

L'évolution peut-elle empêcher l'extinction?

Apports de modèles éco-évolutifs à notre compréhension des défis de l'adaptation aux changements climatiques

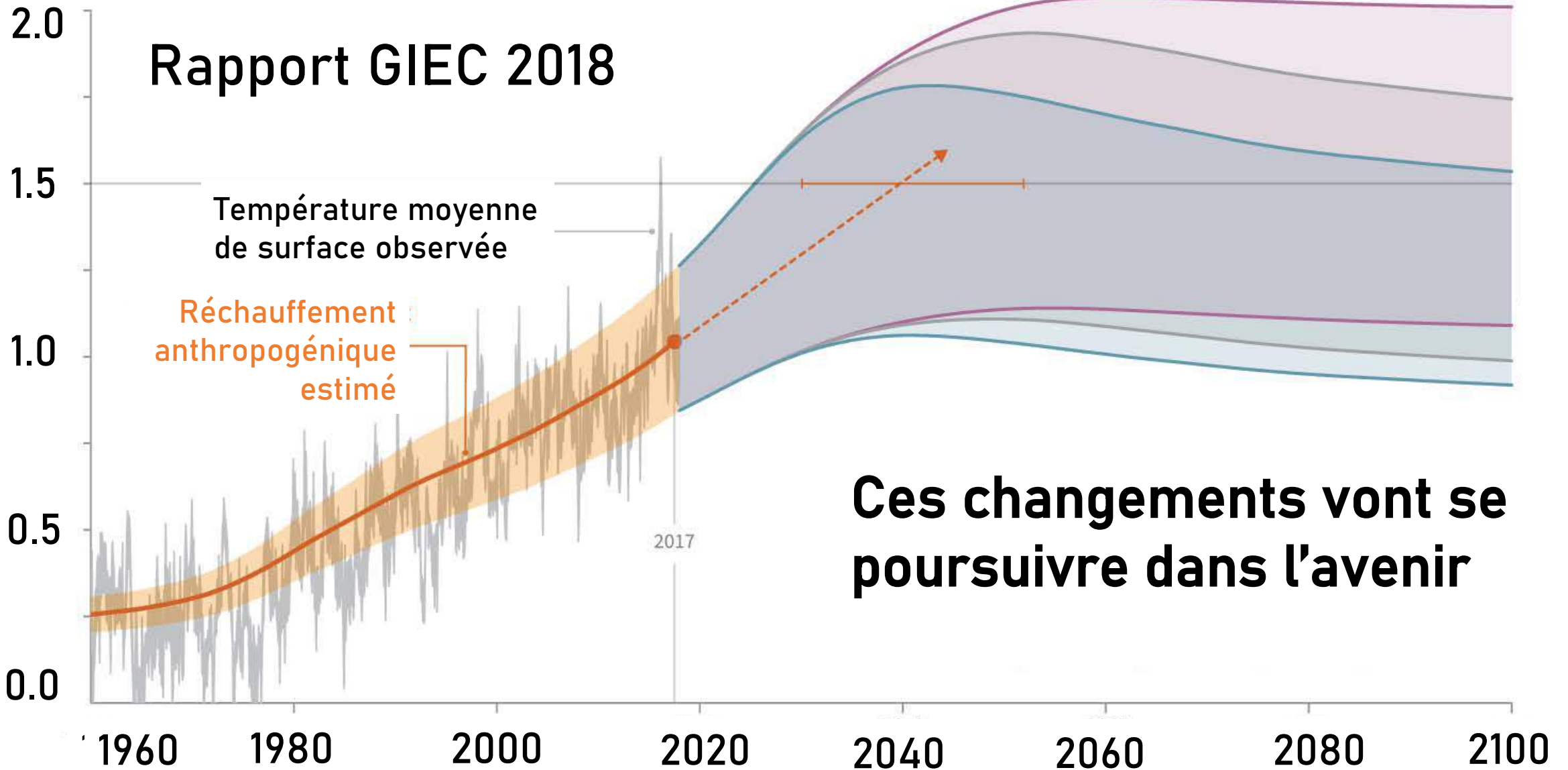


Ophélie Ronce



Réchauffement global par rapport à 1850-1900 (°C)

Rapport GIEC 2018



Température moyenne de surface observée

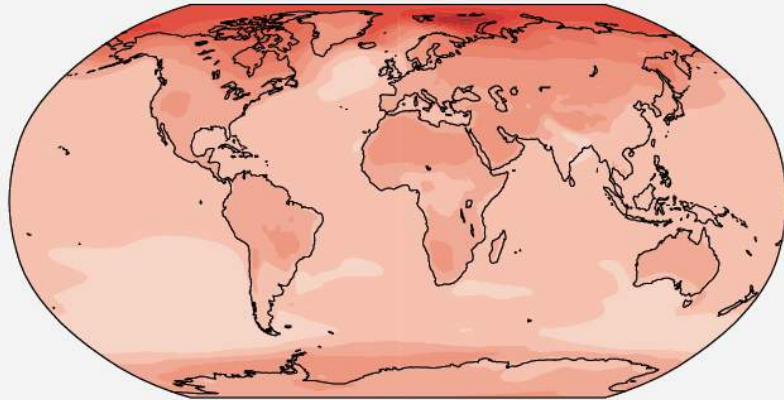
Réchauffement anthropogénique estimé

Ces changements vont se poursuivre dans l'avenir

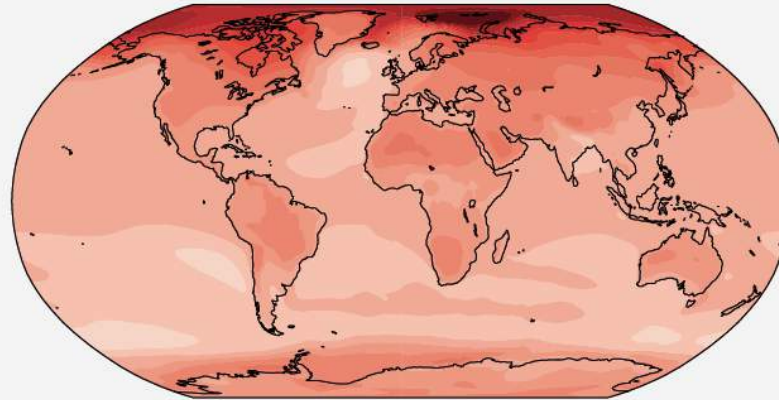
Rapport GIEC 2021

Ces changements seront localement plus intenses

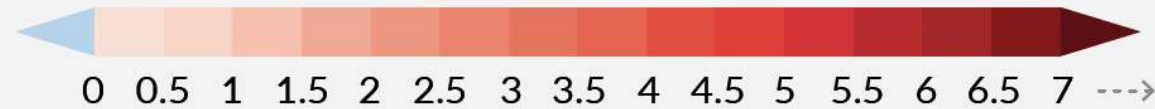
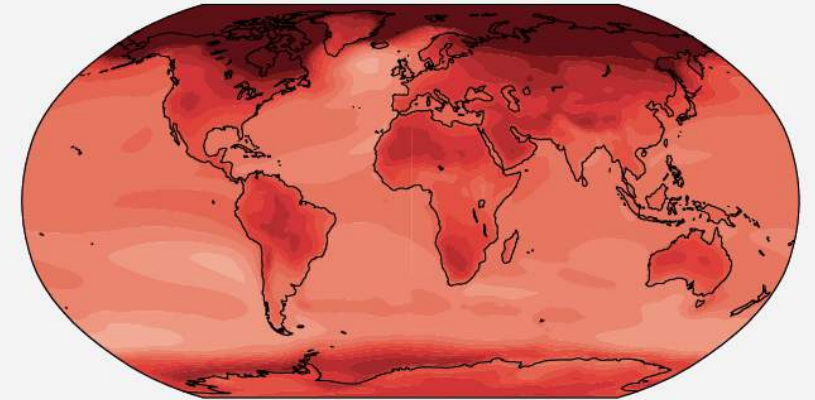
Simulations pour +1.5°C global



Simulations pour +2°C global



Simulations pour +4°C global



Réchauffement (°C)

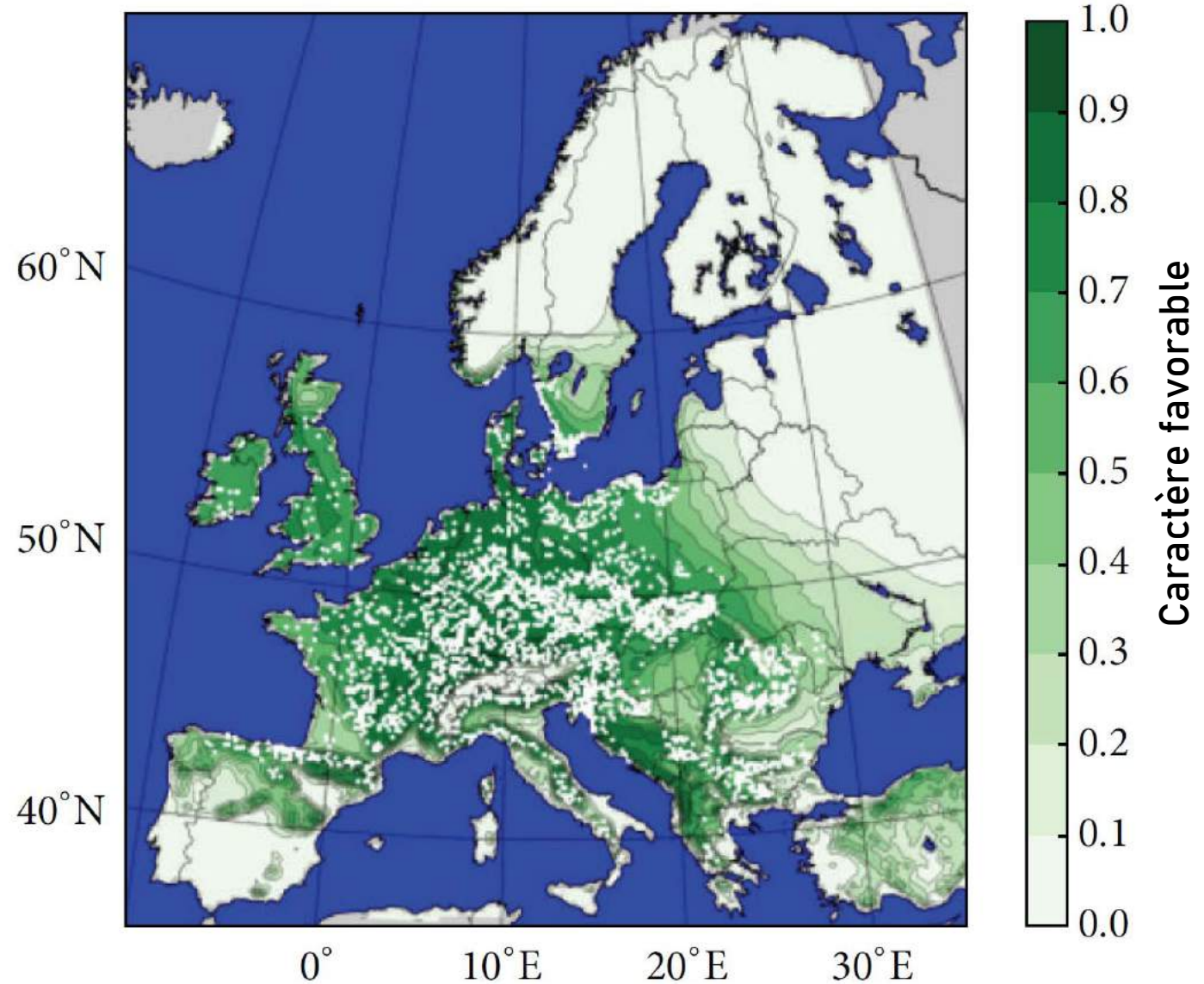


**Différentes espèces se sont adaptées
à des climats différents**





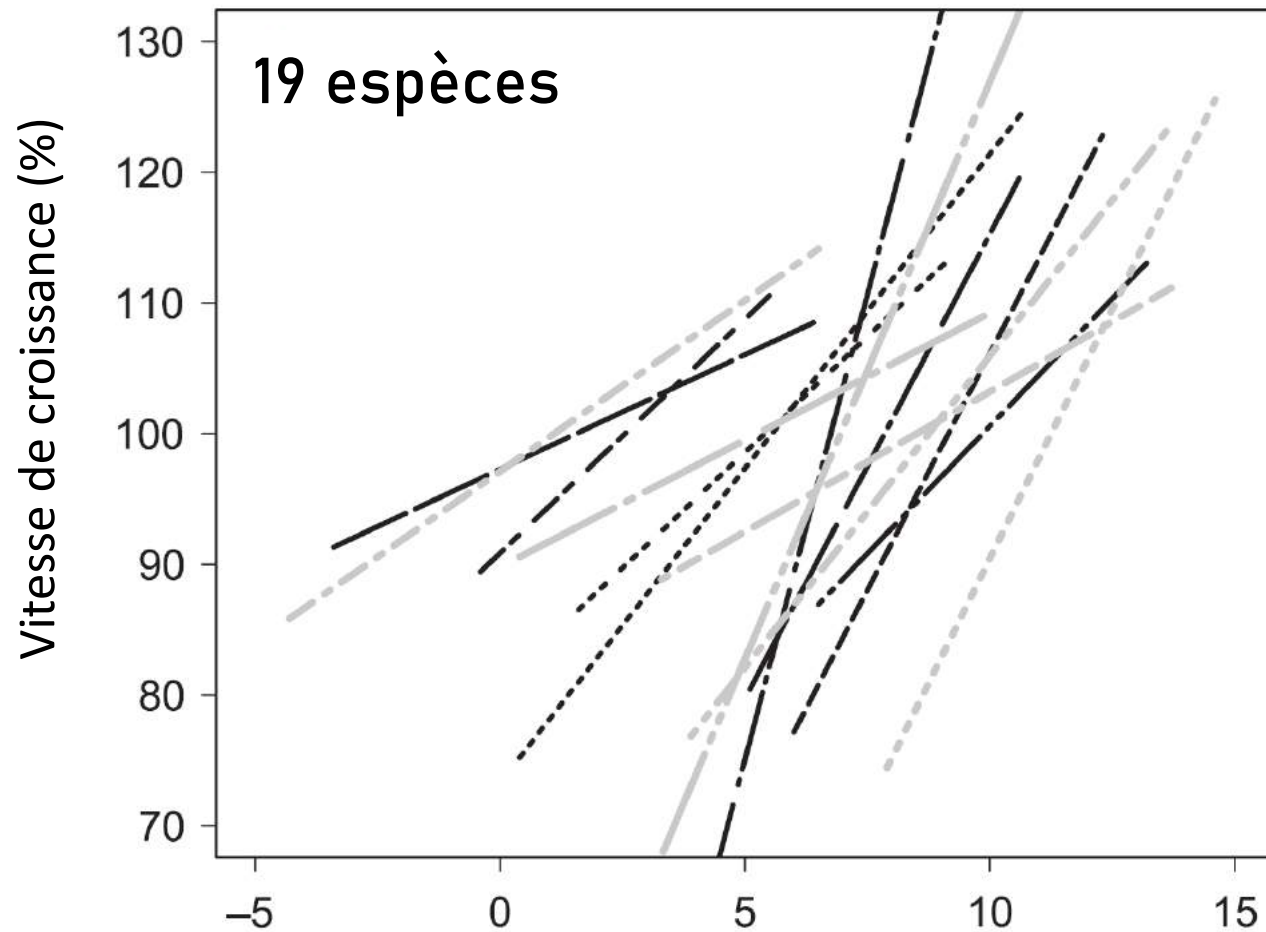
Le climat prédit où trouver une espèce



Les différentes populations au sein d'une espèce sont adaptées à leur climat local



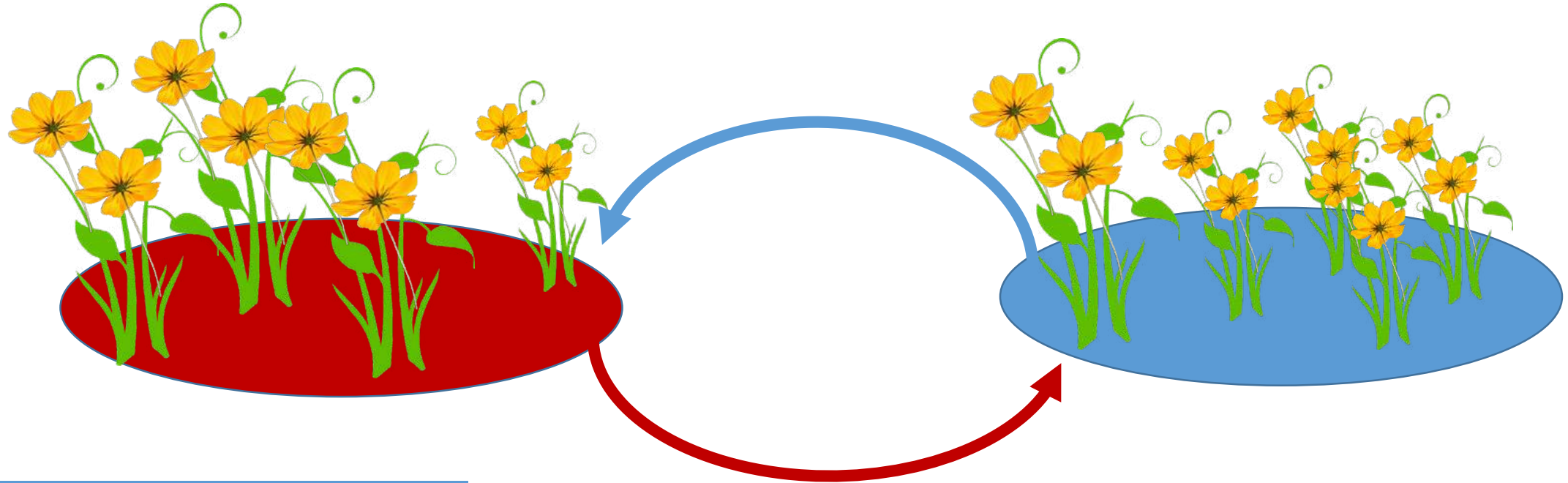
Le climat prédit la divergence génétique des caractéristiques de l'espèce au sein de sa distribution géographique



Aitken & Bemmels 2016

Température moyenne annuelle dans le site d'origine (°C)

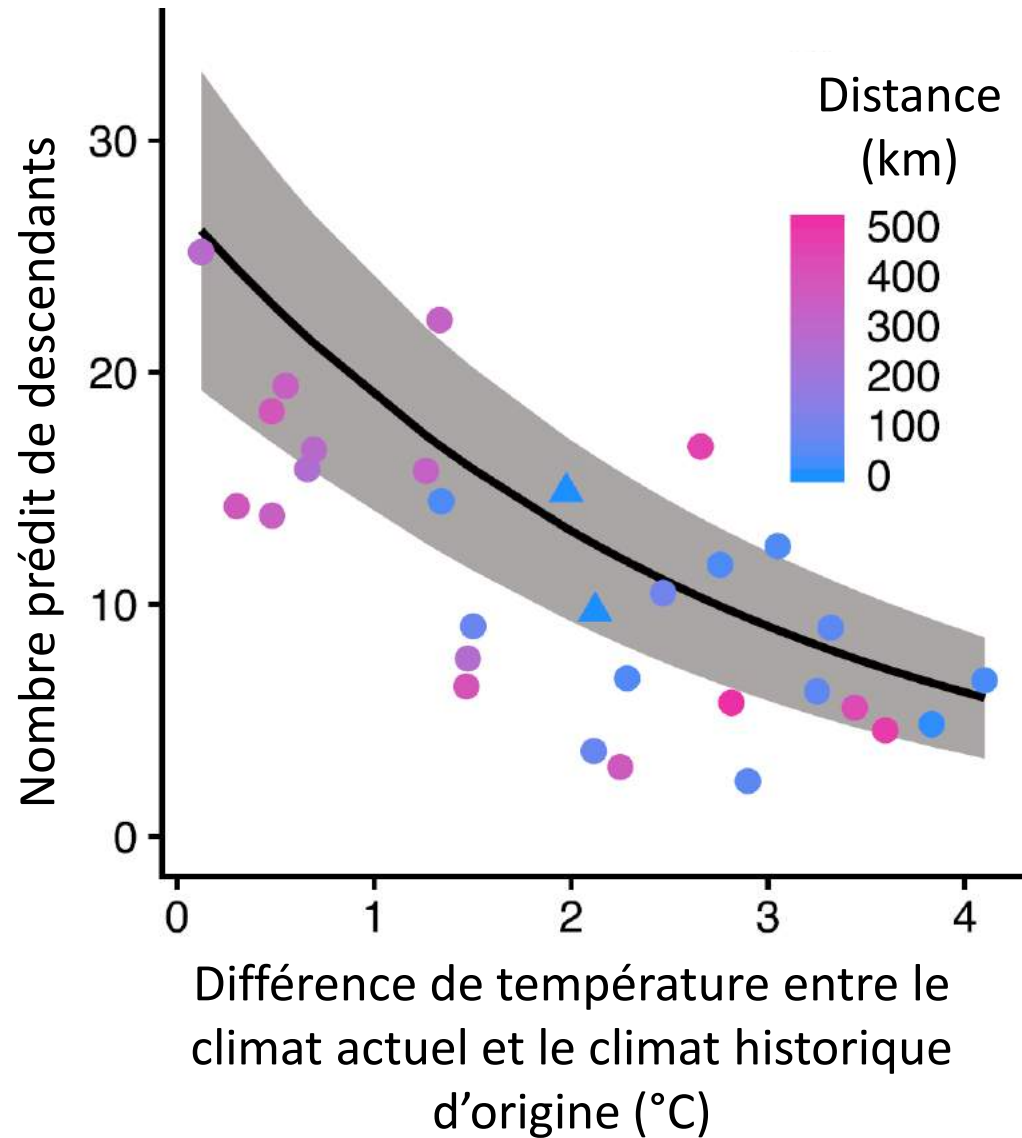
Les plantes d'origine locale survivent et se reproduisent mieux que les plantes d'autres origines



Leimu & Fischer 2008

1032 transplantations réciproques
local > non local: 71%

Le changement climatique perturbe ces adaptations



Bontranger &
Angert 2019

Les plantes locales n'ont pas le meilleur succès de reproduction

Les plantes issues de sites avec un climat historique plus chaud laissent plus de descendants

Quelles conséquences de cette mal adaptation dans le futur?

Où est une espèce?



Quel est le climat dans ces localités?

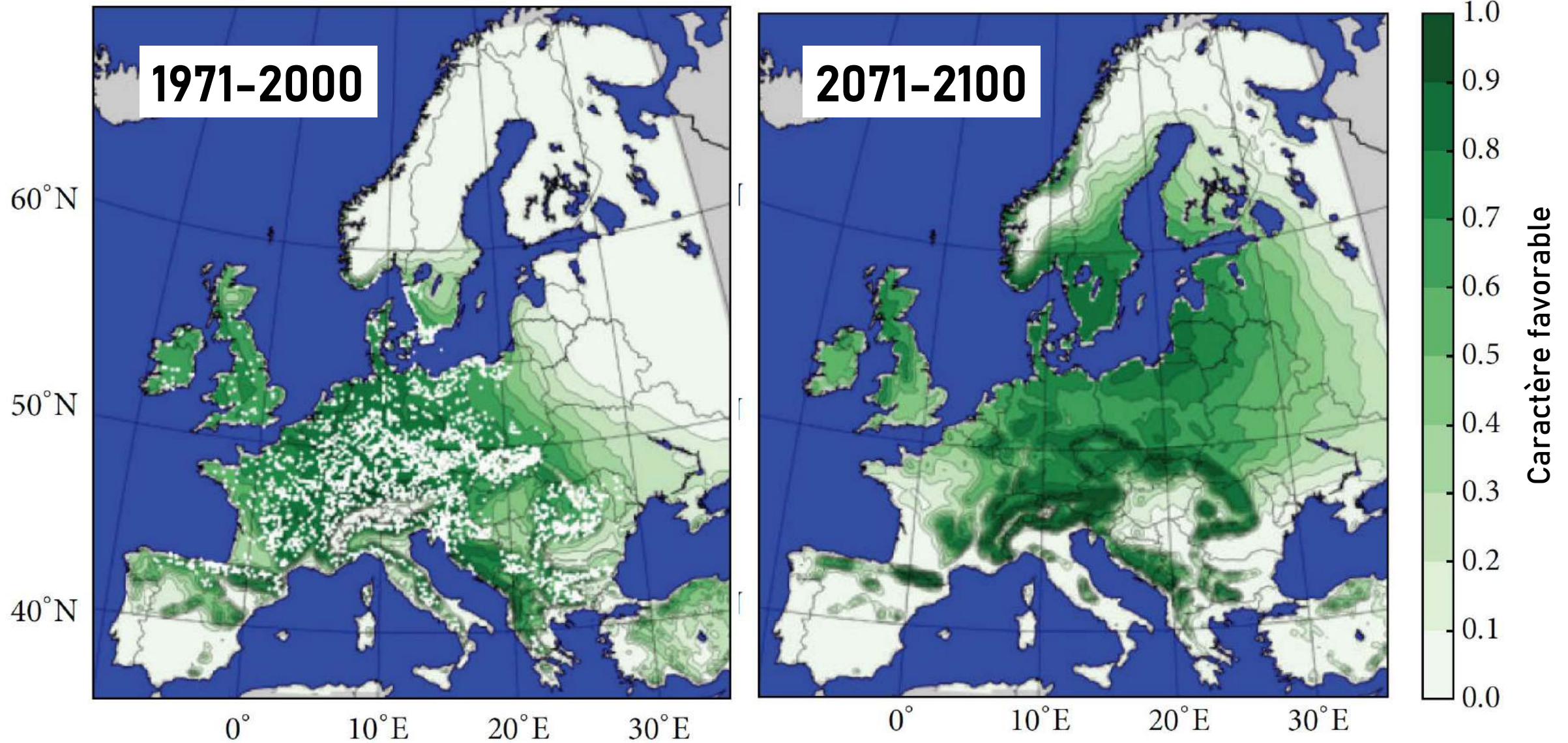


Où trouvera-t-on ce climat dans l'avenir?

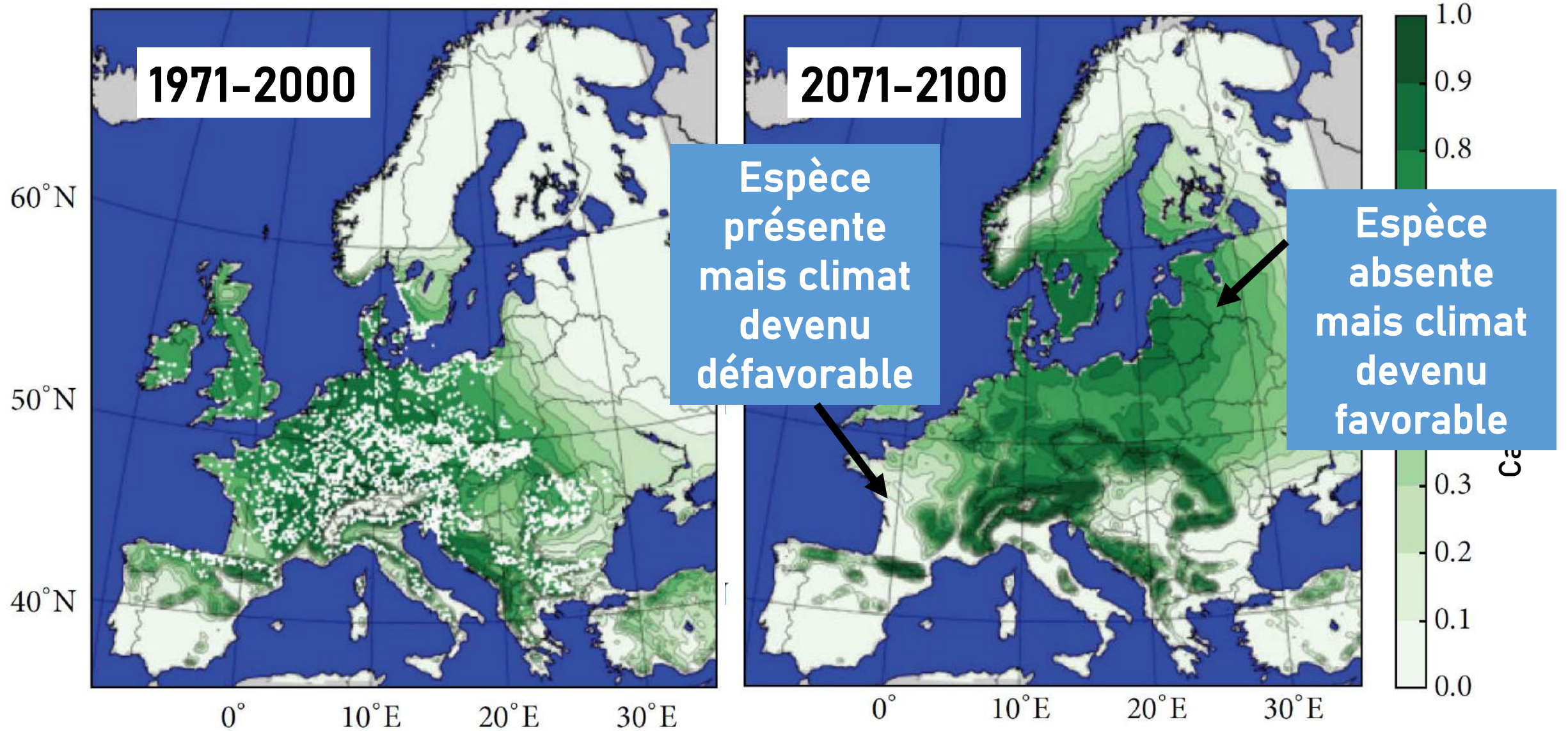
Niche climatique



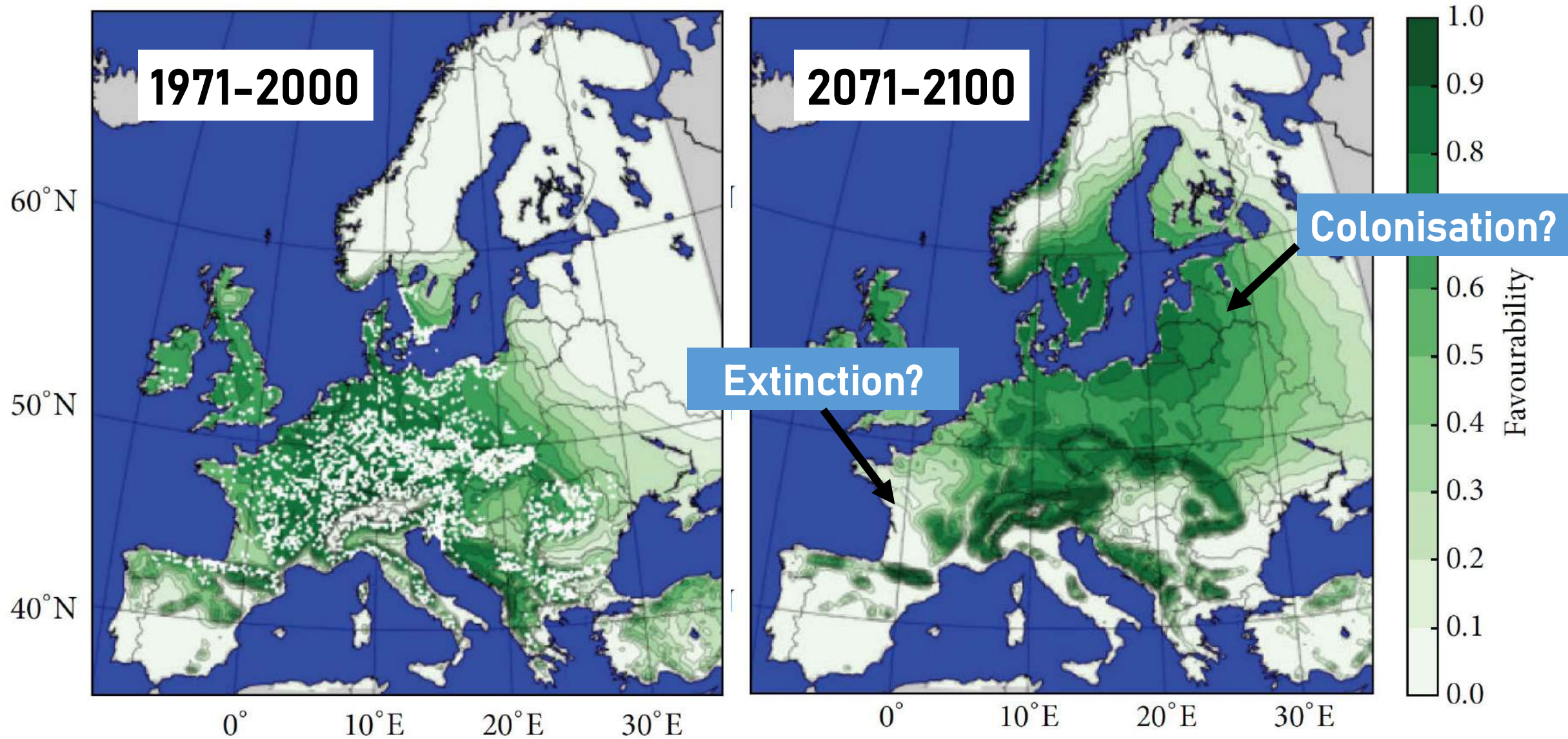
Prédire les déplacements de la niche climatique



Prédire les déplacements de la niche climatique



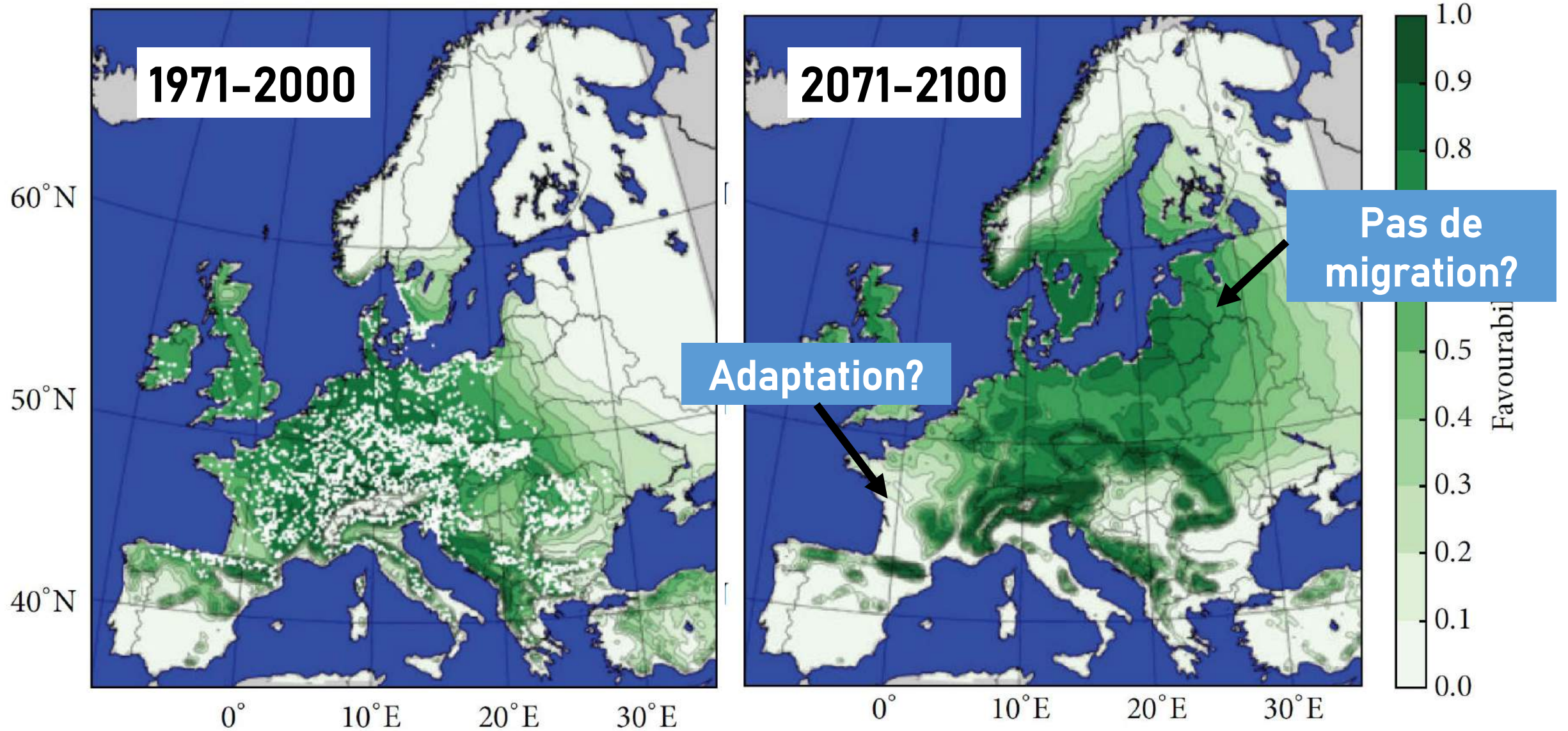
Que feront les hêtres? Un scénario possible



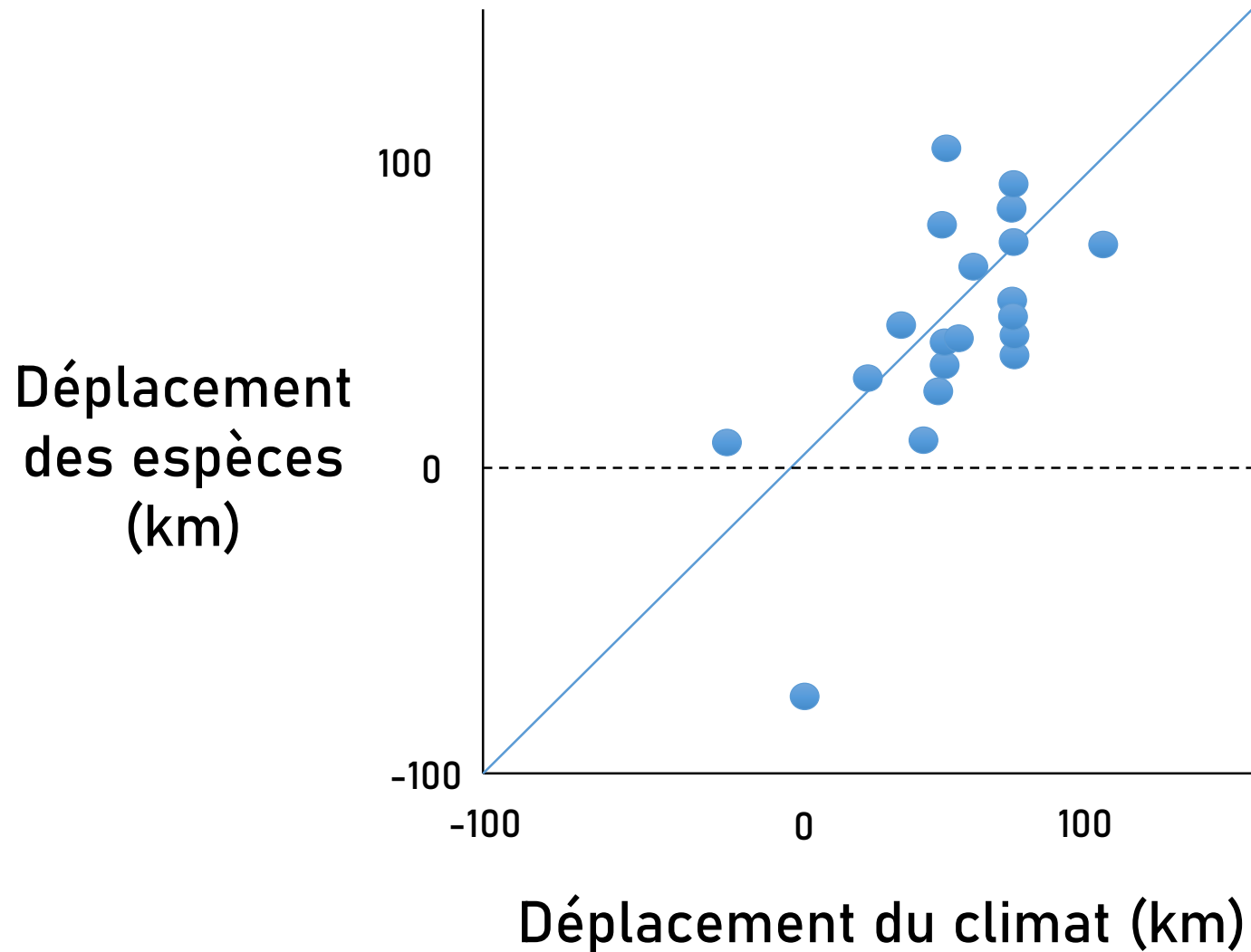
Faut-il cesser de planter des hêtres?



Que feront les hêtres? Un autre scénario



Les changements climatiques **actuels** prédisent les déplacements de la distribution des espèces



**17 km en 10 ans
en moyenne**

Chen *et al.* 2011

Lenoir *et al.* 2020

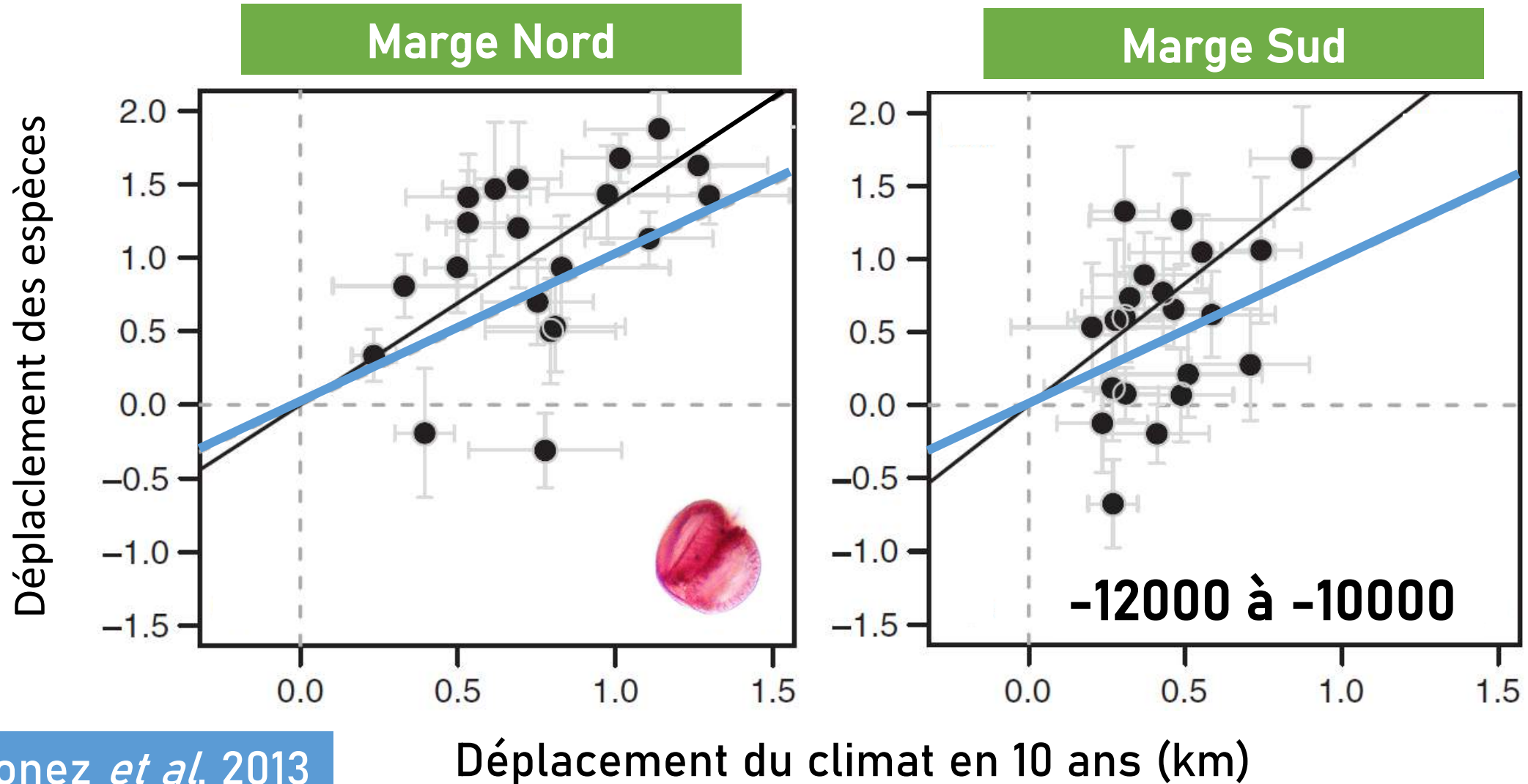


5-7km/an

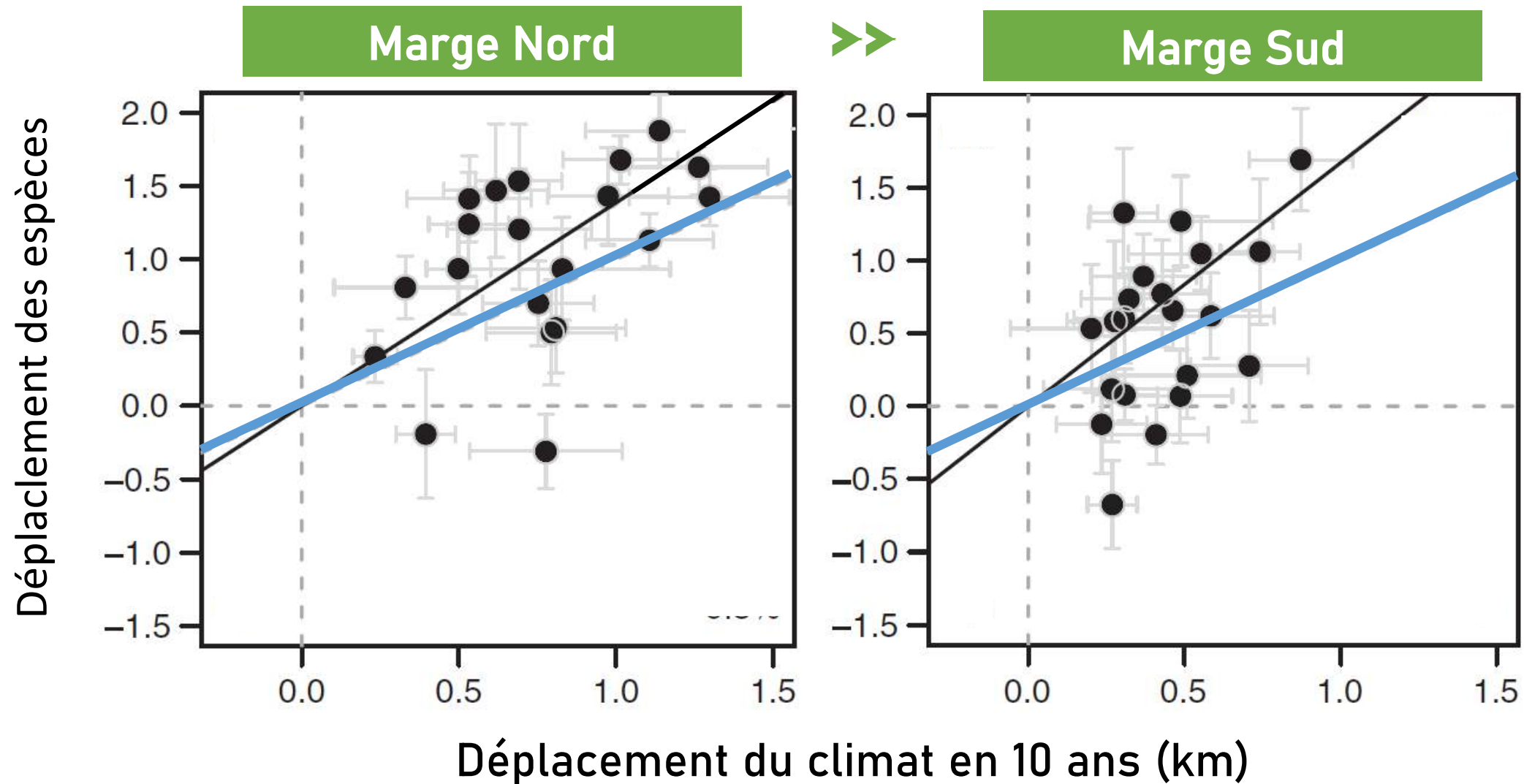


0-2km/an

Les changements climatiques **passés** prédisent les déplacements de la distribution des espèces



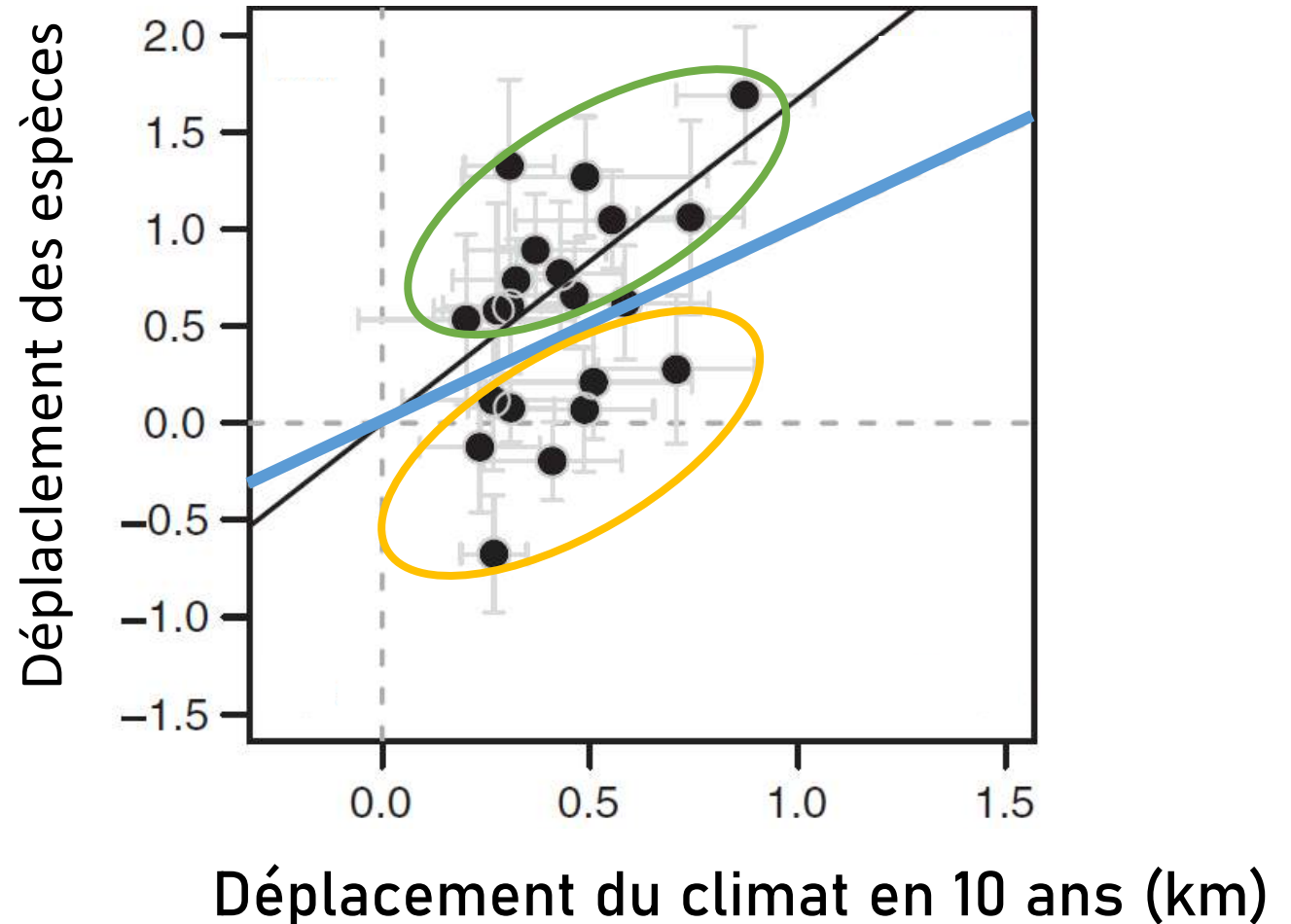
Les changements climatiques **passés** prédisent les déplacements de la distribution des espèces



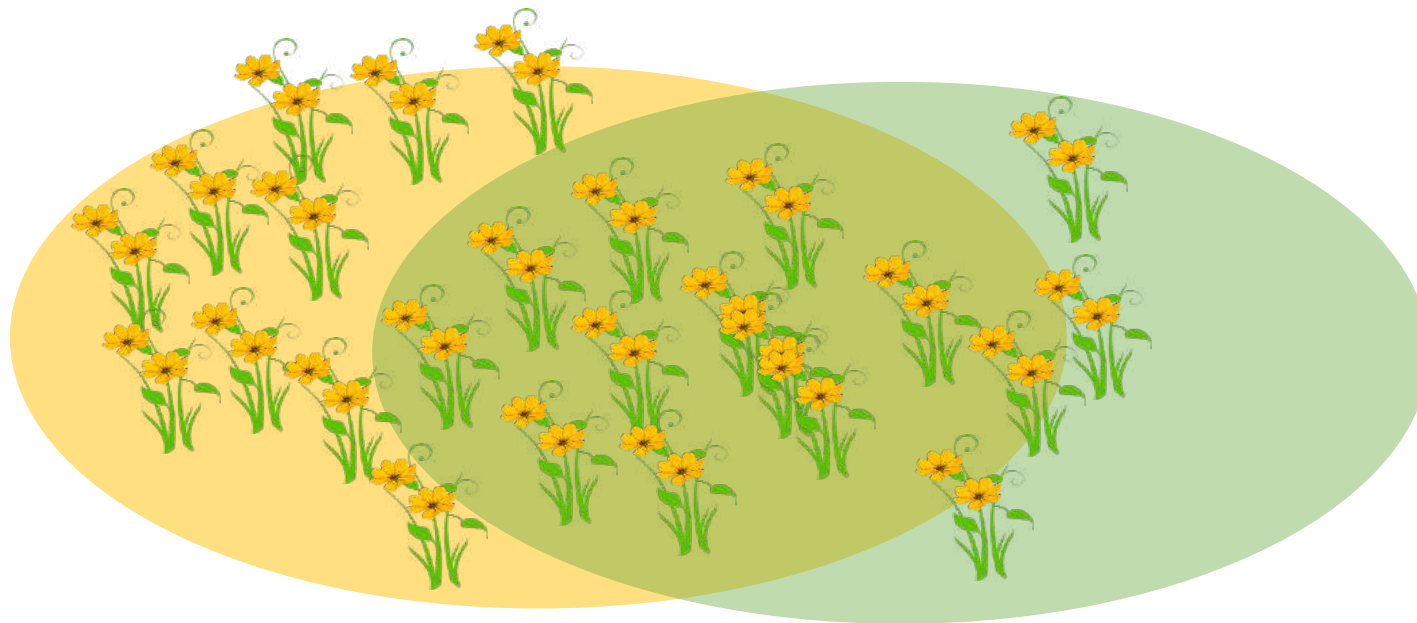
Les changements climatiques **passés** prédisent les déplacements de la distribution des espèces

Certaines espèces se déplacent plus vite que le climat

Certaines espèces se déplacent moins vite que le climat



De quoi la dette climatique est-elle le signal?



Persistence dans les zones
devenues climatiquement
défavorables

➔ Extinction en sursis?

➔ Adaptation au nouveau climat?

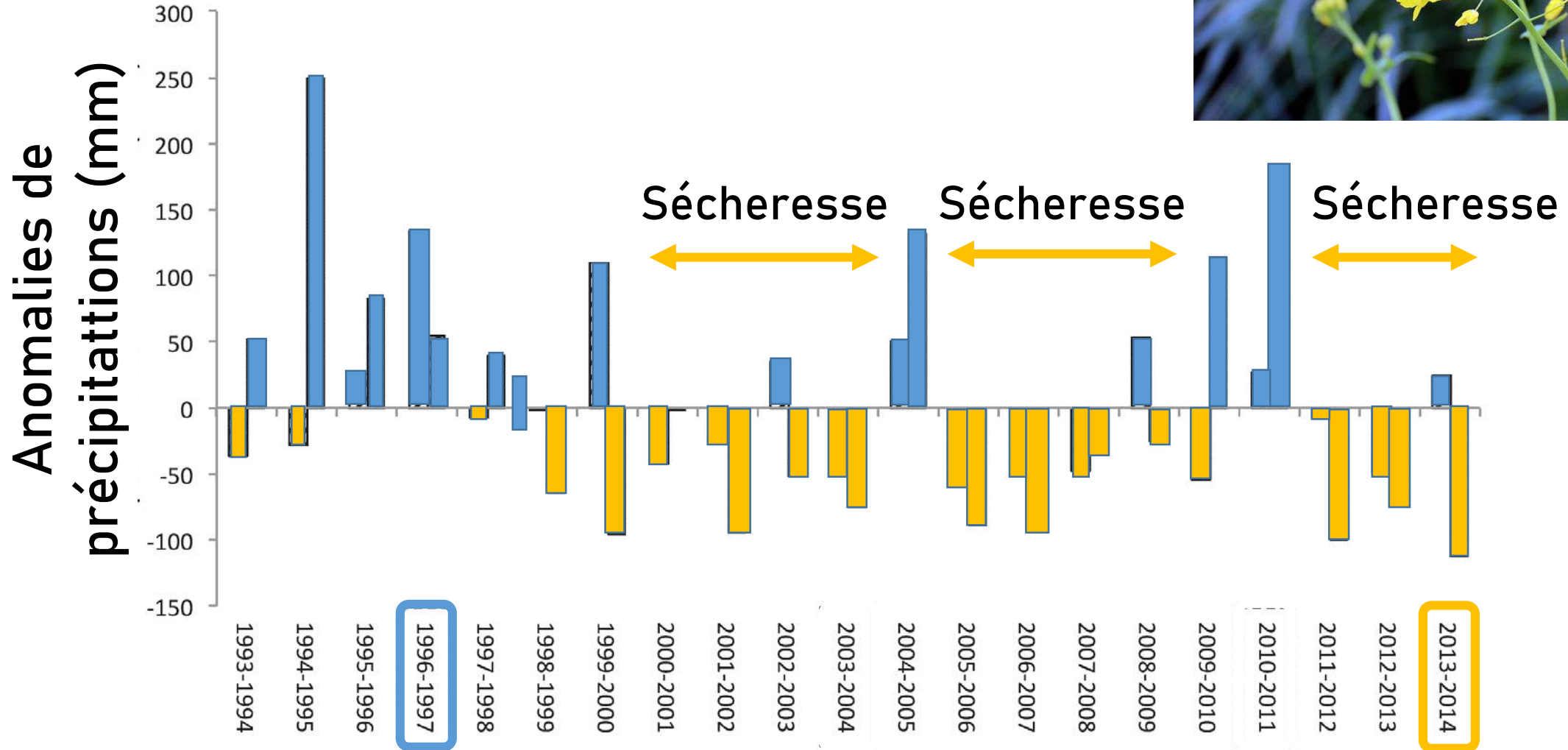


Un exemple d'évolution contemporaine rapide en réponse aux changements climatiques

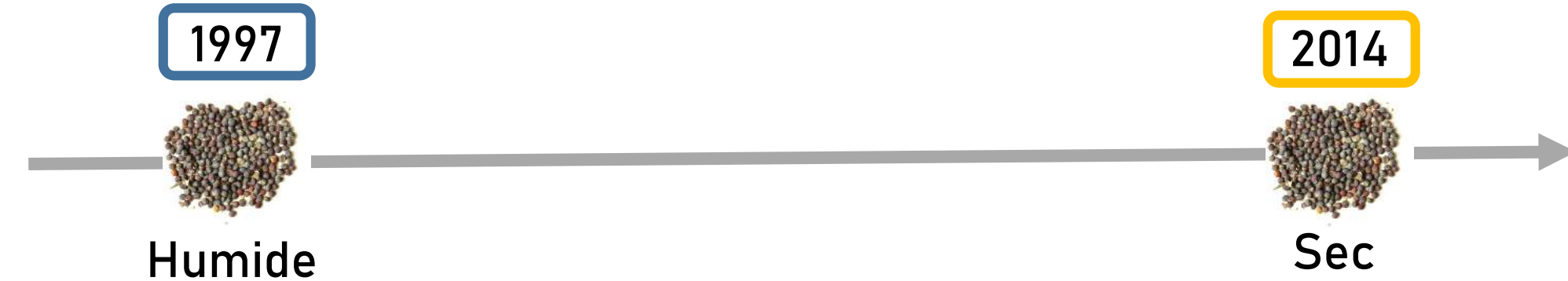
Les plantes portant des gènes permettant une floraison précoce sont plus fréquentes que dans le passé

Hamman *et al.* 2018

Une expérience de "résurrection"

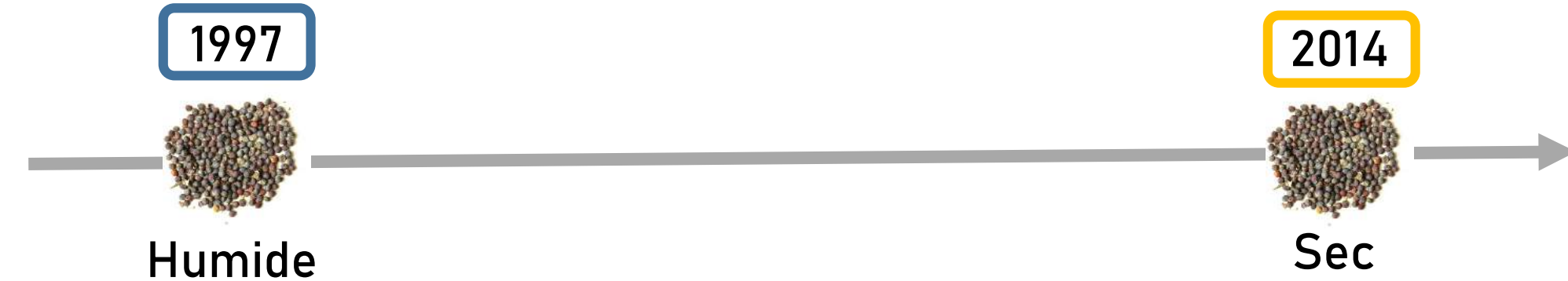


Une expérience de “résurrection”



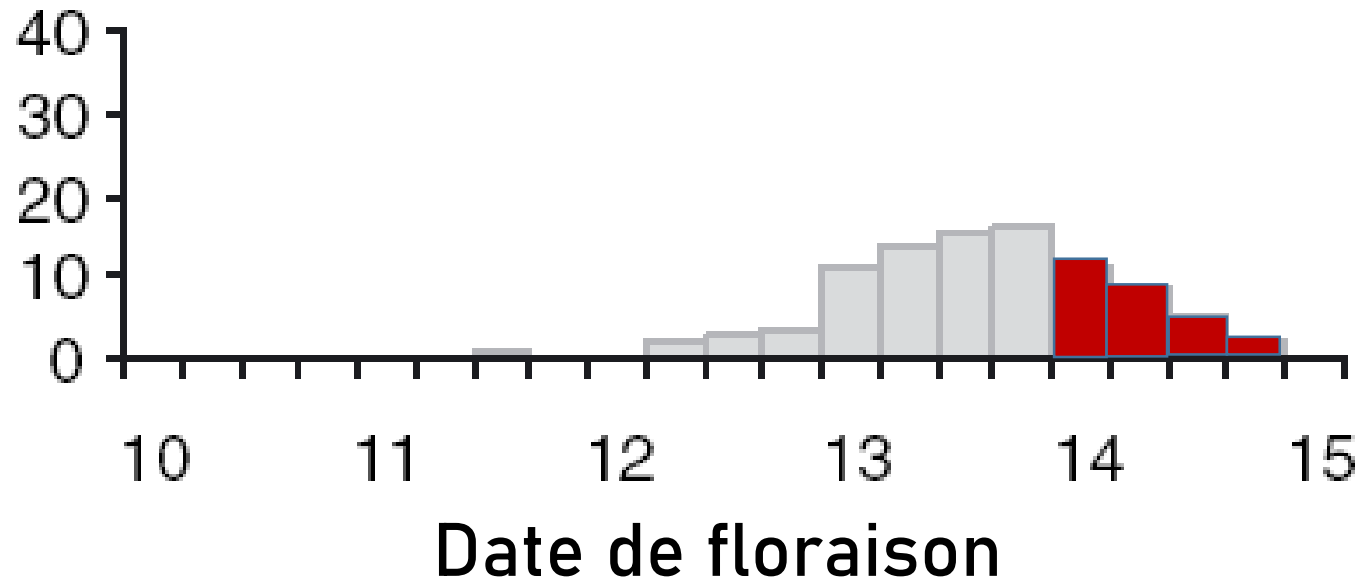
Les plantes du passé et du présent poussent dans le même jardin commun et sont croisées

Une expérience de “résurrection”



**Différences
génétiques**

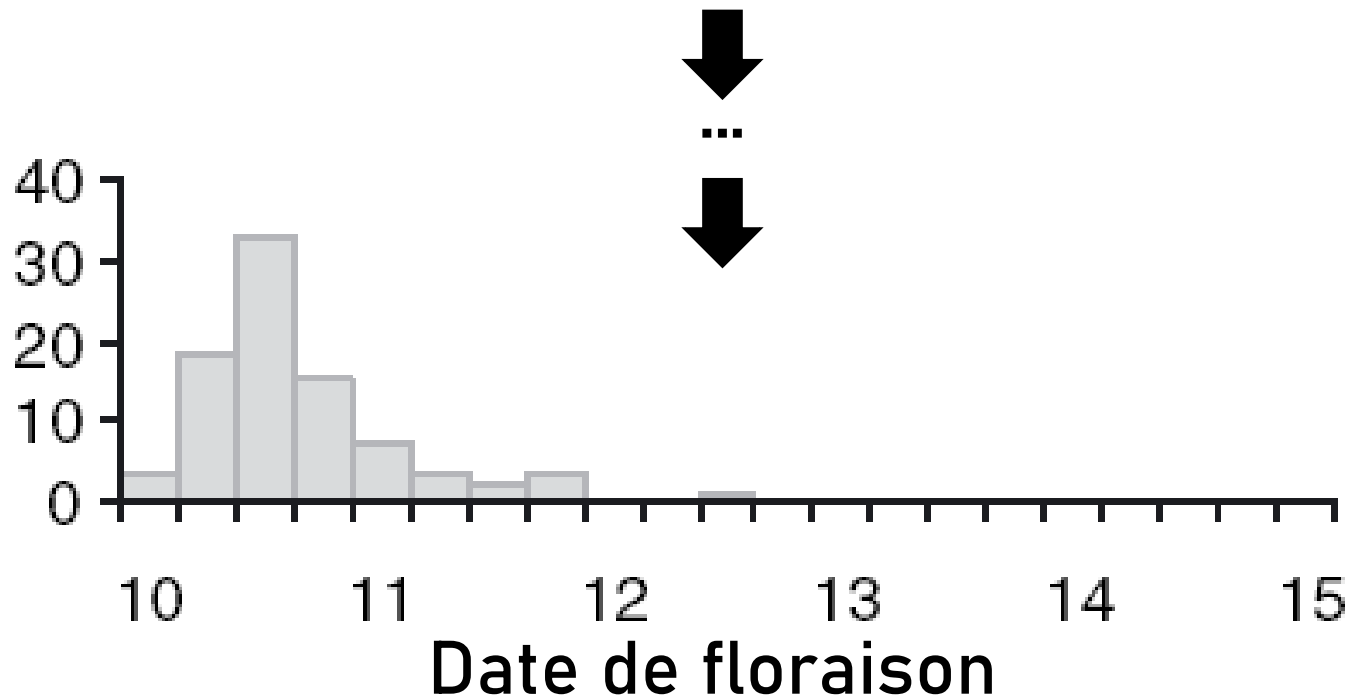
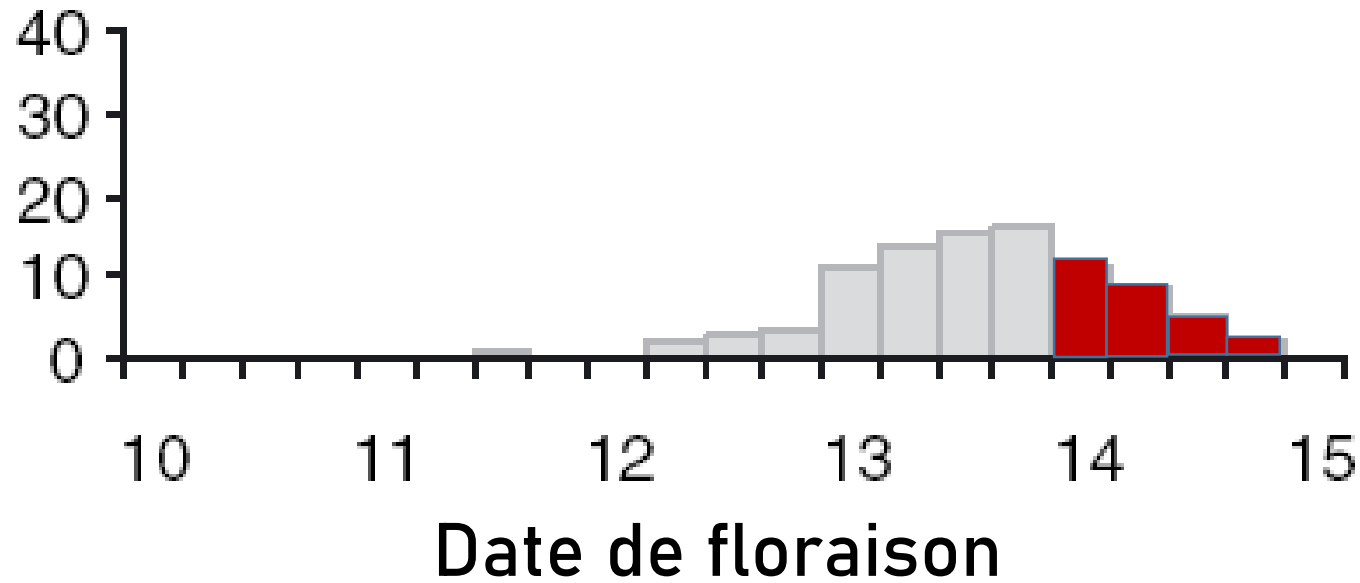
**Les plantes issues de graines
récoltées après plusieurs années
de sécheresse fleurissent 3 jours
plus tôt**



Sécheresse



La sélection naturelle favorise les plantes plus précoces



Pour que l'évolution soit rapide, il faut que:

- 1) Les individus précoces et tardifs aient un succès différent
- 2) Les dates de floraison soient très variables entre individus
- 3) Ces différences soient transmises aux descendants

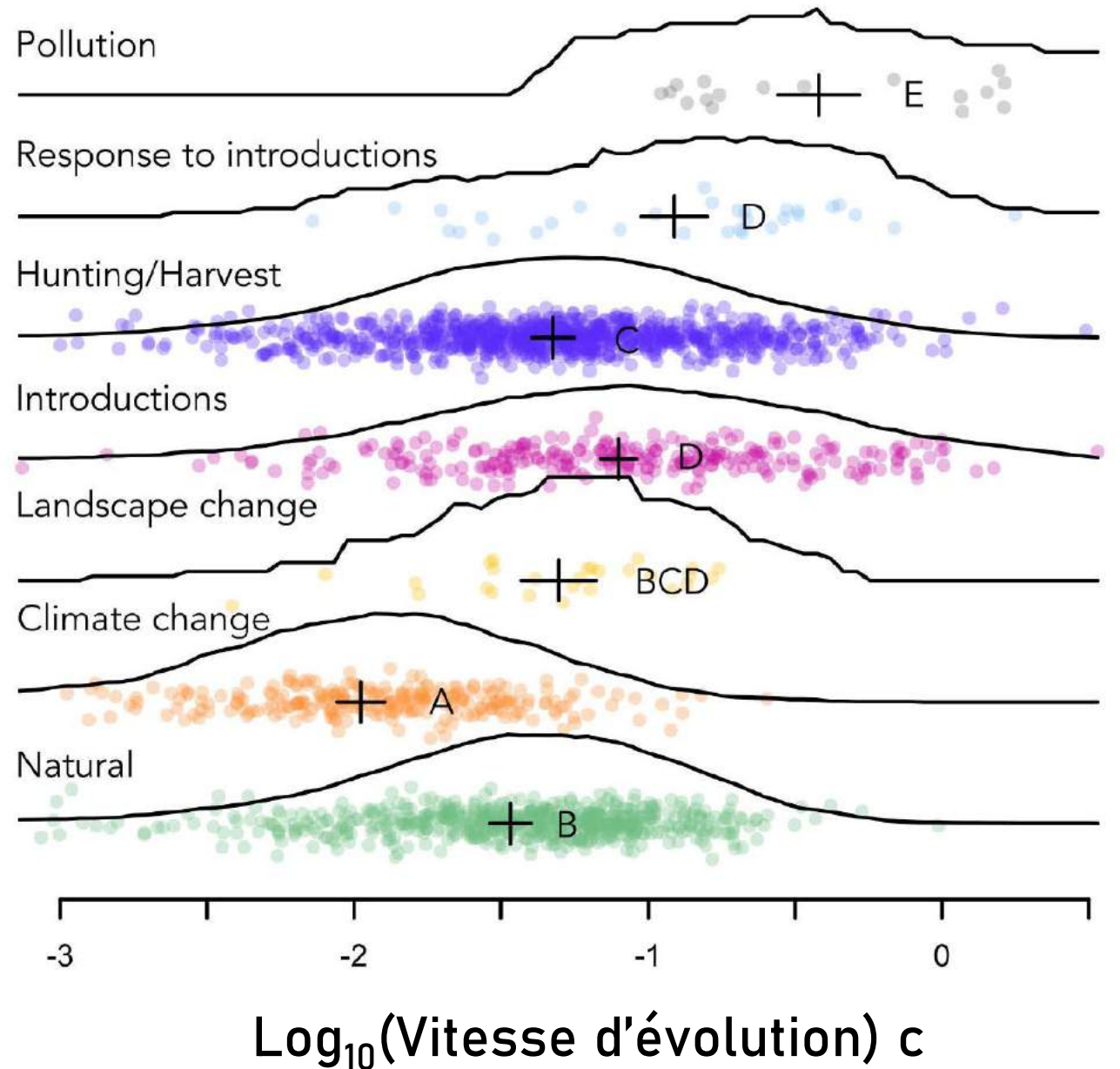


Floraison avancée de 3 jours en 17 ans

Evolution rapide!

Mais est-ce assez rapide?

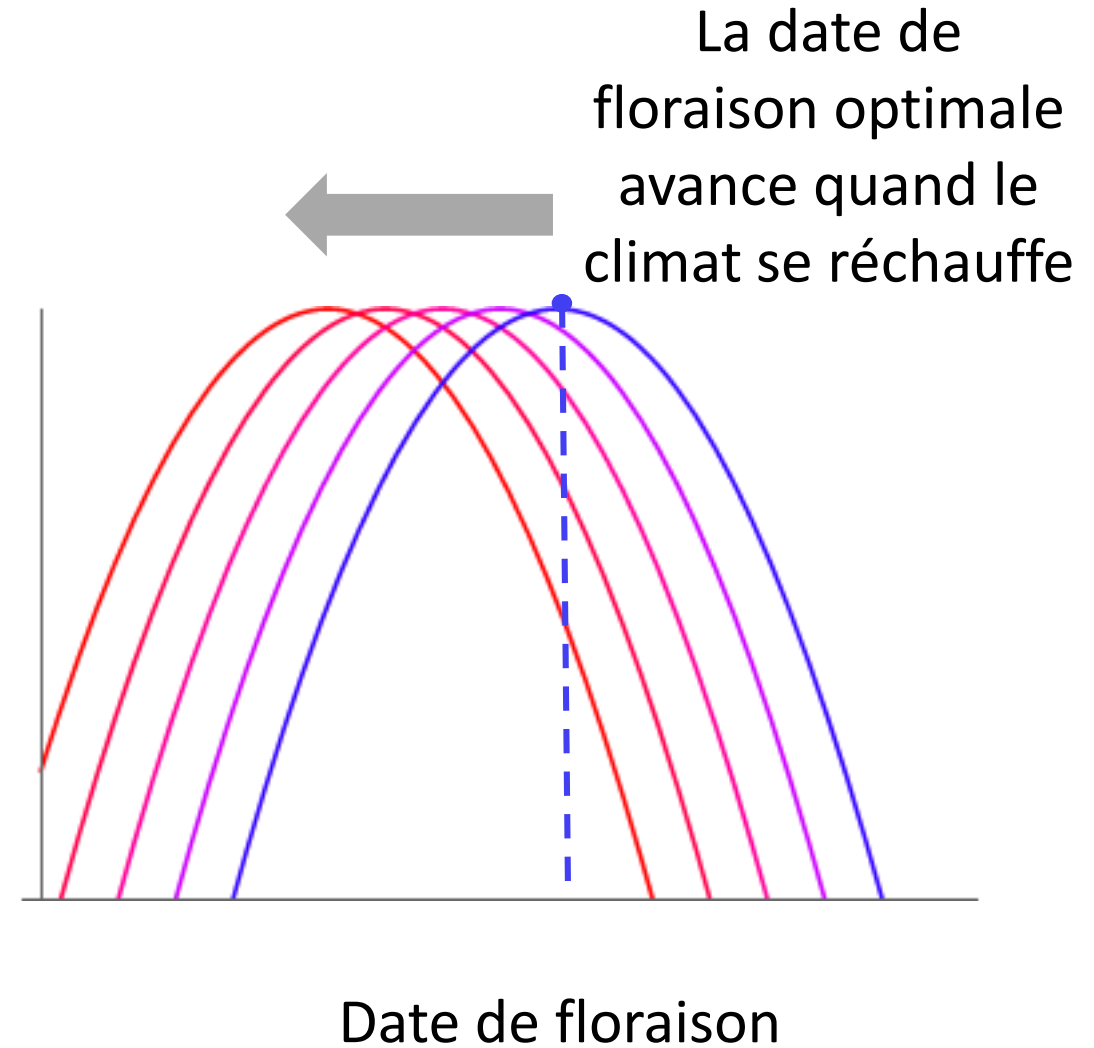
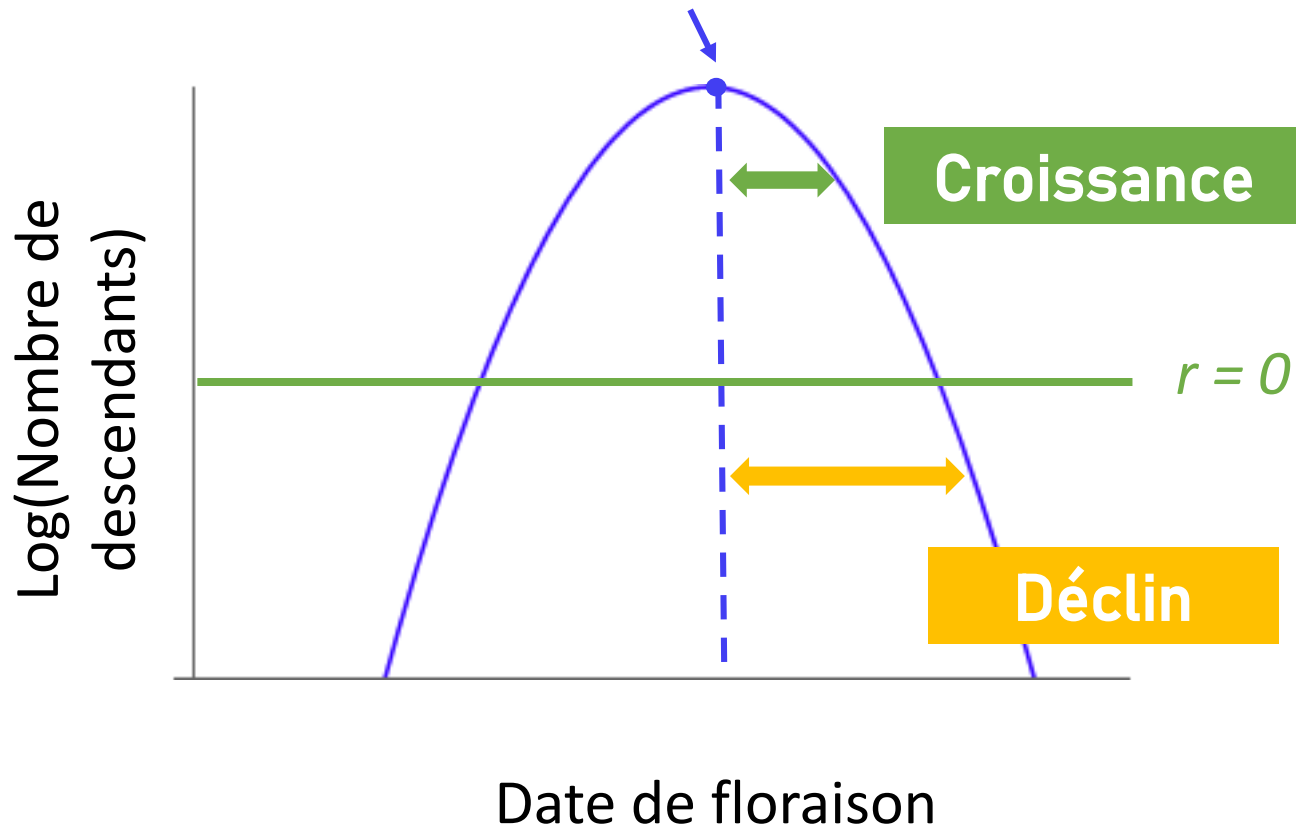
Sanderson *et al.* 2022



Un modèle simple pour mieux comprendre les défis de l'adaptation aux changements climatiques

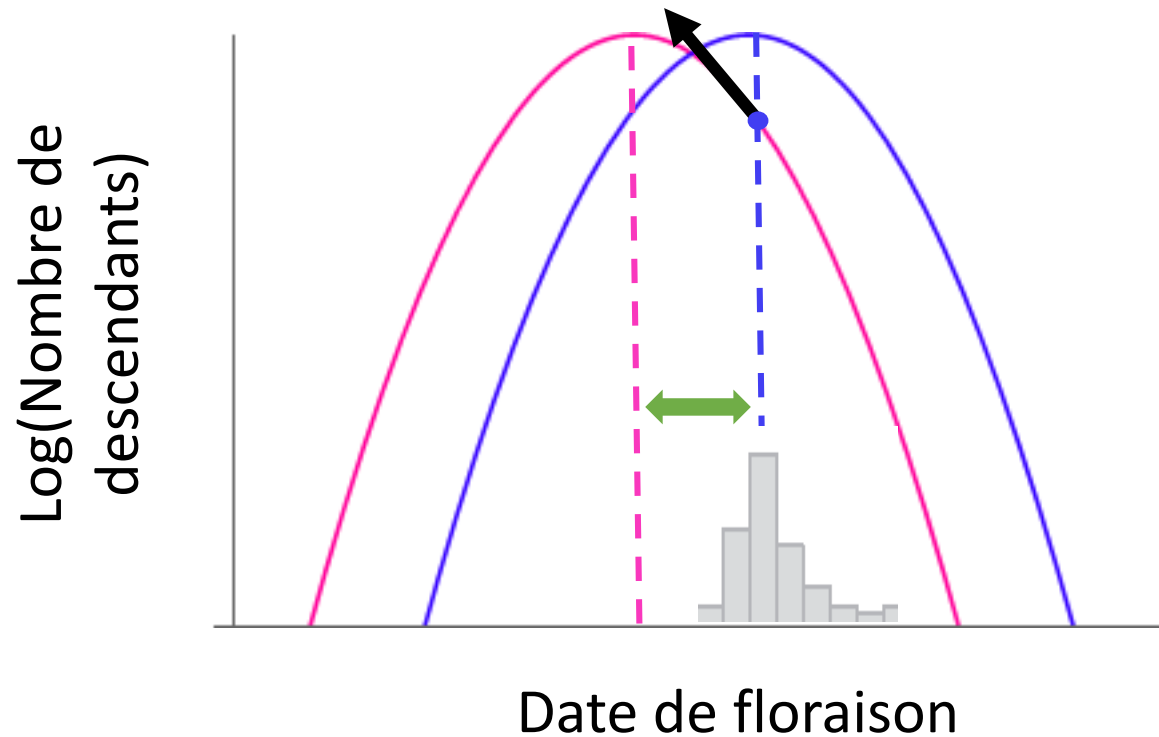
Lynch *et al.* 1991

Date de floraison optimale



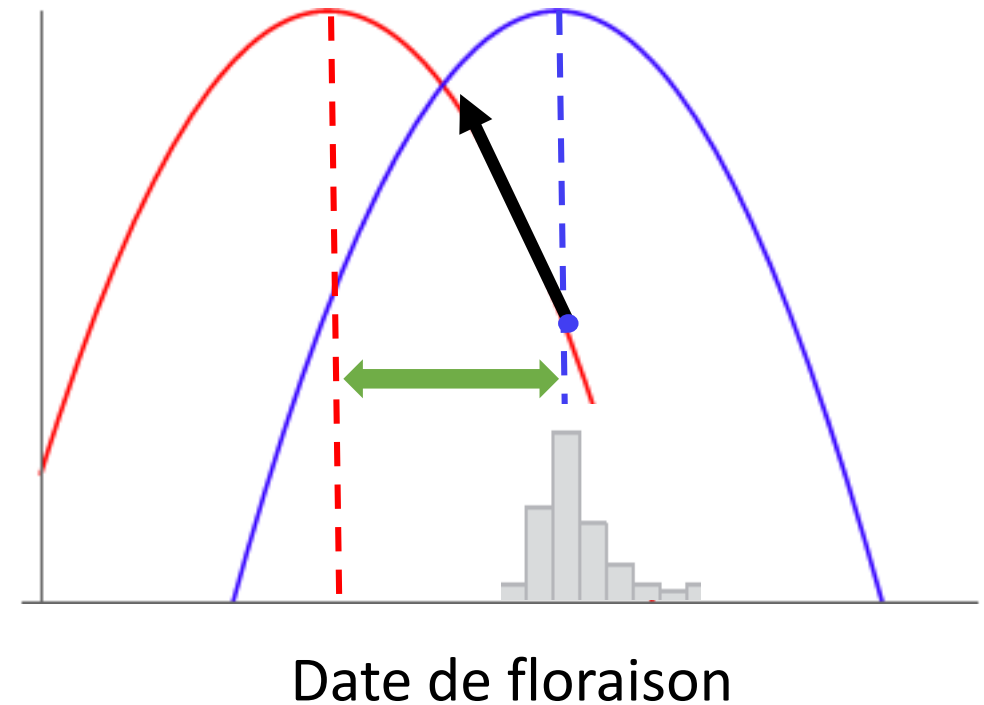
La force de la sélection augmente avec la mal adaptation

Réchauffement modéré



Peu de différences de succès entre individus précoces et tardifs

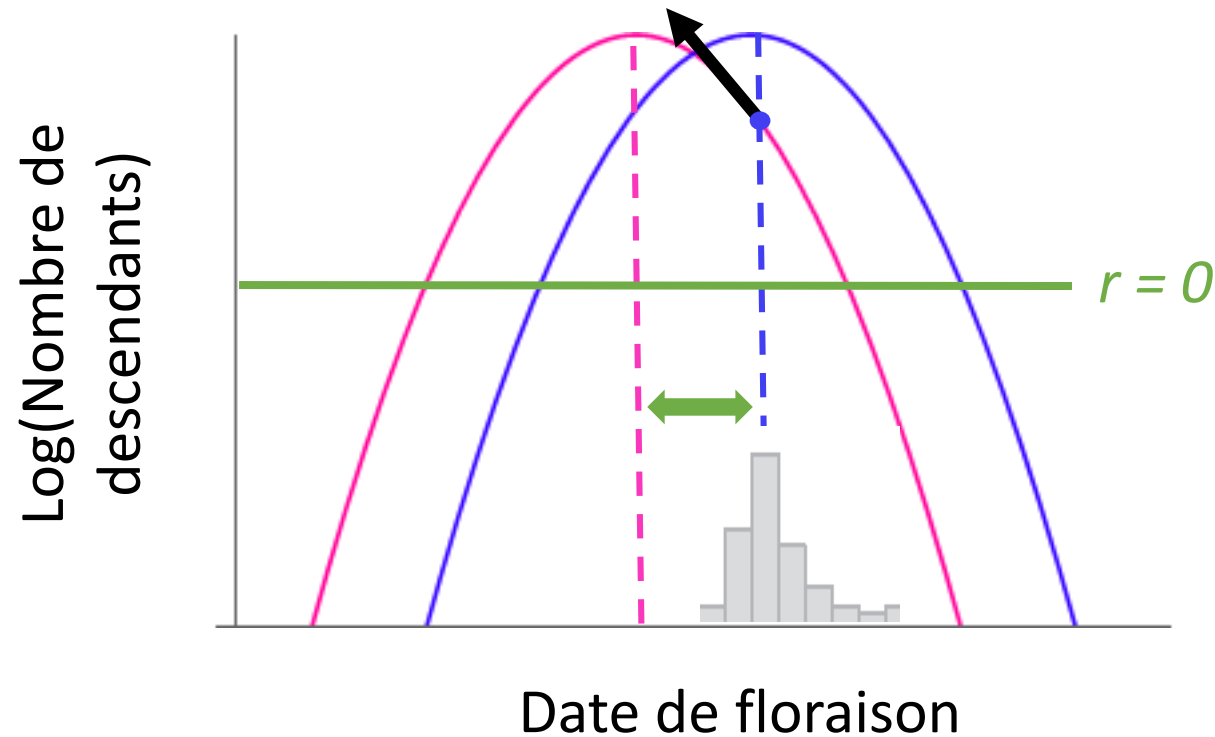
Réchauffement intense



Grandes différences de succès entre individus précoces et tardifs

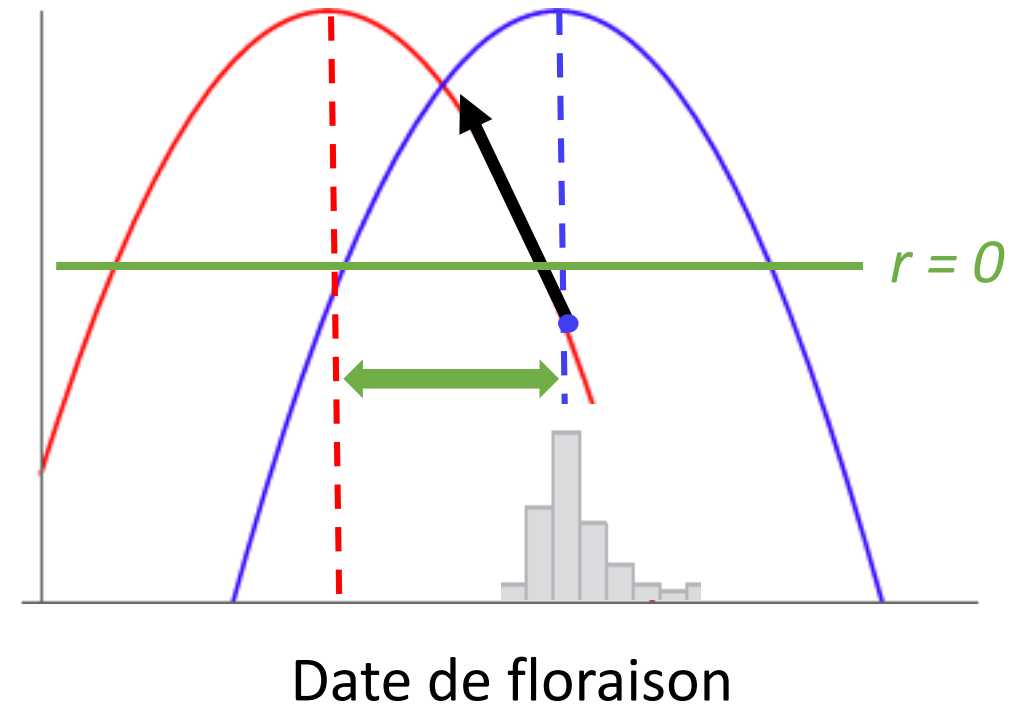
La force de la sélection augmente avec la mal adaptation

Réchauffement modéré

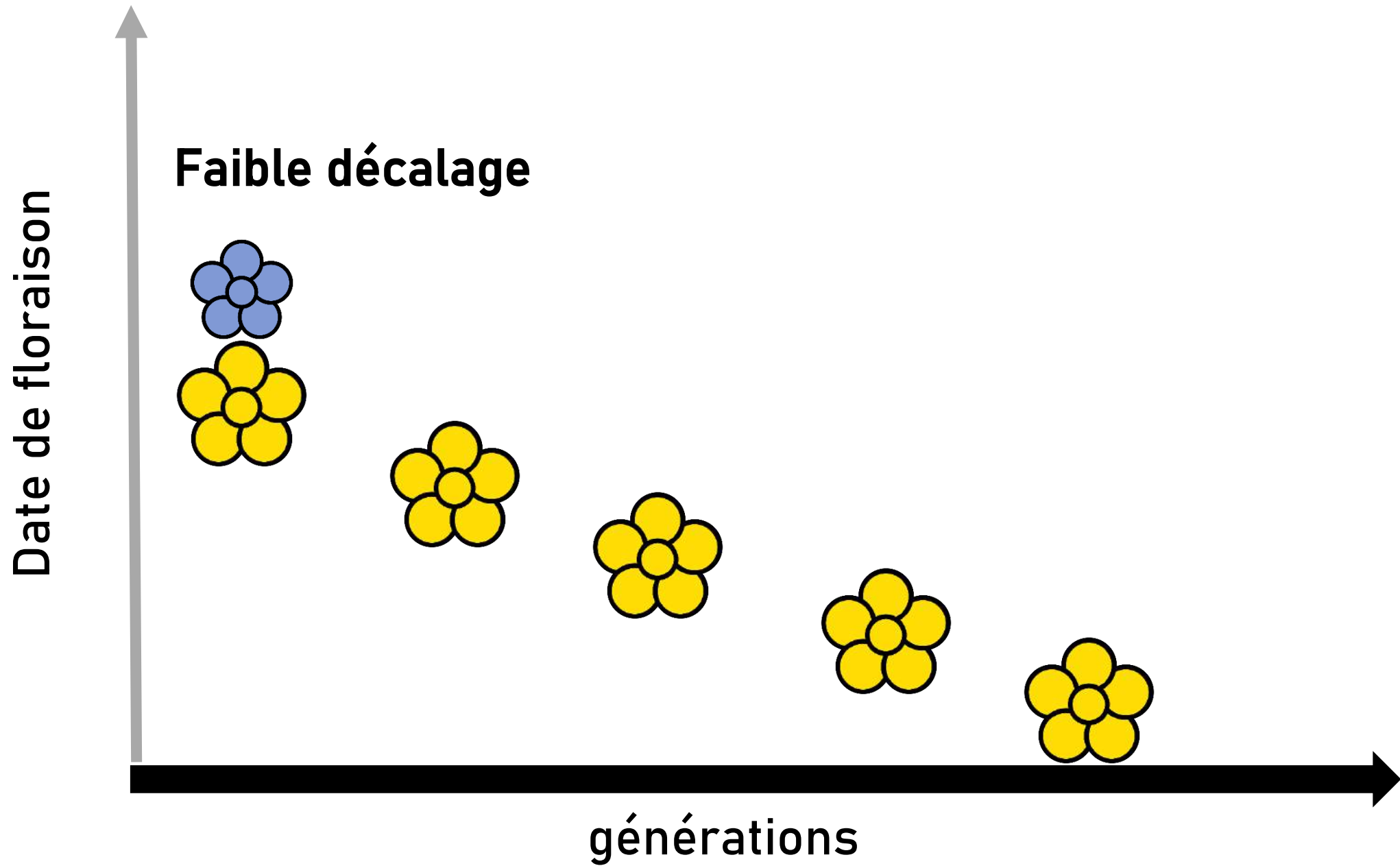


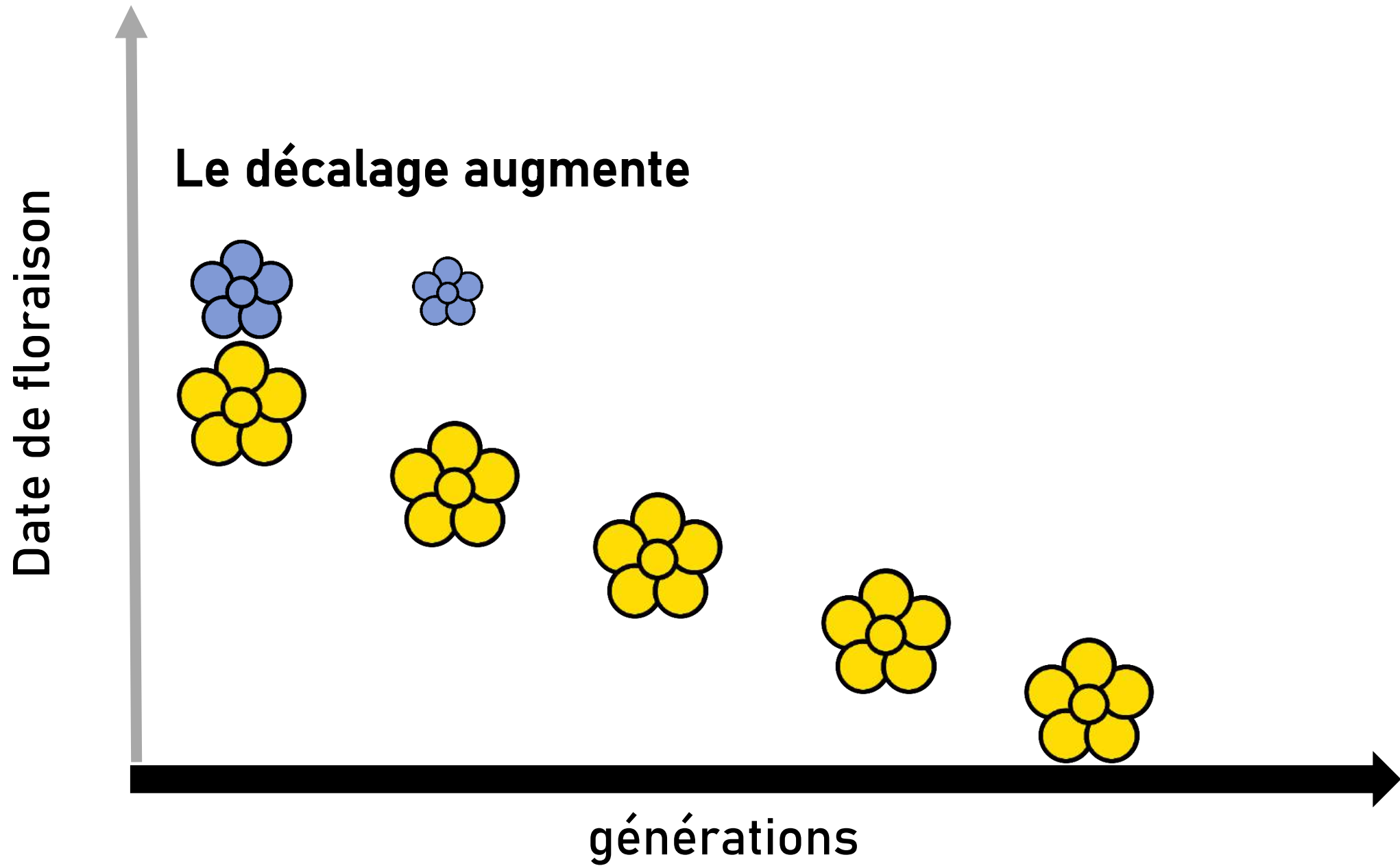
La population persiste même si elle n'évolue pas

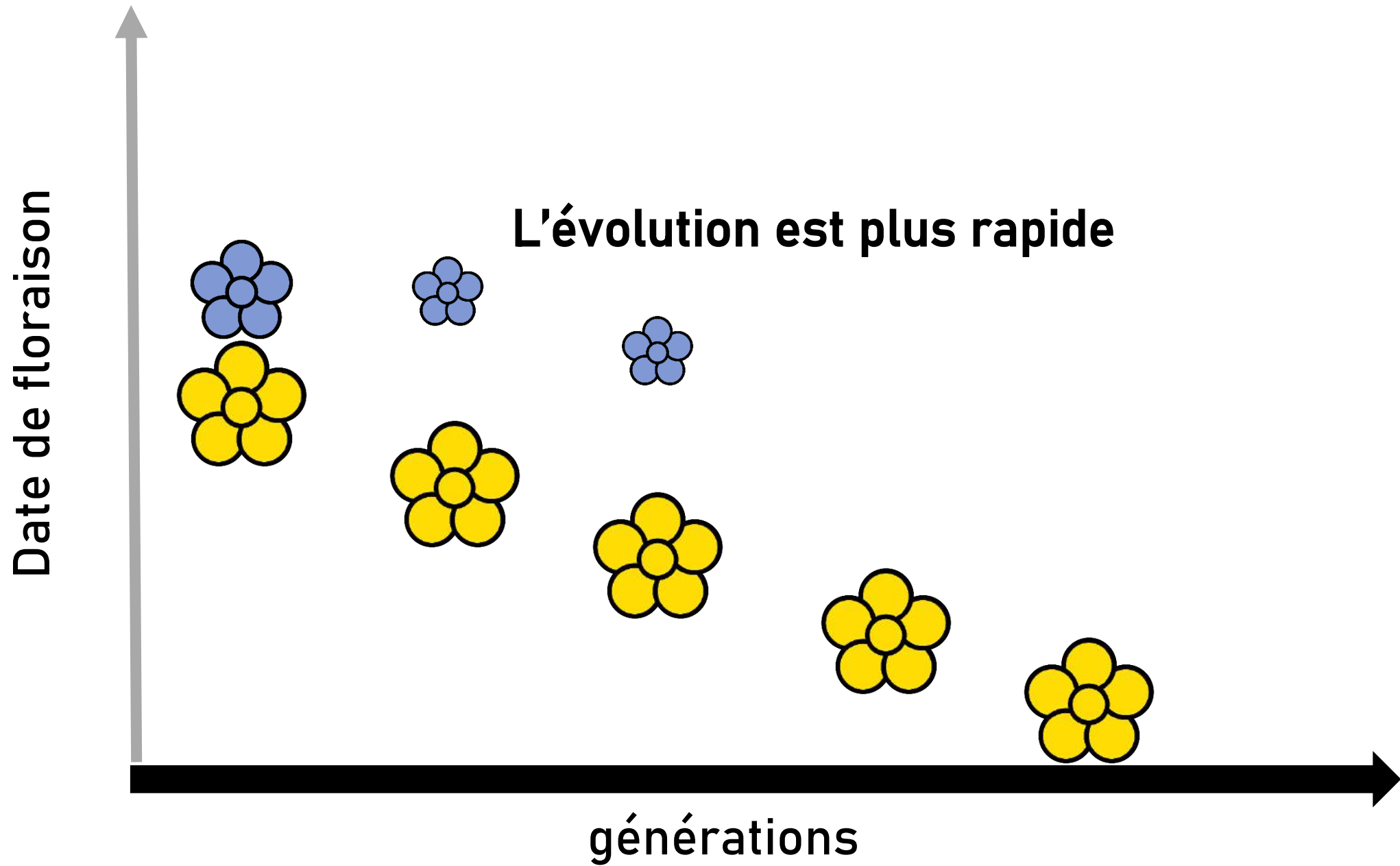
Réchauffement intense

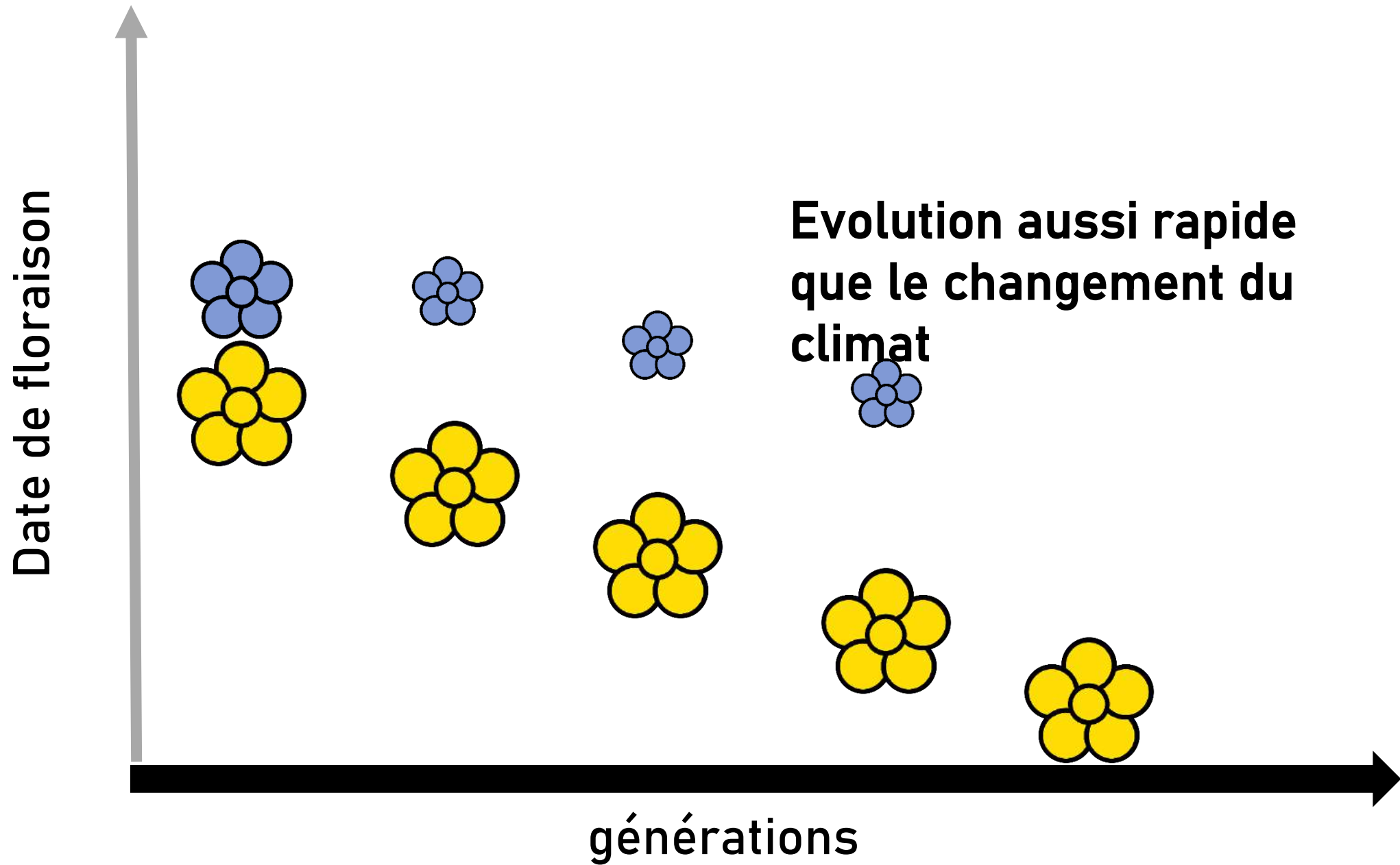


La population s'éteint si elle n'évolue pas

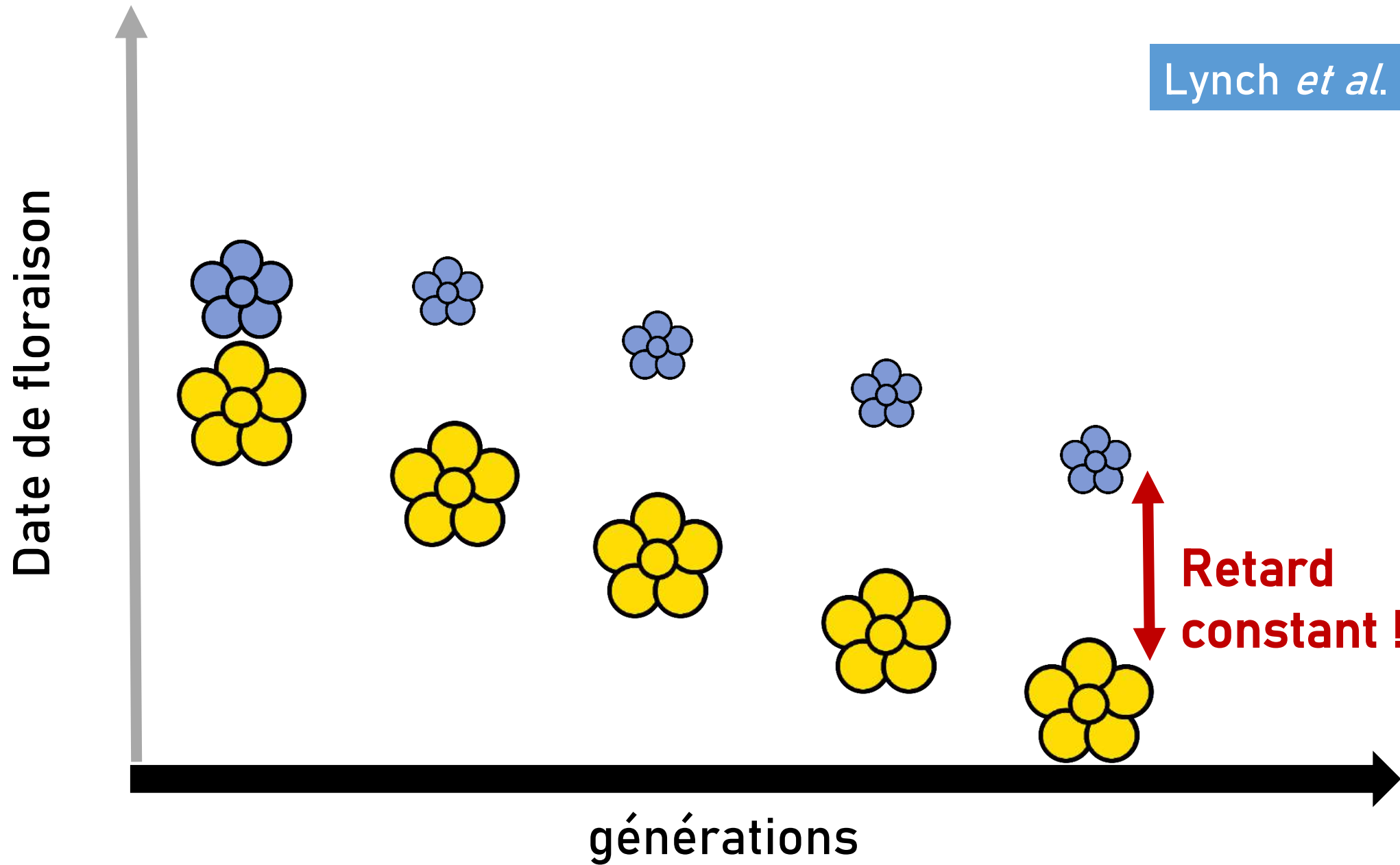


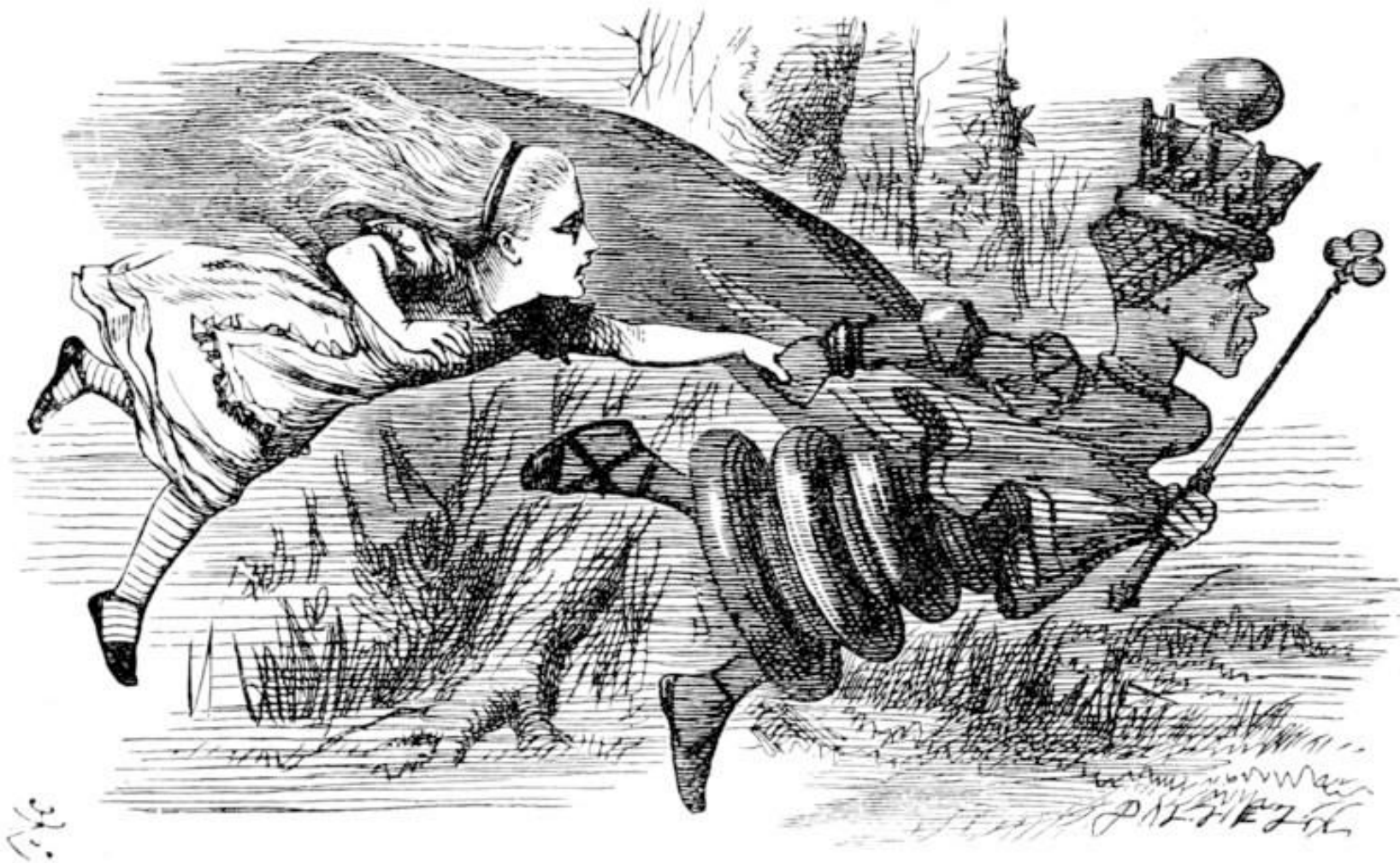






Lynch *et al.* 1991





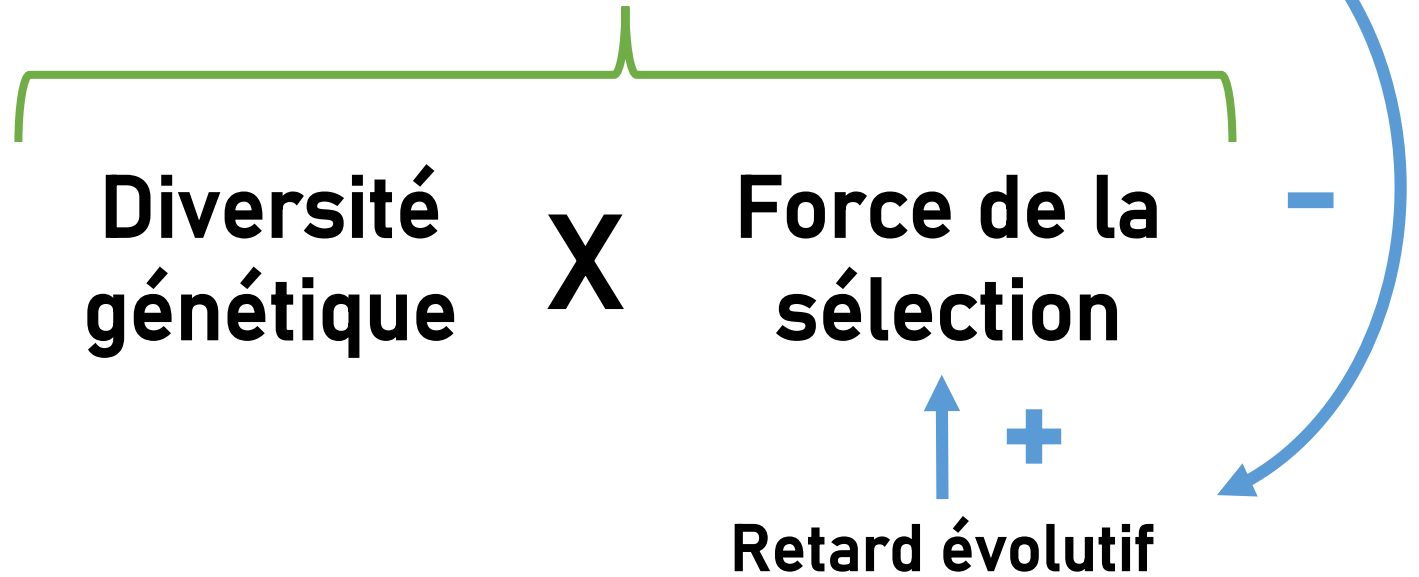
“Nous courrons
pour rester à la
même place.”

Lewis Carroll, *De
l'autre côté du miroir*

**Vitesse du
changement
climatique**

=

**Vitesse de
l'évolution**



Si le retard évolutif est trop grand, la population décline

Les vitesses d'évolution trop grandes ne sont pas soutenables

L'évolution génétique n'empêche pas nécessairement l'extinction

Le retard adaptatif est grand quand



Le climat change vite

Le remplacement des générations est lent

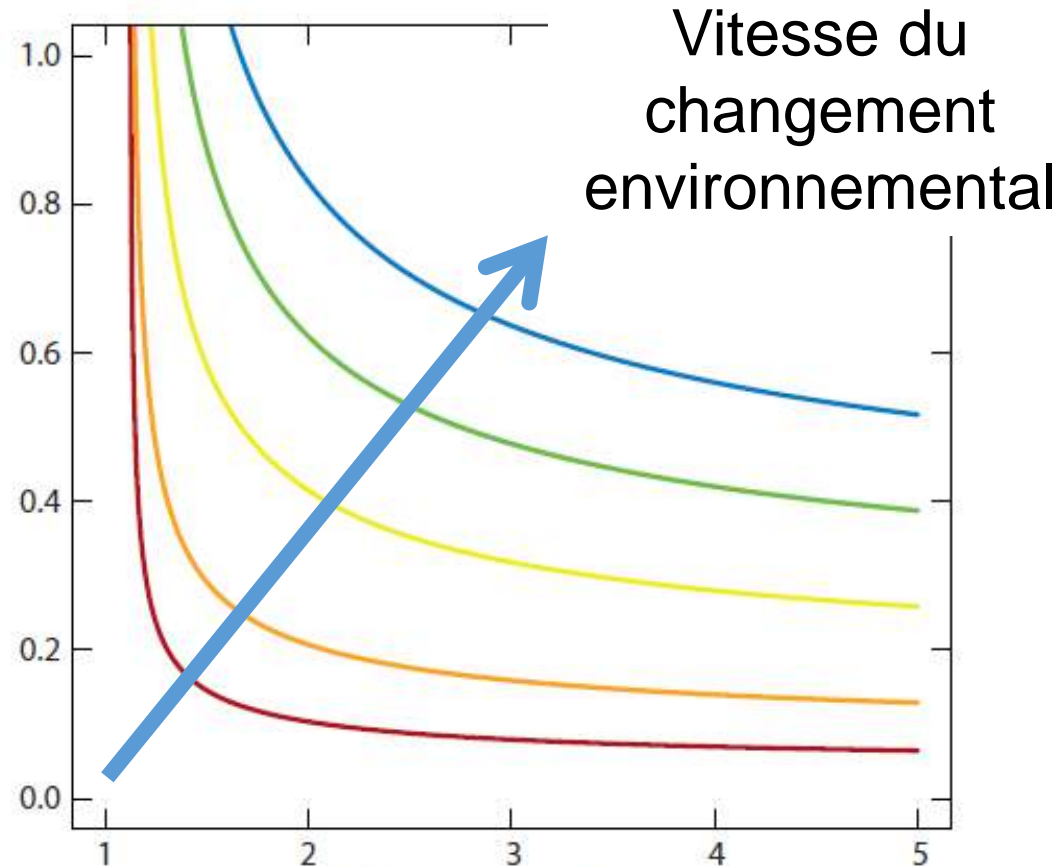
Il y a peu de diversité génétique

La sélection est faible



L'adaptation est une course entre évolution et changement de l'environnement

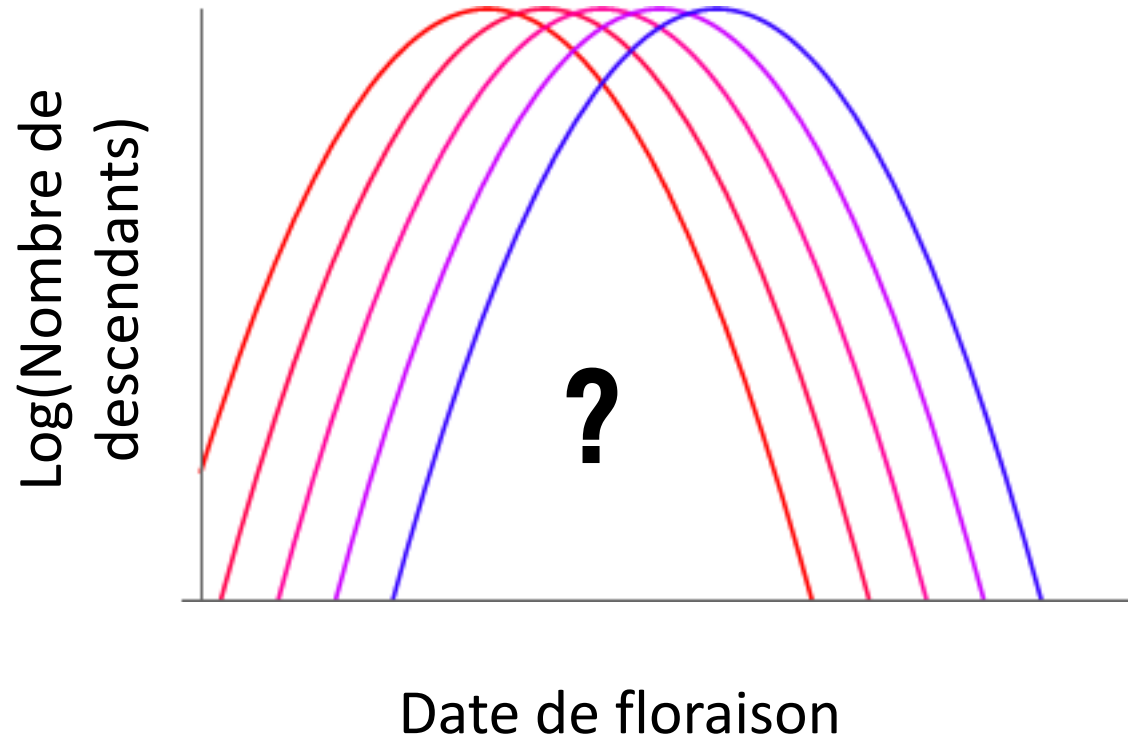
Diversité génétique nécessaire pour échapper à l'extinction



Fécondité

Gomulkiewicz & Houle 2009

Pour prédire le résultat de cette course, il faut comprendre comment la sélection change avec le climat



Difficile à mesurer pour beaucoup d'espèces dans beaucoup de sites sur des périodes longues et dans des climats futurs

Prédire la sélection à l'aide de modèles écophysiologicals

Gaüzere *et al.* 2020



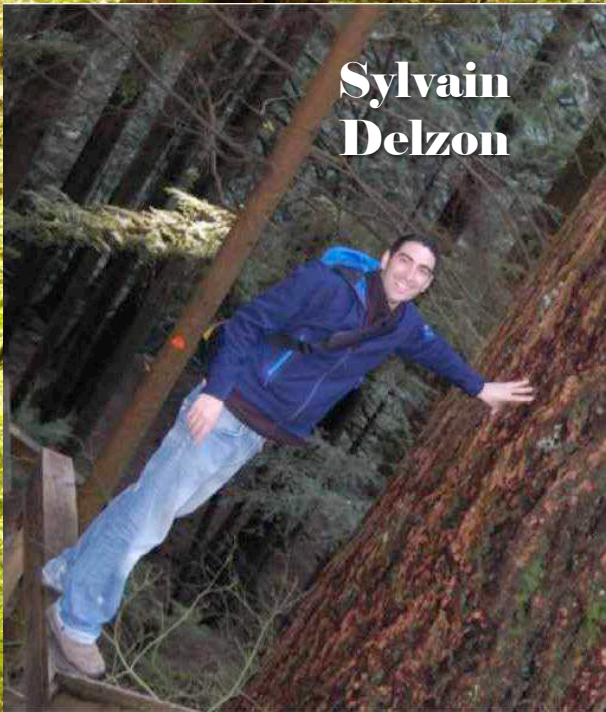
Julie Gaüzere



**Isabelle
Chuine**



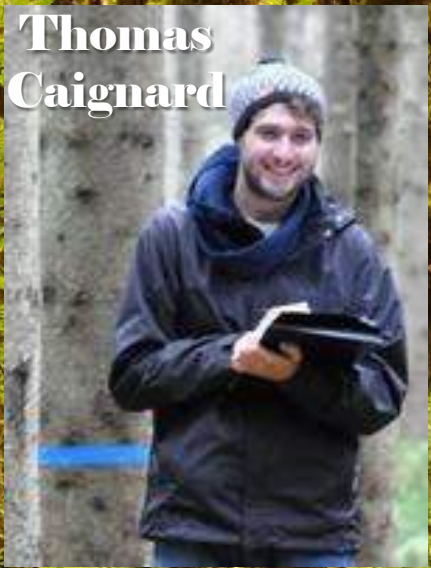
Luis-Miguel Chevin



**Sylvain
Delzon**



**Hendrik
Davi**



**Thomas
Caignard**

Le modèle PHENOFIT

Chuine et Beaubien 2001

Données climatiques
journalières

Réponses physiologiques de
l'espèce à la température

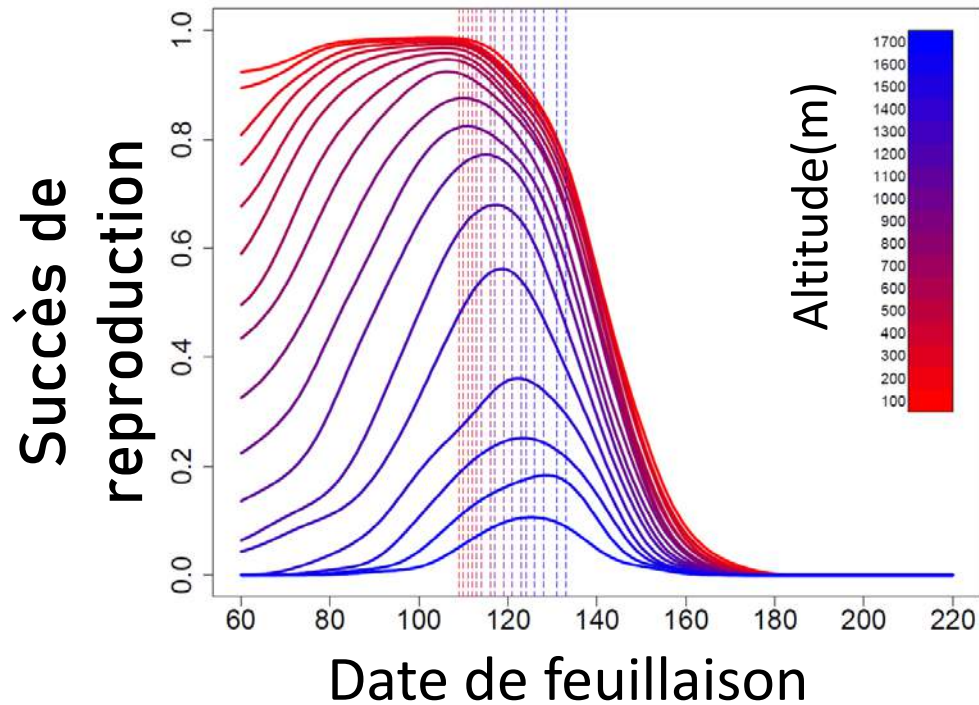
Dates de feuillaison, floraison, fructification

Résistance au froid

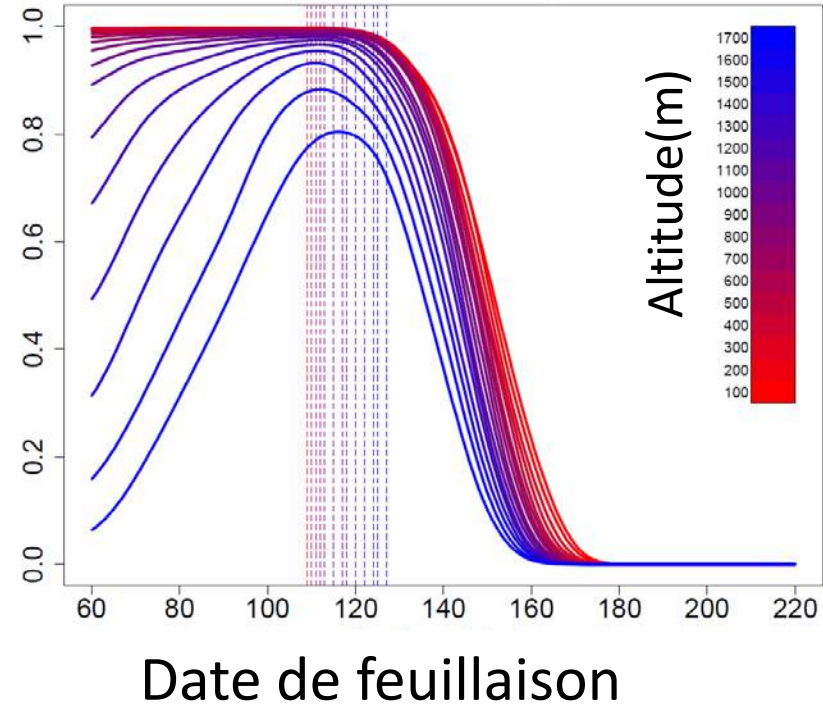
Succès de reproduction

Prédire comment la sélection change avec le climat

Climat historique



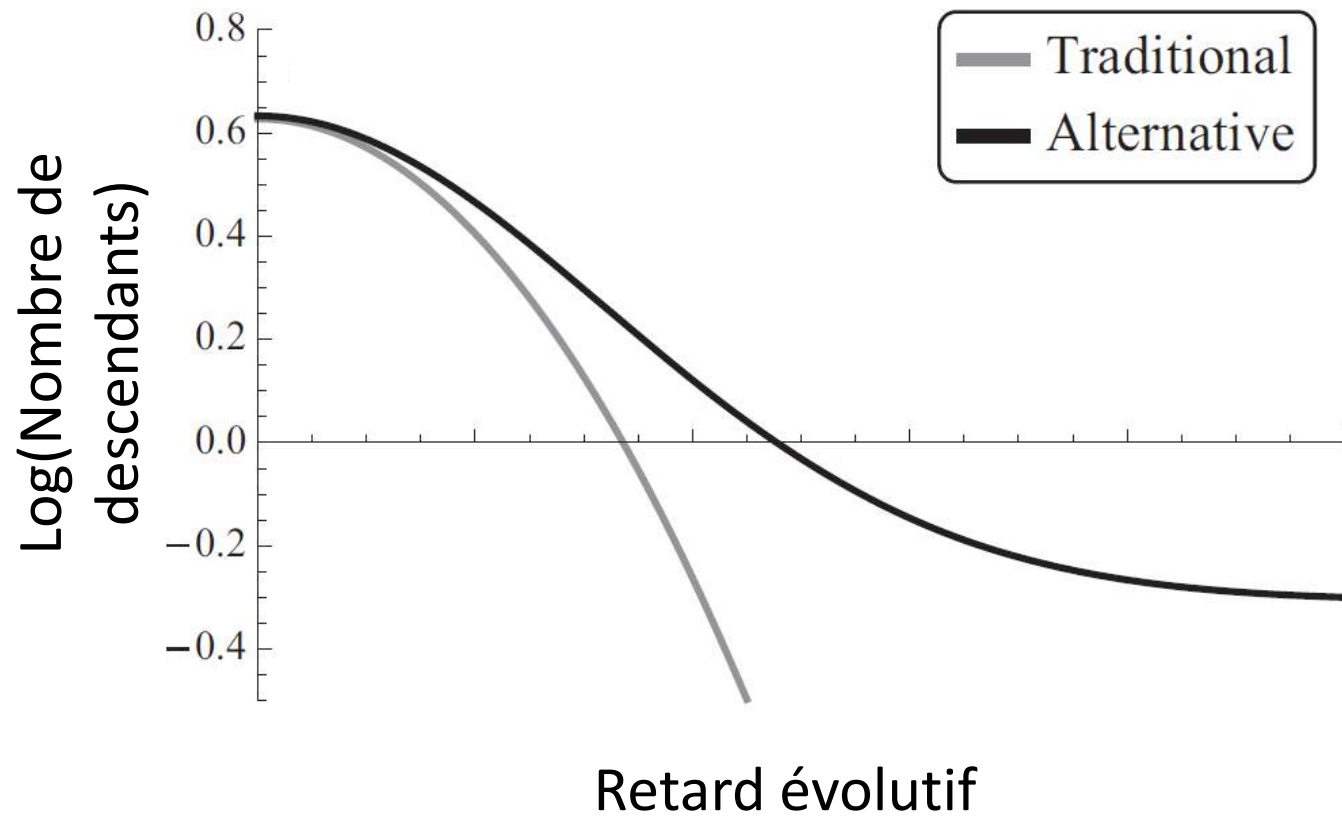
Climat futur



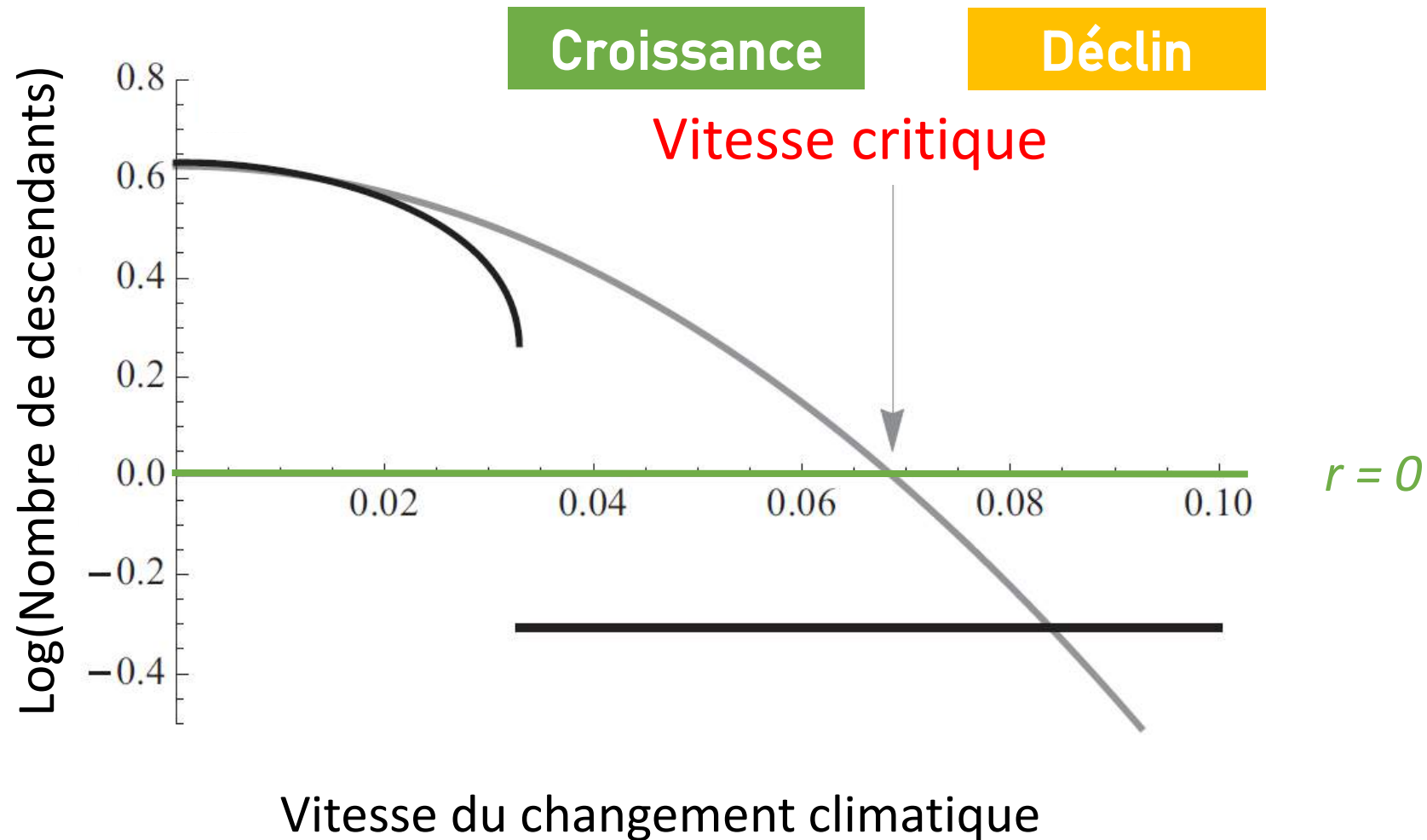
Les dates optimales changent avec l'altitude

Le réchauffement améliore les conditions à haute altitude et relâche la sélection à basse altitude

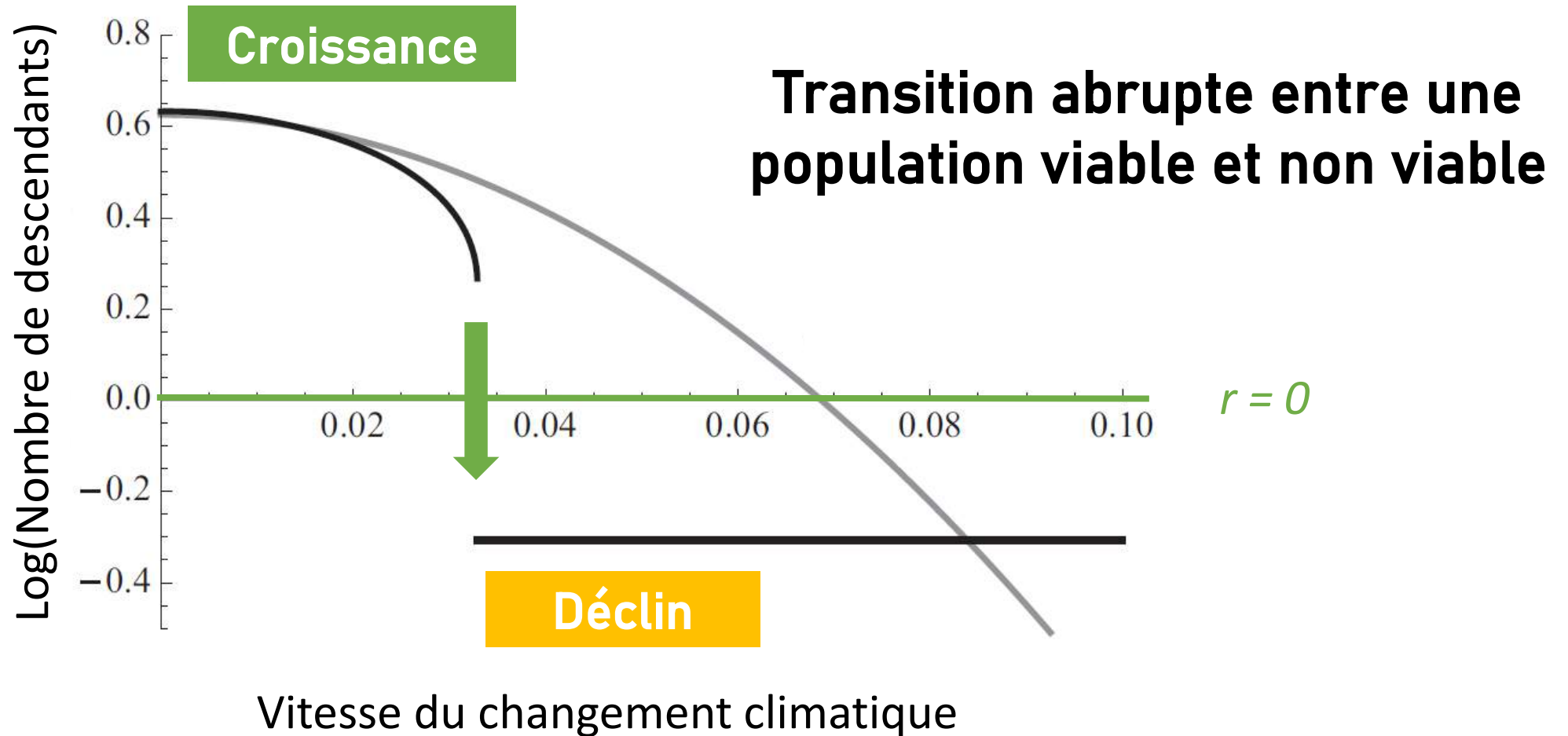
Qu'est-ce que change la forme de la sélection?



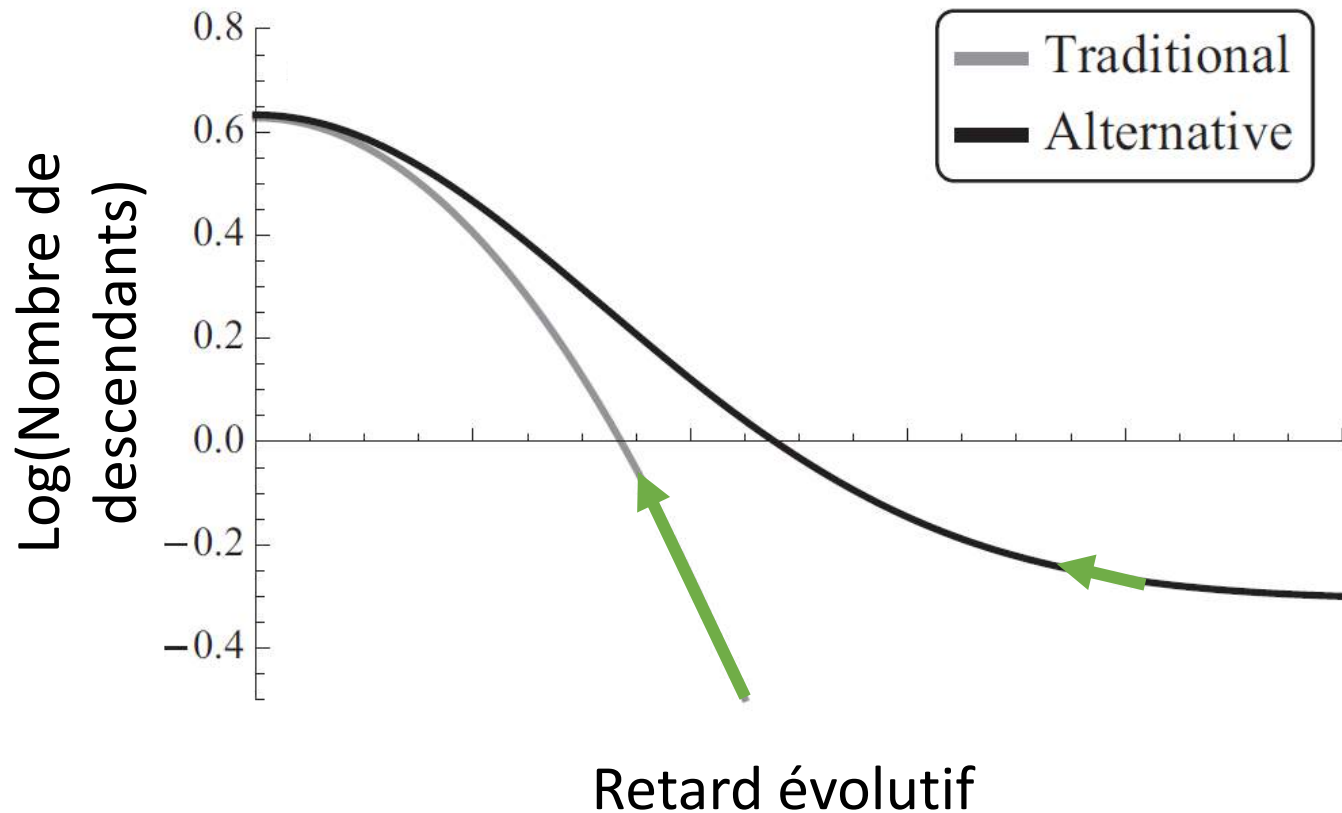
Des points de bascule évolutifs



Des points de bascule évolutifs



Qu'est-ce que change la forme de la sélection?



La force de rappel de la sélection diminue quand le retard est trop grand

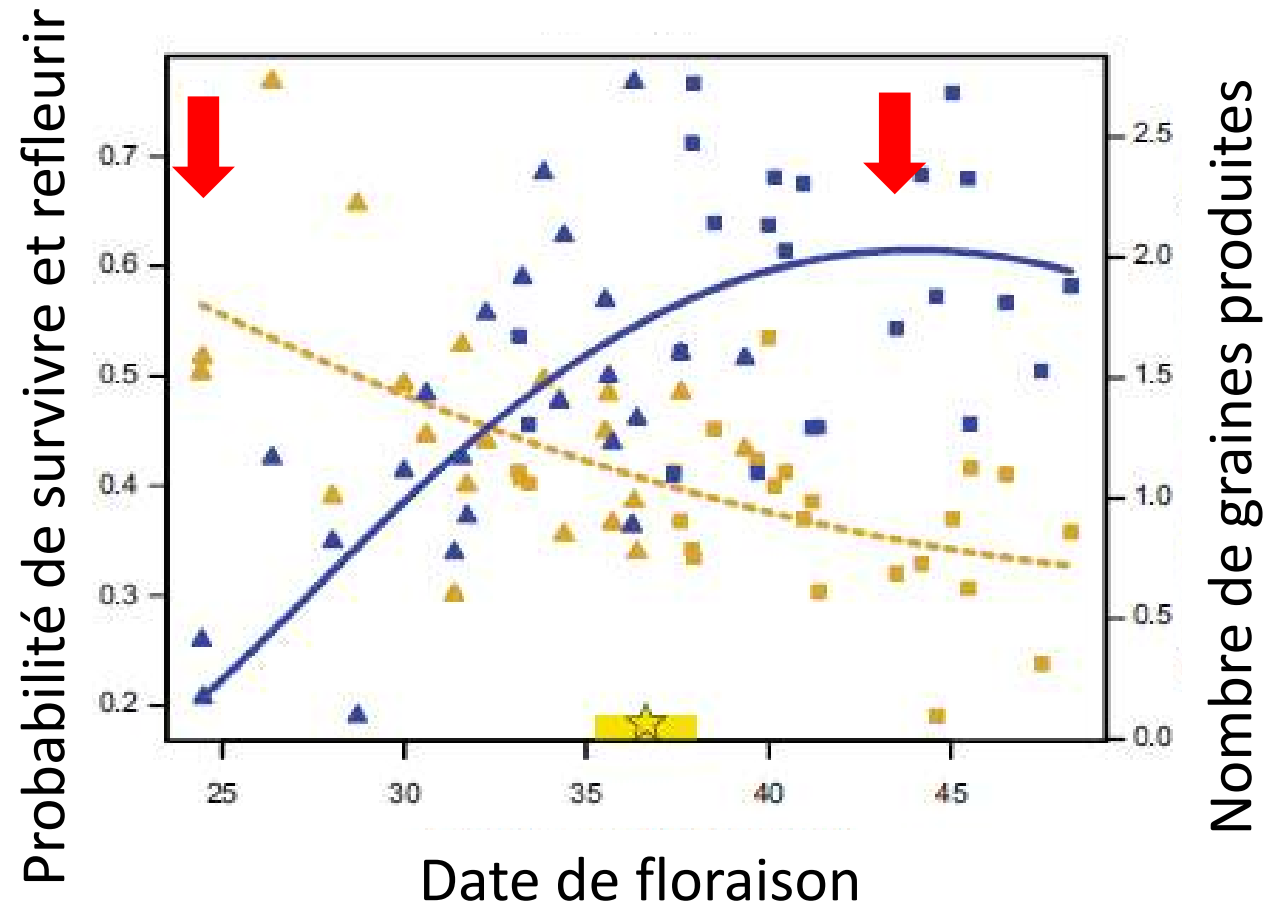
Osmond & Klausmeier 2017

La sélection liée au climat est complexe



La date qui maximise la survie et la fécondité n'est pas la même

Quelles conséquences pour l'adaptation au changement climatique?



Wagdymer *et al.* 2017



**Olivier
Cotto**



Linnea Sandell

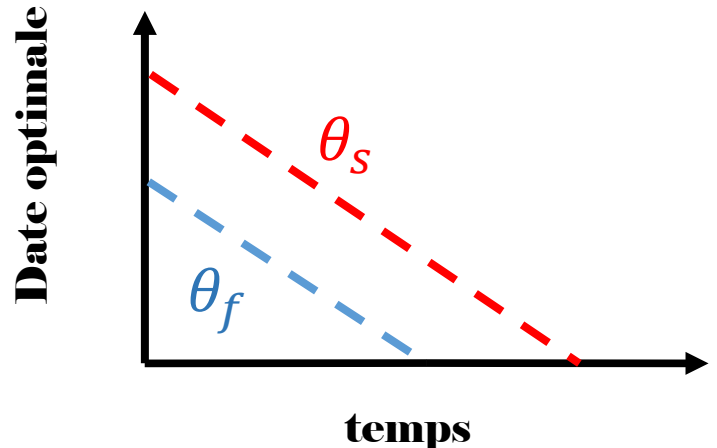
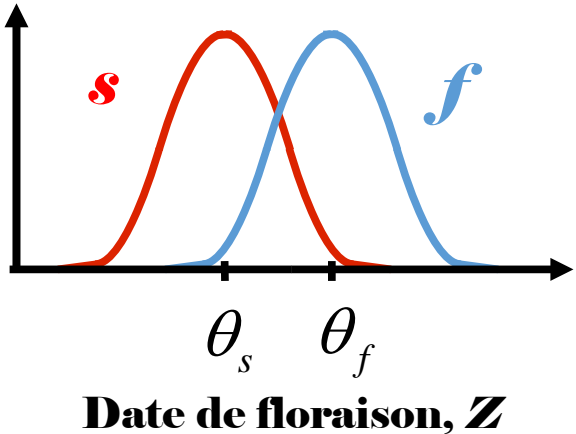
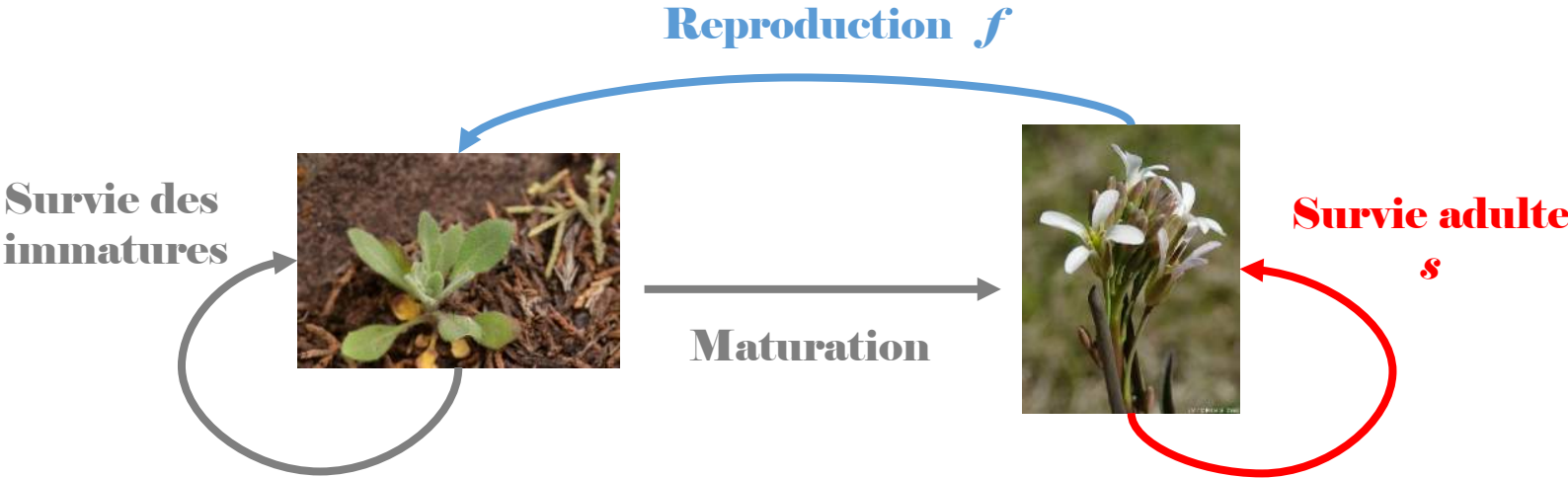


Luis-Miguel Chevin

Cotto *et al.* 2019

**Am. Nat. special feature
on maladaptation**

Un modèle avec deux stades de vie



Le compromis optimal qui maximise la croissance de la population

Cotto *et al.* 2019

$$\frac{e_f \theta_f + e_s \theta_s}{e_f + e_s} = \tilde{\theta}$$

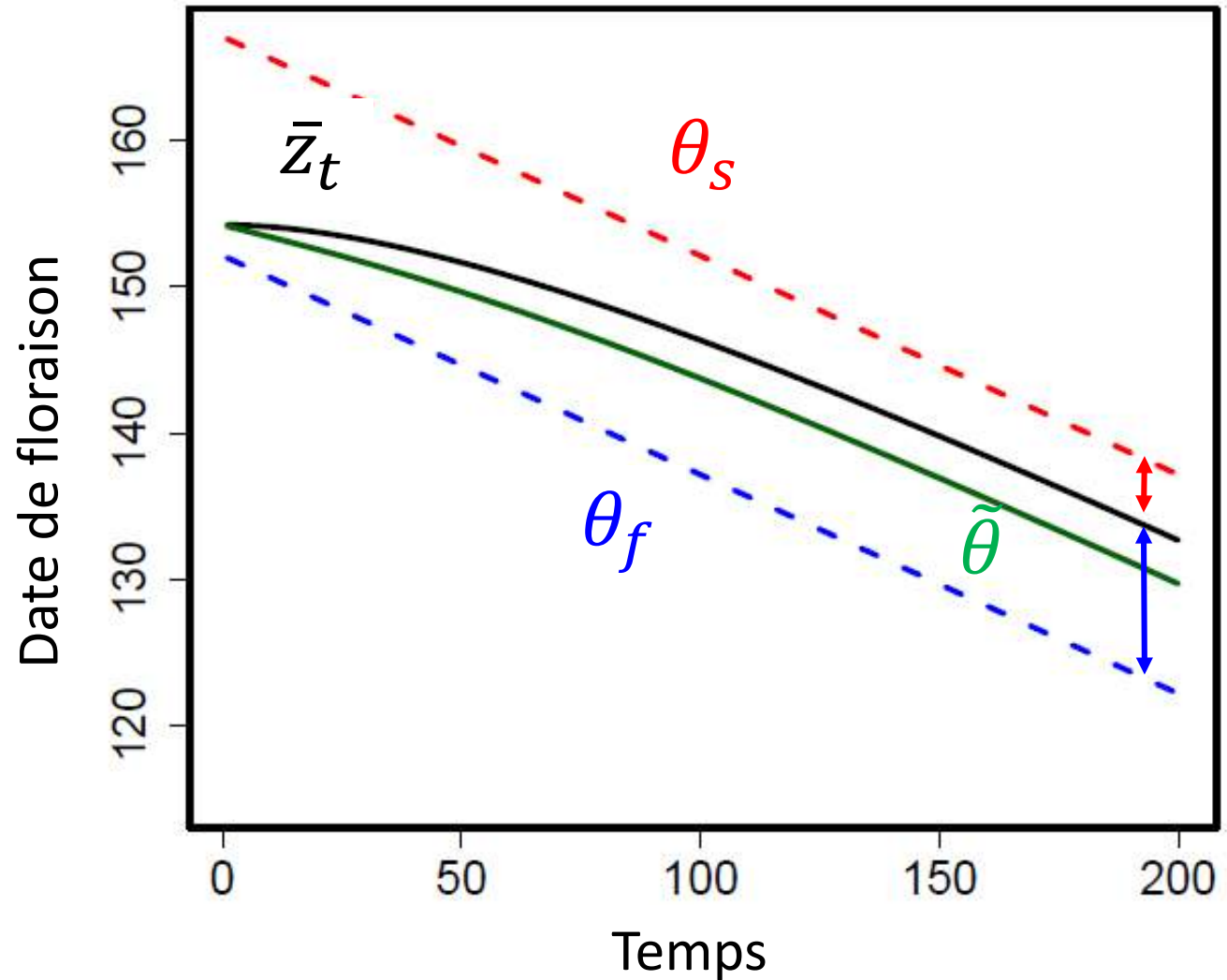
Elasticité du taux de croissance de la population vis à vis d'un changement de fécondité

Elasticité du taux de croissance de la population vis à vis d'un changement de survie adulte

$$e_s = \frac{\partial r}{\partial \ln(s)}$$

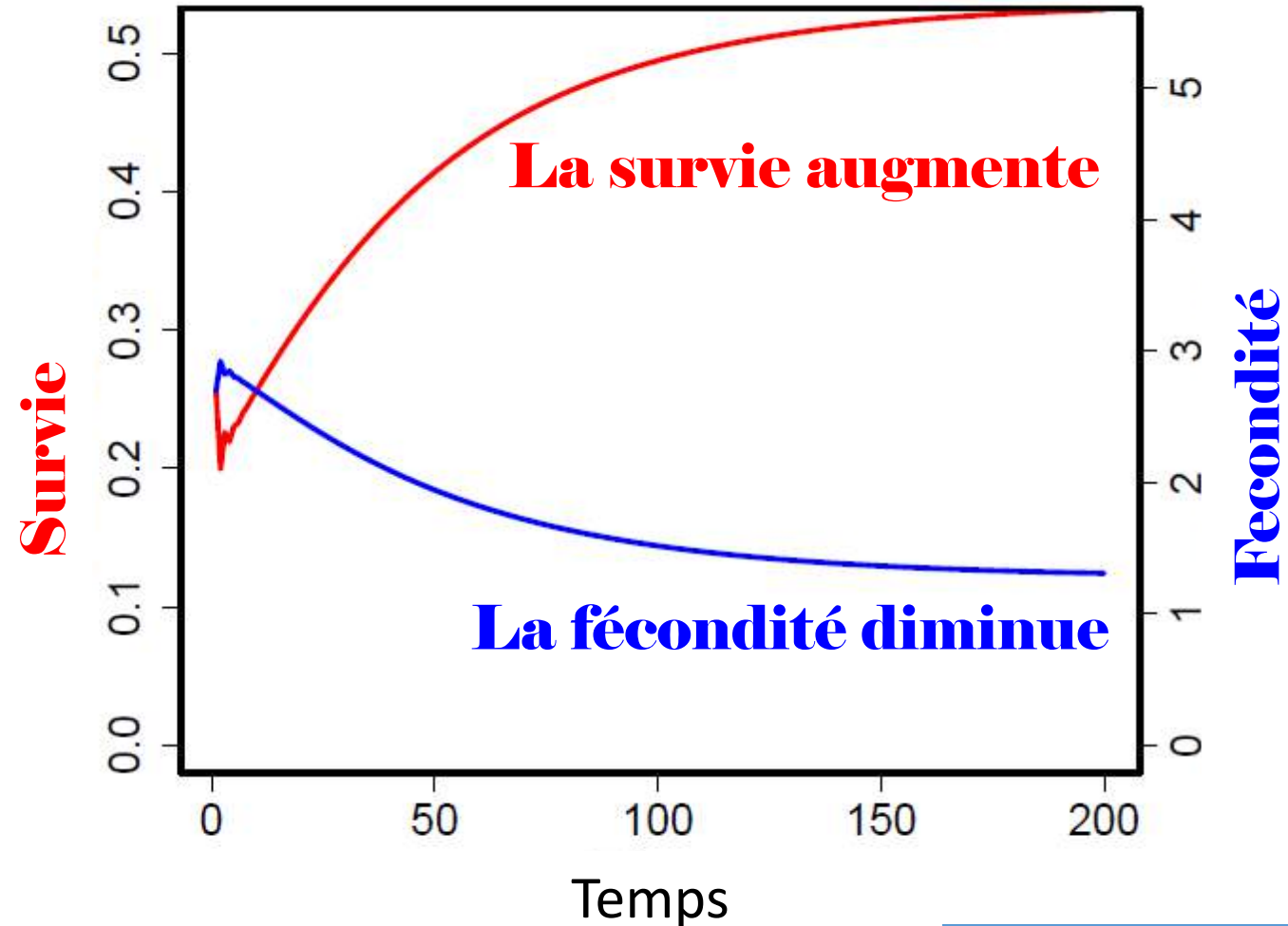
La date de floraison traque la date optimale avec un retard

Cotto *et al.* 2019



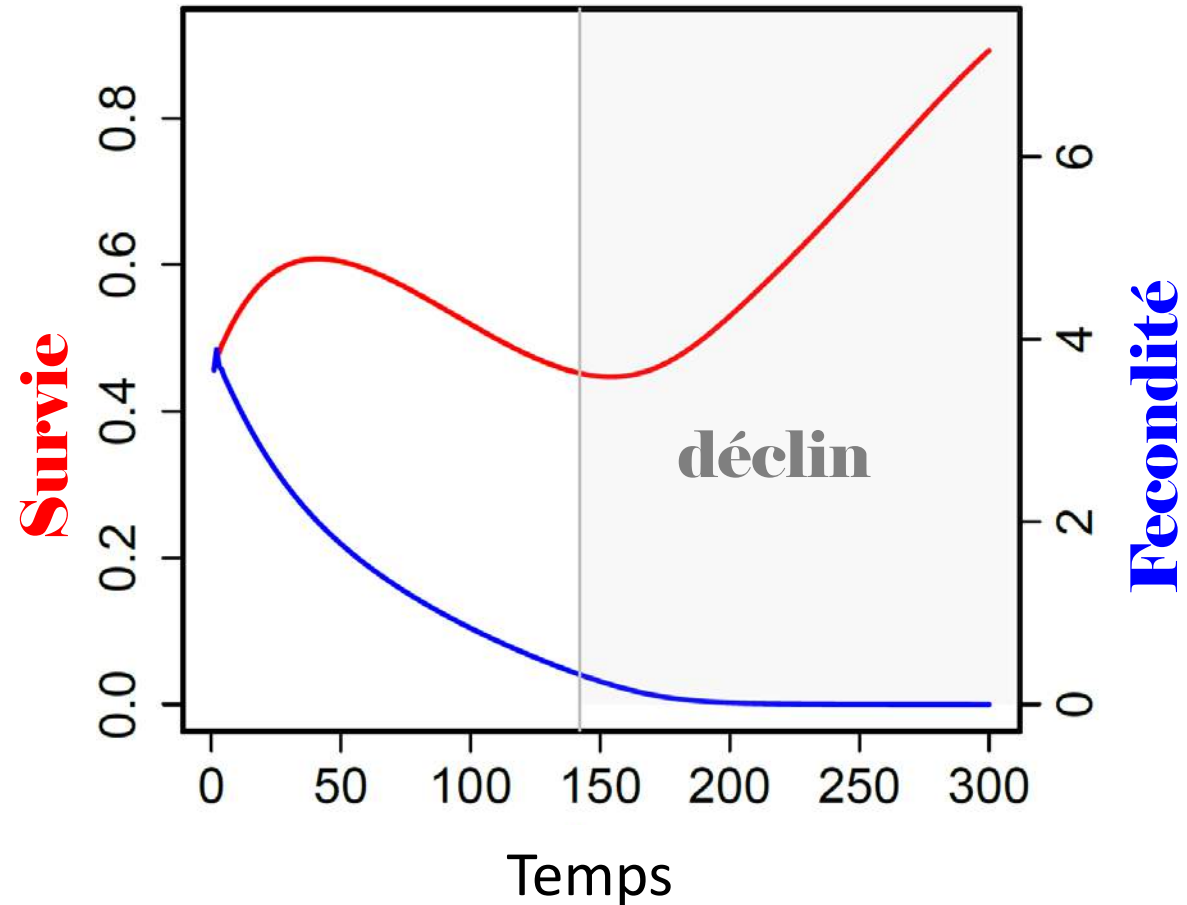
Le retard adaptatif modifie le cycle de vie

Ces changements pourraient être confondus avec une adaptation au changement climatique!

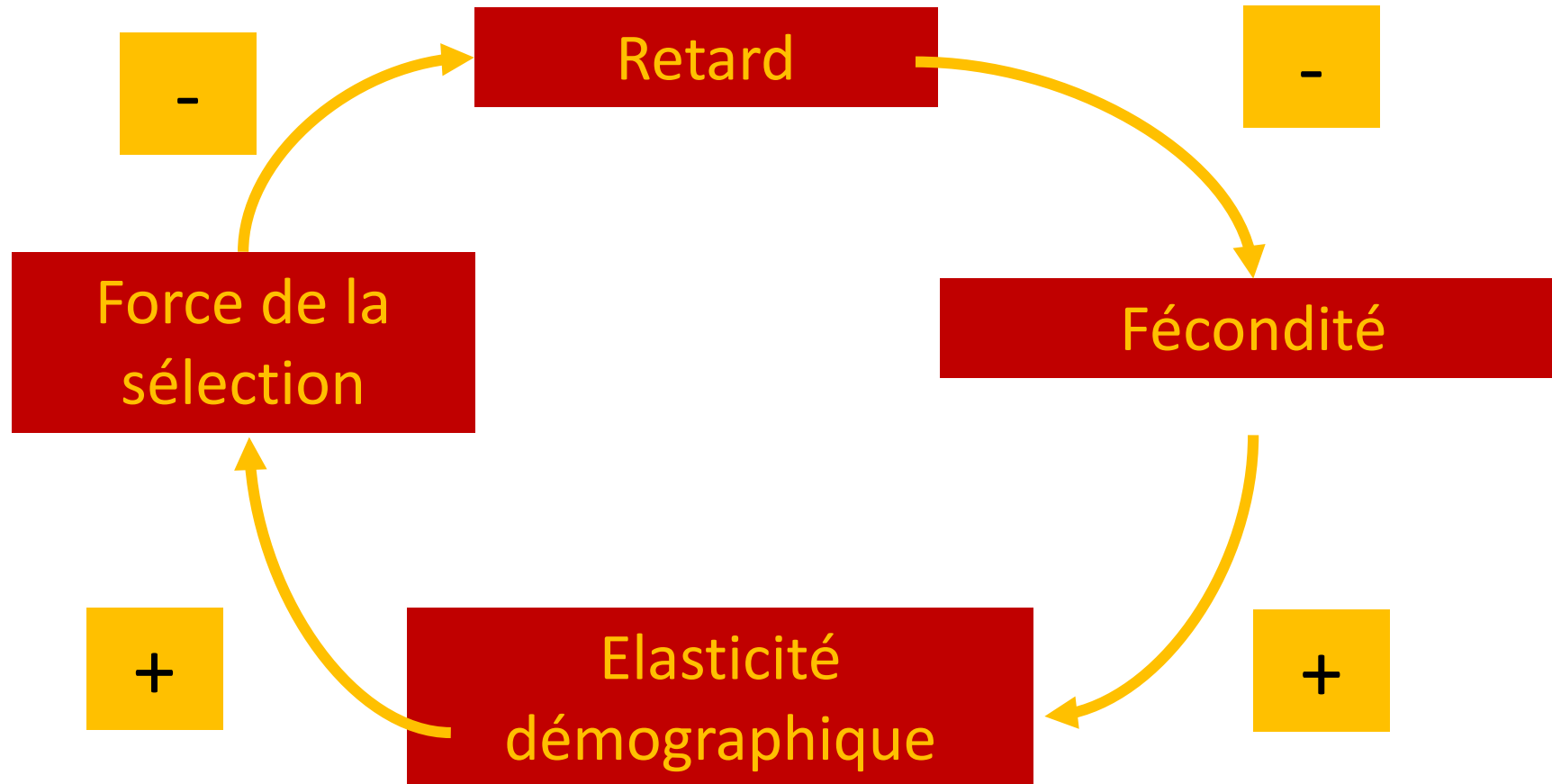


Un piège évolutif

La population évolue des dates de floraison qui confèrent une forte survie, mais une fécondité insuffisante pour persister



Ces pièges évolutifs résultent d'une boucle de rétroaction entre l'évolution et la démographie de la population

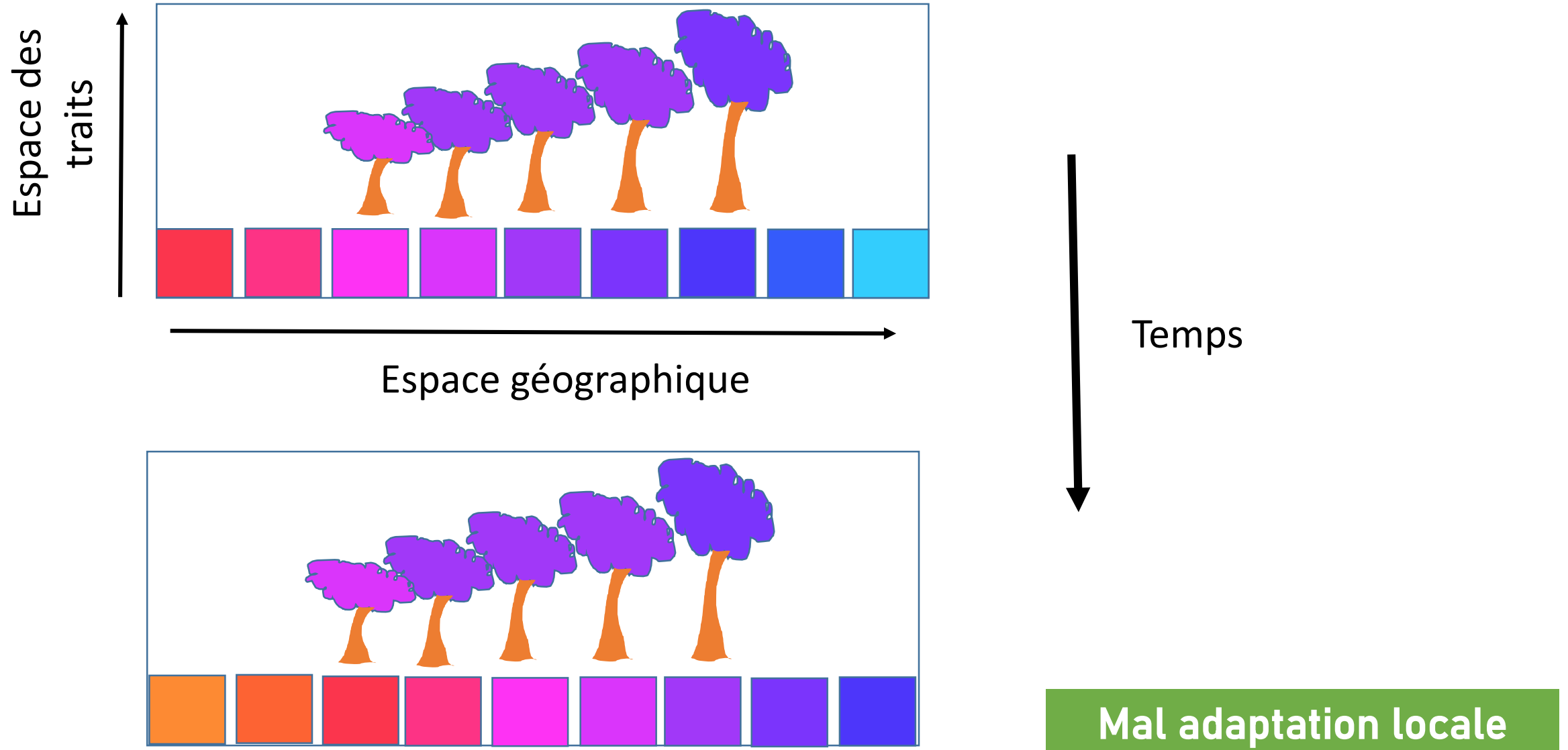


Les adaptations au climat ont fréquemment des effets antagonistes sur différents éléments du cycle de vie

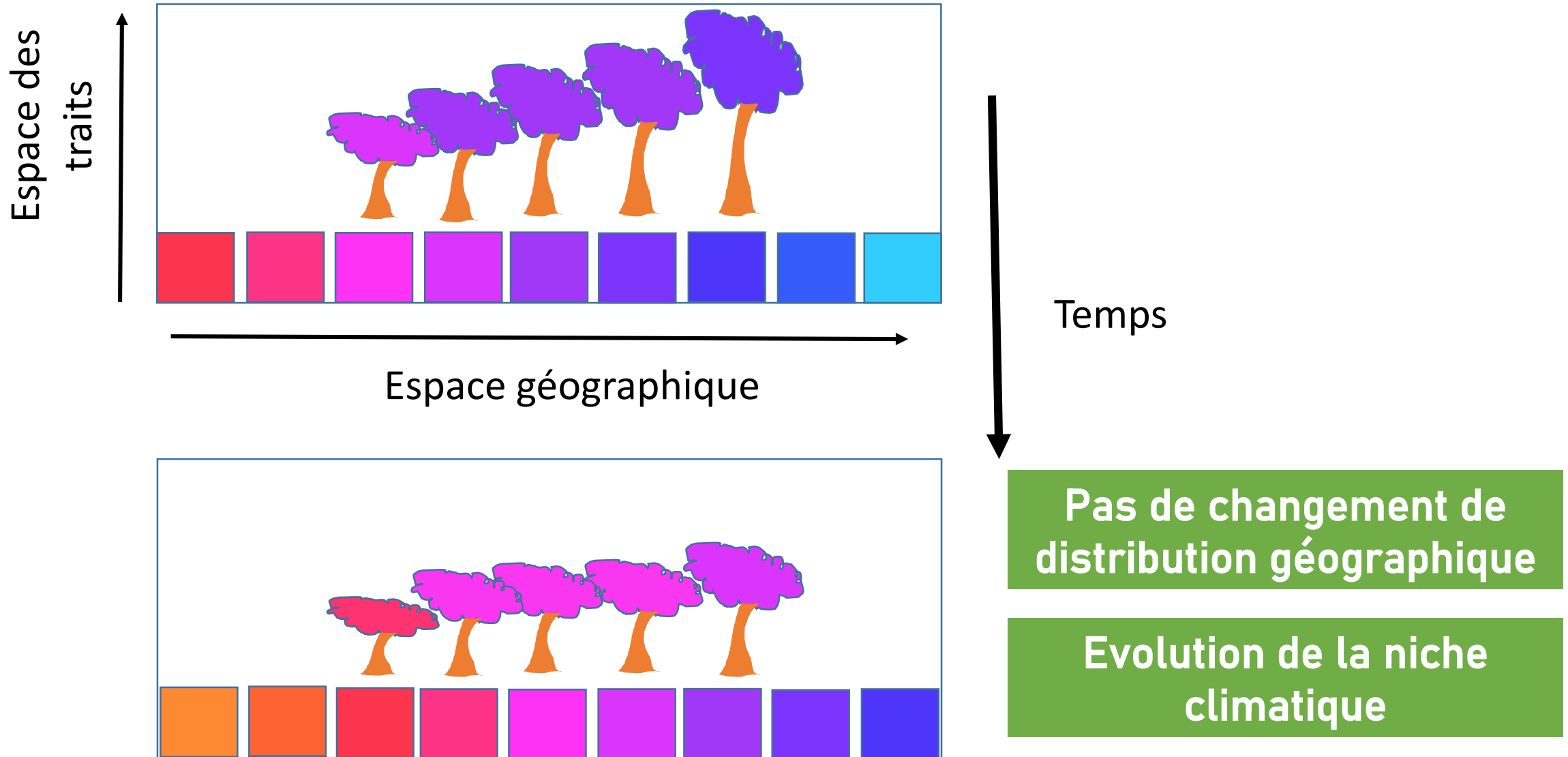
Le retard adaptatif cause des modifications mal adaptatives du cycle de vie

Des boucles de rétroaction entre adaptation au climat et cycle de vie sont la cause de dynamiques complexes et difficilement prédictibles

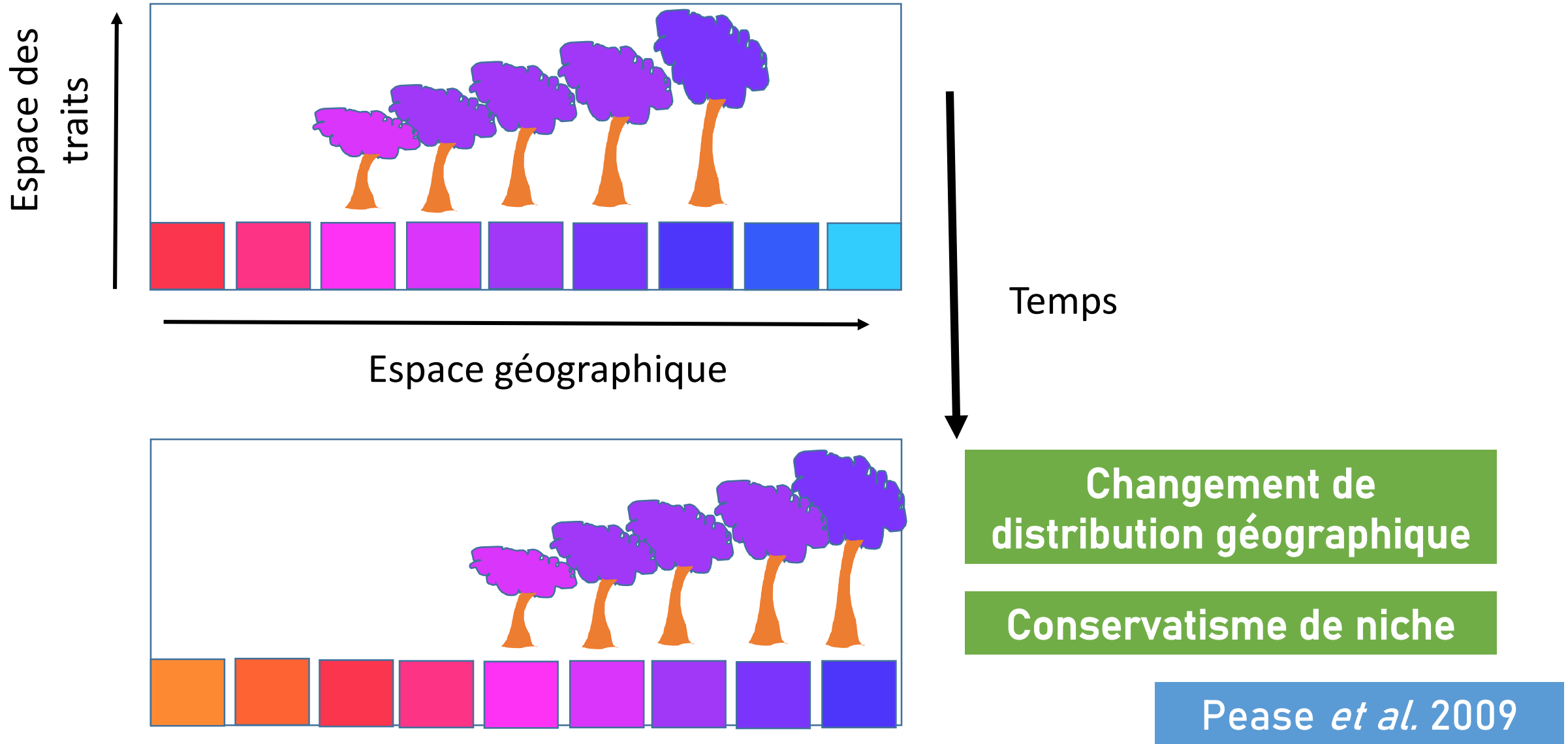
Le climat change dans le temps et l'espace



Le climat change dans le temps et l'espace



Le climat change dans le temps et l'espace



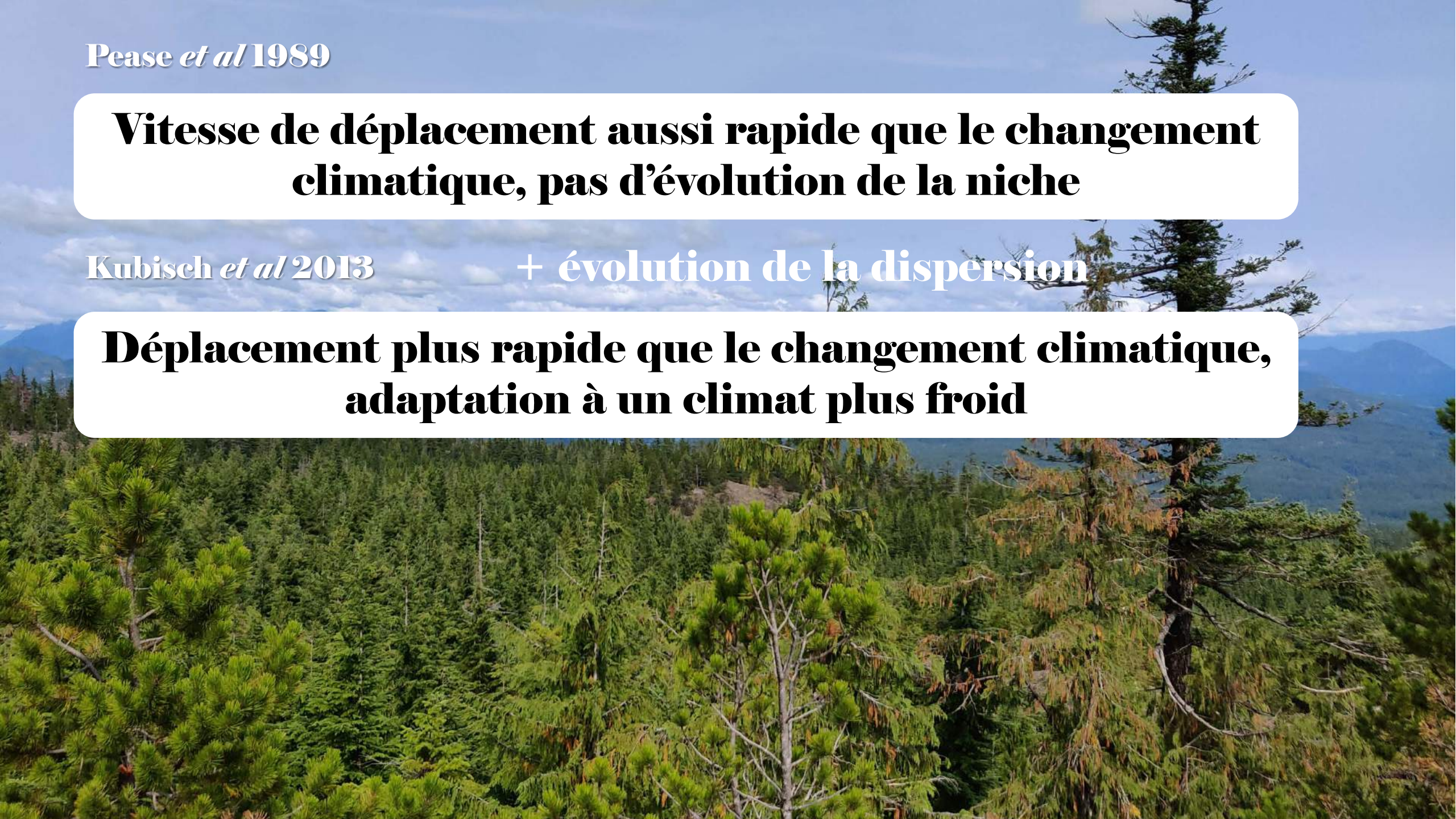
Pease et al 1989

Vitesse de déplacement aussi rapide que le changement climatique, pas d'évolution de la niche

Kubisch et al 2013

+ évolution de la dispersion

Déplacement plus rapide que le changement climatique, adaptation à un climat plus froid





**Distance maximale de dispersion des
graines de l'ordre de 10 km**

**Distance maximale de dispersion du
pollen de l'ordre de 1000 km**

Kremer et al 2013

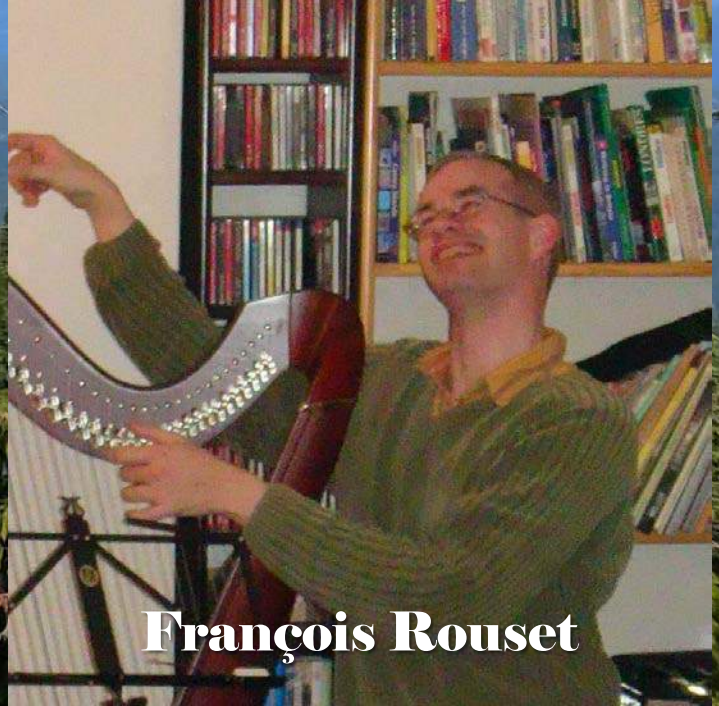
➔ **Comment est-ce que la dispersion du pollen affecte l'évolution
conjointe de la niche et de la distribution dans un climat
changeant?**



Robin Aguilée



Gaël Raoul



François Rousset

Pease et al 1989

Vitesse de déplacement aussi rapide que le changement climatique, pas d'évolution de la niche

Kubisch et al 2013

+ évolution de la dispersion

Déplacement plus rapide que le changement climatique, adaptation à un climat plus froid

Aguilée et al 2016

+ dispersion du pollen

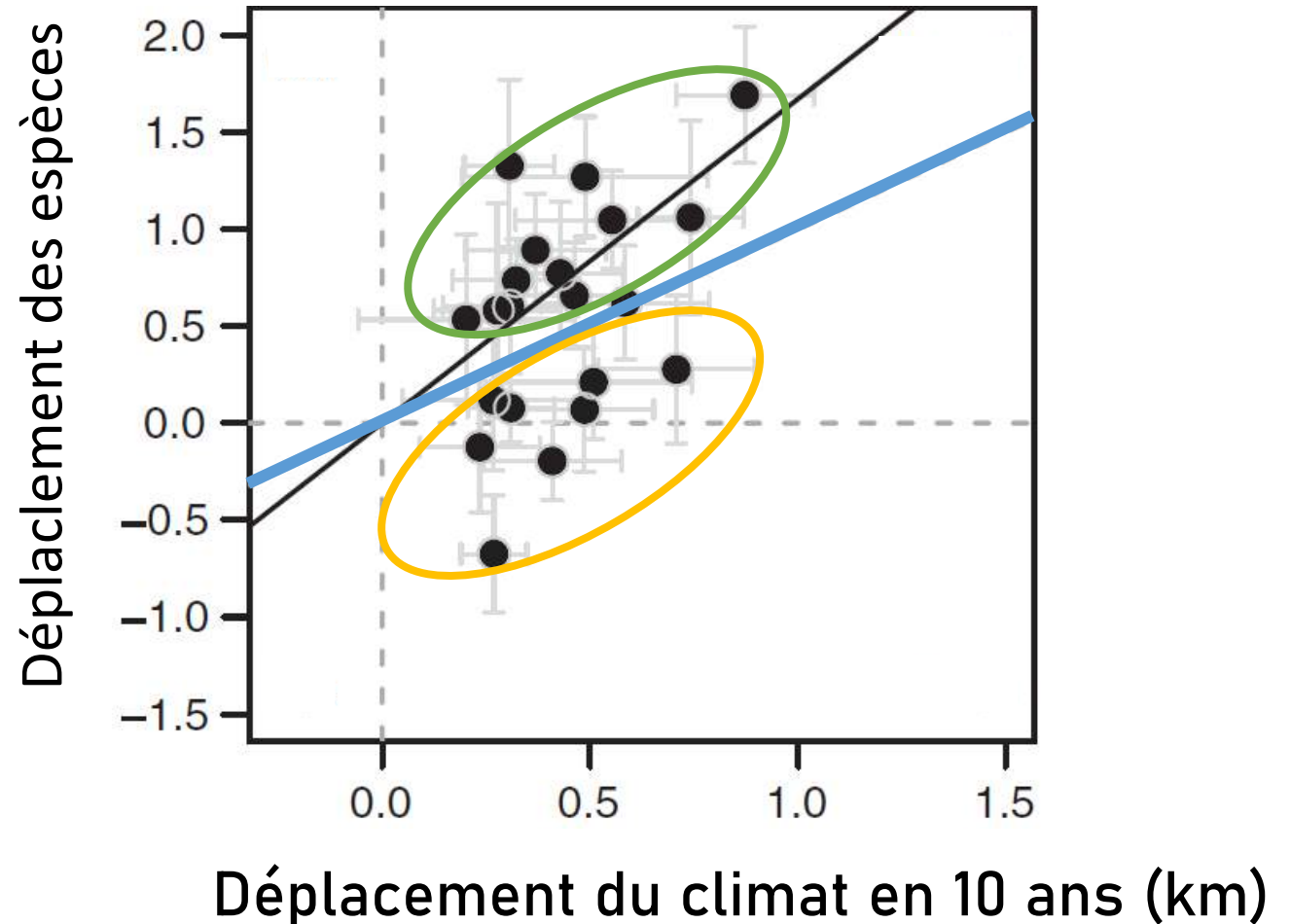
Déplacement moins rapide que le changement climatique, adaptation à un climat plus chaud

Ces modèles éclairent l'hétérogénéité des déplacements de la distribution des espèces contemporains et du passé

Certaines espèces se déplacent plus vite que le climat

Certaines espèces se déplacent moins vite que le climat

Ordonez *et al.* 2013



Le changement climatique cause déjà des changements phénotypiques, génétiques et dans la distribution géographique des espèces

Mais ces adaptations ne sont pas nécessairement suffisantes pour empêcher les extinctions

L'adaptation dans le contexte du changement climatique est une course entre déclin et évolution

Prédire le destin des espèces implique de quantifier les dynamiques évolutives et démographiques

Les modèles éco-évolutifs nous aident à mieux comprendre la complexité de ces dynamiques et les fortes incertitudes liées au rôle de l'évolution dans les réponses de la biodiversité aux changements globaux.