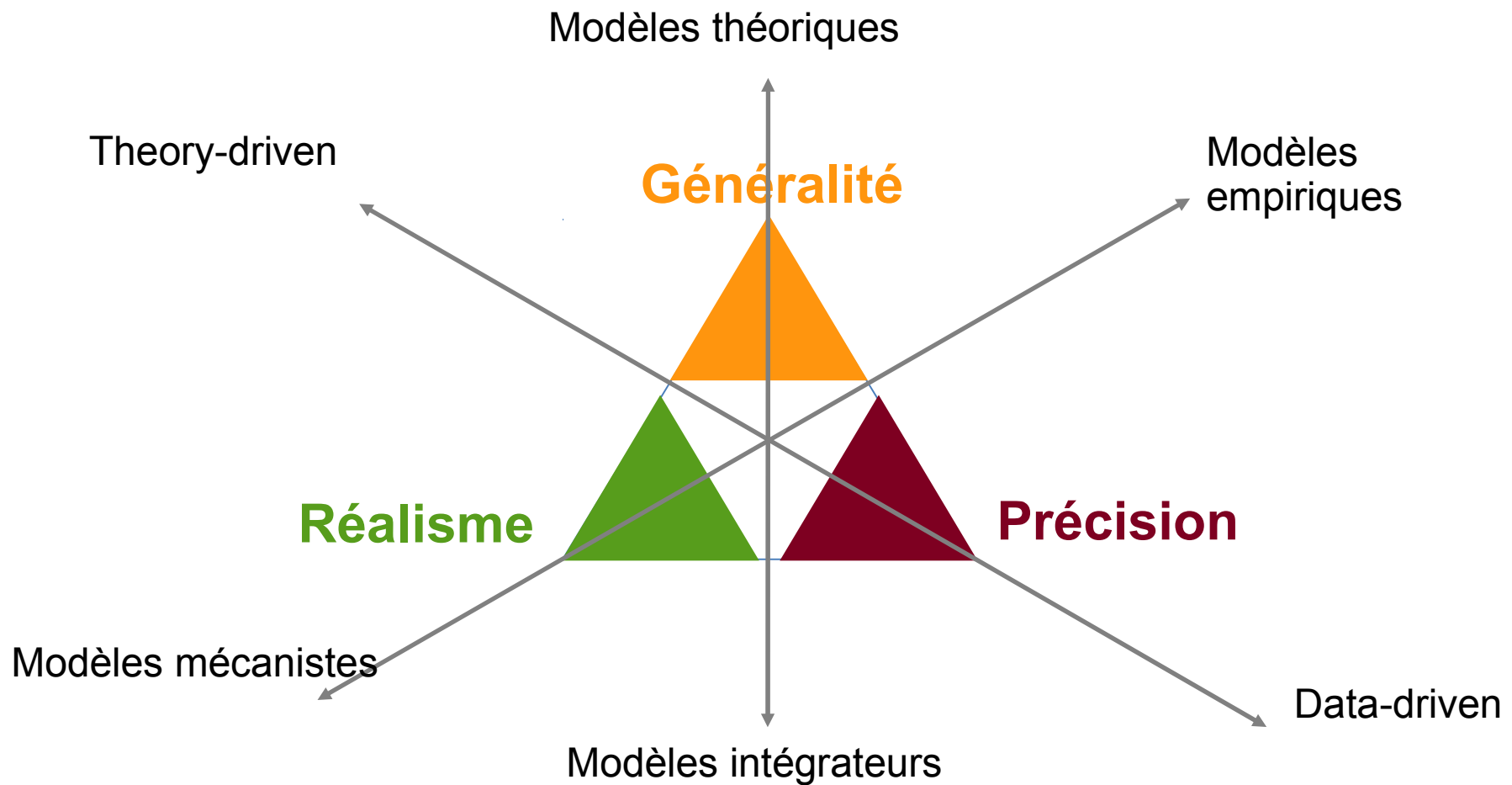


**Levins (1966) Amer Sci 54:421-431** : les scientifiques n'ont pas les capacités pour manipuler un modèle possédant les trois propriétés



# Modélisation et scénarisation

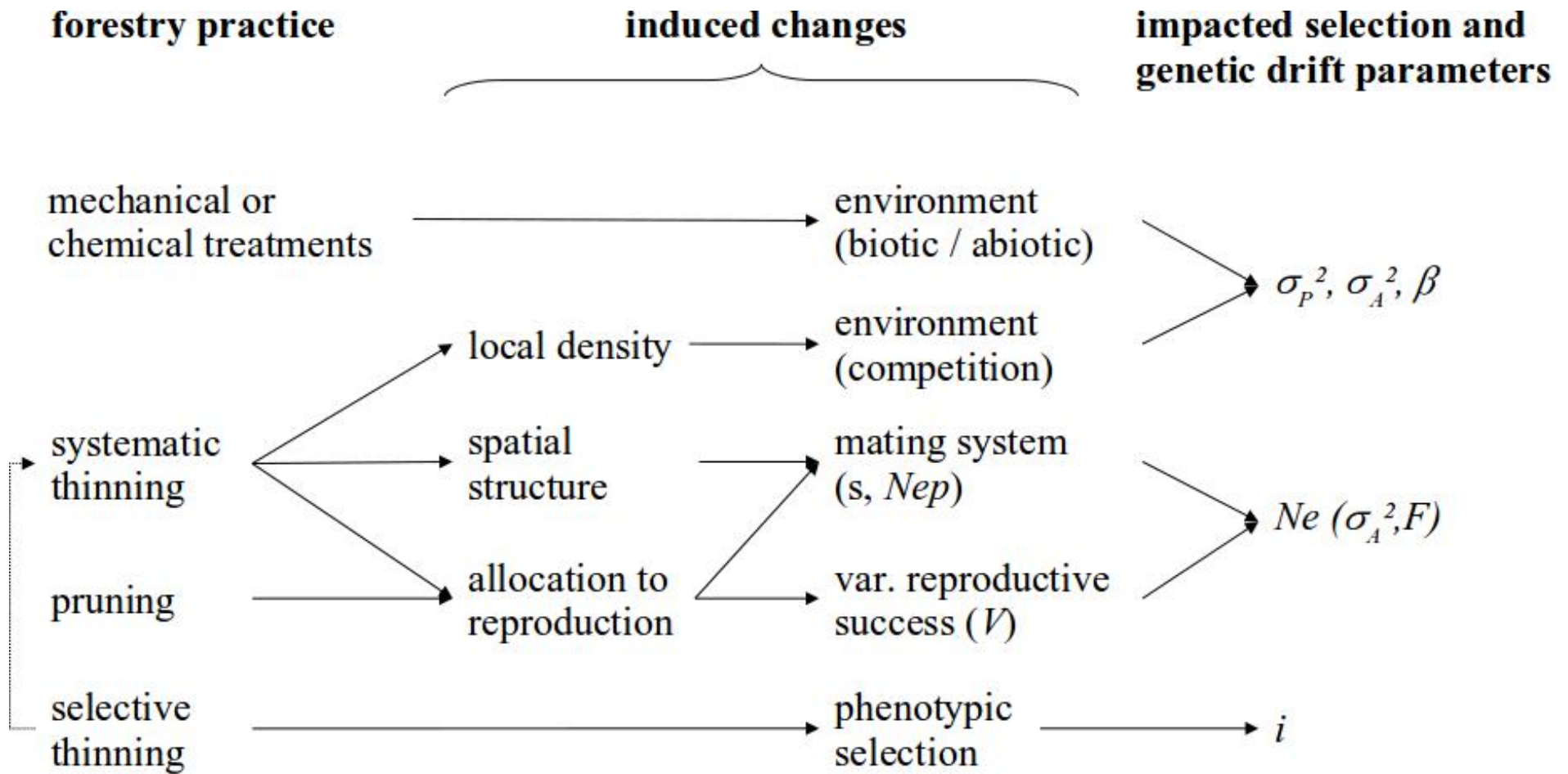
Types de modèles pour produire des scénarios d'adaptation au CC



**Levins (1966) Amer Sci 54:421-431** : les scientifiques n'ont pas les capacités pour manipuler un modèle possédant les trois propriétés

# Modélisation et scénarisation

Utilisation de modèles de la génétique pour intégrer le souci des processus évolutifs dans une sylviculture adaptative innovante



**Lefèvre et al (2013) Ann For Sci doi:10.1007/s13595-013-0272-1**

# Modélisation et scénarisation

CASTANEA :

un modèle générique simulant le fonctionnement des écosystèmes forestiers

Processus	Pas de temps
<i>Interception de la lumière</i>	Heure
<i>Photosynthèse foliaire</i>	Heure
<i>Conductance stomatique</i>	Heure
<i>Respiration des organes</i>	Heure
<i>Transpiration</i>	Heure
Bilan énergétique	Heure
Interception des pluies	Jour
Bilan hydrique	Jour
<i>Respiration du sol</i>	Jour
<i>Croissance des organes</i>	Jour
<i>Largeur de cernes</i>	Année
<i>Croissance en Hauteur</i>	Année
<i>Reproduction</i>	Année

Espèce	Site de validation
<i>Fagus sylvatica</i>	Hesse (NE, France) Ventoux (SE, France)
<i>Quercus ilex</i>	Puchabon (NE, France)
<i>Quercus petraea</i>	Fontainebleau (N, France)
<i>Quercus pubescens</i>	St Michel l'observatoire (SW, France)
<i>Pinus sylvestris</i>	Fontainebleau (N, France), Hollande
<i>Pinus pinaster</i>	Landes (SW, France)
<i>Abies alba</i>	Ventoux (SE, France)
<i>Picea abies</i>	Allemagne
<i>Pinus halepensis</i>	Fontblanche (SE, France) 2014
<i>Eperua falcata</i>	Guyane 2014

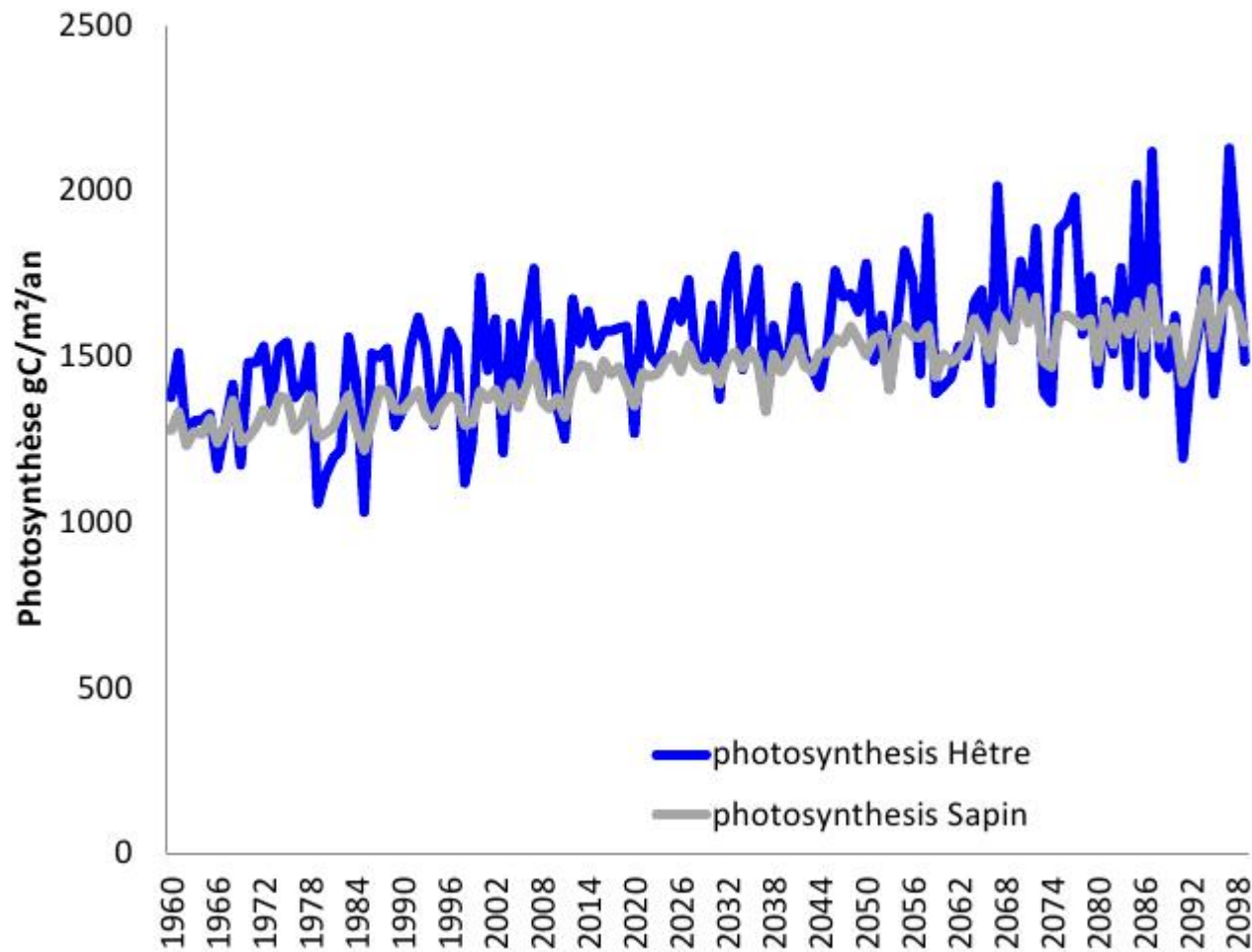
**Dufrêne et al (2005) Ecol Model 185:407-436 & Davi et al (2009) Agric For Met 149:349-361**



# Modélisation et scénarisation

CASTANEA :

évolution simulée de la photosynthèse du **hêtre** et du **sapin** au Mont Ventoux

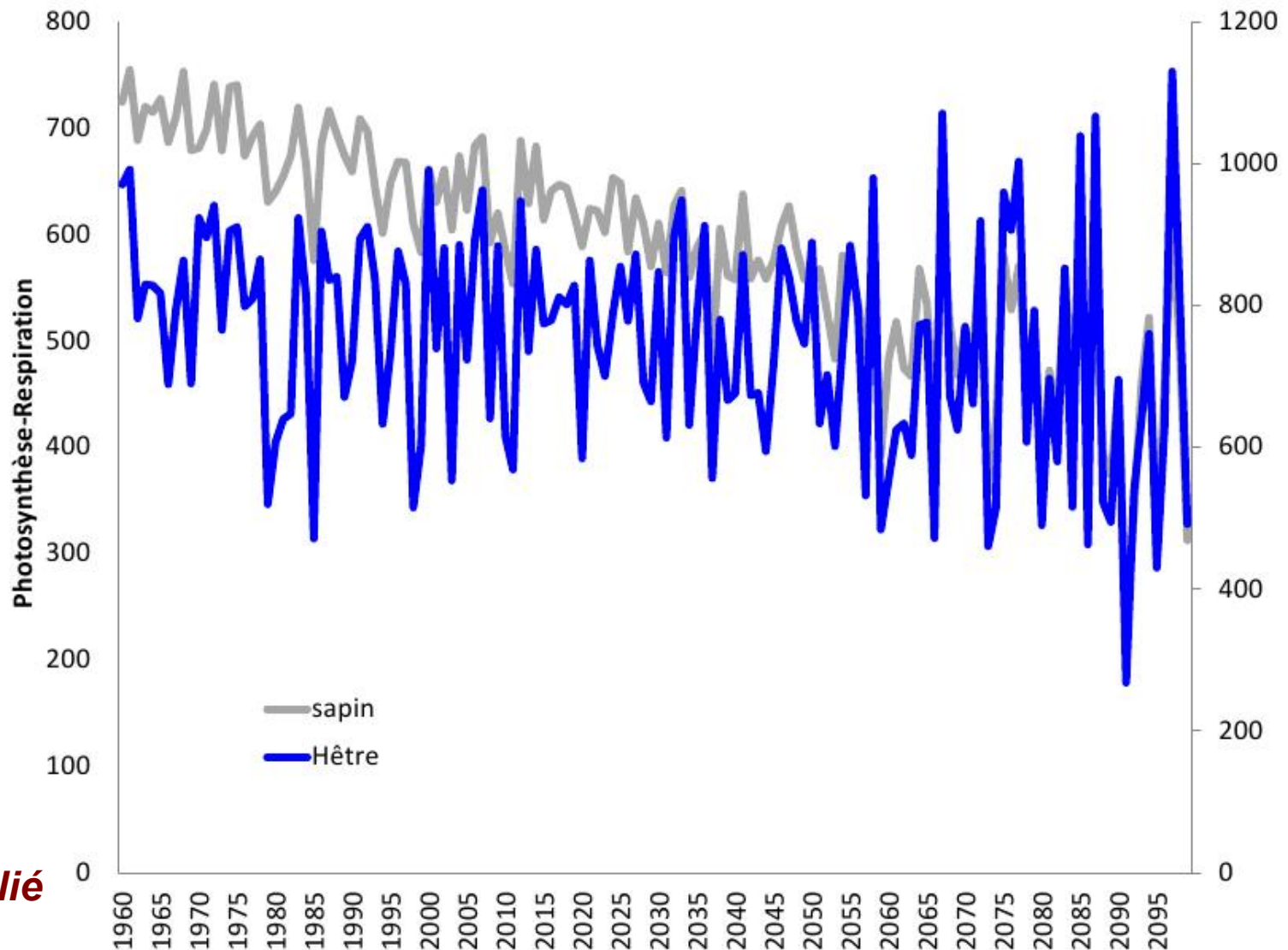


*Davi, non publié*

# Modélisation et scénarisation

CASTANEA :

évolution simulée du bilan de C du **hêtre** et du **sapin** au Mont Ventoux



*Davi, non publié*

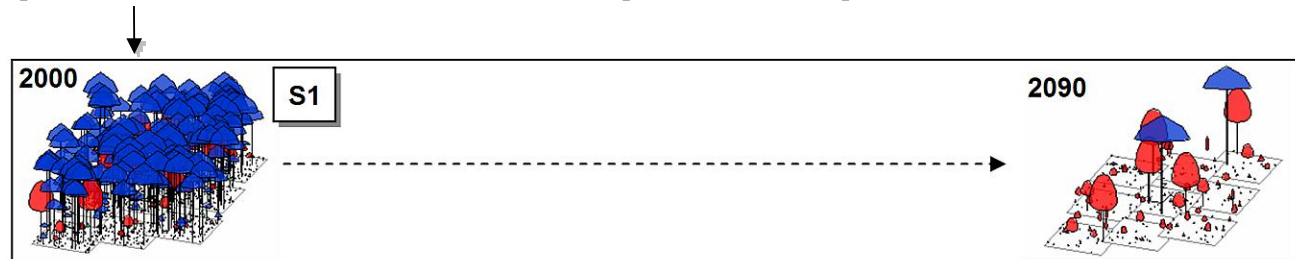
# Modélisation et scénarisation

Modèle de dynamique forestière (démographie + interventions) couplé à un modèle stationnel pour simuler des scénarios de gestion contrastés

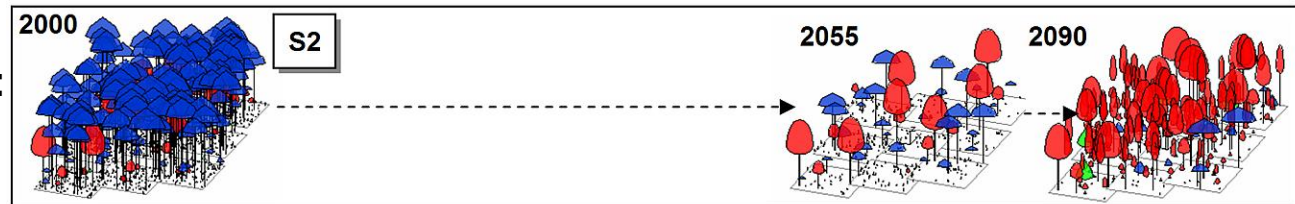
## 4 Options sylvicoles : Sapinière en zone à fort risque de dépérissement

S1. Sans intervention :

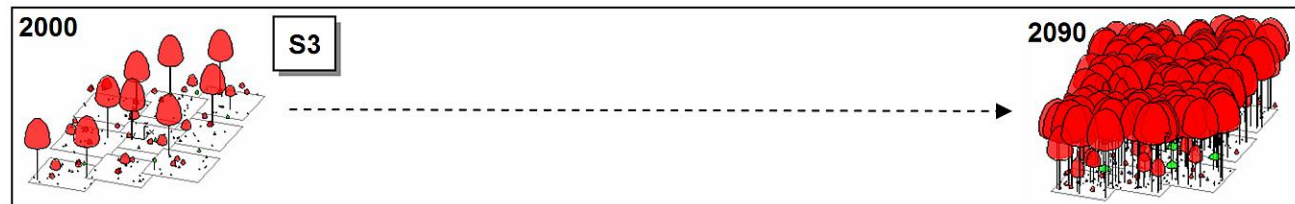
-> structures ouvertes mixtes  
arbres-ligneux bas



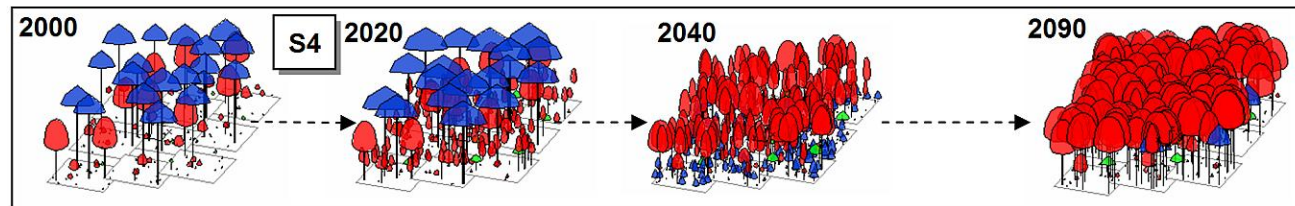
S2. Suppression Tardive du Sapin :  
faible bénéfice pour le Hêtre



S3. Suppression Immédiate :  
développement maximal  
du Hêtre



S4. Réduction Progressive :  
peuplement de Hêtre,  
moins dense, et plus haut



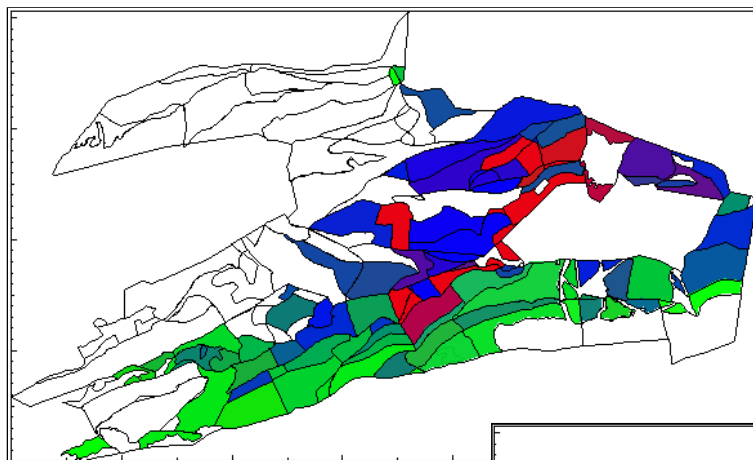
**Dreyfus (2012) Ann For Sci doi:10.1007/s13595-011-0163-2**



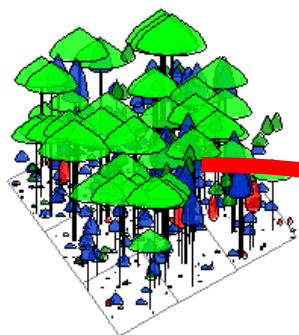
# Modélisation et scénarisation

Un enjeu : l'intégration des échelles spatiales, de l'arbre au paysage

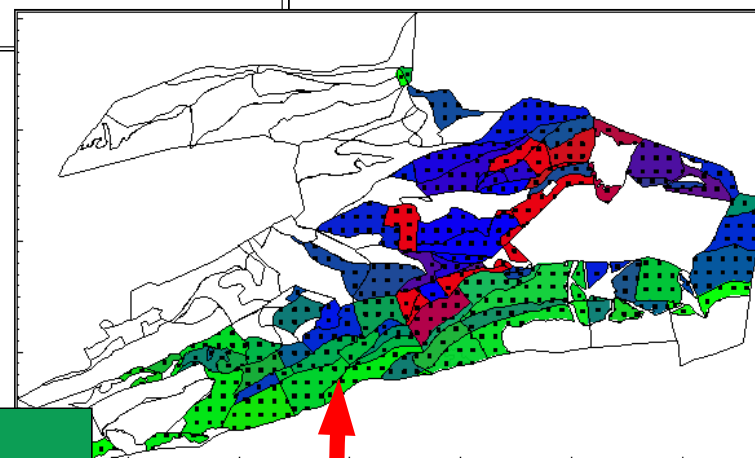
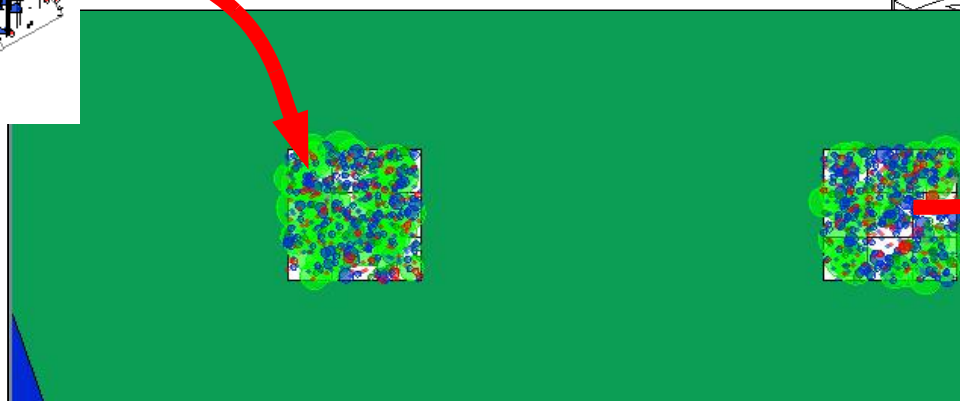
simulation à l'échelle  
Forêt / Paysage ...



... grille incomplète de cellules de 10 m x 10 m  
dans chaque peuplement



croissance/mortalité:  
interactions entre arbres

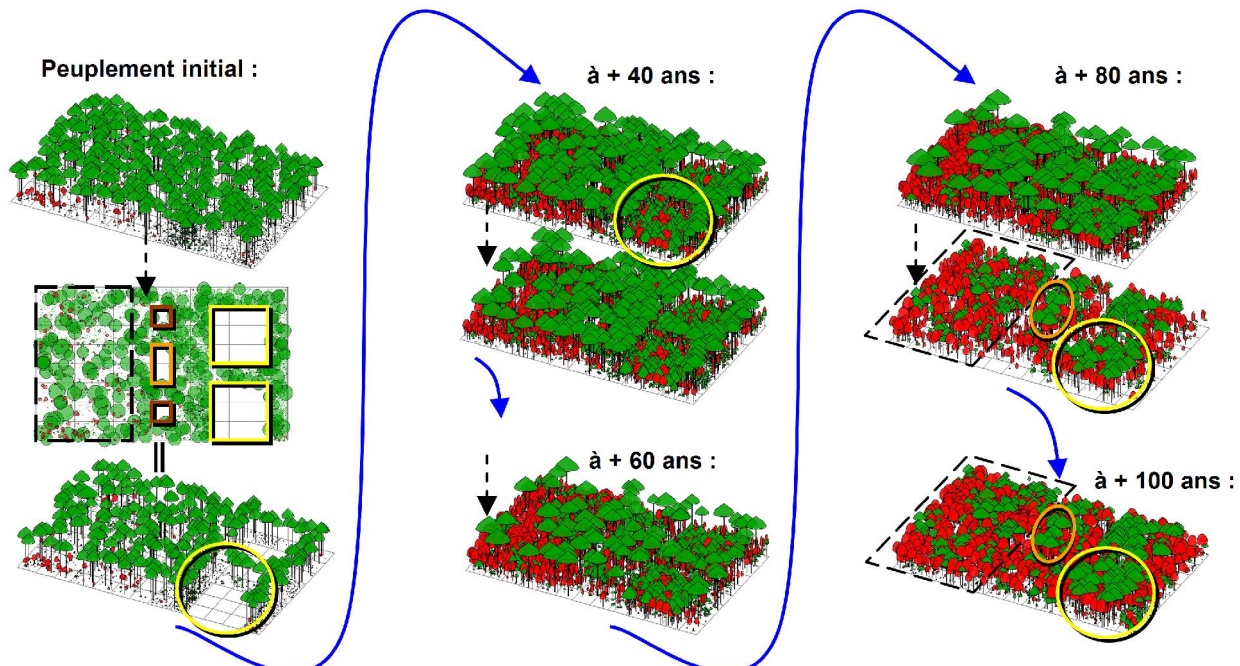


dispersion:  
interactions  
entre peuplements

# Modélisation et scénarisation

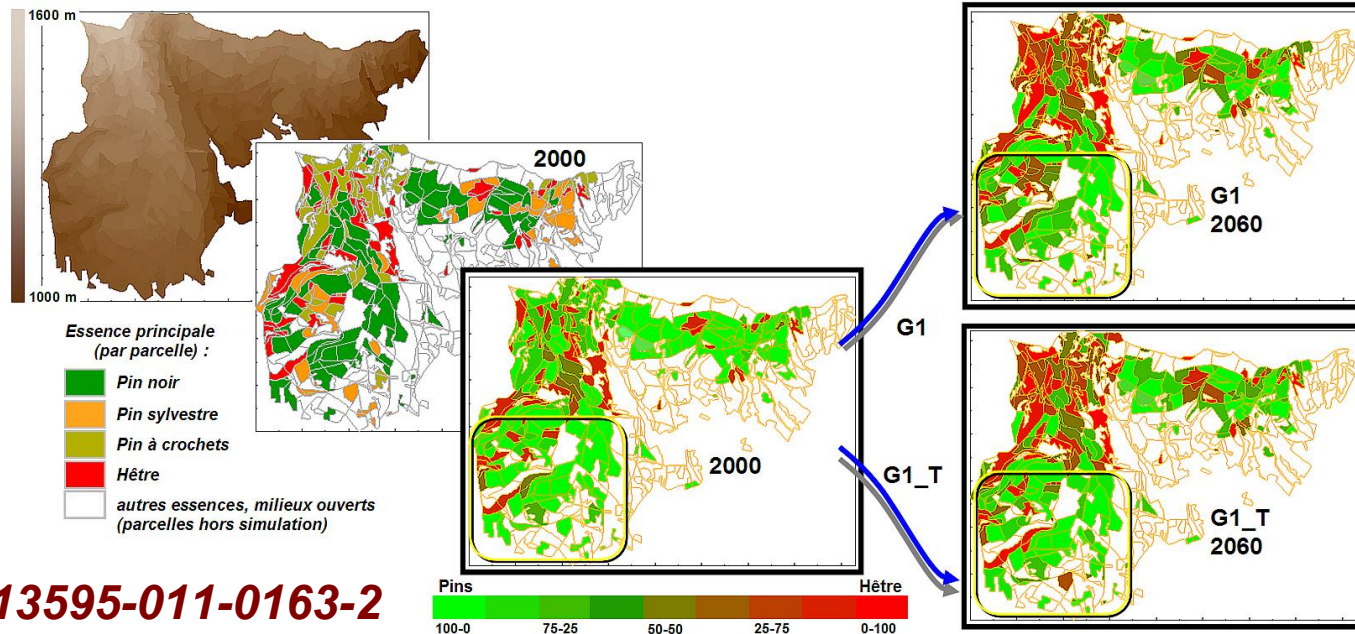
Simulation « Peuplement »  
(sylviculture)

quelques ha



Simulation « Paysage »  
(aménagement)

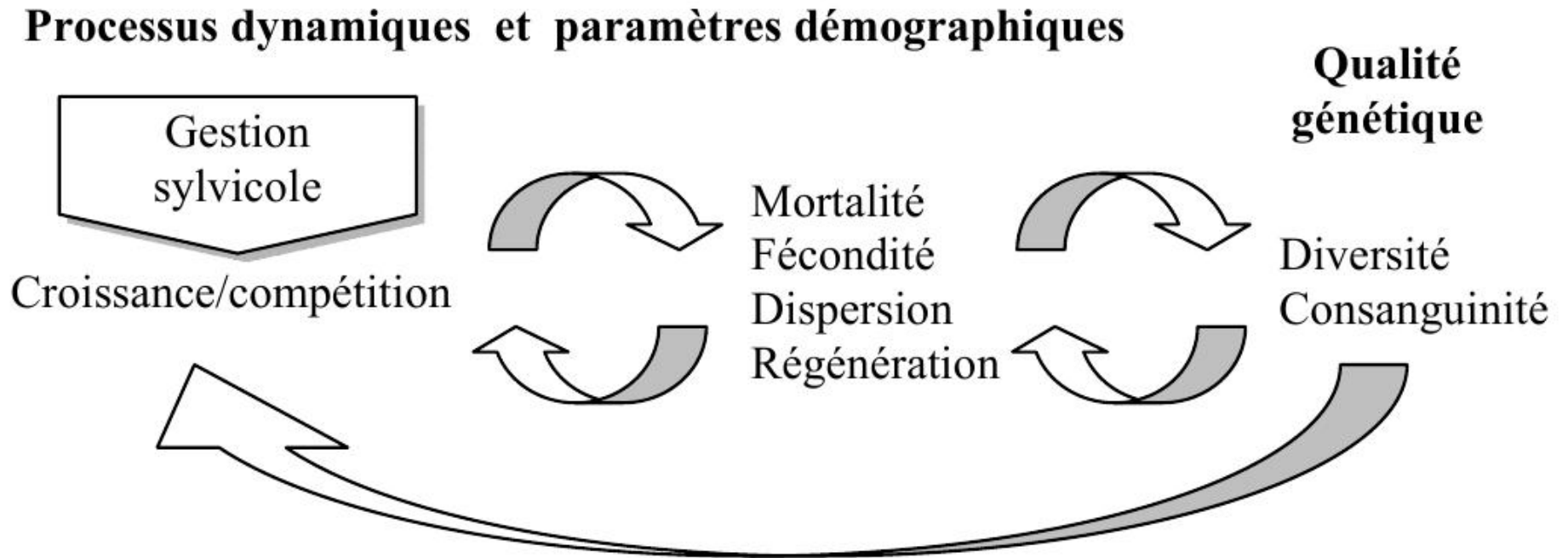
2000 ha



**Dreyfus (2012)**  
**Ann For Sci doi:10.1007/s13595-011-0163-2**

# Modélisation et scénarisation

Couplage des processus :  
du modèle de dynamique **démo-génétique** en environnement stable ...



***Dreyfus et al (2005) Les Actes du BRG 5 : 231-250***



# Modélisation et scénarisation

Couplage des processus :

... au modèle **physio-démo-génétique (PDG)** en environnement changeant

Intérêt par rapport aux modèles physiologiques :

=> la variabilité (hétérogénéité) interindividuelle est prise en compte

=> les paramètres physiologiques variables peuvent évoluer génétiquement

Intérêt par rapport aux modèles de dynamique :

=> les paramètres de la dynamique évoluent en réponse aux changements environnementaux

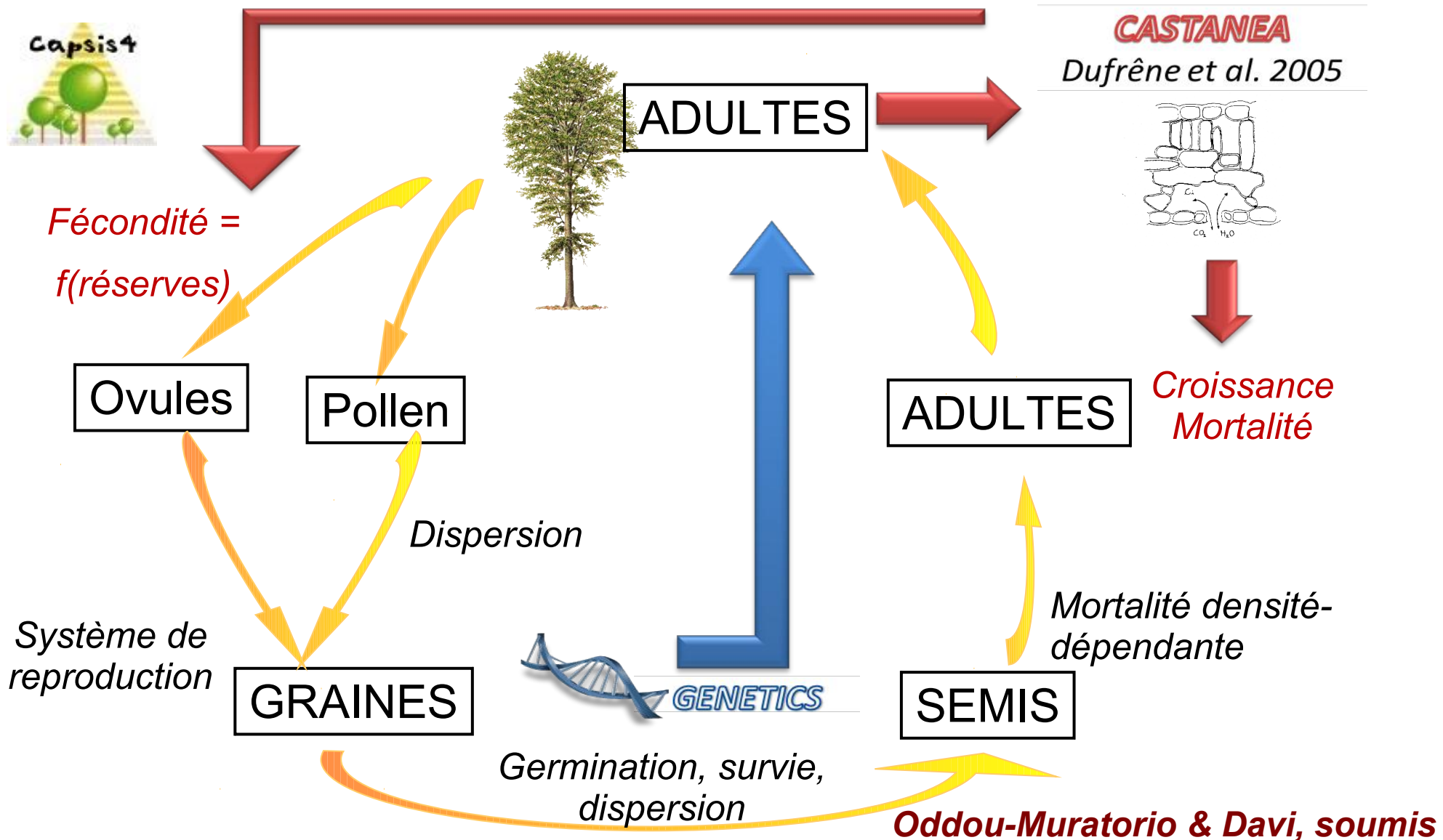
Intérêt par rapport aux modèles génétiques :

=> la valeur sélective (fitness) n'est plus fixée a priori, ses composantes (survie, reproduction) résultent dynamiquement des processus biophysiques

# Modélisation et scénarisation

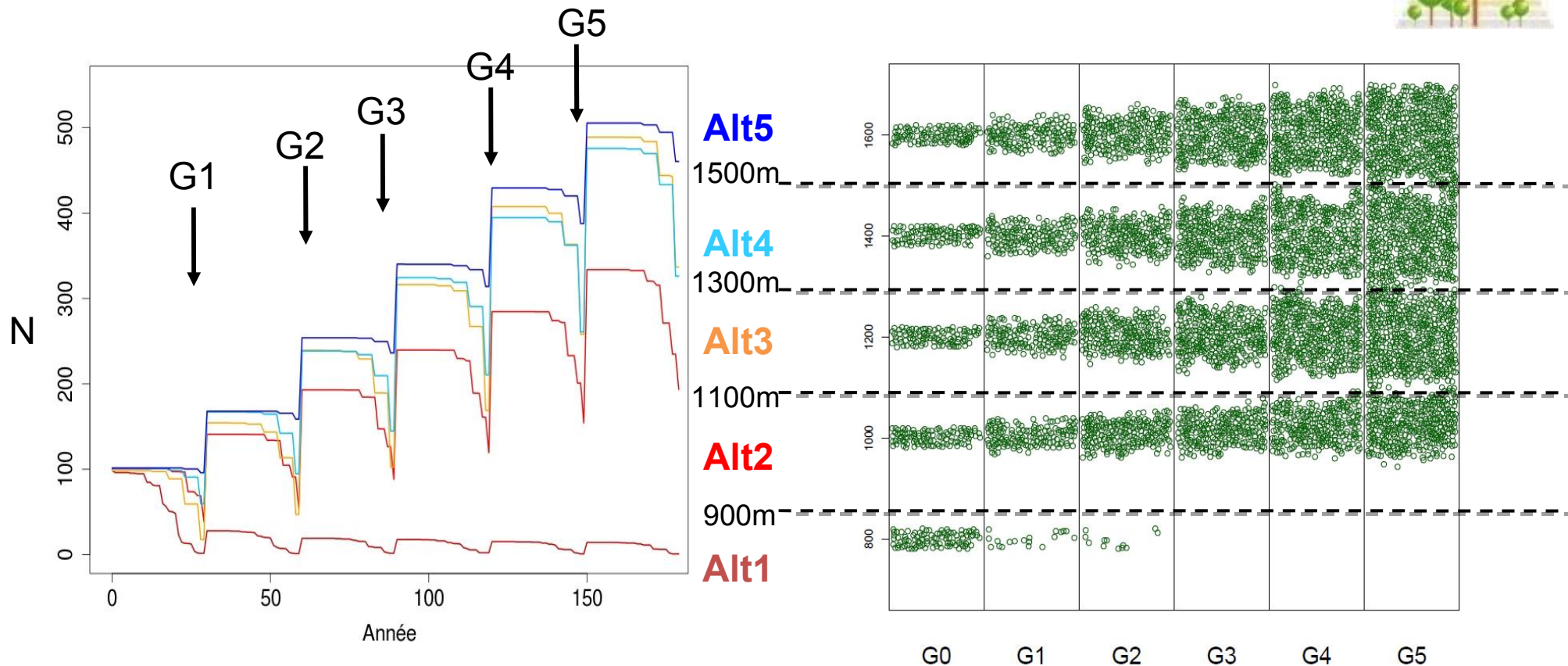
Couplage des processus :

... au modèle **physio-démo-génétique (PDG)** en environnement changeant



# Modélisation et scénarisation

Simulation de scénarios de colonisation du hêtre sur un gradient altitudinal du Mont Ventoux : 5 altitudes, 5 générations non chevauchantes  
Un seul caractère variable : la phénologie ( $F_{critBB}$ )



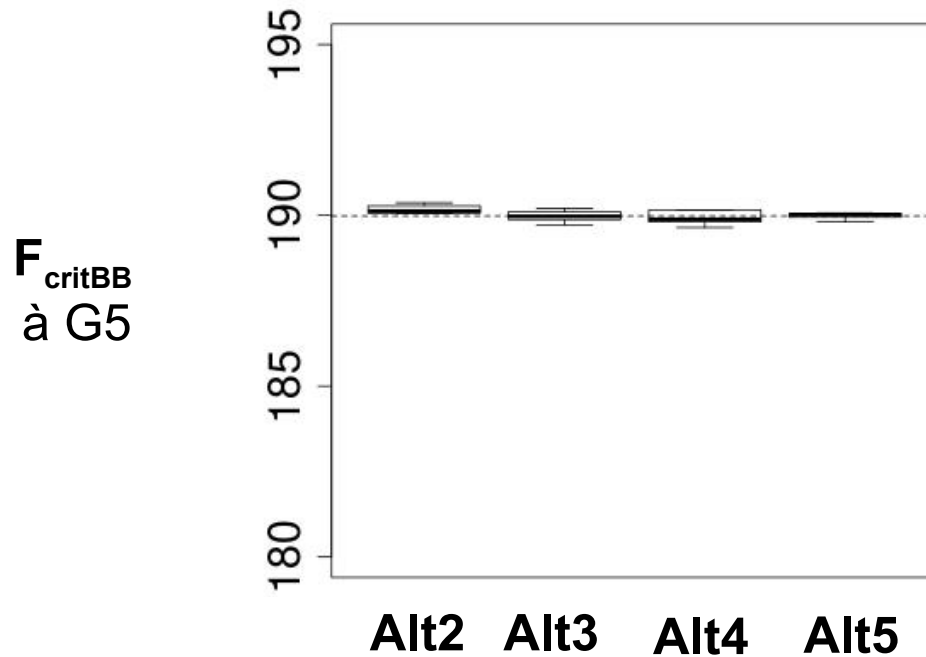
- ✓ Colonisation des populations Alt2 → Alt5
- ✓ Extinction en Alt1 ; limite altitudinale à ~980 m (Ventoux: 750 m)

**Oddou-Muratorio & Davi, soumis**

# Modélisation et scénarisation

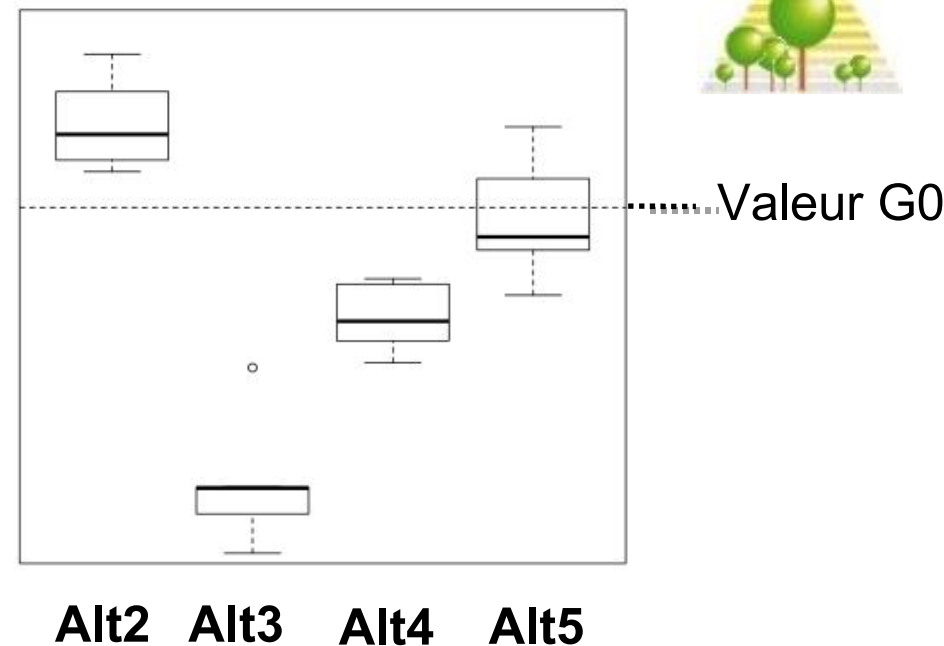
## A Scénario de référence:

$F_{critBB}$  variable, soumis à sélection mais non héritable



## B Scénario avec évolution:

$F_{critBB}$  variable, soumis à sélection et héritable



- ✓ Le processus de sélection généré ne varie pas de façon linéaire avec la variation environnementale, ni en direction ni en intensité
- ✓ Alt 2 évolue vers un débourrement plus tardif, Alt 3 et Alt 4 évoluent vers un débourrement plus précoce
- ✓ L'évolution est pilotée par la mortalité, peu par la reproduction
- ✓ Les causes de mortalité varient entre haute et basse altitude

*Oddou-Muratorio & Davi, soumis*



# Modélisation et scénarisation



## Plateforme de modélisation

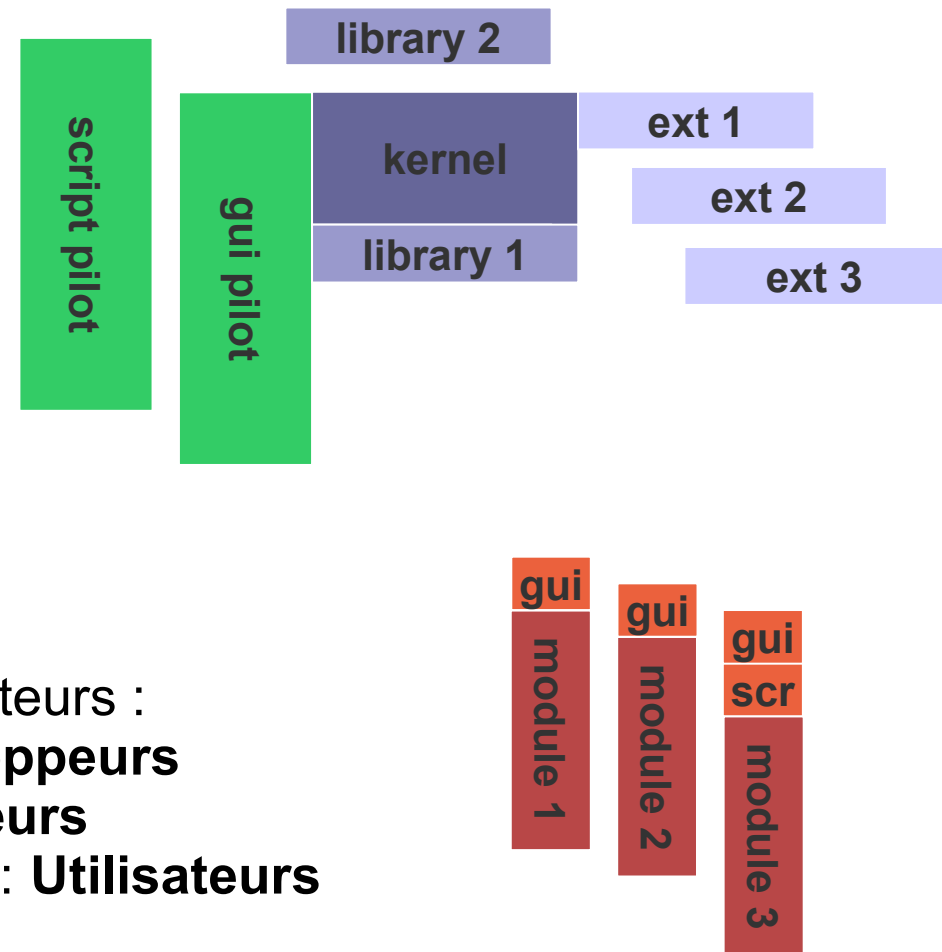
La modélisation est aussi un outil pour réaliser l'interaction entre disciplines, entre recherche et développement.

Une plateforme réseau avec 3 catégories d'acteurs :

- des informaticiens animent le projet : **Développeurs**
- des scientifiques modélisateurs : **Modélisateurs**
- des utilisateurs experts (partenaires) ou non : **Utilisateurs**

Objectif, coller à la réalité : **peu de développeurs, beaucoup de modélisateurs**  
→ les modélisateurs doivent développer

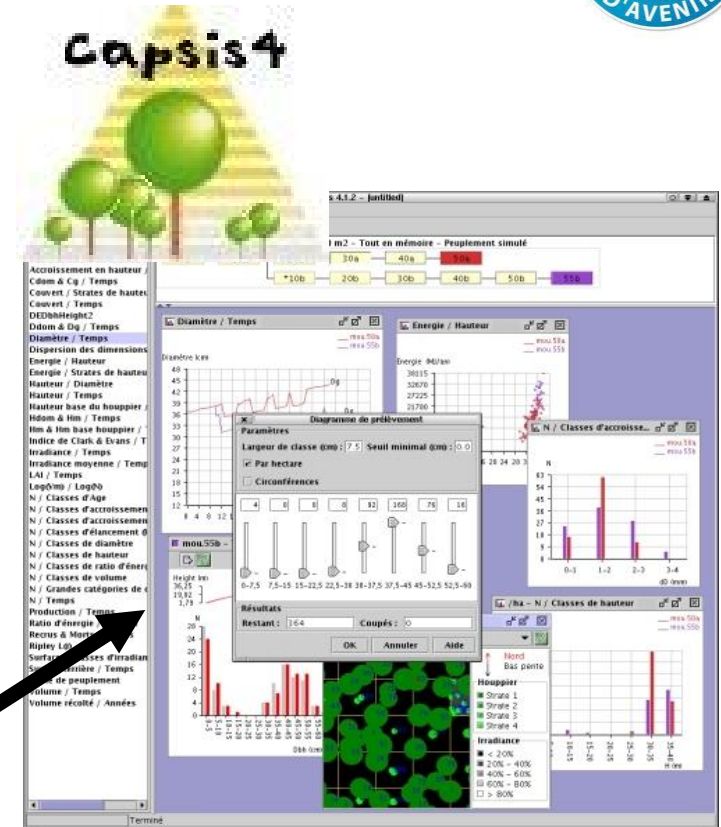
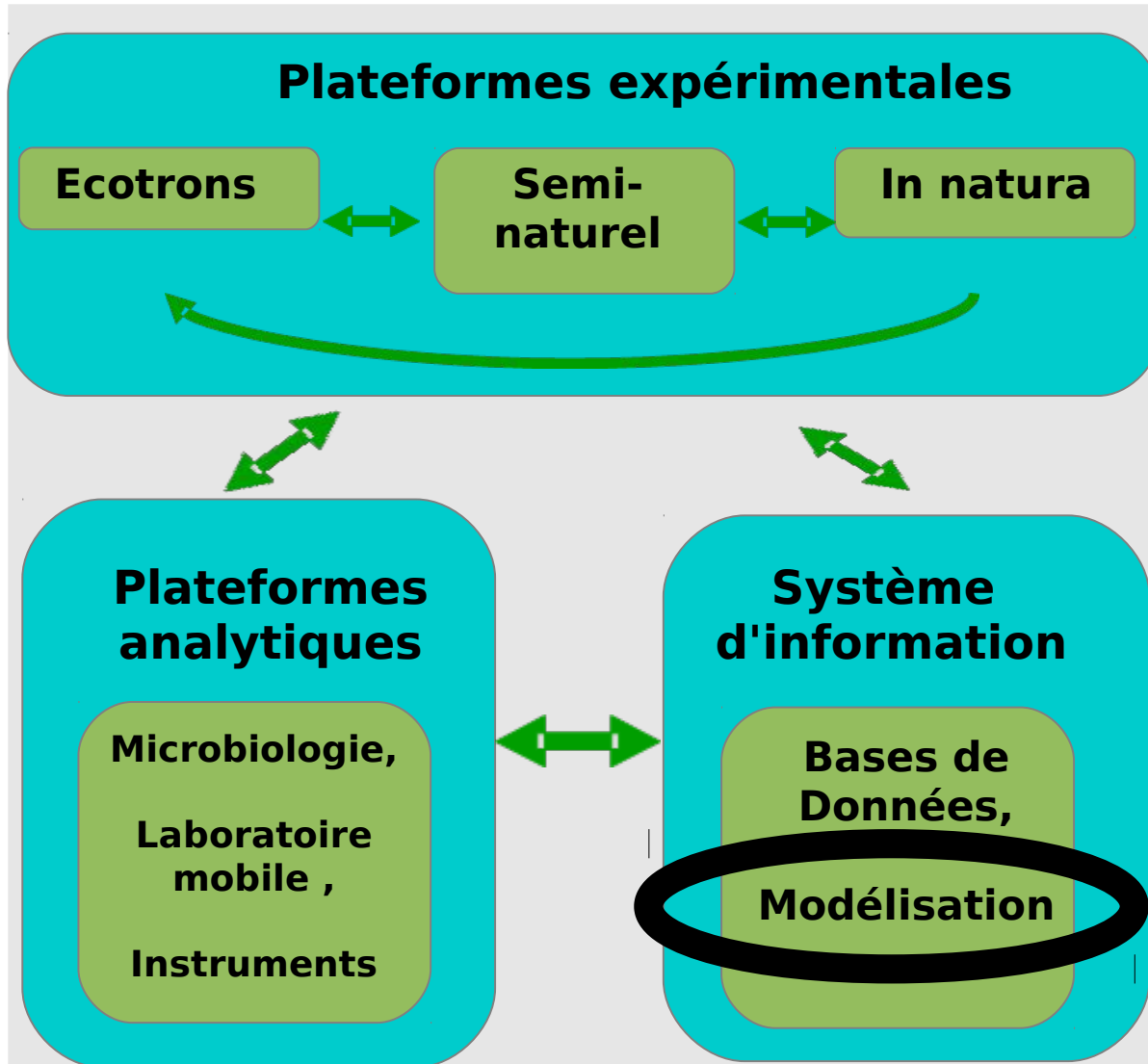
Les développeurs et modélisateurs forment **une communauté de co-développement** (plus de 50 modèles intégrés)



# ANAEE-Services



Une infrastructure nationale pour  
l'« Analyse et Expérimentation sur les Ecosystèmes »



# Adaptation des forêts au CC : un enjeu d'innovation

Enjeu : dépasser la querelle des « béats » contre les « catastrophistes »

➤ *approche dynamique de l'adaptation, passant par la compréhension des processus (écologiques, interventions) et de leurs interactions.*

Enjeu : définir des stratégies réellement robustes et/ou flexibles

➤ *complémentarité des modèles pour produire différents scénarios, caractériser les points de basculement, identifier les sources de flexibilité.*

Innovations dans les pratiques de recherche

➤ *nouveaux outils et méthodes scientifiques*

➤ *interdisciplinarité*

Innovation dans les pratiques de gestion

➤ *intégrer les nouvelles perspectives de connaissances*

Innovation dans les pratiques d'interface recherche – action

➤ *soutenir les arènes d'échanges entre acteurs, clarifier les rôles*