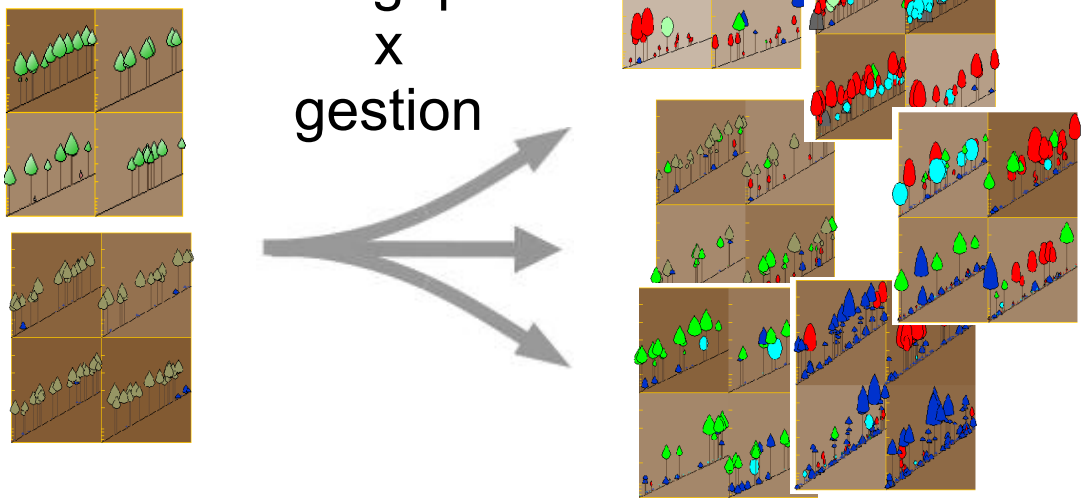
Perspectives ouvertes par une approche intégrée des processus de dynamique, de fonctionnement et de diversité, le cas du Mont Ventoux.

F. Lefèvre[1], H. Davi[1], Ph. Dreyfus[1,2], F. de Coligny[3], S. Oddou-Muratorio[1], C. Pichot[1]

[1] *INRA, Avignon, Ecologie des Forêts Méditerranéennes (URFM)*
[2] *adresse actuelle : ONF, Avignon, Département R&D*
[3] *INRA, Montpellier, Botanique et Bioinformatique de l'Architecture des Plantes (UMR AMAP)*

Adaptation : polysémie et incertitudes

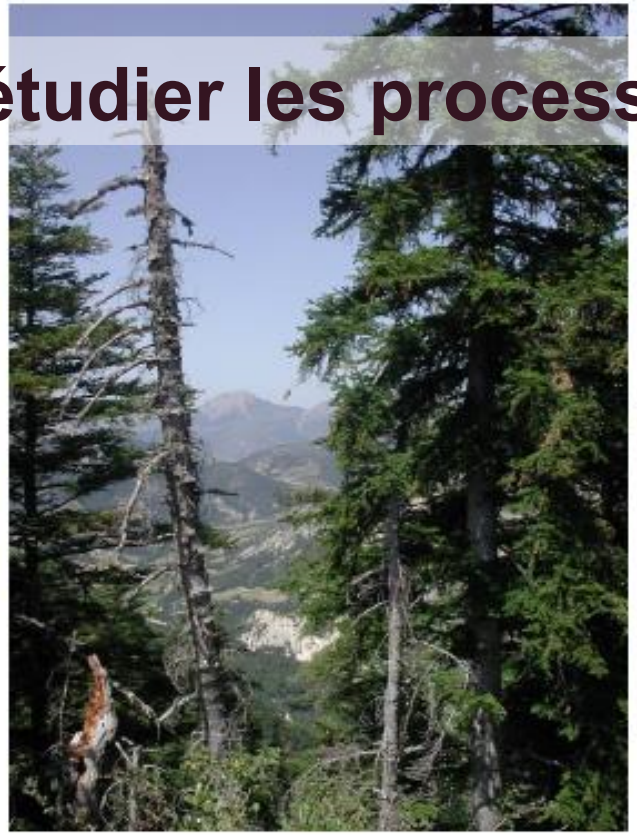
processus
écologiques
x
gestion

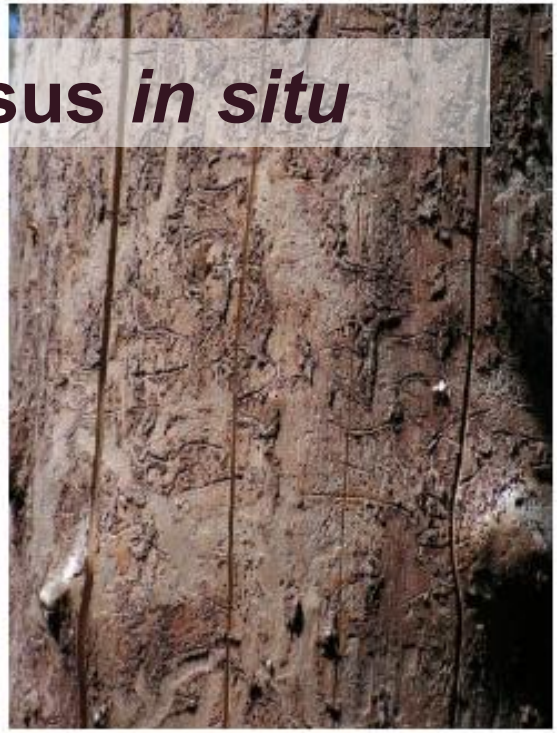


gérer les transitions, les trajectoires
plutôt que chercher à figer un idéal

Le Mont Ventoux : étudier les processus *in situ*

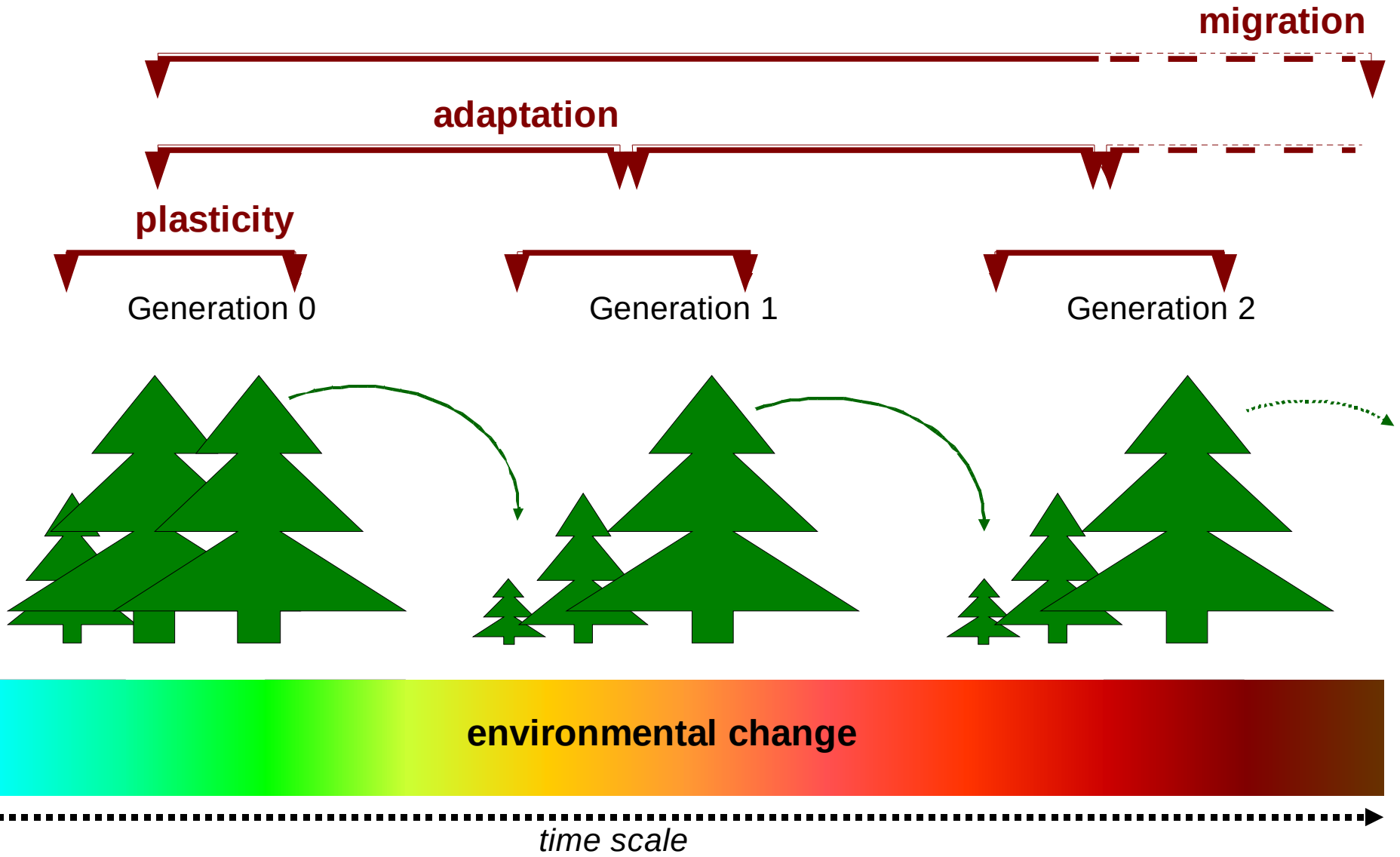
Le Mont Ventoux : étudier les processus *in situ*



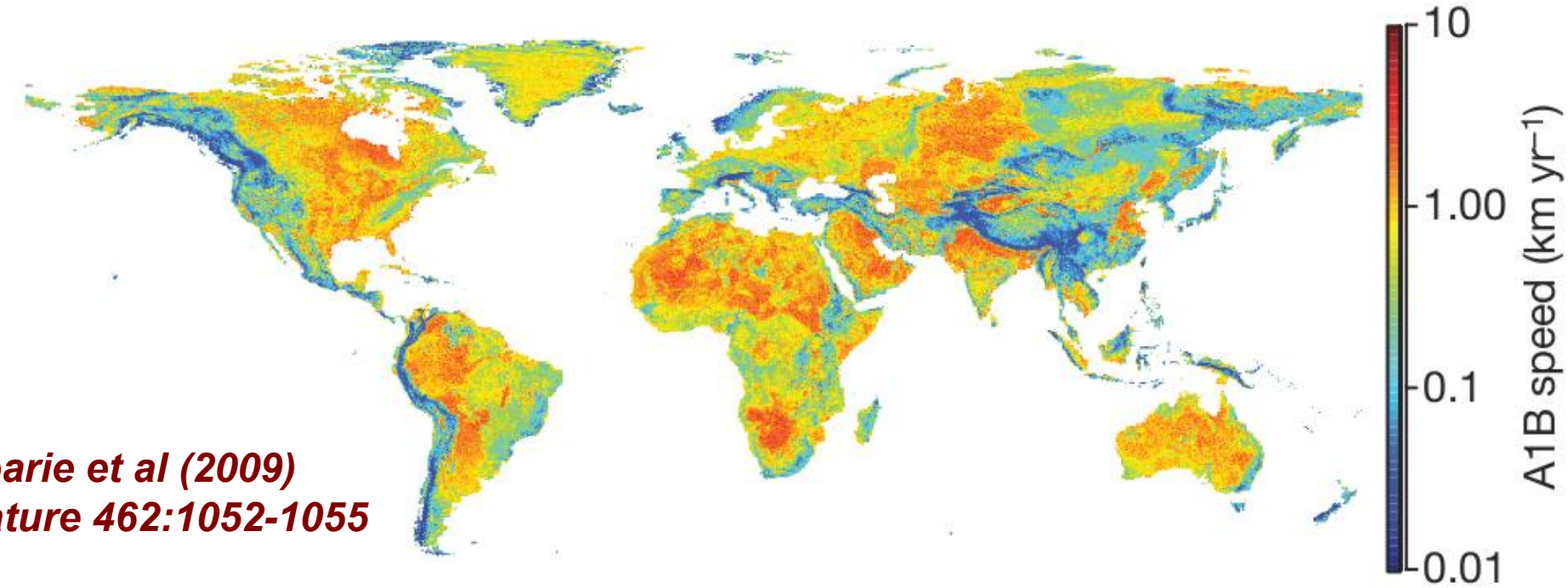


Les échelles de temps de l'adaptation en forêt

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



Notion de vélocité du changement climatique



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

vélocité (kms.an^{-1})

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

temps de résidence (an)

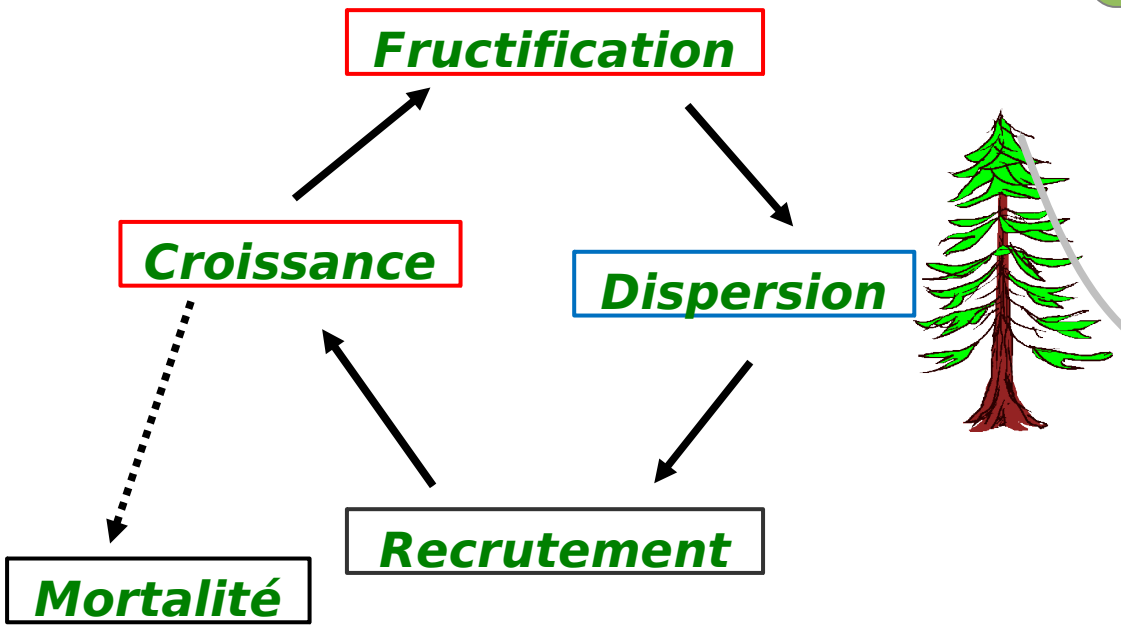
$$\frac{\text{aire non fragmentée (km)}}{\text{velocité (km.an}^{-1}\text{)}}$$

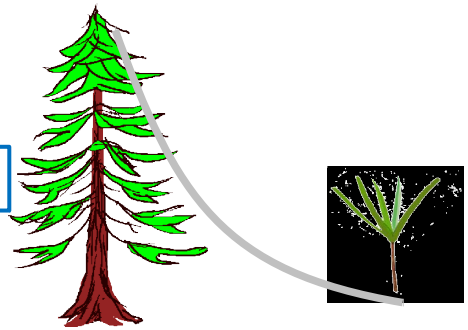
14 biomes (moy)	0.08 – 1.26	1.1 – 74.6
Mt Ventoux		
prédit IPCC A1B	0.01	140 ans
Observé 1980-2006	0.04	36 ans

Évaluer le potentiel de migration

1. Identification et calibration des processus

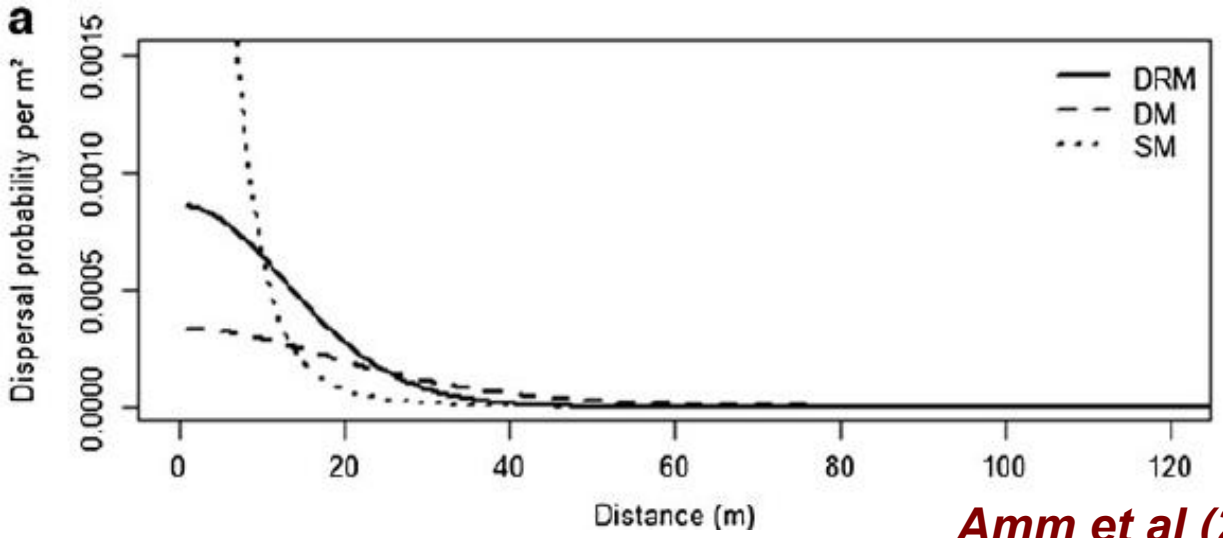
2. Modélisation et simulation





3. Scénarios d'évolution

Évaluer le potentiel de migration



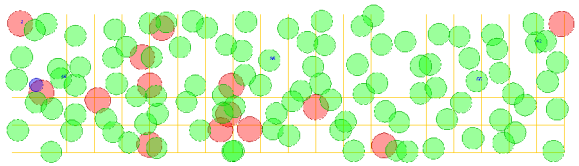
Amm et al (2012)
Ann For Sci 69:845-856

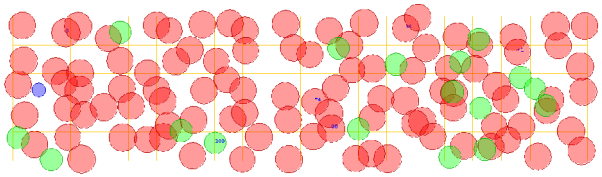
Capsis4

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

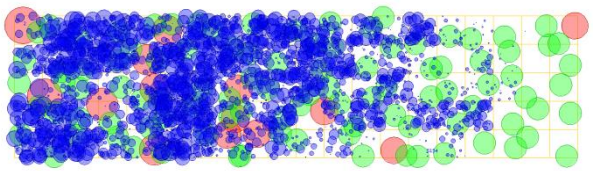
Le **sapin** se disperse dans du **hêtre**

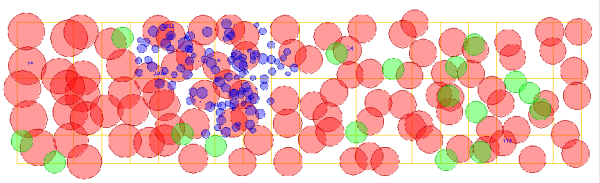
1975





2100



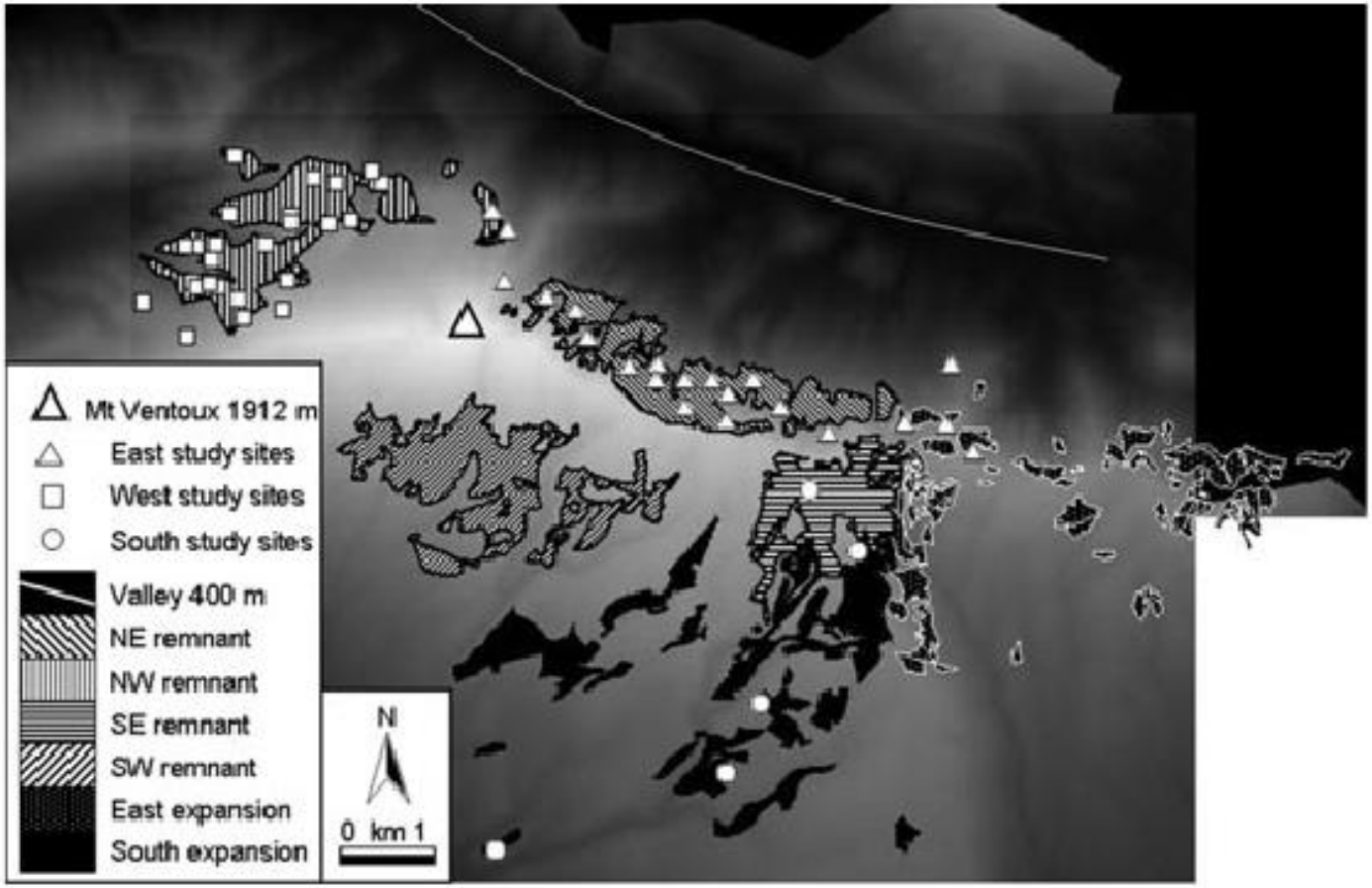


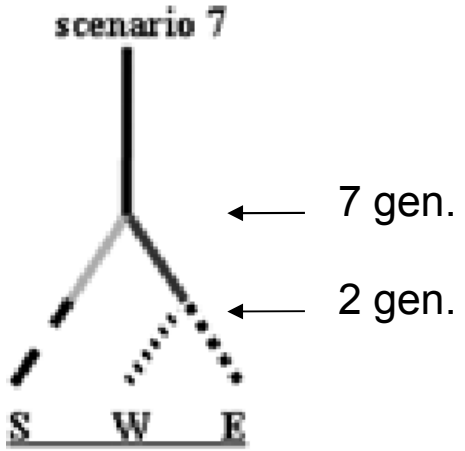
Forte colonisation

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)

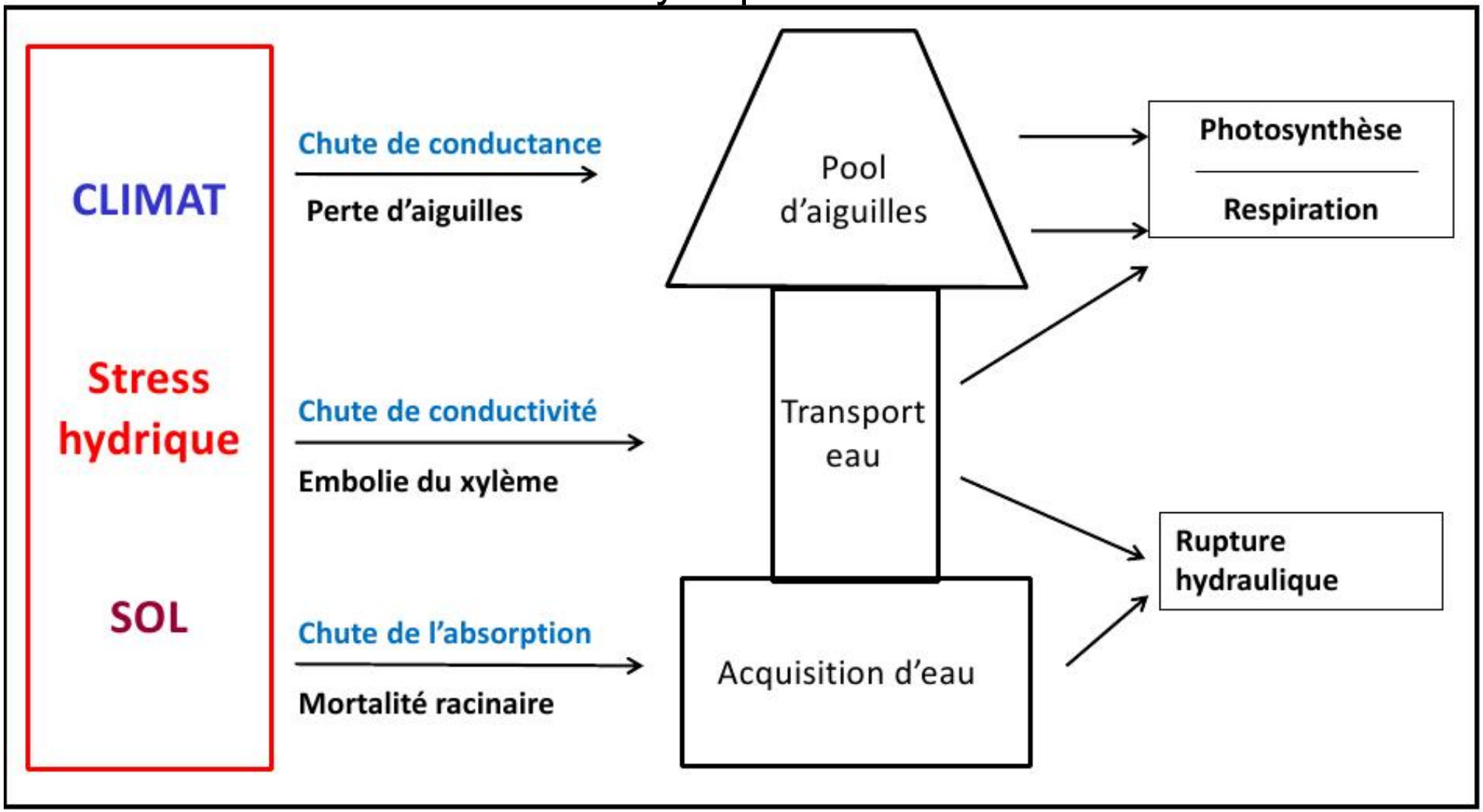




Lander et al. (2011) Mol Ecol 20:5182-5196

Etude *in situ* de la réponse aux aléas climatiques

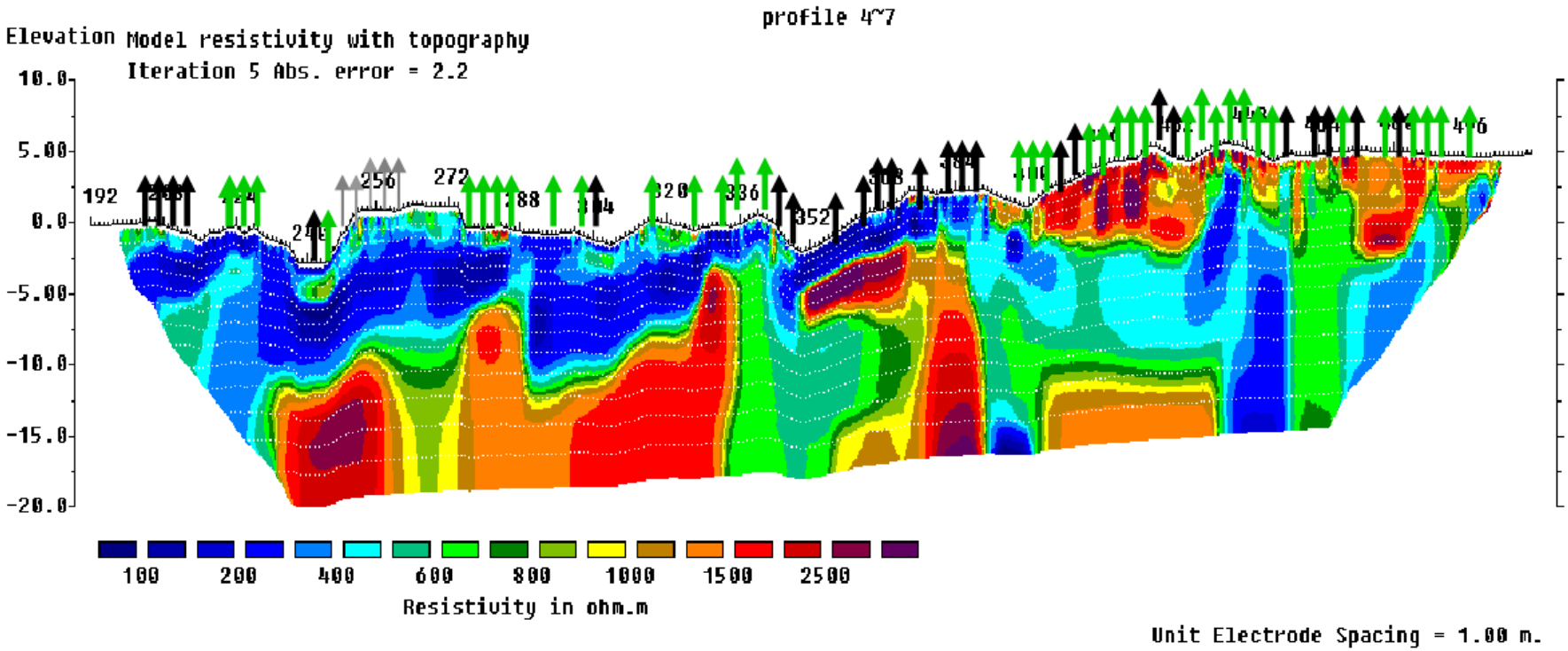
Effet du stress hydrique sur les arbres



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)

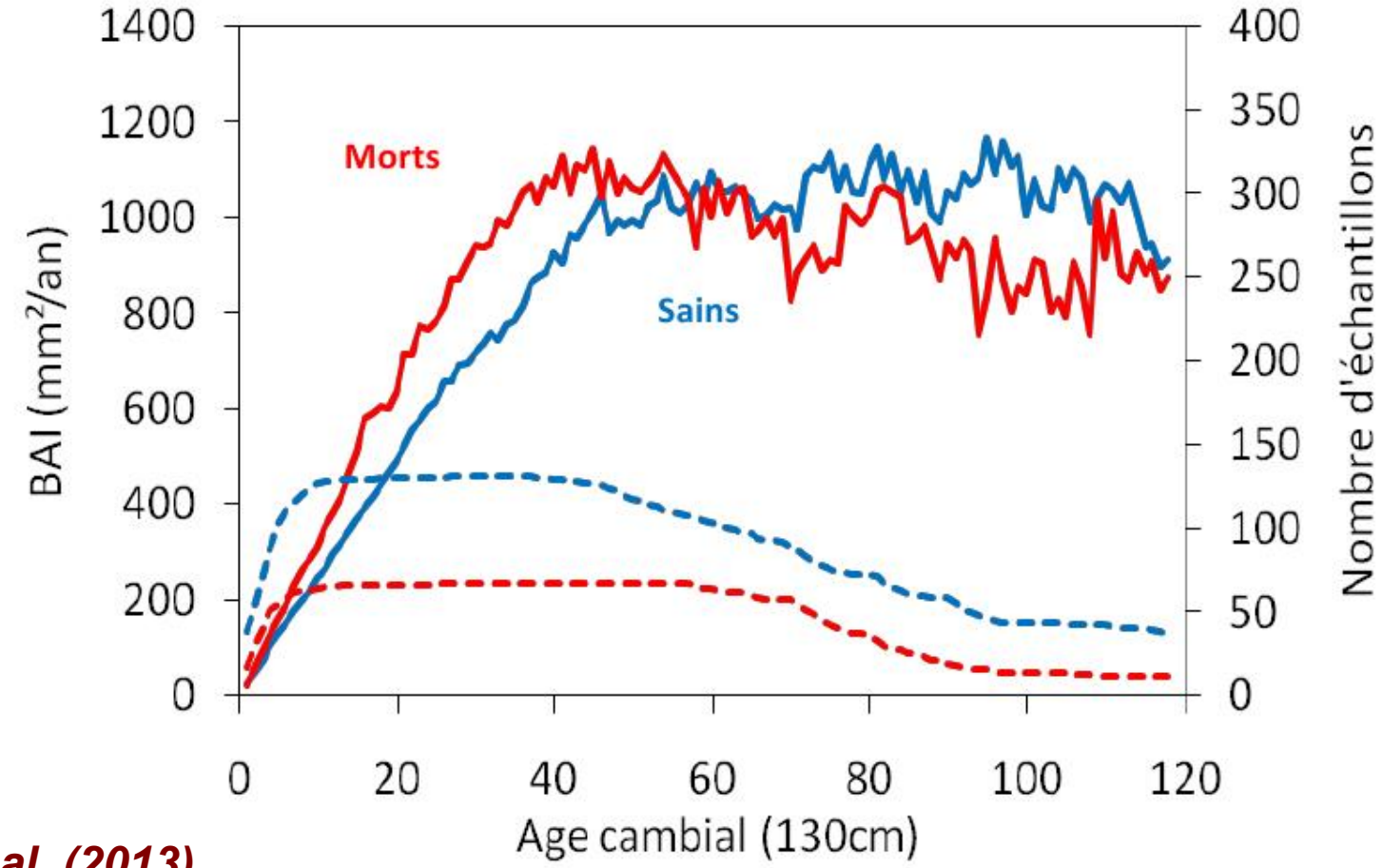


Nourtier et al. (2013)
Ann For Sci doi:10.1007/s13595-012-0229-9.

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.

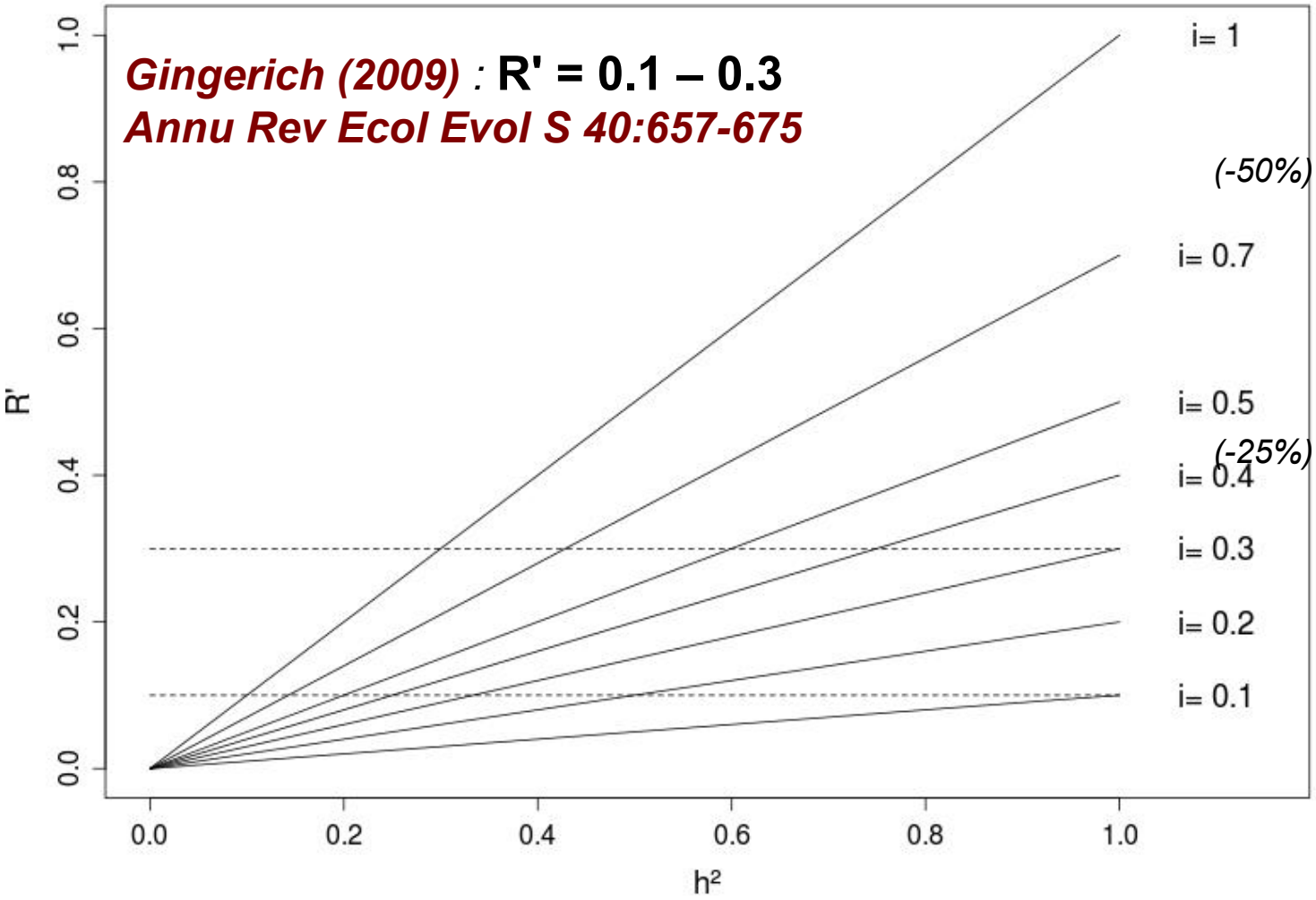
Les arbres morts avaient une croissance juvénile supérieure

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*

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

$$Z_{ij} = 2\, r_{ij} h^2 + bd_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

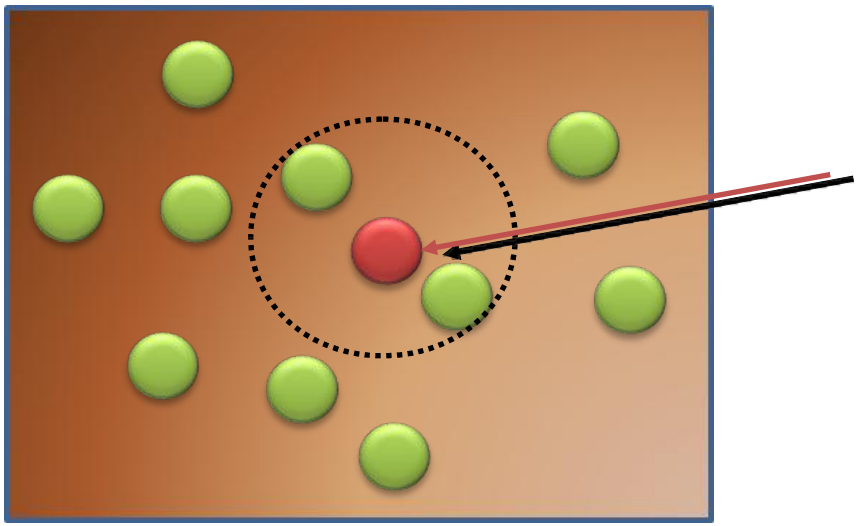
Ritland (1996) Evolution 50:1062-1073

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)

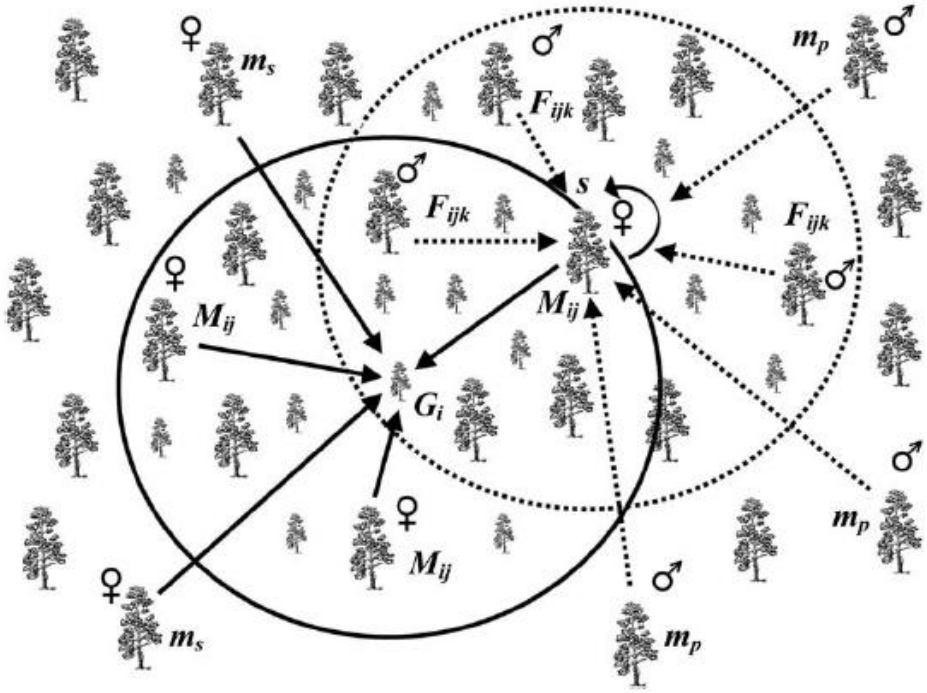
Cas du hêtre au Mont Ventoux : traits foliaires sur arbres adultes, 19 SSR

	PSS	LMA	$\delta^{13}C$	N_{mass}
σ^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 (β)



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

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

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

π_s : succès reproducteur femelle

π_p : succès reproducteur mâle

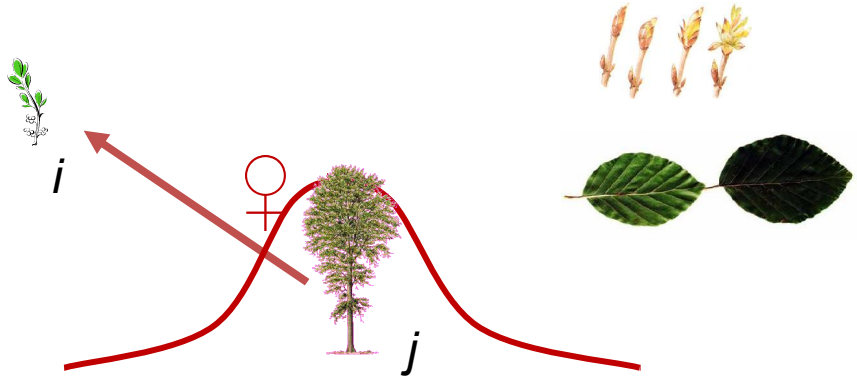
$m_p(m_s)$: taux de migration de l'extérieur de la parcelle par pollen (graines)

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

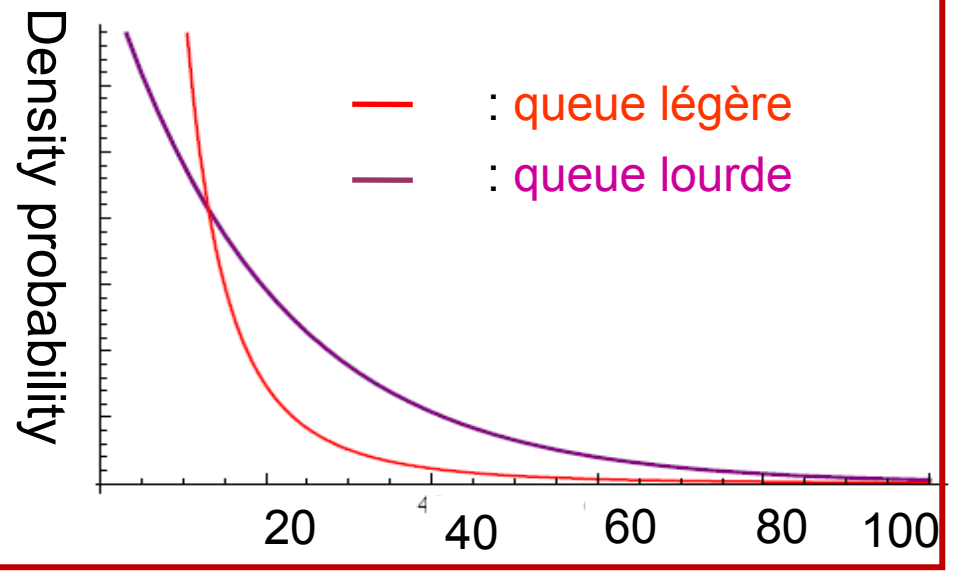
Application au hêtre sur le Mont Ventoux

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)

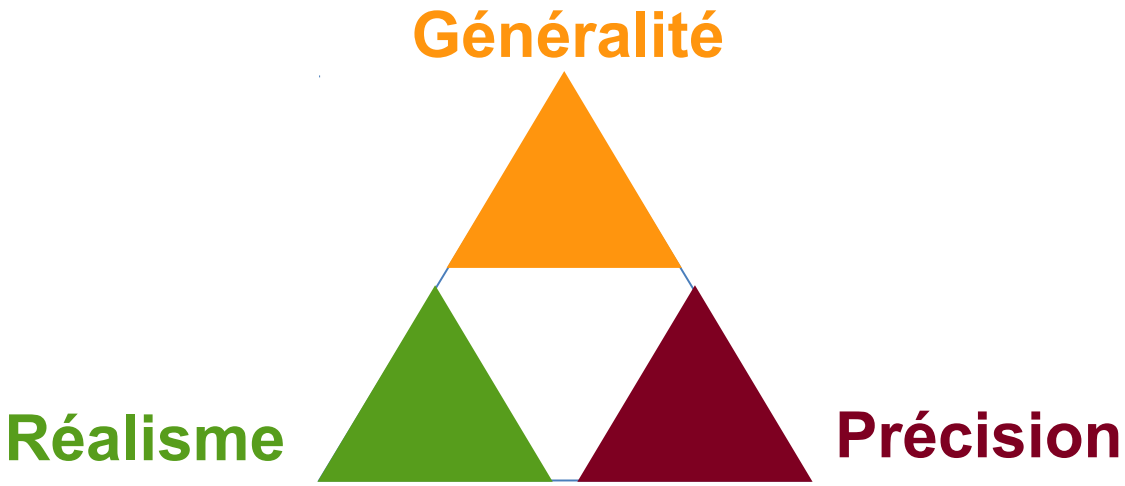
Pour chaque caractère T :

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

Gradient de sélection multi-caractère

Modélisation et scénarisation

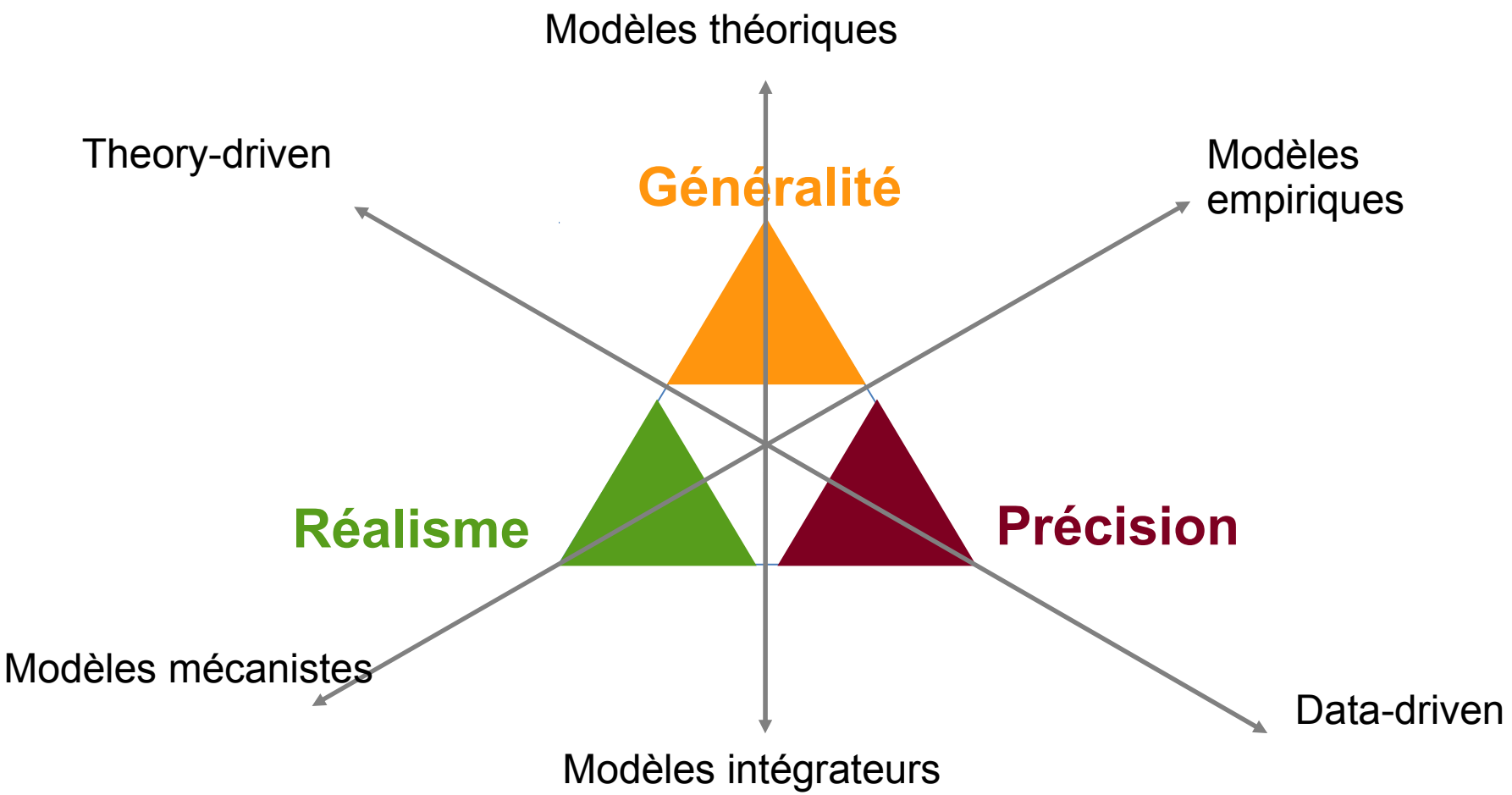
Qualité des modèles pour produire des scénarios d'adaptation au CC



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

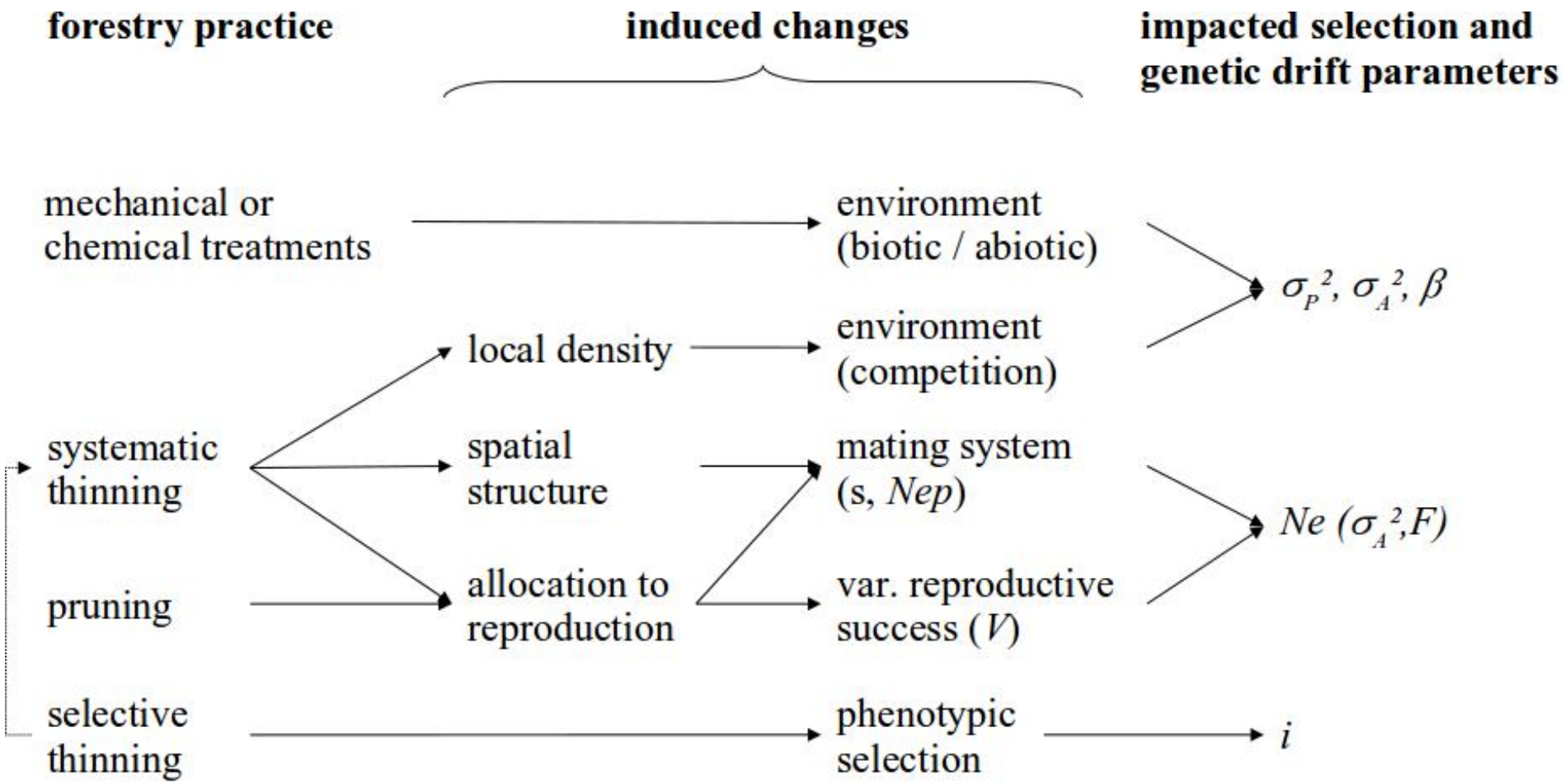
Types de modèles pour produire des scénarios d'adaptation au CC



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

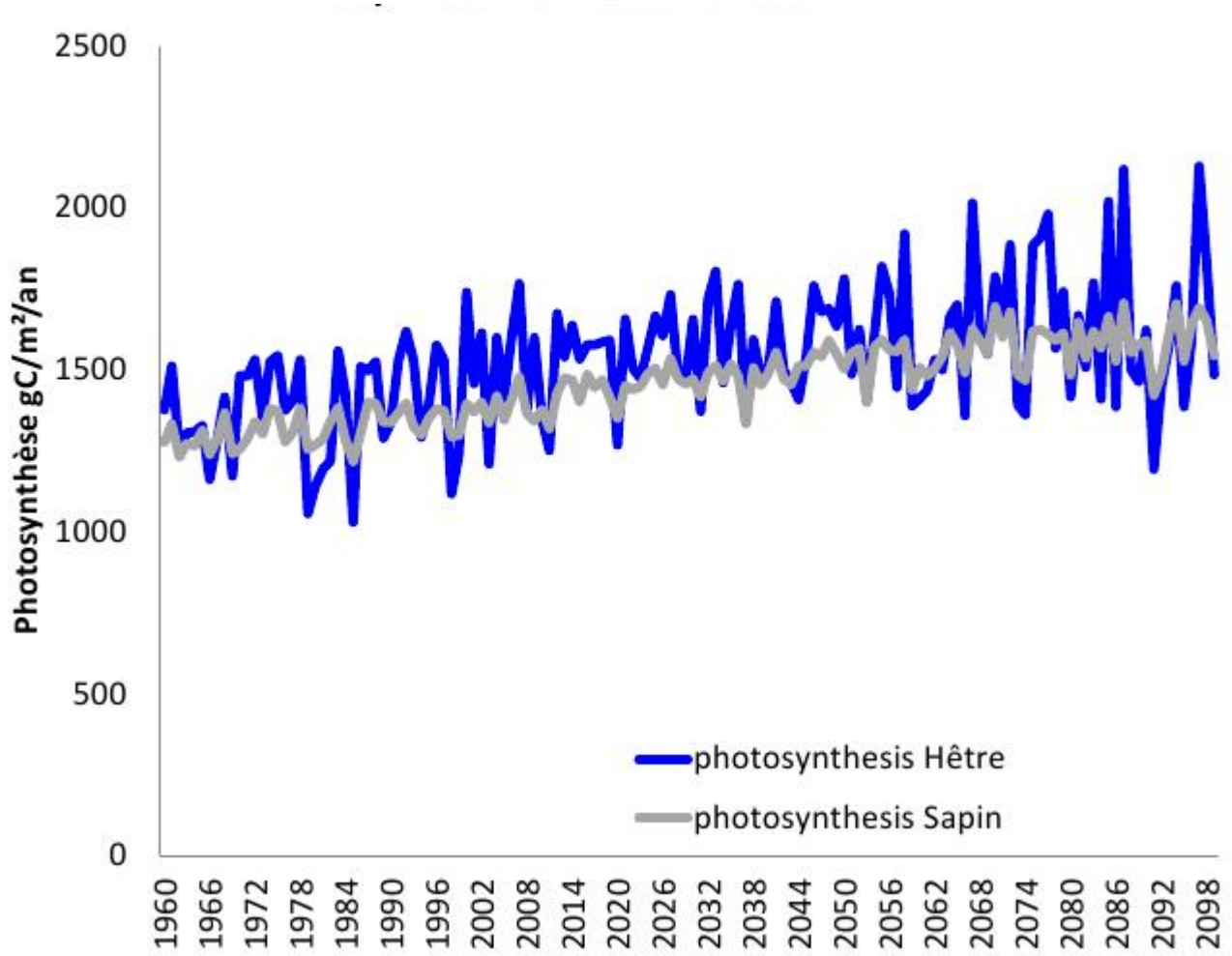
Processus	Pas de temps
Interception de la lumière	Heure
Photosynthèse foliaire	Heure
Conductance stomatique	Heure
Respiration des organes	Heure
Transpiration	Heure
Bilan énergétique	Heure
Interception des pluies	Jour
Bilan hydrique	Jour
Respiration du sol	Jour
Croissance des organes	Jour
Largeur de cernes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

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

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

Modélisation et scénarisation

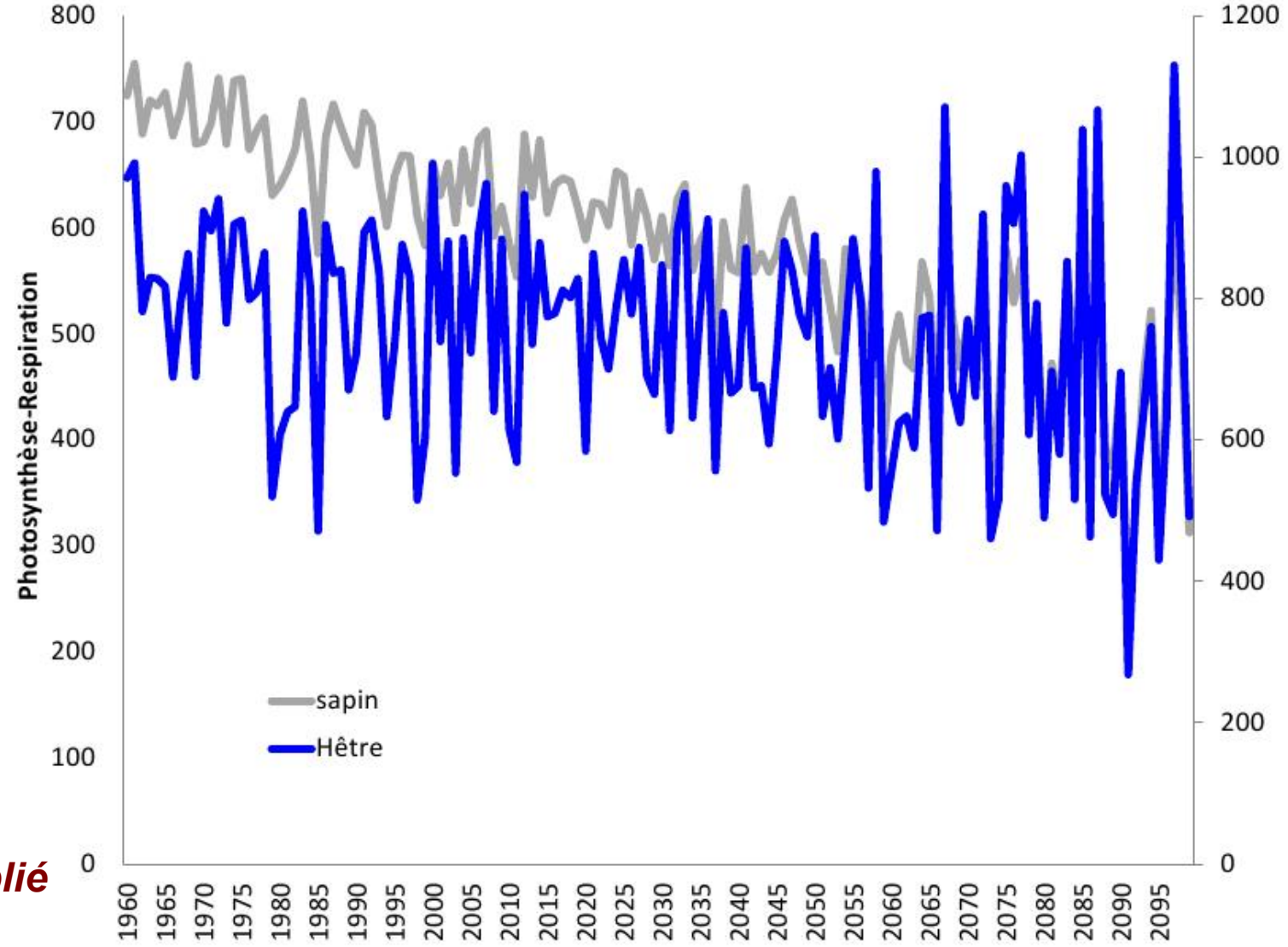
CASTANEA :
évolution simulée de la photosynthèse du **hêtre** et du **sapin** au Mont Ventoux



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 :

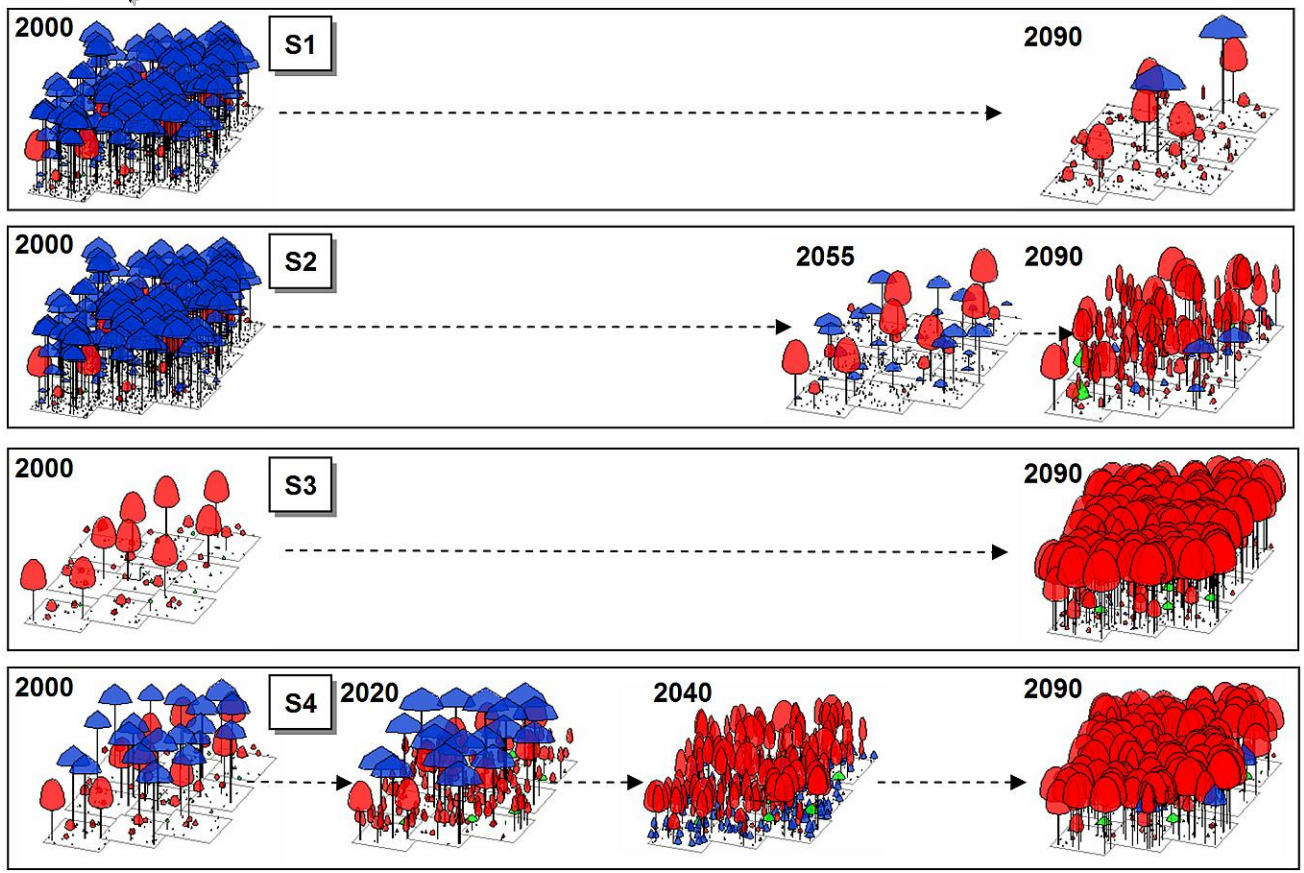
S1. Sans intervention :
-> *structures ouvertes mixtes arbres-ligneux bas*

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

Sapinière en zone à fort risque de dépérissement

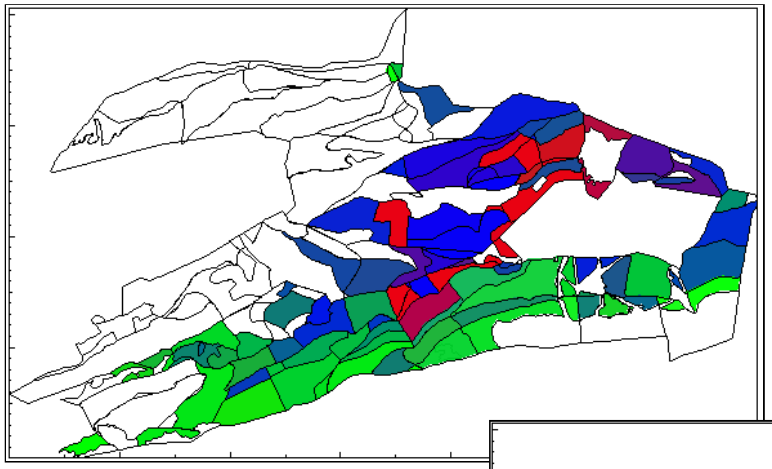


Dreyfus (2012) Ann For Sci doi:10.1007/s13595-011-0163-2

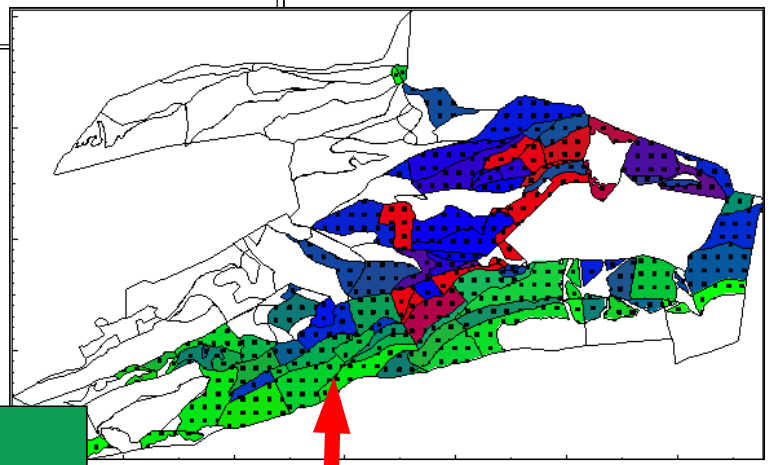
Modélisation et scénarisation

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

simulation à l'échelle
Forêt / Paysage ...

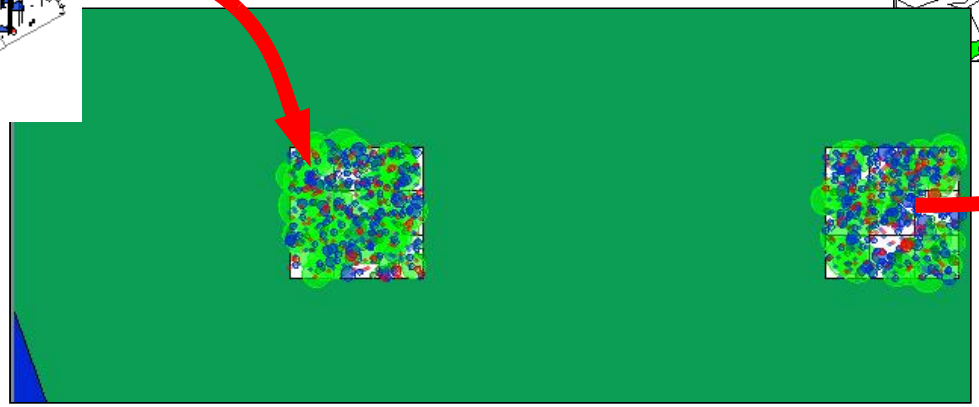


Capsis4



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

croissance/mortalité:
interactions entre arbres



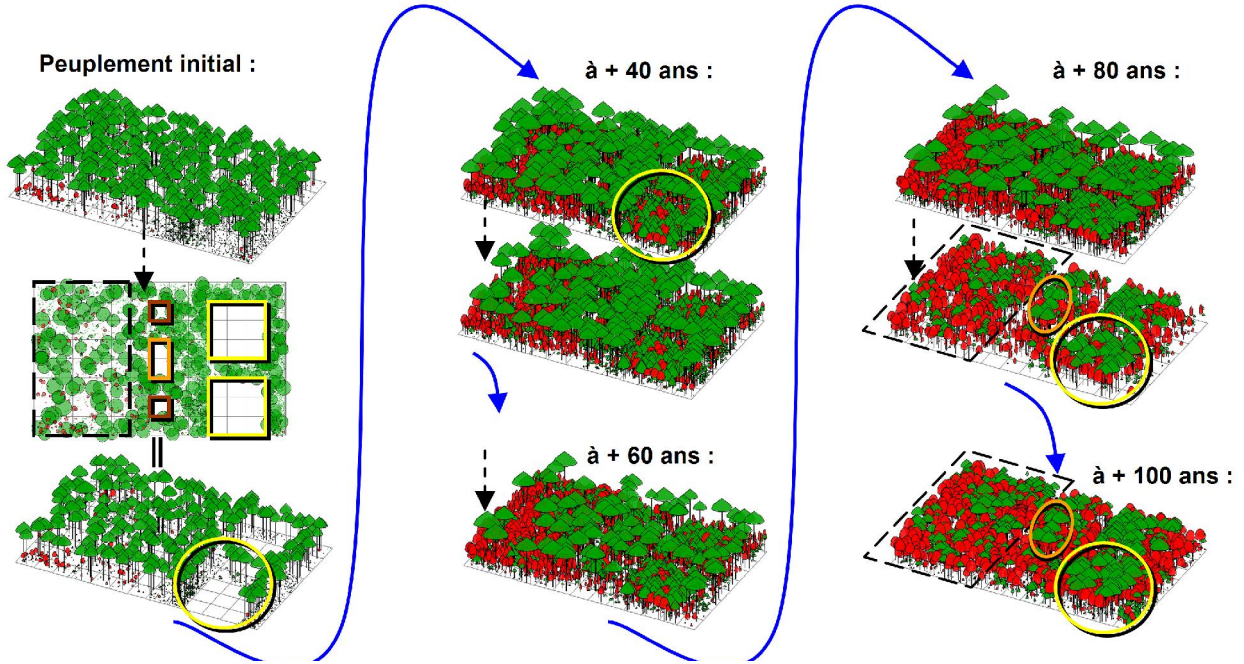
dispersion:
interactions
entre peuplements

Modélisation et scénarisation

Simulation « Peuplement » (sylviculture)

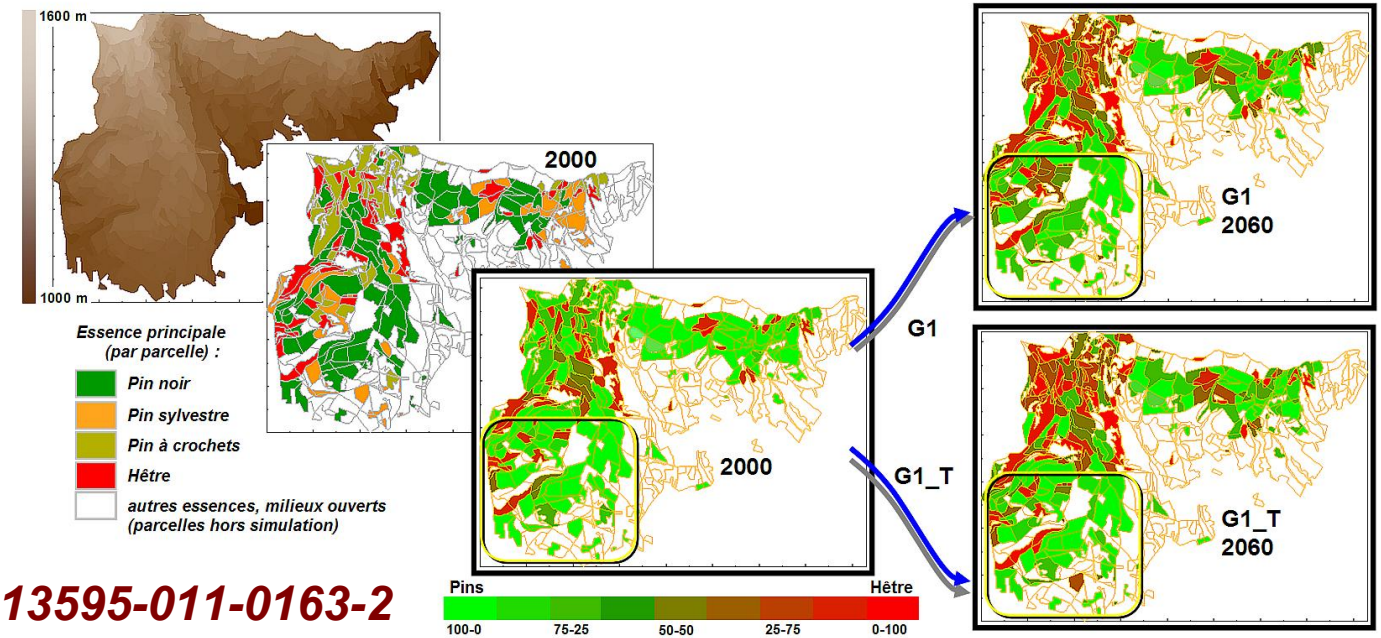
quelques ha

Capsis4



Simulation « Paysage » (aménagement)

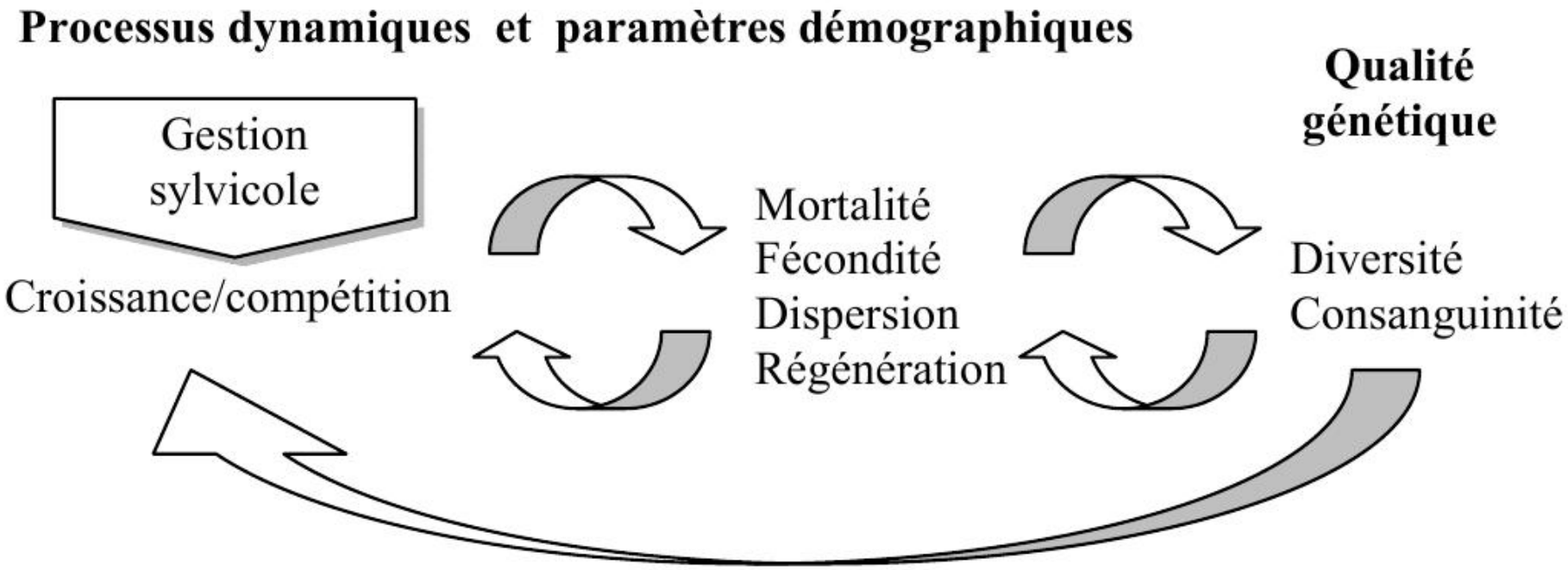
2000 ha



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

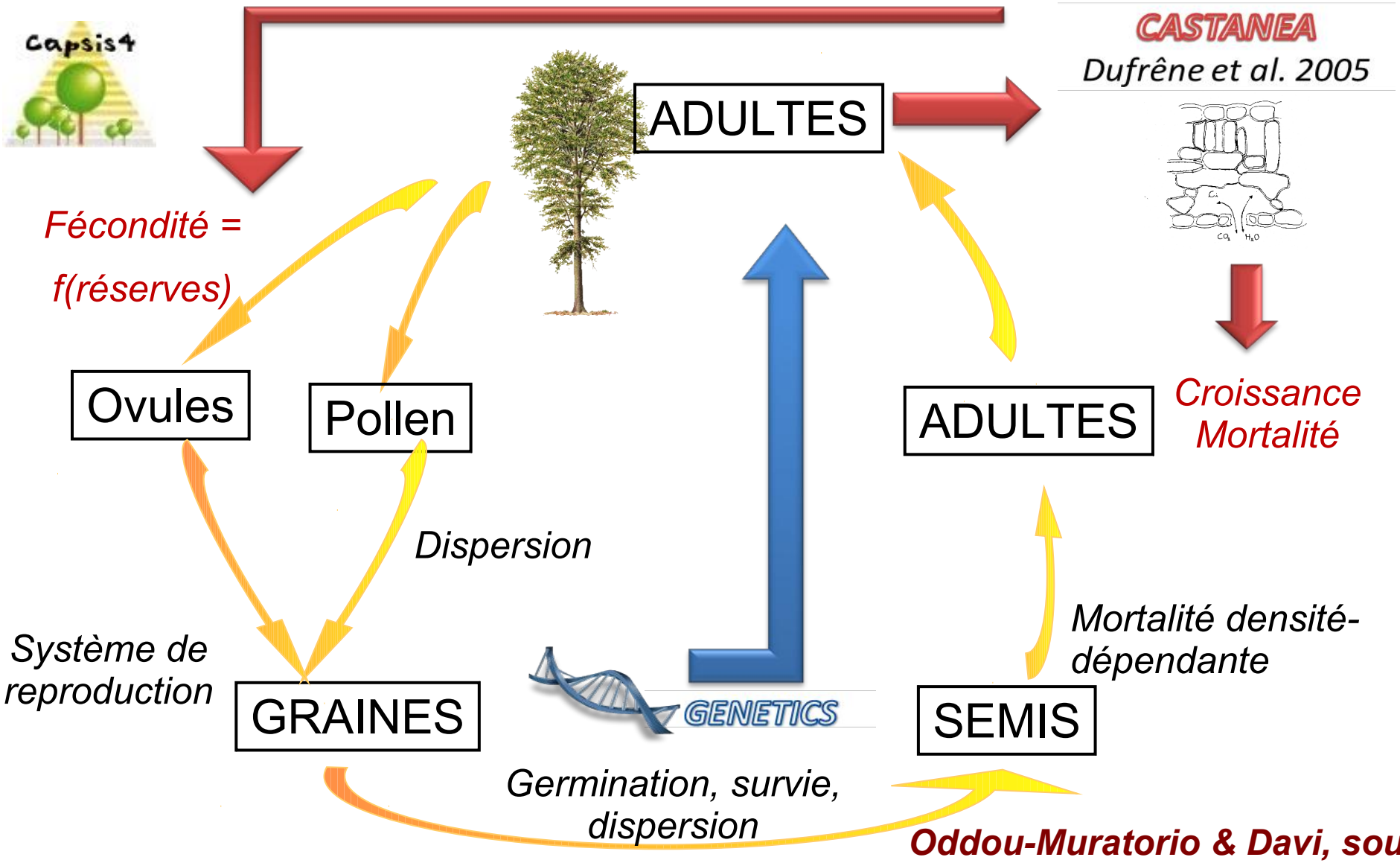
Intérêt par rapport aux modèles de dynamique :
=> les paramètres de la dynamique évoluent en réponse aux changements environnementaux

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 :

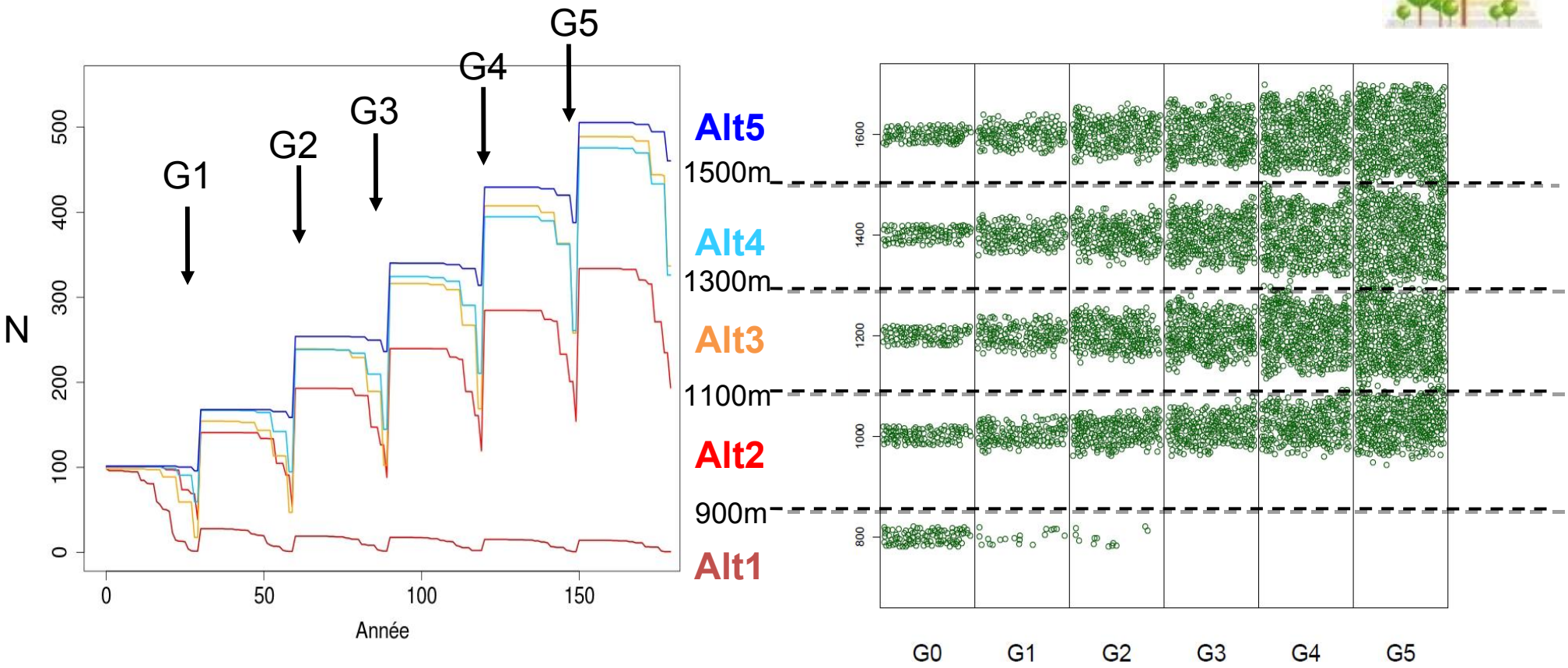
… au modèle **physio-démo-génétique** (**PDG**) en environnement changeant



Oddou-Muratorio & Davi, soumis

Modélisation et scénarisation

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



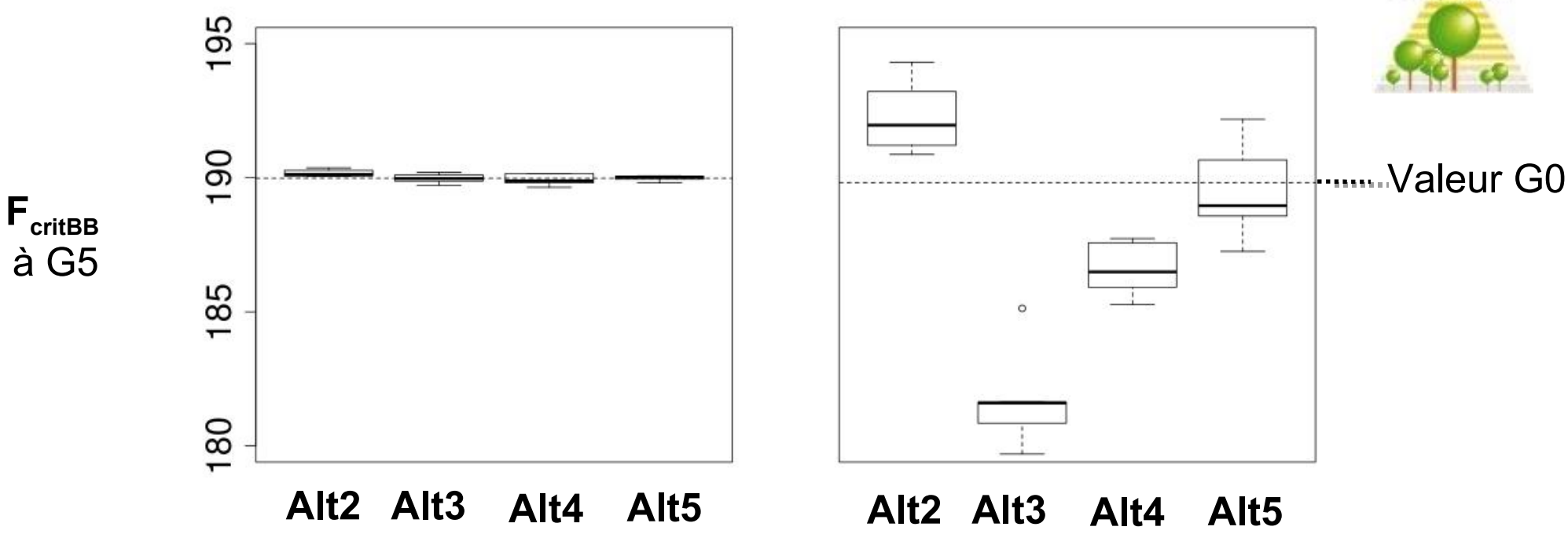
- ✓ Colonisation des populations Alt2 → Alt5
- ✓ Extinction en Alt1 ; limite altitudinale à ~980 m (Ventoux: 750 m)

Oddou-Muratorio & Davi, soumis

Modélisation et scénarisation

A Scénario de référence:
F_{critBB} variable, soumis à sélection mais non héritable

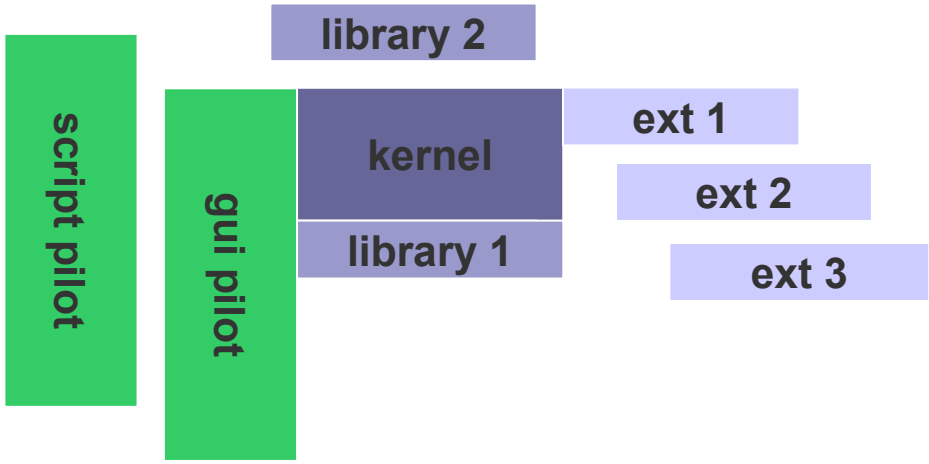
B Scénario avec évolution:
F_{critBB} variable, soumis à sélection et héritable



- ✓ **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

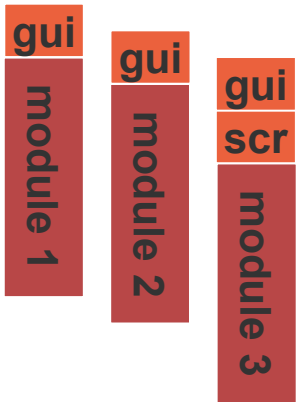
Oddou-Muratorio & Davi, soumis

Modélisation et scénarisation



Plateforme de modélisation

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



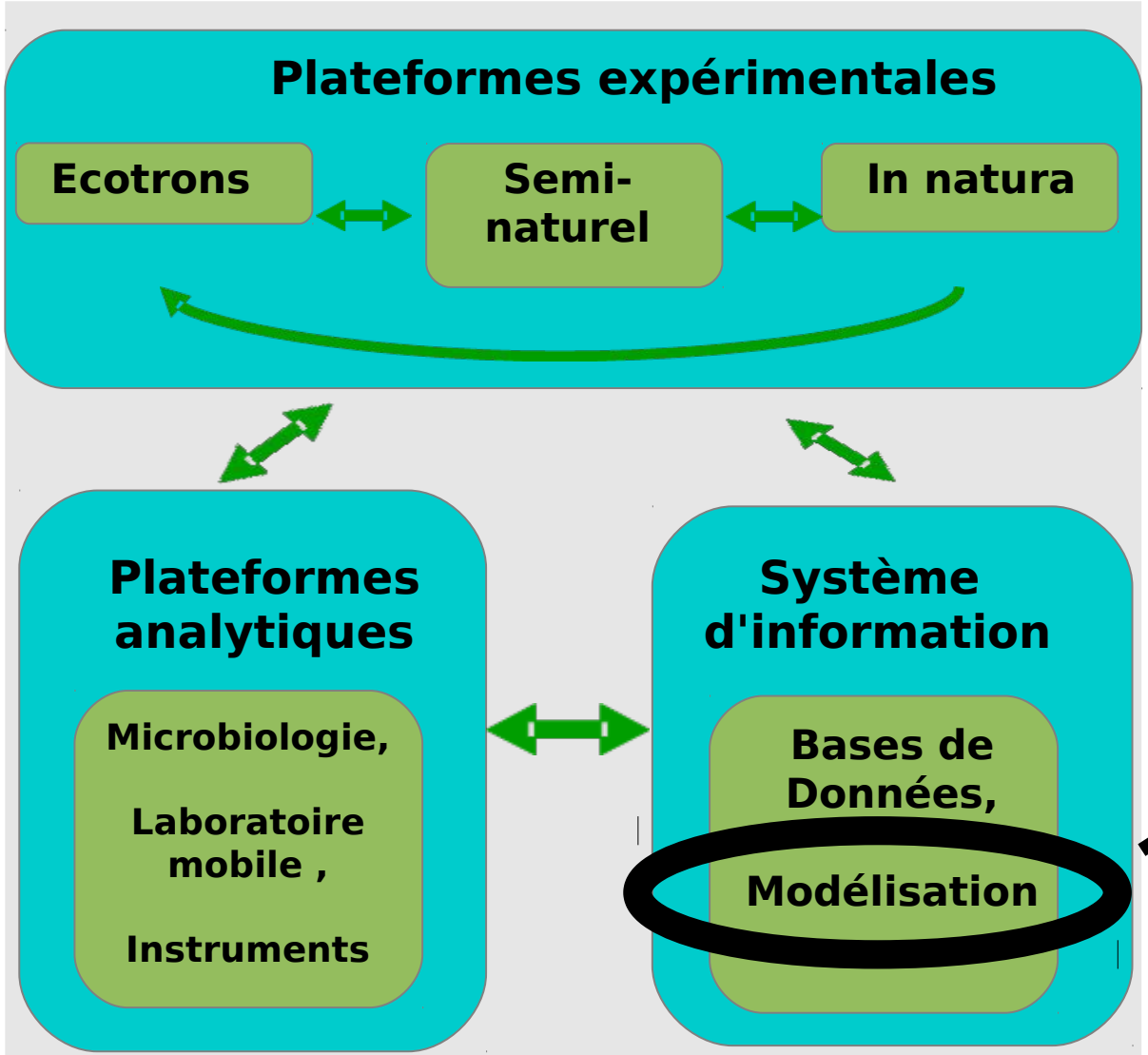
Une plateforme réseau avec 3 catégories d'acteurs :
- des informaticiens animent le projet : **Développeurs**
- des scientifiques modélisateurs : **Modélisateurs**
- des utilisateurs experts (partenaires) ou non : **Utilisateurs**

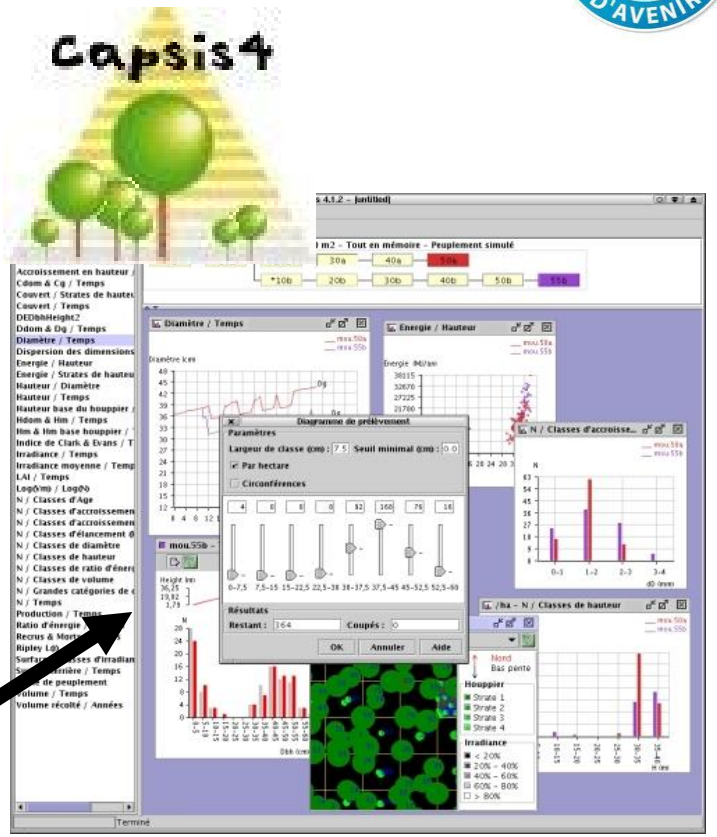
Objectif, coller à la réalité : **peu de développeurs, beaucoup de modélisateurs**
→ les modélisateurs doivent développer

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*