



HAL
open science

Prédire l'adaptation des populations d'arbres au changement climatique

Sylvie Muratorio, Hendrik Davi

► **To cite this version:**

Sylvie Muratorio, Hendrik Davi. Prédire l'adaptation des populations d'arbres au changement climatique : Une approche mécaniste par modélisation des processus physio-démo-génétiques. Impact de l'anthropisation et des changements climatiques sur les arbres forestiers : du fondamental à l'appliqué, un dialogue entre science et société, Aug 2013, Paris, France. hal-01344431

HAL Id: hal-01344431

<https://hal.science/hal-01344431>

Submitted on 5 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.



Prédire l'adaptation des populations d'arbres au changement climatique

Une approche mécaniste par modélisation des processus physio-démo-génétiques



Réponses possibles des populations d'arbres au CC

Fort potentiel d'ADAPTATION (évolution génétique + plasticité phénotypique)

Fort potentiel de migration



PERSISTANCE LOCALE

(= Variations démographiques sans extinction)

DÉPLACEMENT

(= extinction locale)

Ecologie évolutive

Gestion forestière

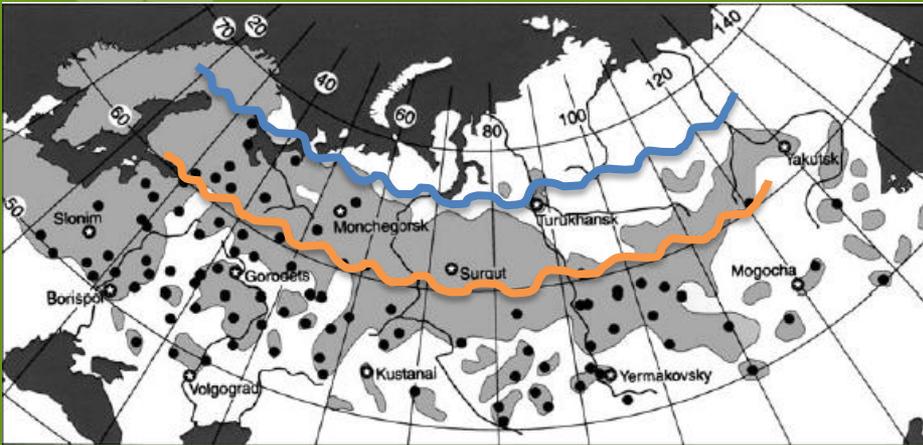
La capacité évolutive d'une population à supporter les variations environnementales = le potentiel adaptatif

Scotti 2010; Lefèvre et al. AFS 2013; Kremer, Kramer et Delzon, Motive D4-2

Tous les aspects de la gestion forestière qui doivent être modifiés pour permettre aux forêts de continuer à assurer les services écosystémiques habituels

Bernier and Schoene 2009

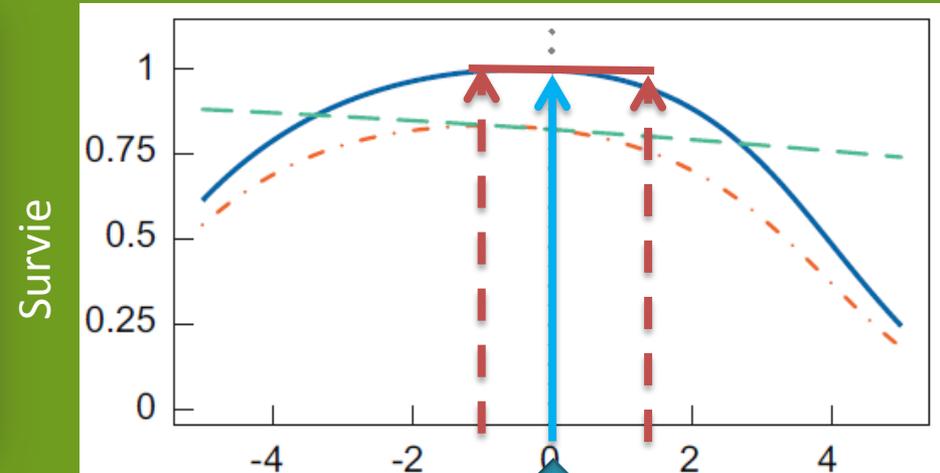
Capacités d'adaptation à un nouveau climat à de courtes échelles de temps ?



Pinus sylvestris:

69 provenances sur 21 sites
Rehfeldt et al., 2002 ; Savolainen
et al (2007)

Population centrale- 60°N



Transfert latitudinal → Nord

- - Survie absolue de la pop locale
- .- Survie absolue de la pop transférée
- Survie relative

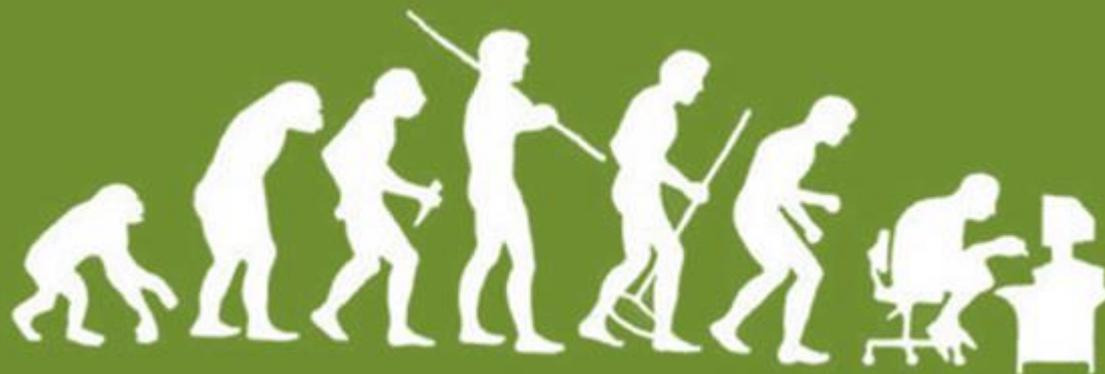
- + Plasticité phénotypique
- + Diversité génétique
- + Flux de gènes (pollen)



- Long temps de génération
- Faible mortalité des arbres établis
- Contraintes physiologiques (eg interaction entre traits fonctionnels → performance)
- Contraintes génétiques (eg épistasie, pléiotropie)
- ... (Futuyma 2010)

_02

La modélisation comme outil pour étudier l'adaptation au climat

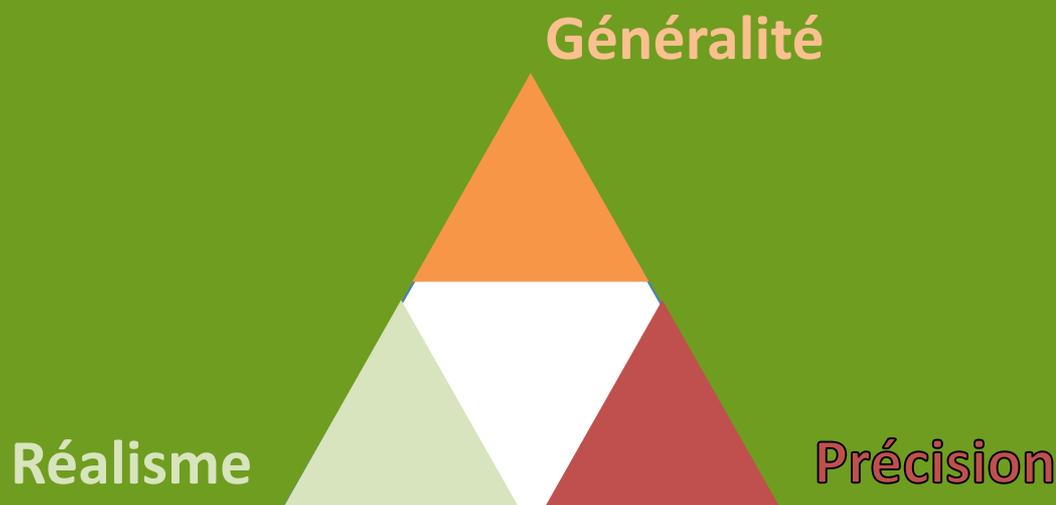


Something, somewhere went terribly wrong

THE STRATEGY OF MODEL BUILDING IN POPULATION BIOLOGY

By RICHARD LEVINS

Intérêt des modèles pour prédire l'adaptation des populations d'arbres au CC



- Pour Levins
 - Aucun modèle ne peut concilier les trois propriétés
 - Plus exactement: les scientifiques n'ont pas les capacités à manipuler un modèle possédant les trois propriétés

THE STRATEGY OF MODEL BUILDING IN POPULATION BIOLOGY

By RICHARD LEVINS

Intérêt des modèles pour prédire l'adaptation des populations d'arbres au CC

Modèles théoriques

Theory-driven

Généralité

Modèles empiriques

Réalisme

Précision

Modèles mécanistes

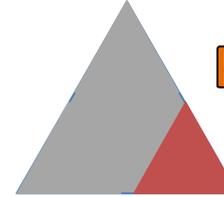
Data-driven

Modèles intégrateurs

- Pour Levins
 - Aucun modèle ne peut concilier les trois propriétés
 - Plus exactement: les scientifiques n'ont pas les capacités à manipuler un modèle possédant les trois propriétés

Illustration: prédiction de la niche bioclimatique future des populations d'arbres

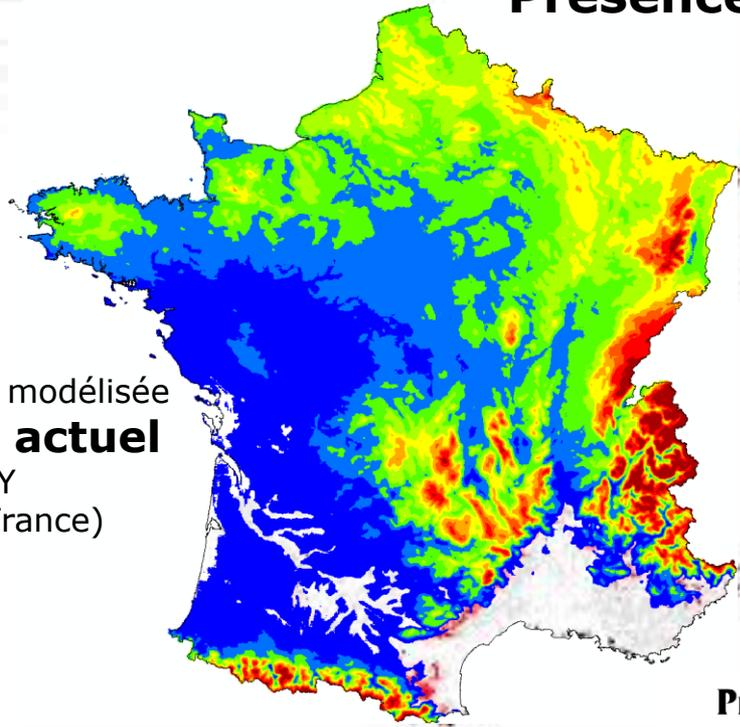
Précision



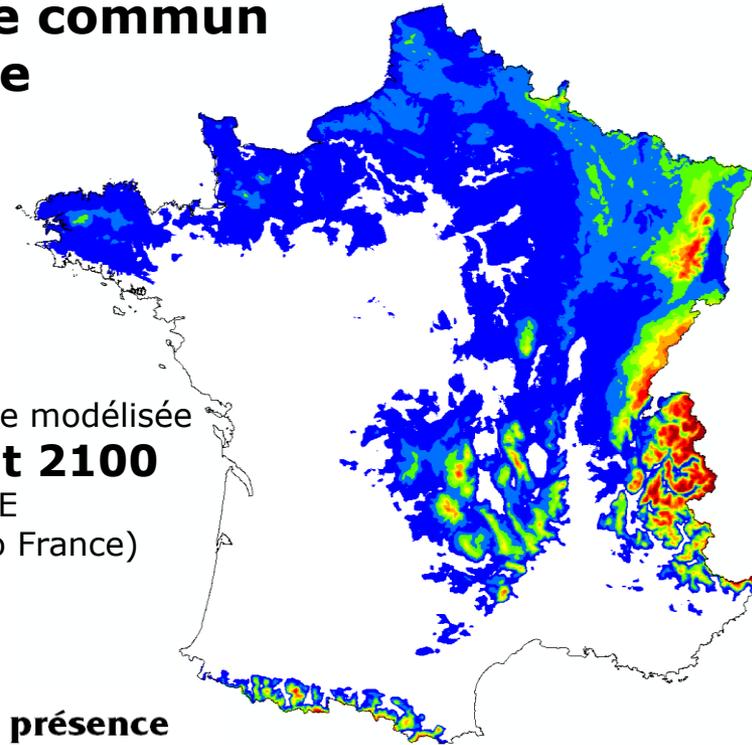
Présence du hêtre commun en France



Présence modélisée
climat actuel
(AURELHY
Météo France)



Présence modélisée
climat 2100
(ARPEGE
Météo France)



Probabilités de présence



Badeau et coll. rapport Carbofor (2004)

Benito-Garzon et al. (2011): test de provenance multi-site → calibration de plusieurs modèles / région de provenance

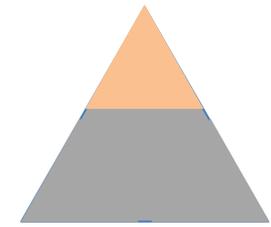


Illustration: évolution de l'aire de distribution d'une espèce en environnement hétérogène et avec flux de gènes (Kirkpatrick & Barton, 1997)

- Modèles théoriques à 3 ou 4 paramètres
- Dérivations mathématiques des solutions

$$\frac{\partial \bar{z}}{\partial t} = \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial^2 \bar{z}}{\partial x^2} + \sigma^2 \frac{\partial \ln(n)}{\partial x} \frac{\partial \bar{z}}{\partial x} + G \frac{\partial \bar{r}}{\partial \bar{z}}$$

Evolution d'un trait z	Effet homogénéisant de la migration	Interaction migration / densité (n)	Effet de la sélection
--------------------------	-------------------------------------	---	-----------------------

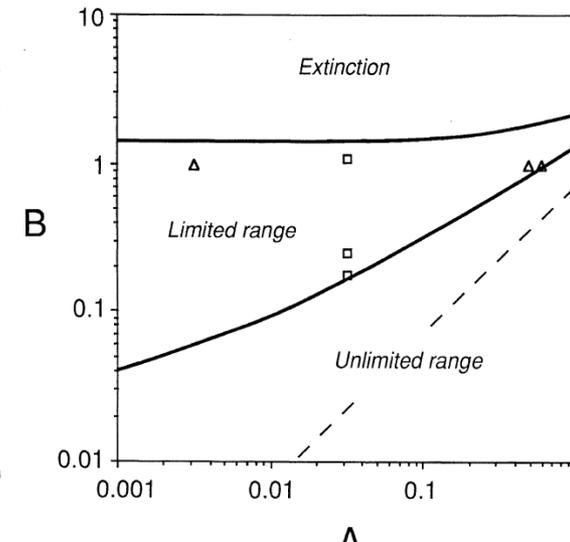
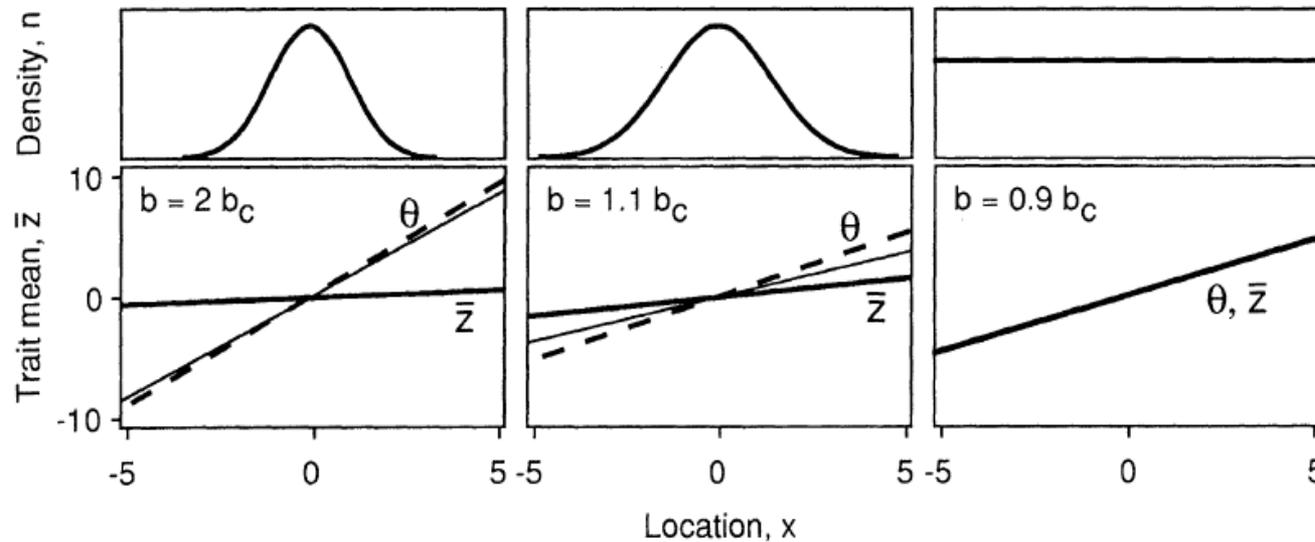
Valeur optimale du trait maximisant la fitness en x :

$$\theta(x) = bx.$$

Pente du cline environnemental

$$r(z) = r_{\max} - \frac{(\theta(x) - z)^2}{2V_s}$$

Solutions de ce modèle pour 3 valeur du cline environnemental (b)





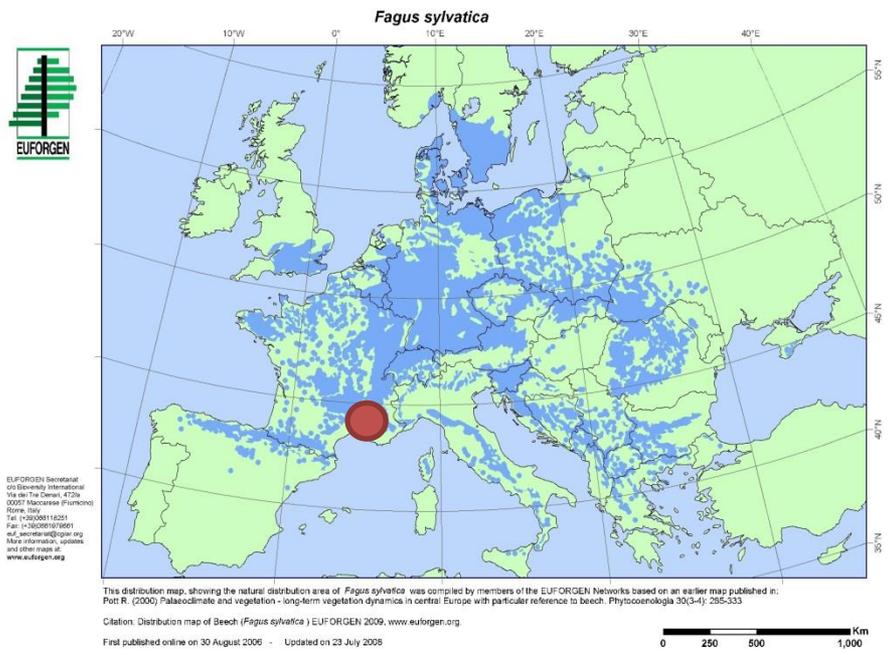
_03

Simuler l'adaptation locale de populations de hêtre le long d'un gradient altitudinal avec un modèle Physio-Démo-Génétique

Oddou-Muratorio et Davi, en révision pour *Evolutionary Applications*

Objectifs

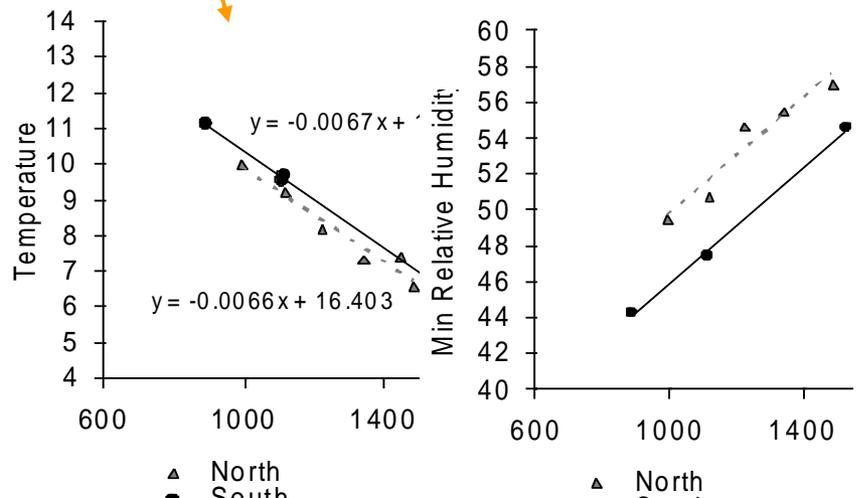
Cas du hêtre (*Fagus sylvatica*) sur le Mont Ventoux



- Le hêtre est distribué entre :
- 750 et 1700 m sur la face Nord
 - 840 et 1615 m sur la face Sud (expansion récente)



Données écologiques (croissance, fructification, dispersion, diversité phénotypique et génétique)

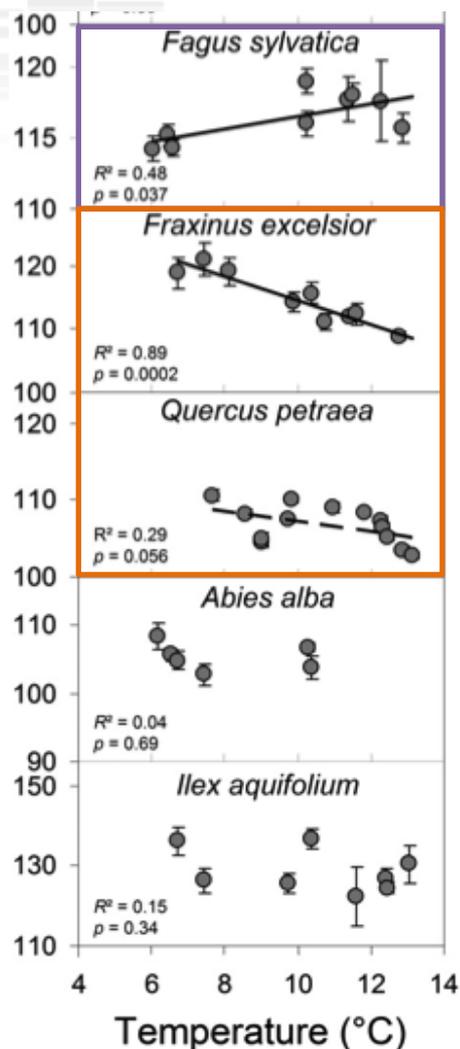


- **Quels sont les rôles respectifs de la plasticité phénotypique et de l'adaptation génétique dans la variation des traits fonctionnels le long du gradient?**
- **A quelle vitesse les populations peuvent-elles évoluer?**
- **Quelle est le type de sélection exercée par le climat?**

Trait fonctionnel focal : la phénologie du débourrement végétatif



Timing of budburst (TBB)



Une date de débournement (TBB) faible (individu précoce)
→ Saison de croissance plus longue
→ Risque de gelée tardive plus élevé

In situ, les populations de lat/alti les plus élevées débourrent APRES les populations de lat/alti les plus basses (Σ températures)

En jardin commun :

Différences entre populations < adaptation génétique

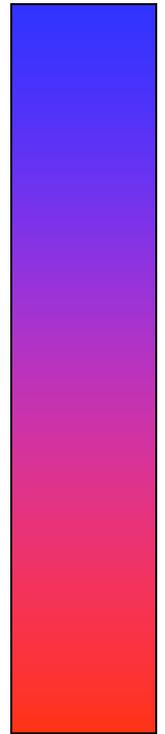
Contre-gradient : les populations de lat/alti les plus élevées débourrent AVANT les populations de lat/alti les plus basses (ex: hêtre)

Co-gradient : les populations de lat/alti les plus élevées débourrent APRES les populations lat/alti les plus basses (ex : frêne, chêne)

Vitasse et al. 2009, Gömörý & Paule 2011

Simulation d'un gradient altitudinal

1700 m

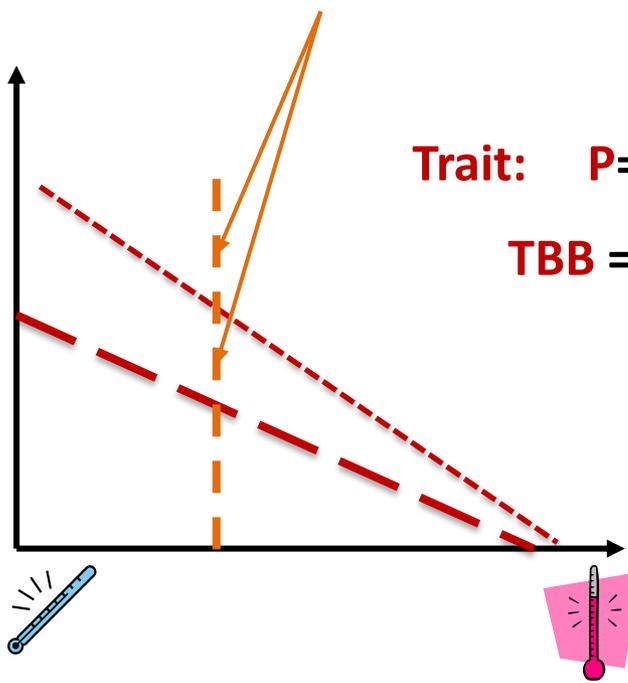


tardif



précoce

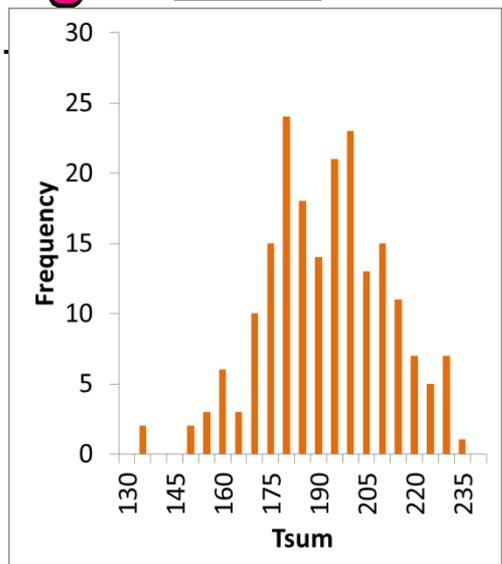
Différentes valeurs de la somme des températures requise pour le débourrement, $F_{critBB} (tardif) > F_{critBB} (précoce)$



Trait: $P = f(\text{Env} + \text{Gen} + \text{Gen} \times \text{Env})$

$TBB = f(T^\circ + F_{critBB} + F_{critBB} \times T^\circ)$

Environnement =
Température

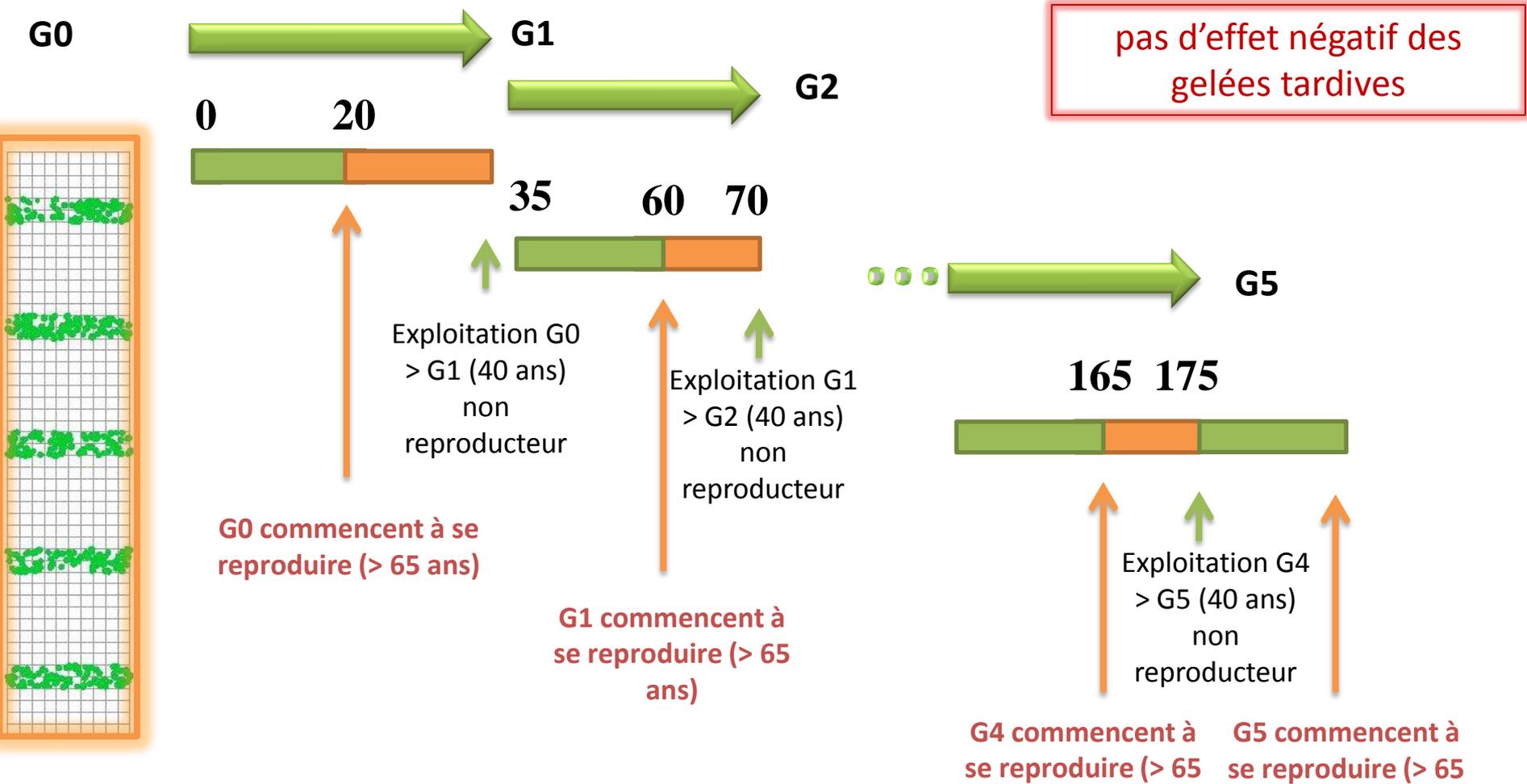


La variation du paramètre F_{critBB} (modèle CASTANEA) est déterminée génétiquement :

- 10 loci non liés, 2 alleles /locus (=10 SNPs)
- Effet de chaque locus <- distribution normale à l'initialisation
- Héritabilité $h^2=1$ puis $h^2=0.6$ (Kramer et al. 2008)

Moyenne $F_{critBB} = 190 \text{ }^\circ\text{C}$

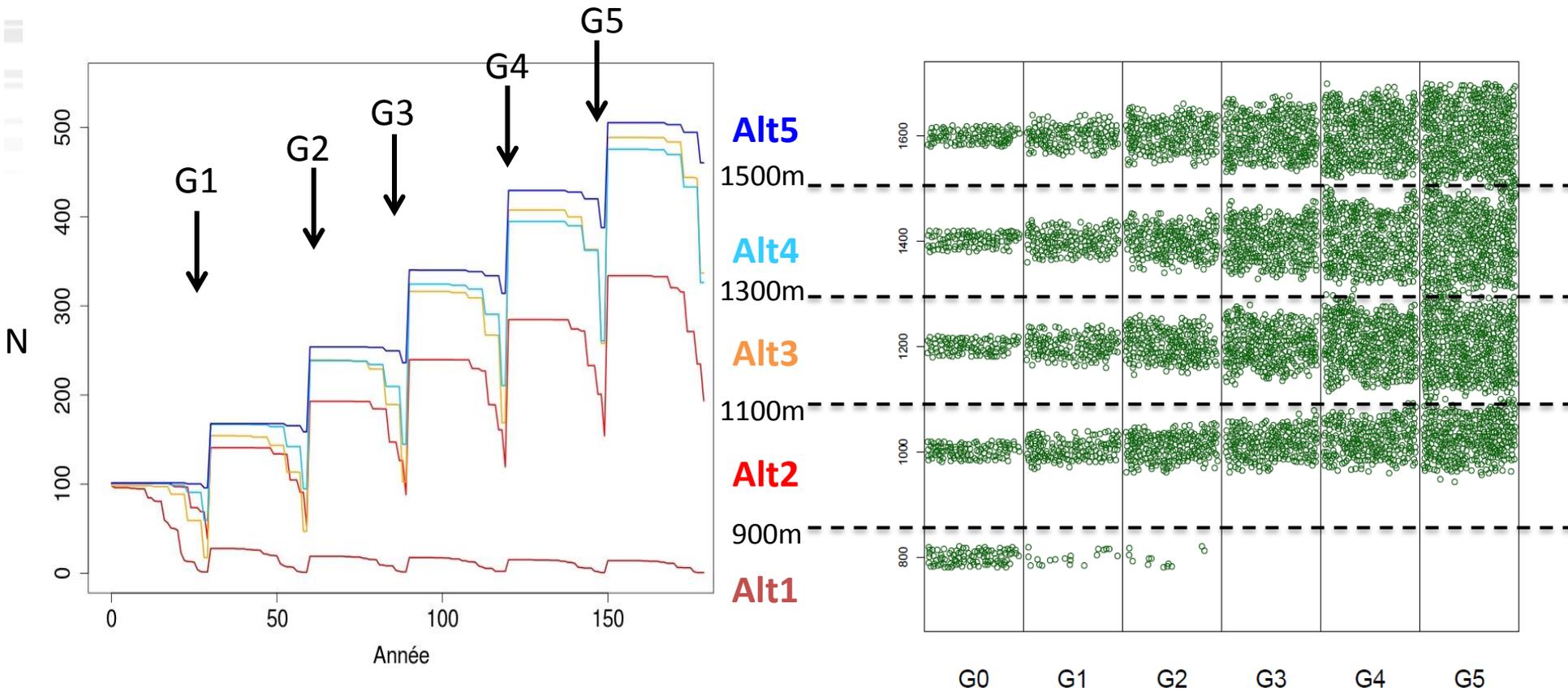
Scénario simulé : Evolution avec sélection et colonisation



Hypothèses de travail :

- Pas de générations chevauchantes (exploitation séquentielle des arbres reproducteurs)
- Pas de sélection sur la date du débourrement pendant la phase de régénération
- Pas de mutation (seulement variabilité génétique existante + recombinaison)
- Pas de compétition pour la lumière entre adultes
- Climat (2002-2006 répété) avec un effet de l'altitude sur T, précipitation et humidité relative.

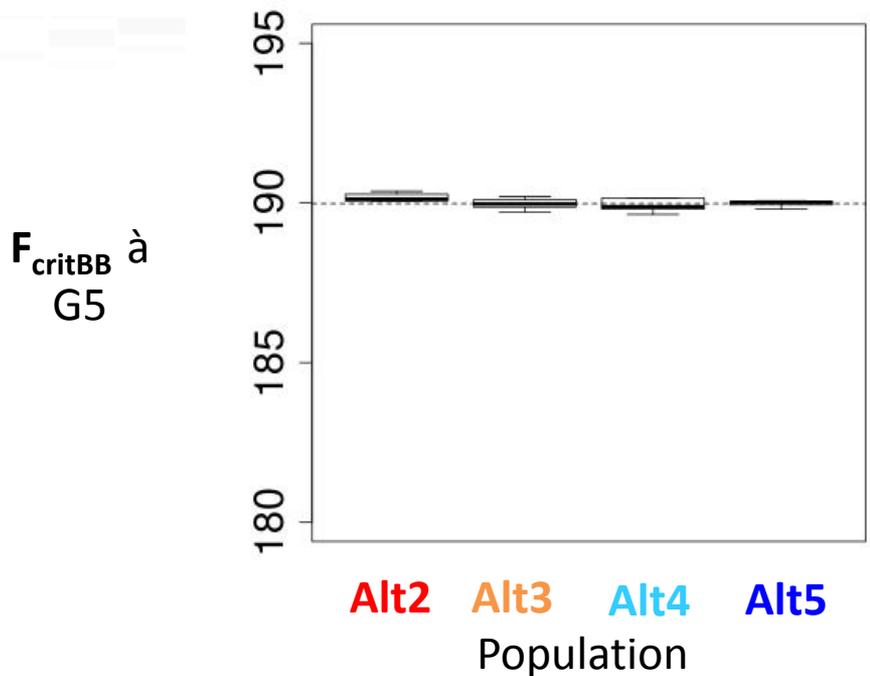
Résultat : dynamique de populations



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

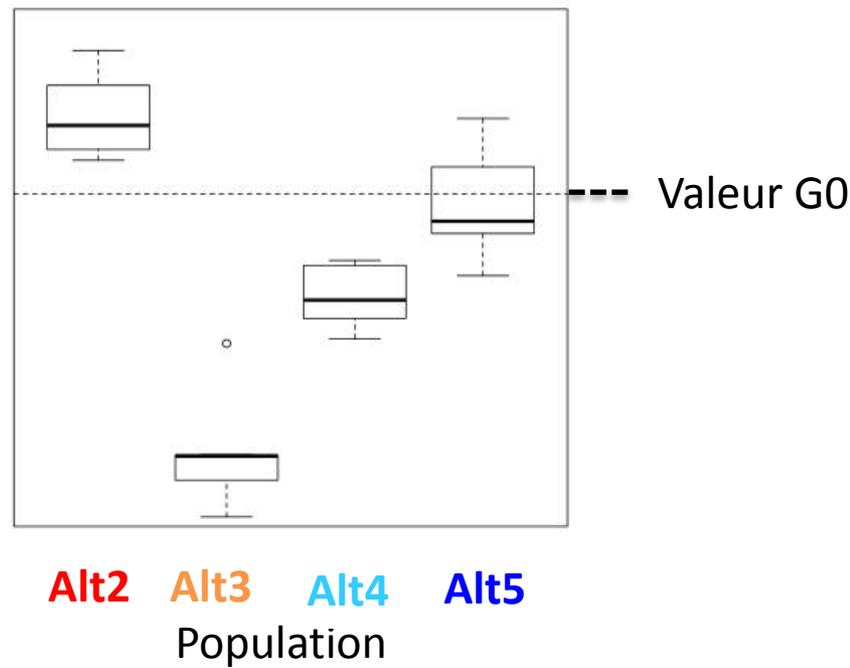
Résultat : évolution de F_{critBB} de G0 à G5

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



TBB à G5: 35.2 jours d'écart de bas en haut du gradient (~600 m)

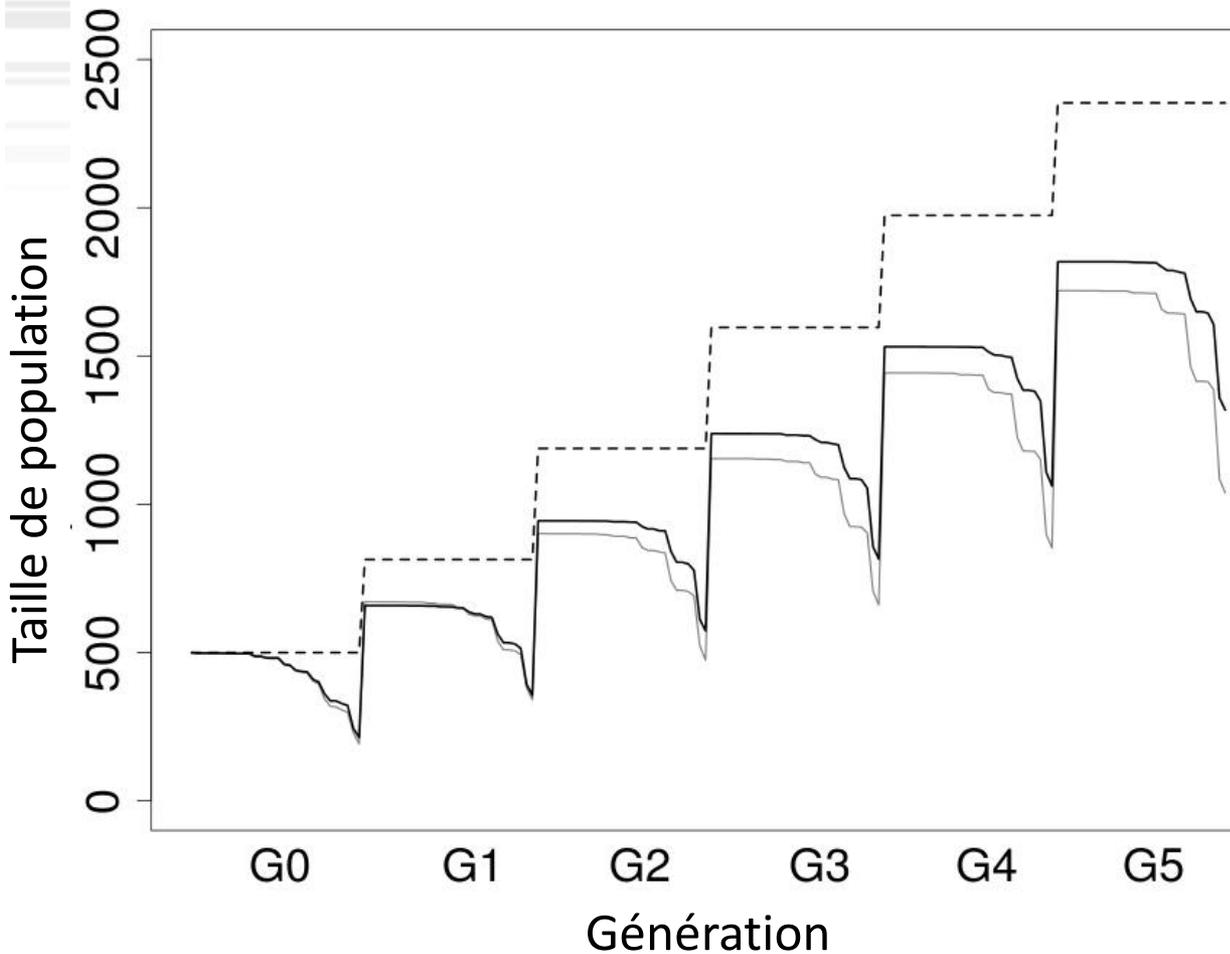
B Scénario avec évolution: F_{critBB} variable, soumis à sélection et héritable



2 jours d'écart maximum entre populations Alt2 et Alt3

- ✓ Alt 2 évolue vers un débourrement plus tardif (+2.20°C)
- ✓ Alt3 et Alt 4 évoluent vers un débourrement plus précoce (-6.65°C en Alt3 ; -3.5°C en Alt4)

Résultats : impact sur la dynamique



C Scénario avec évolution:
FcritBB variable, soumis à
sélection, héritable
Pas de mortalité

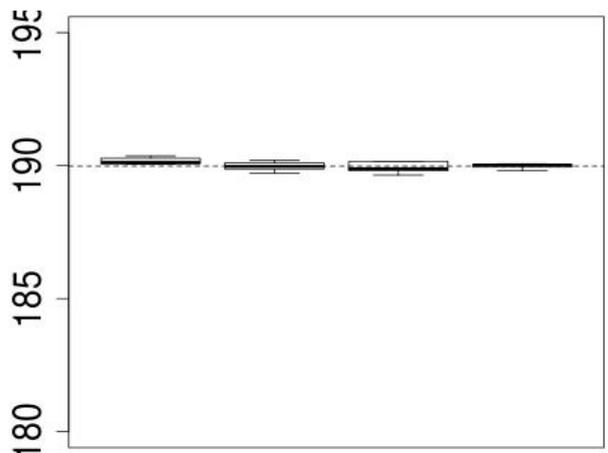
B Scénario avec évolution:
FcritBB variable, soumis à
sélection, héritable

A Scénario de référence:
FcritBB variable, soumis à
sélection mais non
héritable

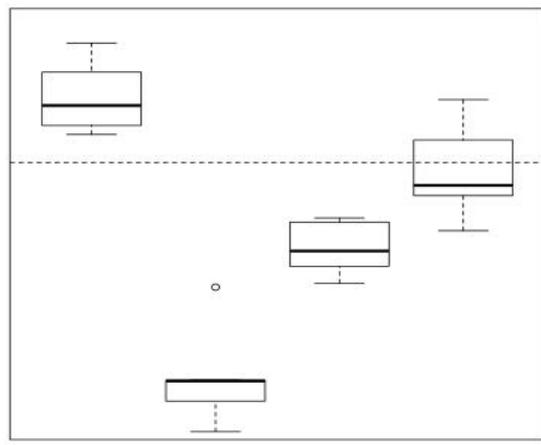
- ✓ La taille de la population globale est plus forte avec évolution adaptative
- ✓ Conséquences potentiellement non négligeables sur stockage de carbone

Résultats : mécanismes pilotant l'évolution de F_{critBB}

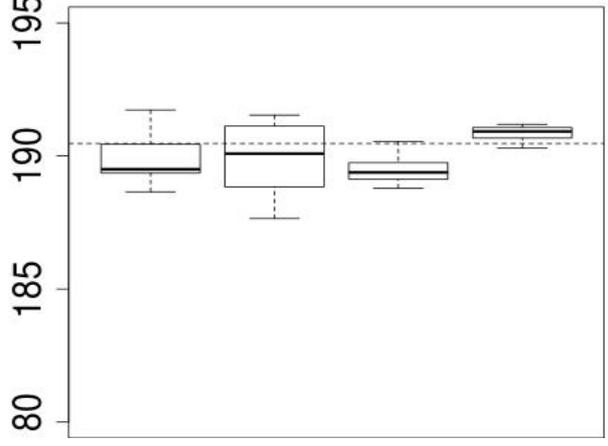
A Scénario de référence



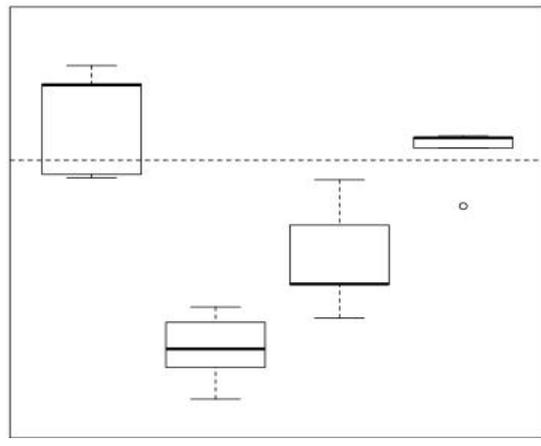
B Scénario avec évolution



C Scénario avec évolution, sans mortalité



D Scénario avec évolution: sans variation de reproduction



Alt2 Alt3 Alt4 Alt5

Population

Alt2 Alt3 Alt4 Alt5

Population

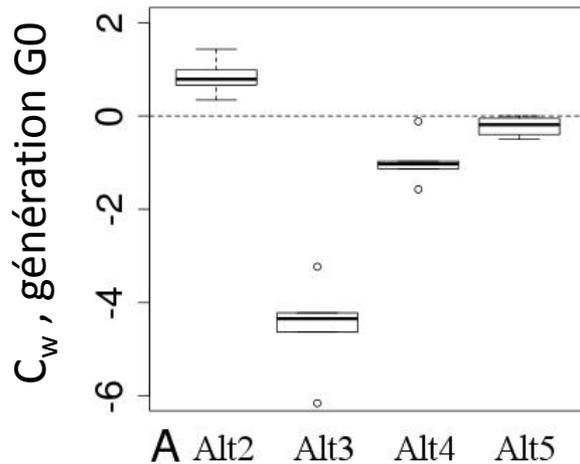
- ✓ L'évolution adaptative est pilotée par la mortalité, les différences de contribution à la reproduction ont un rôle négligeable
- ✓ L'évolution de Alt2 < mortalité liée à une demande en carbone forte au moment du débourrement, et en Alt3/4 par le niveau total de réserve accumulé

Résultats : intensité de la sélection intra-génération sur F_{critBB}

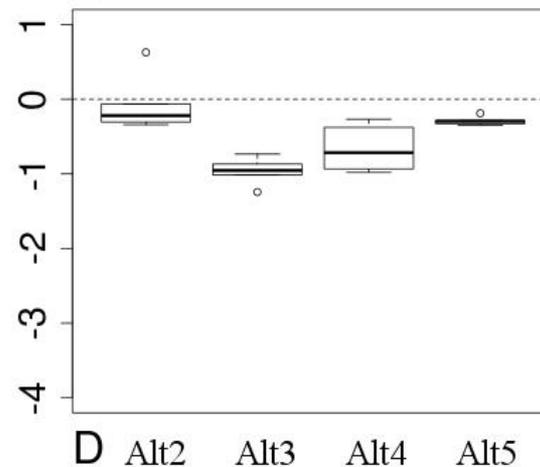
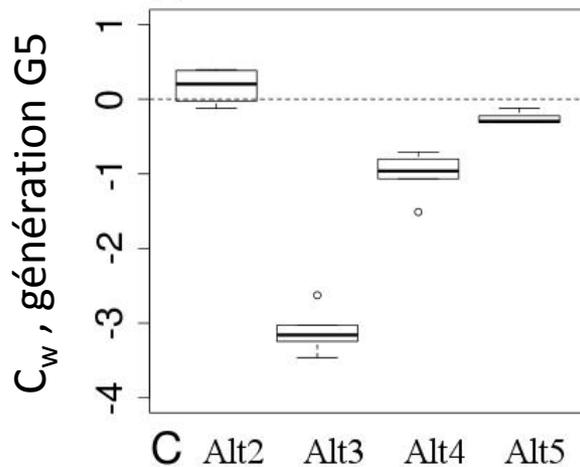
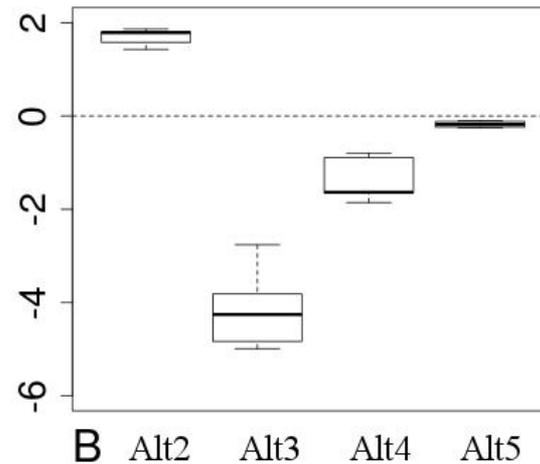
$$Cw_{F_{critBB}}(Gx) = \frac{1}{n_{rep}} \sum_{nr_{ep}} (\mu_{Y70Gx} - \mu_{Y40Gx})$$

(différentiel de sélection)

A Scénario de référence



B Scénario avec évolution

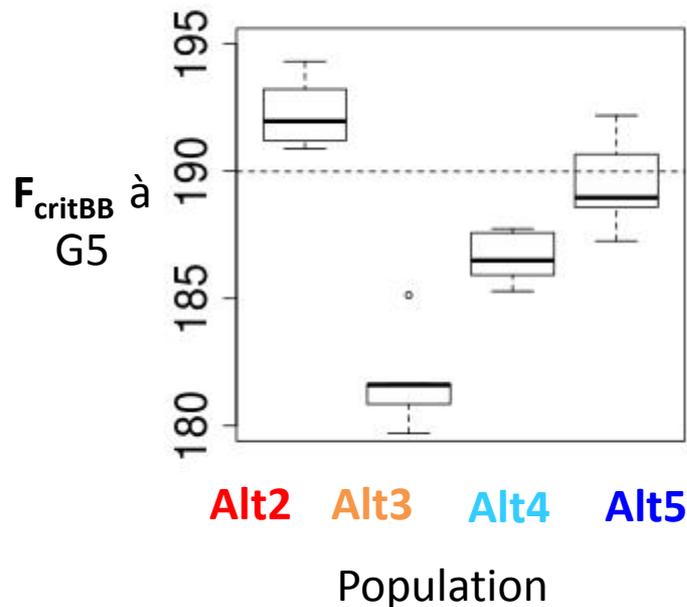


- ✓ Cw négatif en Alt3 → Alt5, positif en Alt 2
- ✓ Cw + fort en Alt3
- ✓ Sélection sous scénarios A et B, mais évolution uniquement sous scénario B : → l'intensité de la sélection moins forte en G5 car on s'est rapproché des optima

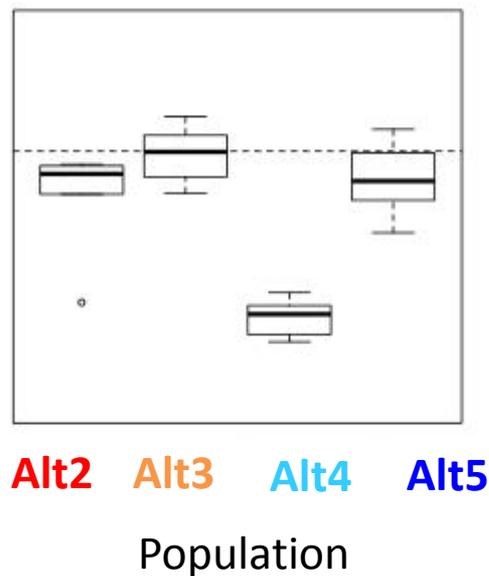
Résultats : mécanismes pilotant l'évolution de F_{critBB}

Hypothèse initiale : pas d'effet négatif des gelées tardives

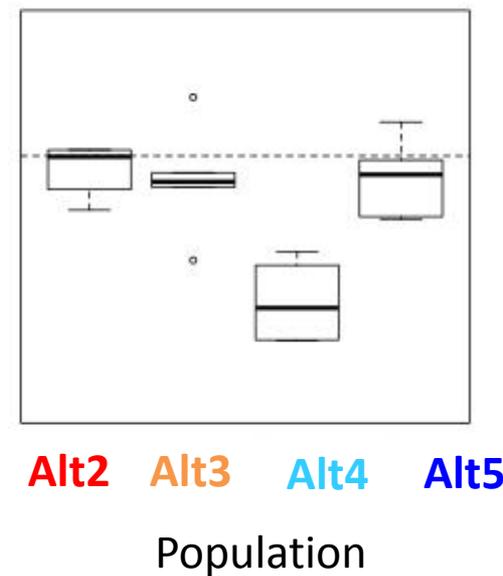
B Scenario avec évolution:
Pas d'effet des gelées
tardive sur LAI



B' Scenario avec évolution:
Réduction de 1% du LAI



B'' Scenario avec évolution:
Réduction de 2% du LAI



- ✓ La population Alt2 n'évolue plus vers un débourrement plus tardif car gelée tardive réduit LAI et la mortalité en début de saison de reproduction
- ✓ Alt3 n'évolue plus vers un débourrement précoce, mais Alt4 oui car échappe aux gelées tardives

Conclusions: intérêt de la modélisation mécaniste

1. Un nouvel outil pour étudier la sélection ← climat

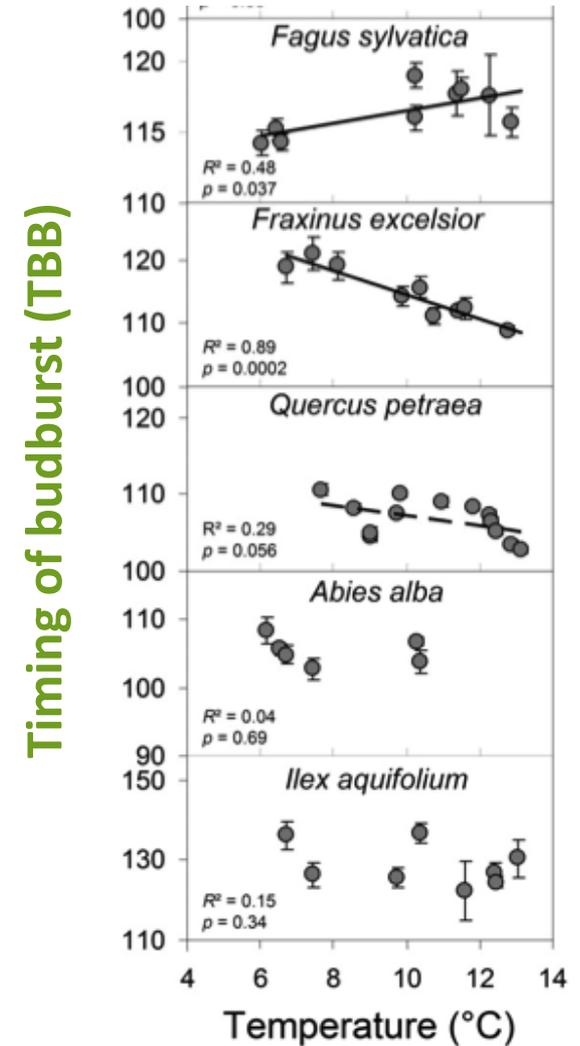
- ✓ Modèle mécaniste biophysique → valide dans d'autres conditions environnementales
- ✓ Modularité → adapté à d'autres espèces

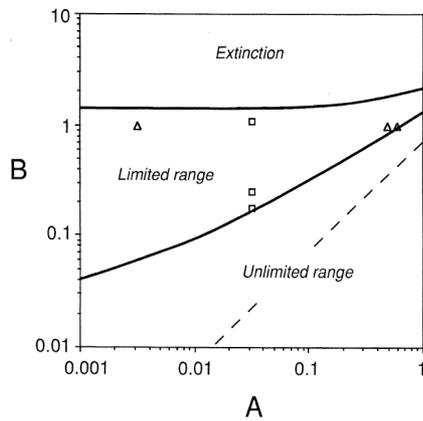
2. L'évolution génétique peut être rapide et forte

- ✓ FCRITBB diminue de 6.65° en 5 générations en Alt 3

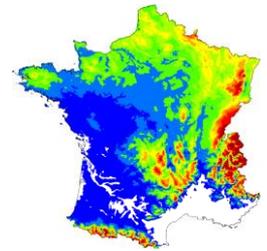
3. Les effets du climat et les optima phénotypiques varient de façon non monotone avec l'altitude

- ✓ Avec ou sans gelée tardive, des génotypes précoces ou tardif sont sélectionnés à différentes altitudes
- ✓ Lien avec les observations en jardin commun

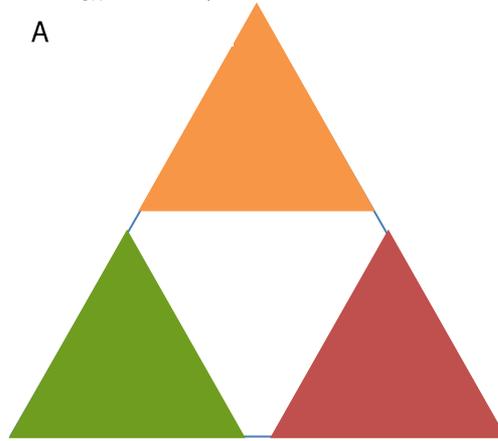




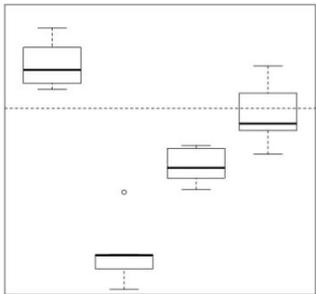
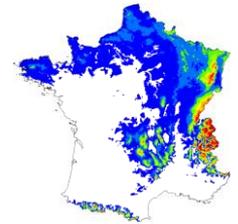
Généralité



Réalisme



Précision

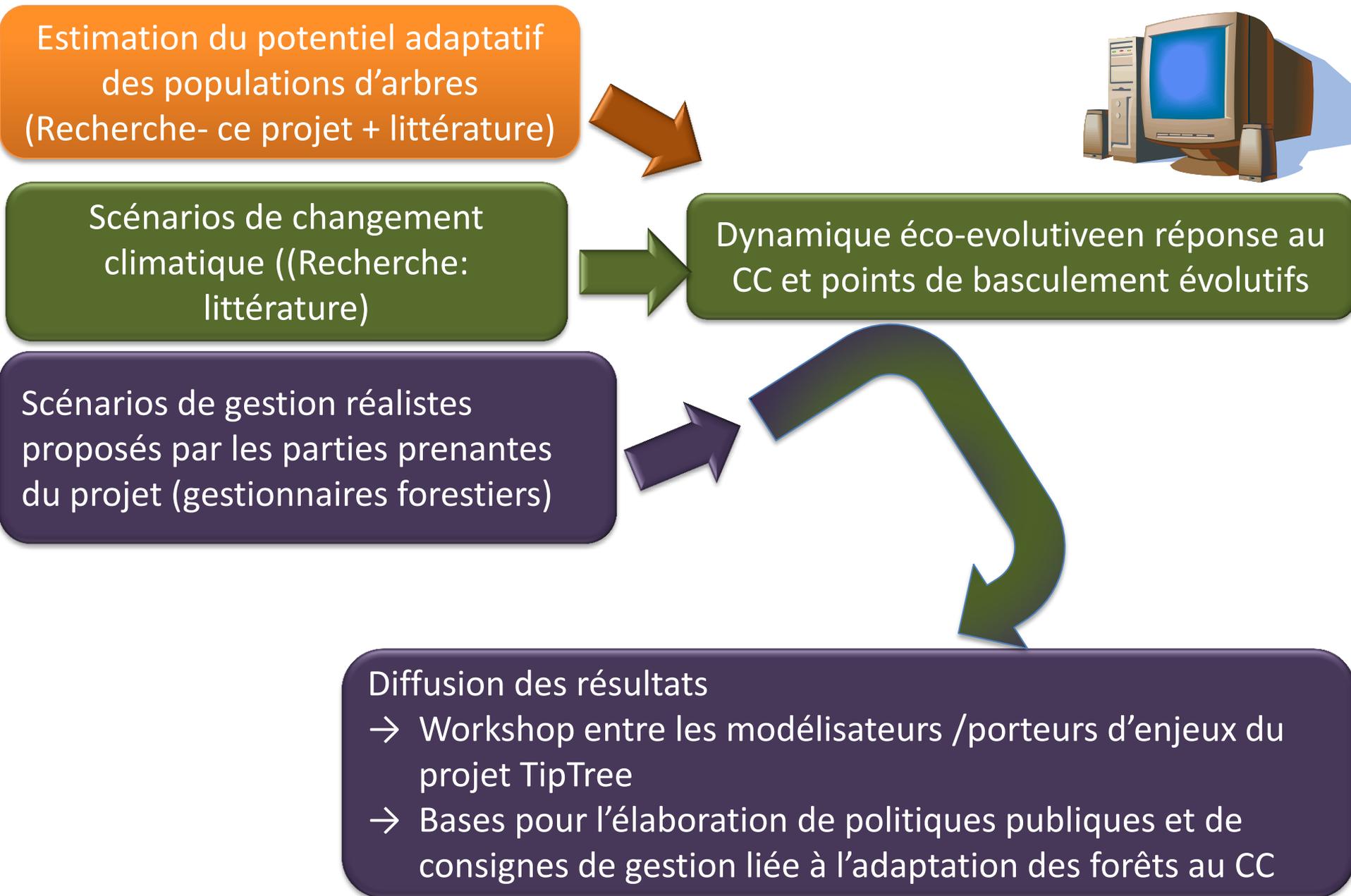


Ecologie prédictive pas encore mûre ?

- ✓ Stratégies adaptatives à favoriser dépendent
 - des services écosystémiques ciblés (Antagonisme possible)
 - de l'amplitude des changements
 - des zones d'études (conditions locales de climat et de sol)
- ✓ Processus de non-équilibre plus difficiles à modéliser que les processus à l'équilibre
- ✓ Logique de scénarios probabilistes sous différentes hypothèses (potentialité)

EXEMPLE D'UTILISATION DE MODELES POUR L'AIDE A LA DECISION

Projet "Scenarios for forest biodiversity dynamics under global change in Europe: Identifying micro-evolutionary scale tipping points"-TipTree (ERANET Biodiversa)





Merci à:

- *François de Coligny*
- *Christian Pichot, Philippe Dreyfus, Marianne Alleaume-Benharira & Francois Lefèvre*
- *Aurore Bontemps, Maxime Cailleret, Julie Gaüzere*
- *L'équipe de terrain de l'URFM (Nicolas, William) et de l'UEFM (Norbert, Olivier, Frank)*

