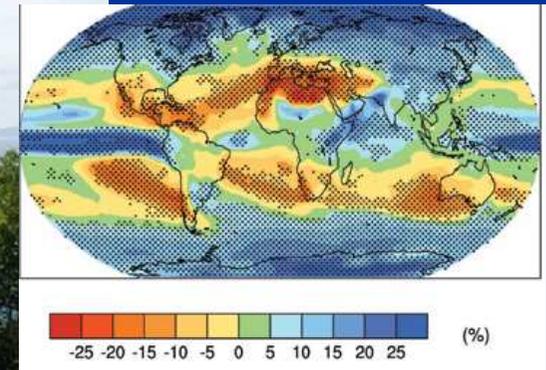
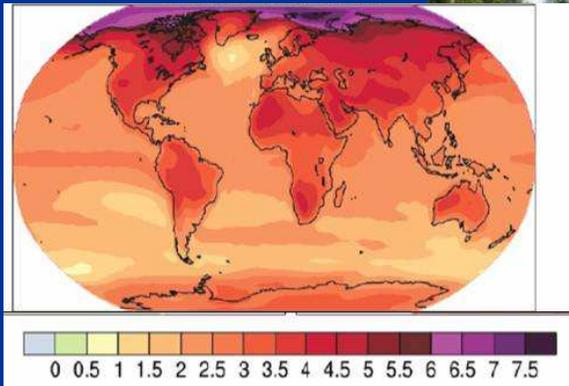


Les flux de gènes entre provenances et espèces : état des lieux et perspectives

Bruno Fady

INRA – URFM, Ecologie des Forêts Méditerranéennes, Avignon

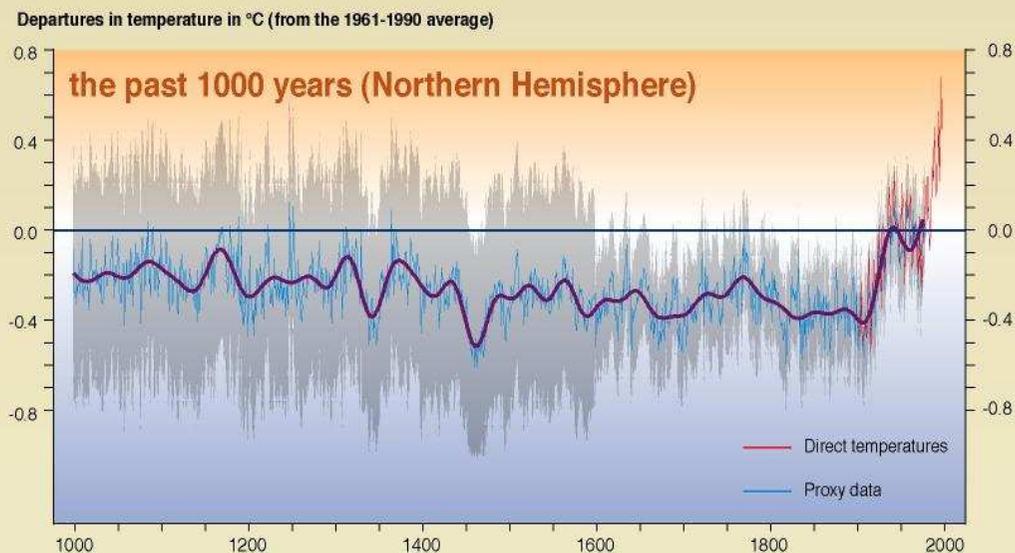
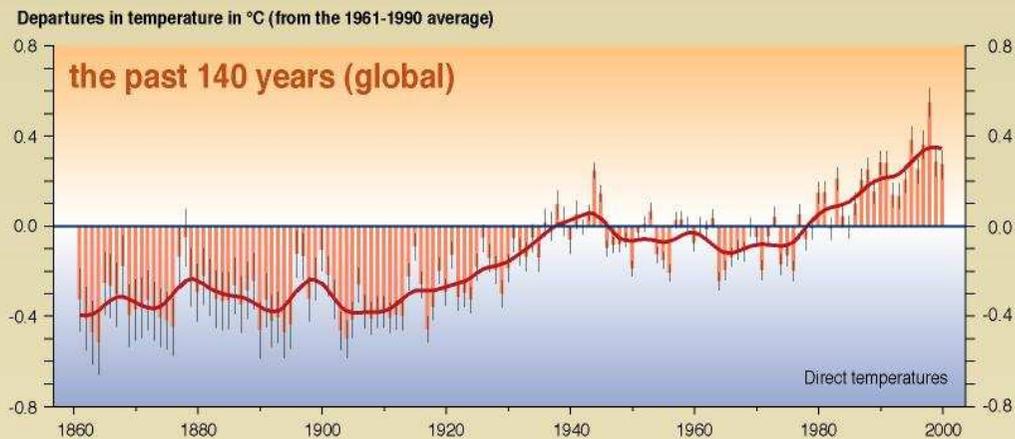


*Atelier du réseau AFORCE « La génétique, un élément clé pour l'adaptation des forêts au changement climatique »
Jeudi 12 mai 2011, FCBA (Paris)*



Le changement climatique global est une réalité, ici et maintenant.

Variations of the Earth's surface temperature for...



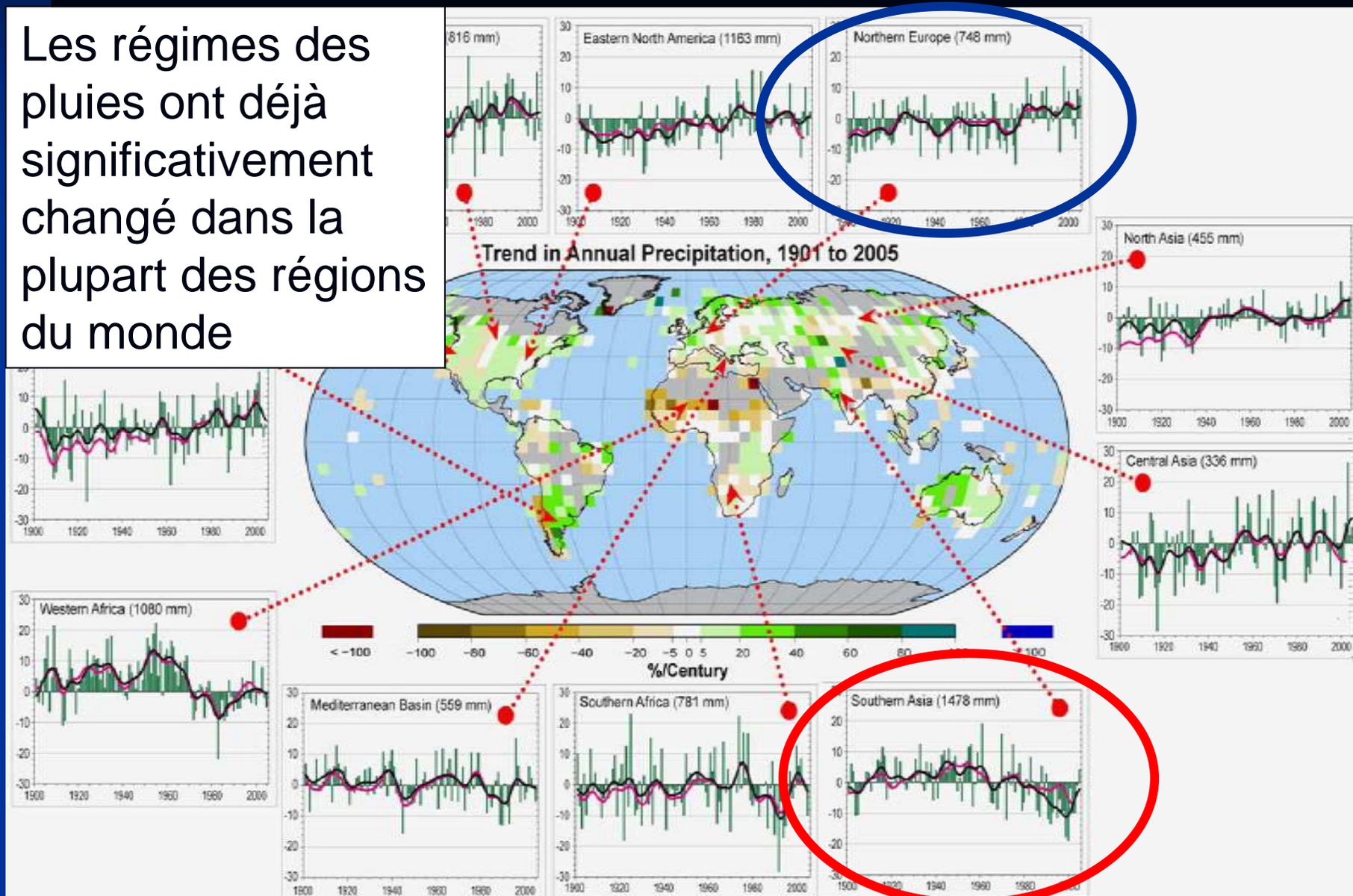
- Accroissement des températures moyennes annuelles de 0,4°C comparé à la moyenne 1961-1990.
- Un phénomène qui a débuté il y a 140 ans avec la révolution industrielle

Tous les graphiques climatiques sont issus du rapport 2007 de l'IPCC :
<http://www.ipcc.ch/graphics>



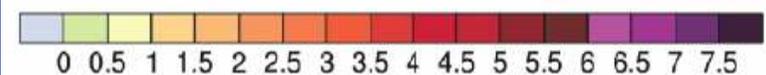
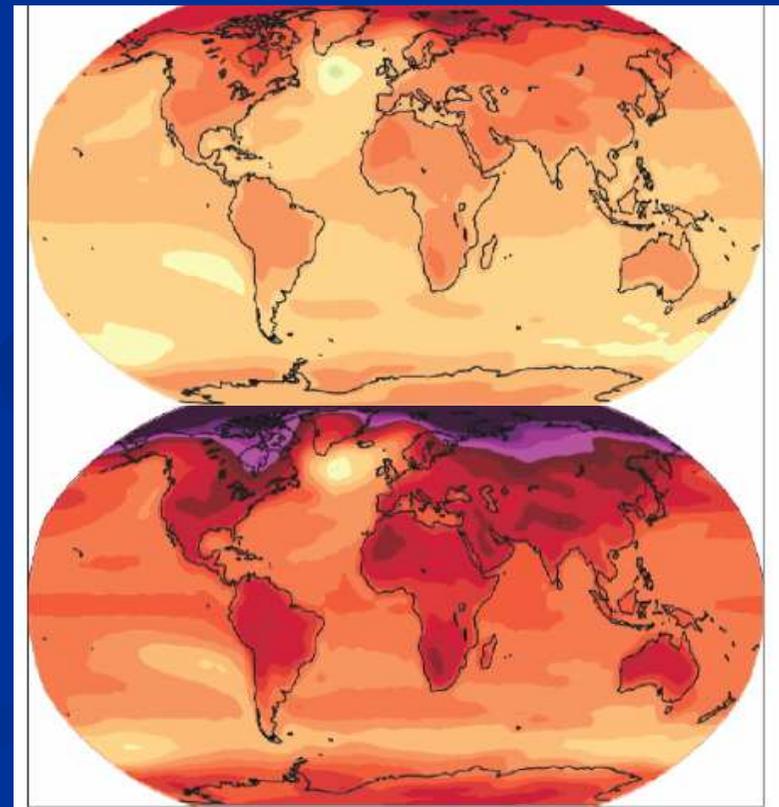
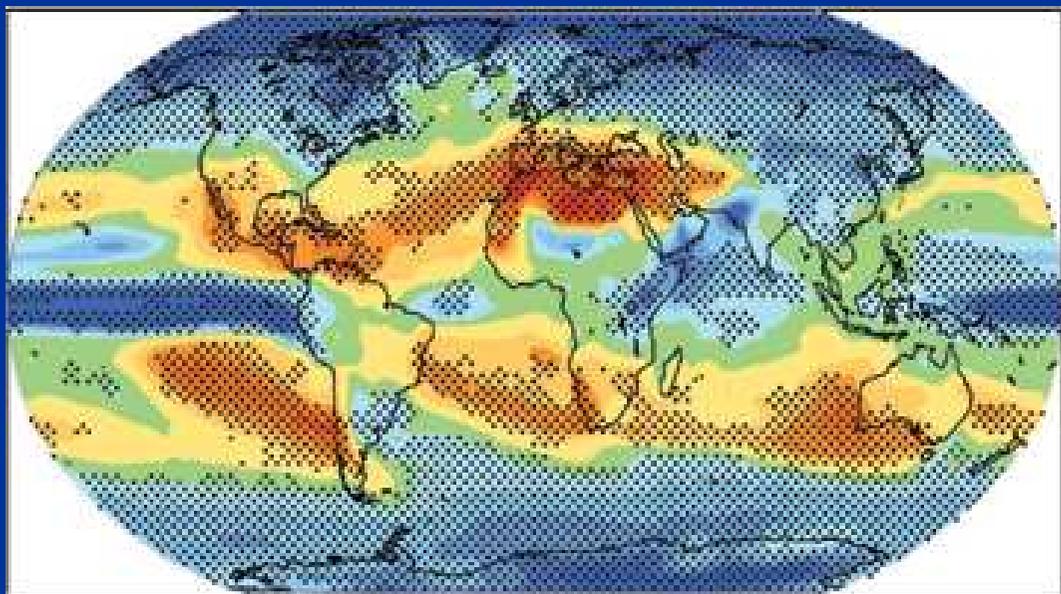
Le changement climatique global est une réalité, ici et maintenant.

Les régimes des pluies ont déjà significativement changé dans la plupart des régions du monde



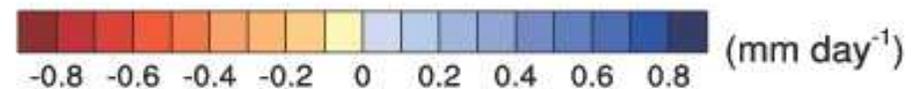
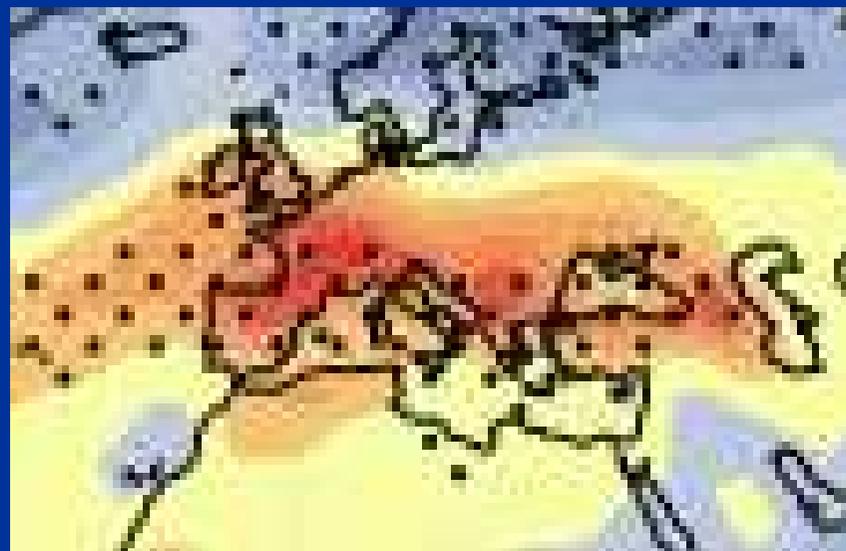
Le changement climatique prévu en 2080

Des effets significatifs sur la température et la pluviométrie



***Le scénario européen (A1B, JJA 2080-2099) =
méditerranéïsation / désertification !***

**= augmentation de la sécheresse estivale (+3
à 5°C; -0,1 à -0,4 mm / jour)**

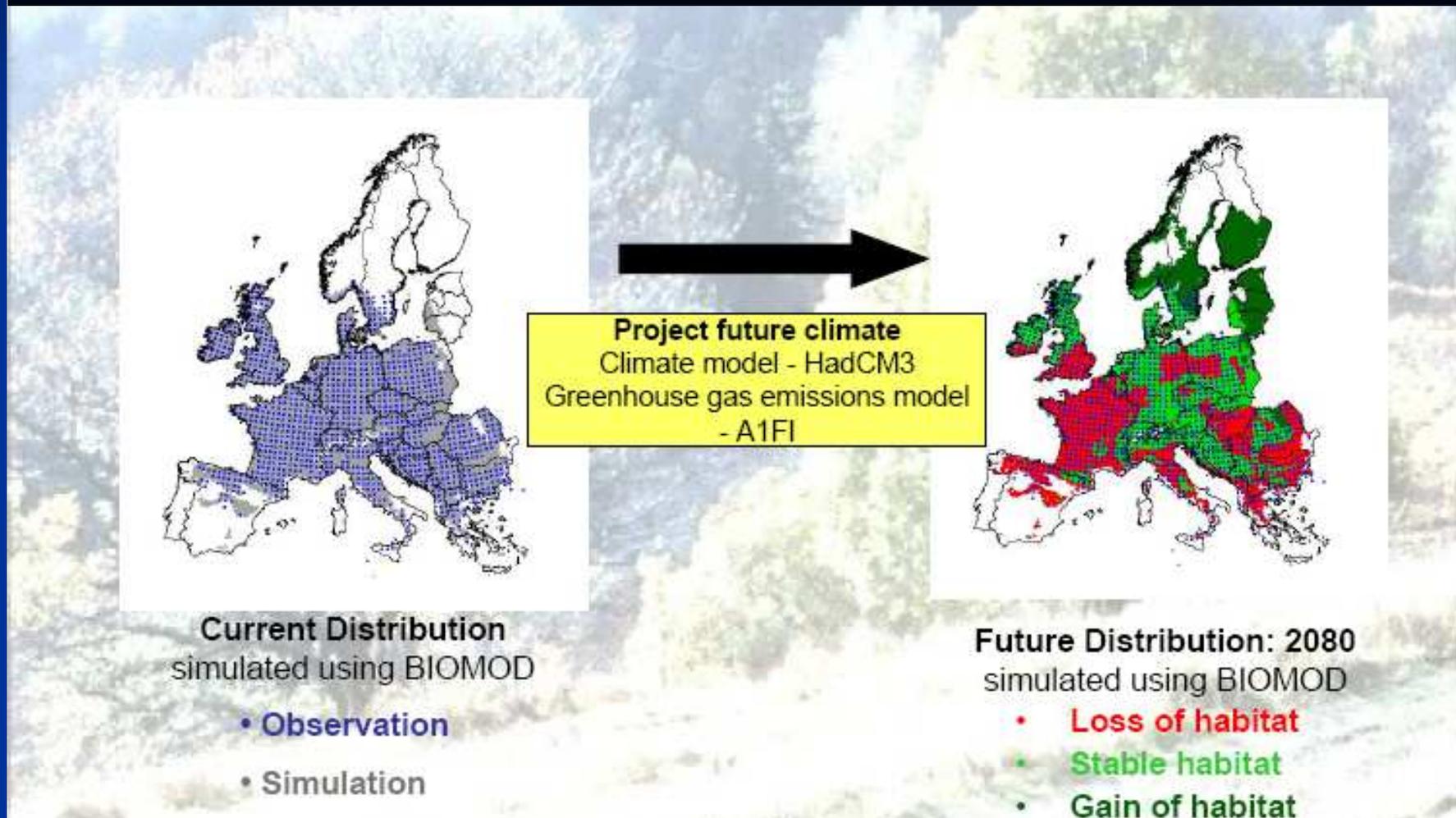


Les changements climatiques et les arbres forestiers

=> Des changements significatifs dans les régimes de pluies et de températures, partout dans le monde.

=> Des conséquences significatives pour la survie et la répartition des arbres et des écosystèmes forestiers, à des degrés divers, partout dans le monde.

Les changements climatiques vus sans processus génétiques : le cas du chêne sessile



Thuiller GCB 2003, Thuiller et al. PNAS 2005

Trois grandes stratégies pour faire face aux crises écologiques

- **Acclimatation** (plasticité) : les arbres peuvent survivre et continuer à pousser et se reproduire parce qu'ils ont des exigences écologiques flexibles.
- **Migration** ou «fuite» (les graines se dispersent au loin et germent dans des conditions plus favorables ou le pollen s'hybride avec une espèce ou un écotype plus résistant).
- **Adaptation** *sensu stricto* (la génération suivante possède des caractères différents, plus efficaces, après sélection naturelle).

Migration et adaptation impliquent les processus génétiques de flux de gènes, dérive et sélection.



Flux de gènes, sélection et diversité génétique intra- et inter-populations

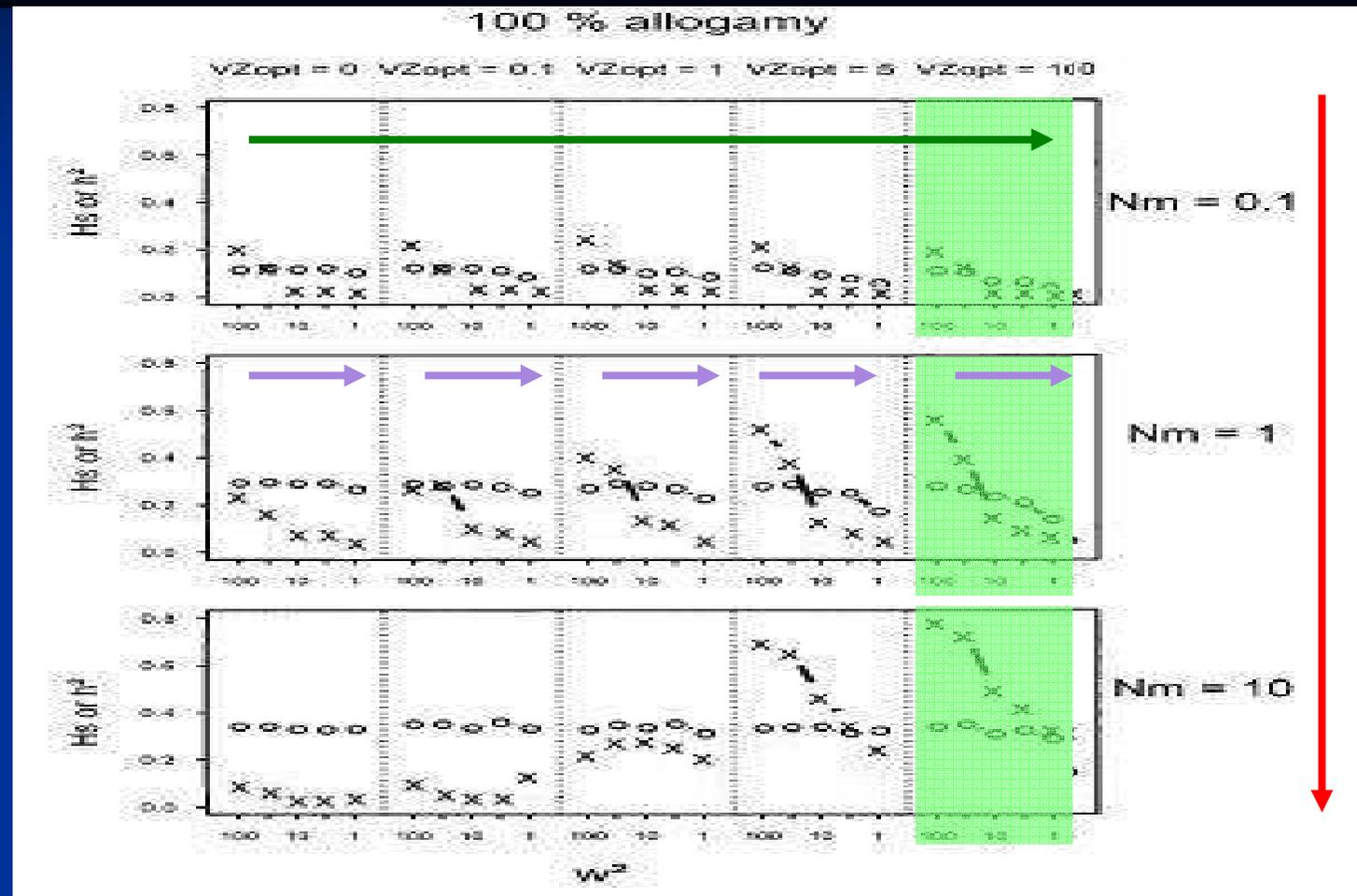
Selon la force de la sélection (dans et entre les populations) et les processus mesurés (neutres ou adaptatifs), les effets des flux de gènes sur la diversité génétique sont variables

Diversité génétique intra-population sous sélection forte

x = gène adaptatif

o = gène neutre

Le Corre & Krémer
(Genetics) 2003



VZopt = sélection diversifiante entre populations (0 = faible) →

W^2 = sélection stabilisante intra-population (100 = faible) →

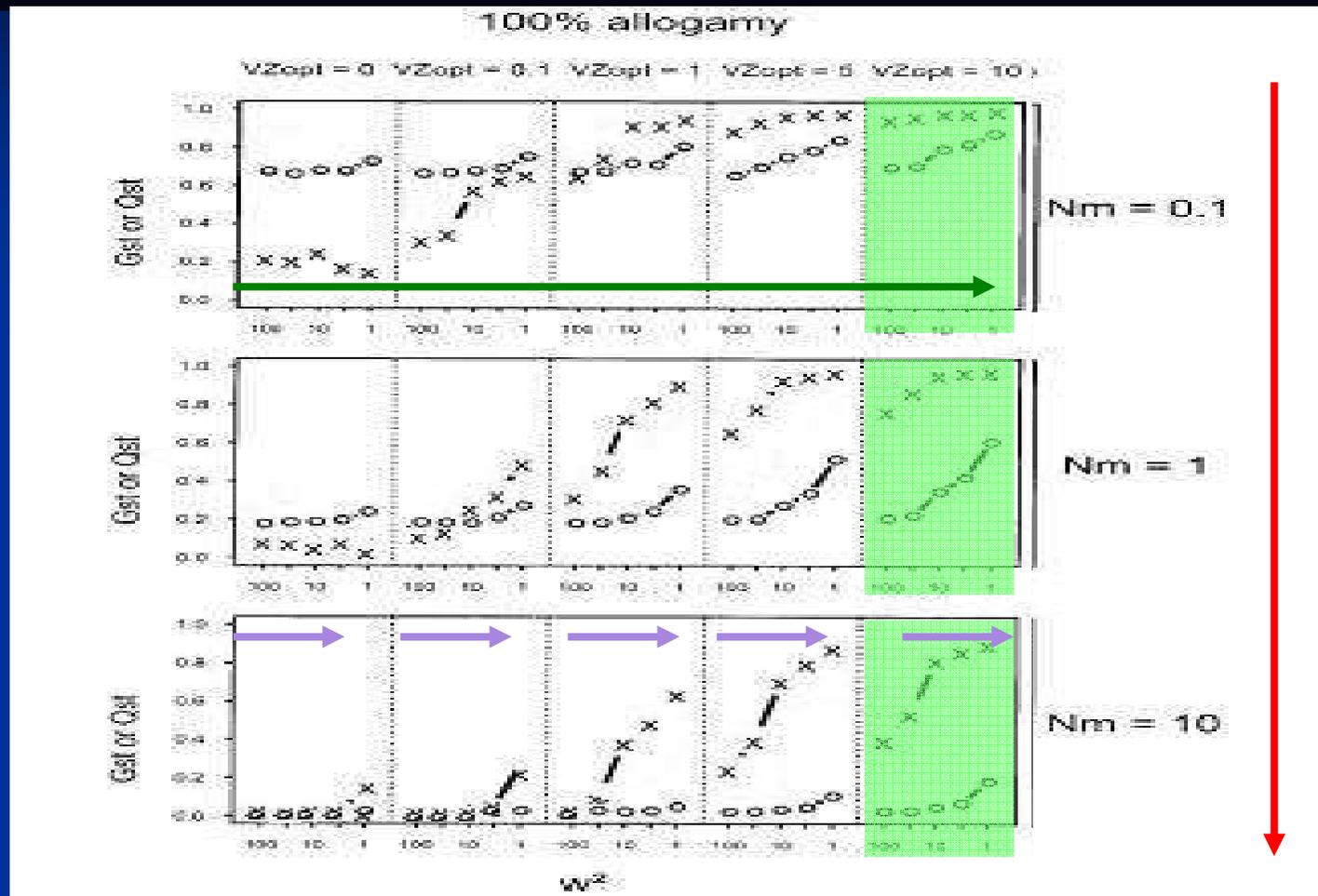
Nm = Nb de migrants par génération (25 pops, 500 indivs / pop) →

Diversité génétique inter-populations sous sélection forte

x = gène adaptatif

o = gène neutre

Le Corre & Krémer
(Genetics) 2003



VZopt = sélection diversifiante entre populations (0 = faible)

W² = sélection stabilisante intra-population (100 = faible)

Nm = Nb de migrants par génération (25 pops, 500 indivs / pop)

Flux de gènes, sélection et diversité génétique intra- et inter-populations

Selon la force de la sélection (dans et entre les populations) et les processus mesurés, les effets des flux de gènes sur la diversité génétique sont variables

Les flux de gènes augmentent la diversité intra-population de manière différentielle pour les gènes neutres et adaptatifs.

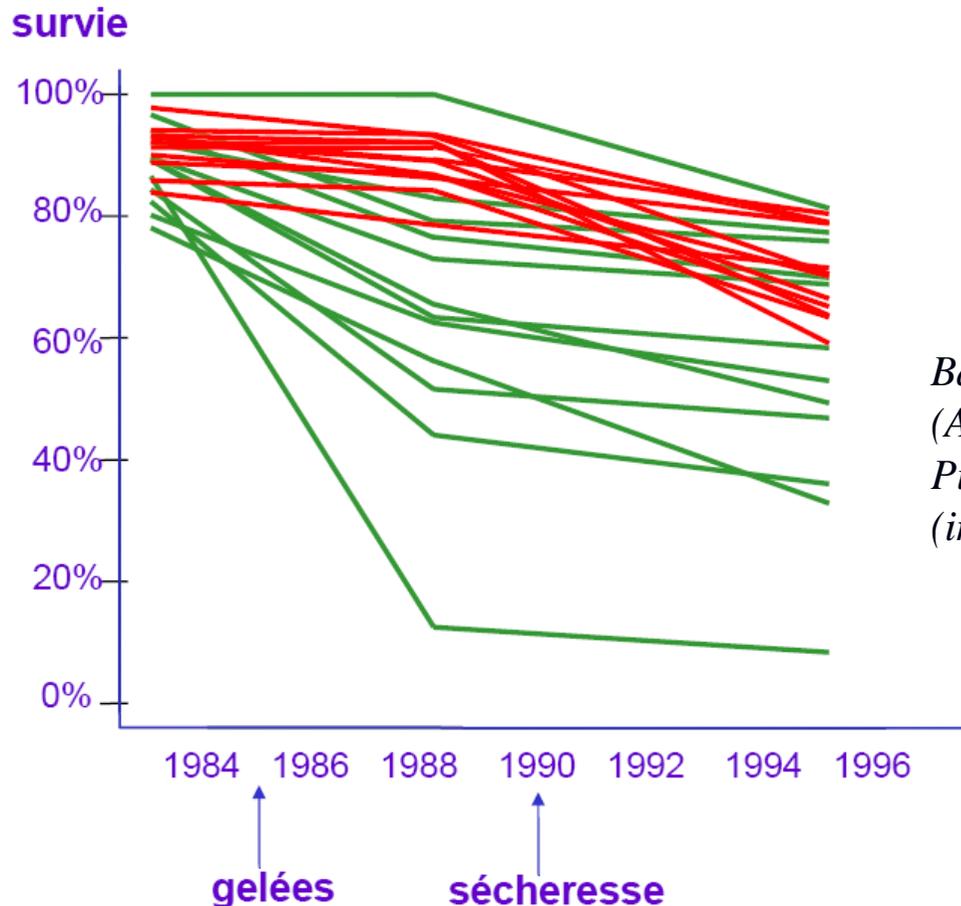
Les flux de gènes forts diminuent surtout la différenciation neutre et moins la différenciation adaptative.

***Flux de gènes et adaptation : diversité
génétique entre provenances et populations***

Quelques exemples et leur intérêt pour la
gestion forestière

Grande diversité génétique naturelle chez les arbres forestiers => adaptation possible !

Provenances de *Pinus halepensis* et *Pinus brutia*:
survie en plantation après deux événements climatiques majeurs



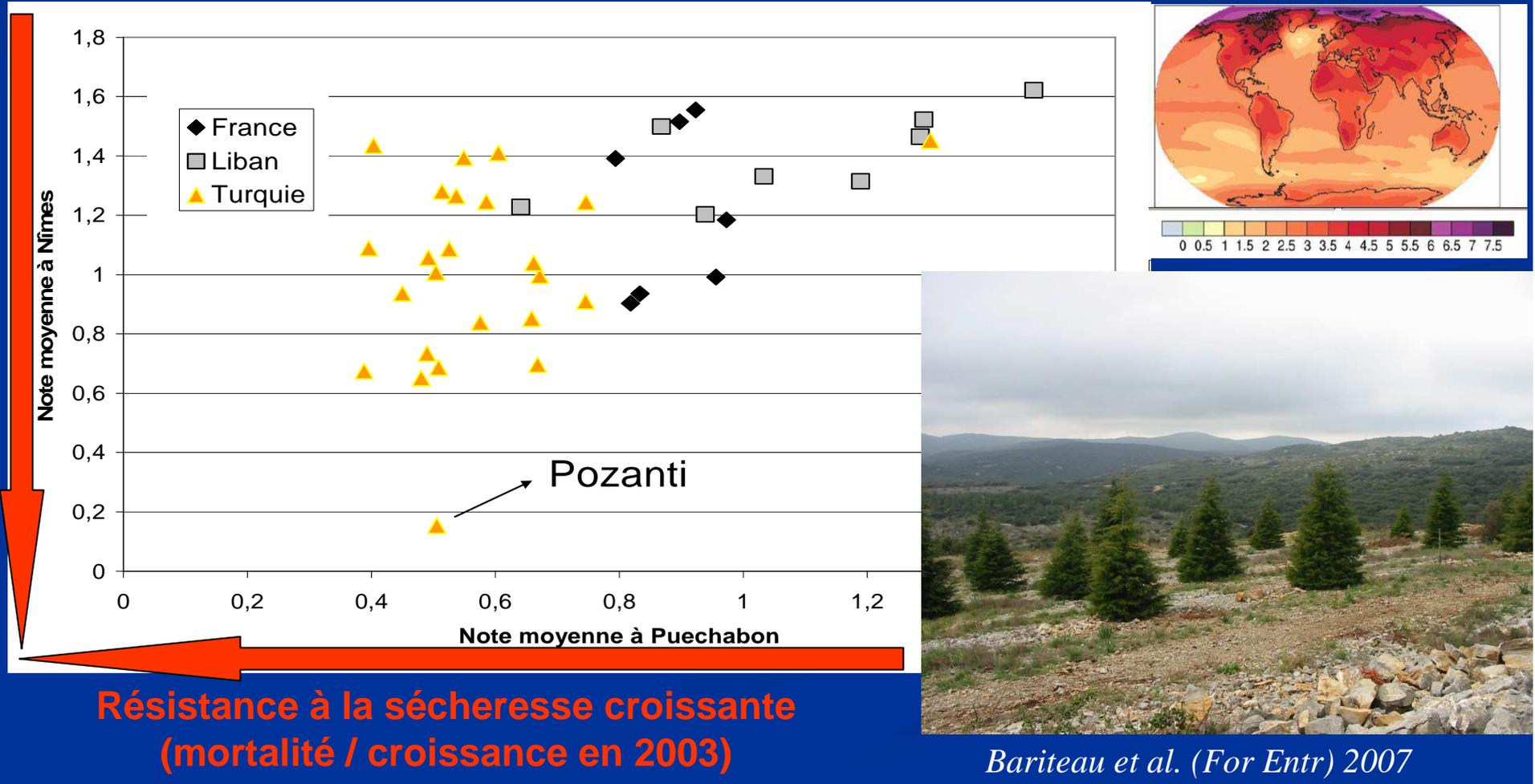
*Bariteau 1992
(AFS),
Pichot et al.
(in prep)*

Diversité
génétique inter-
populations : le
résultat de la
dérive et de
l'adaptation

**Le forestier peut
utiliser cette
diversité
naturelle : la
migration
assistée**

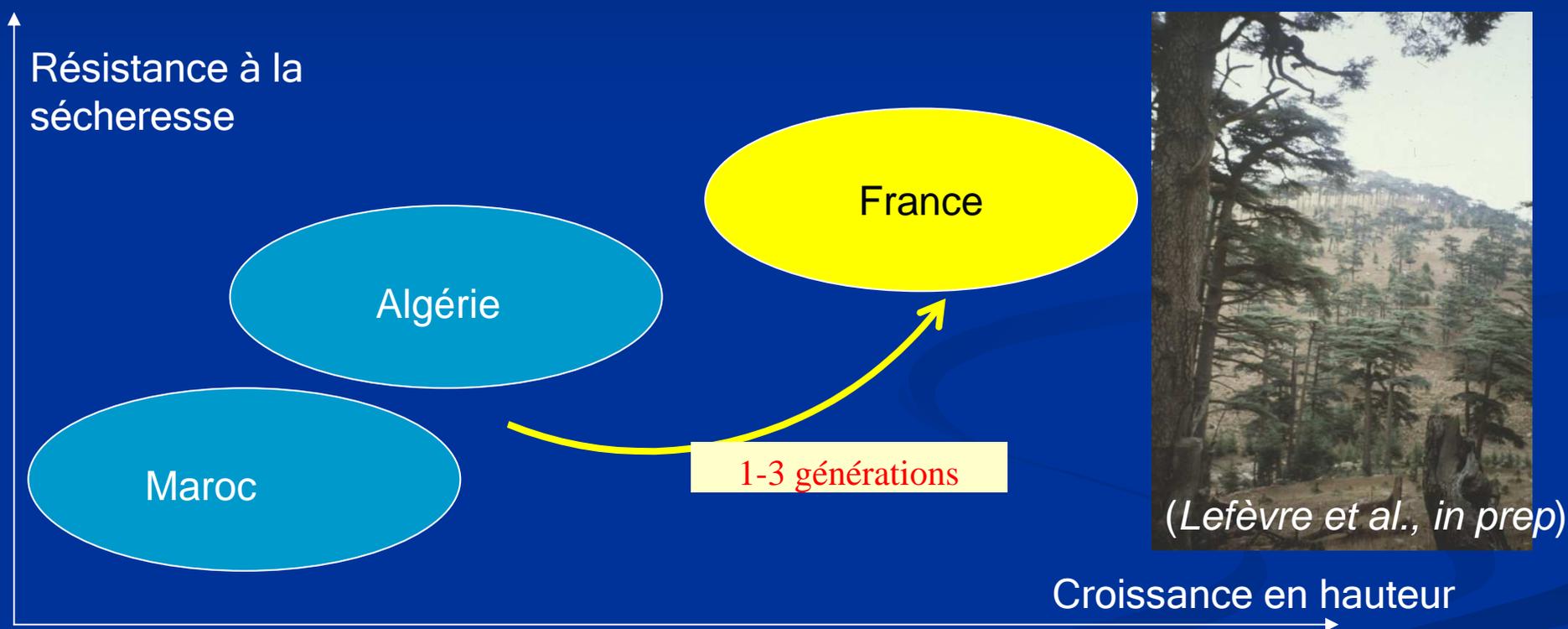
Diversité génétique : conserver et utiliser des ressources génétiques adaptées

- La résistance à la sécheresse des provenances turques de *Cedrus libani* : une ressource génétique d'intérêt sous climat changeant !



Bariteau et al. (For Entr) 2007

La sélection naturelle peut rapidement faire évoluer une espèce en cas de crise écologique : le cas de la migration assistée de Cedrus atlantica en France au 19^{ème} siècle.



Sélection naturelle intense et flux de gènes (admixture)

==> un mécanisme efficace en cas de modification forte du milieu, utilisable par le forestier

***Flux de gènes et adaptation : diversité
génétique dans les provenances et les
populations***

Quelques exemples et leur intérêt pour la
gestion forestière

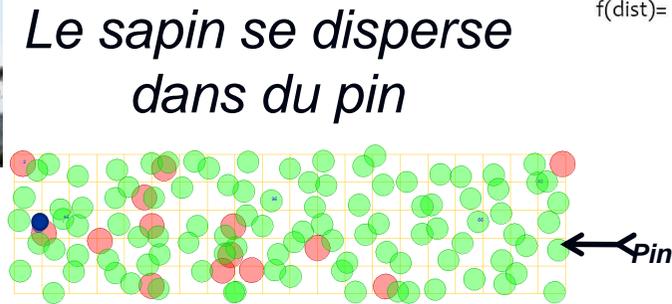
Importance de l'hétérogénéité du recrutement dans la capacité de migration

Simulation basée sur l'exemple d'*Abies alba* au Mont Ventoux

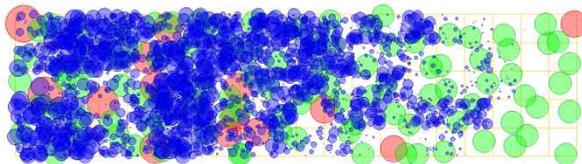
Sagnard et al. (*Ecol Model*) 2007, Amm et al. (*Can J For Res*) soumis



1975

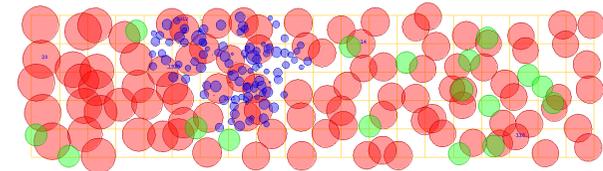
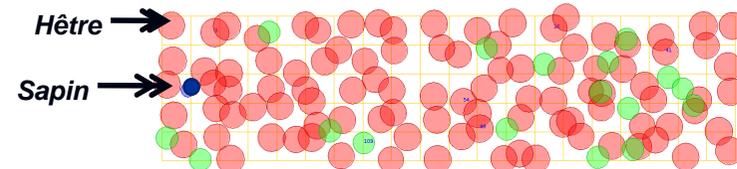


2100



Forte colonisation

Le sapin se disperse dans du hêtre



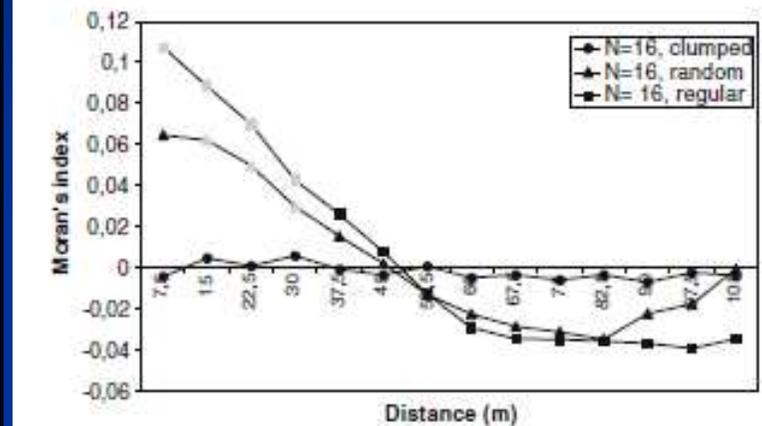
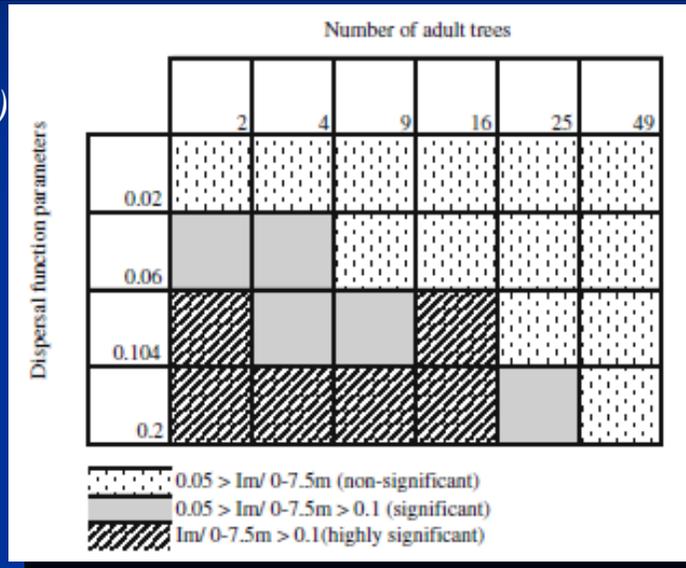
Faible colonisation

L'espèce objectif (celle qui est adaptée localement) peut s'installer (flux de gènes par colonisation) si le milieu d'accueil des semis est favorable : le forestier peut intervenir

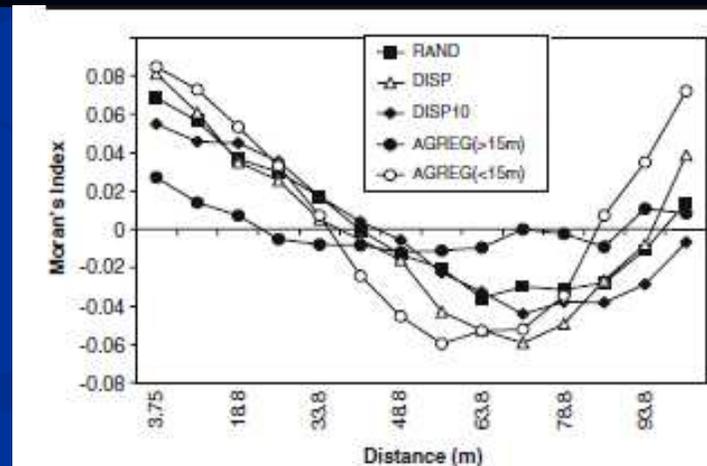
Densité et structure spatiale des adultes et des semis en petite population : effet sur la structure génétique spatiale (SGS) des semis

Sagnard et al. 2011
(Tree Genet Genomes)

Pas de SGS
(les individus voisins sont consanguins)
des semis si :

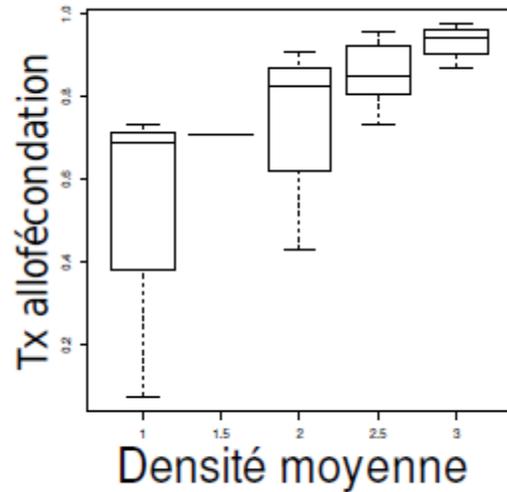


- effectif > seuil faible (e.g. 25 / ha)
- arbres adultes groupés
- semis dispersés loin et mortalité densité dépendante

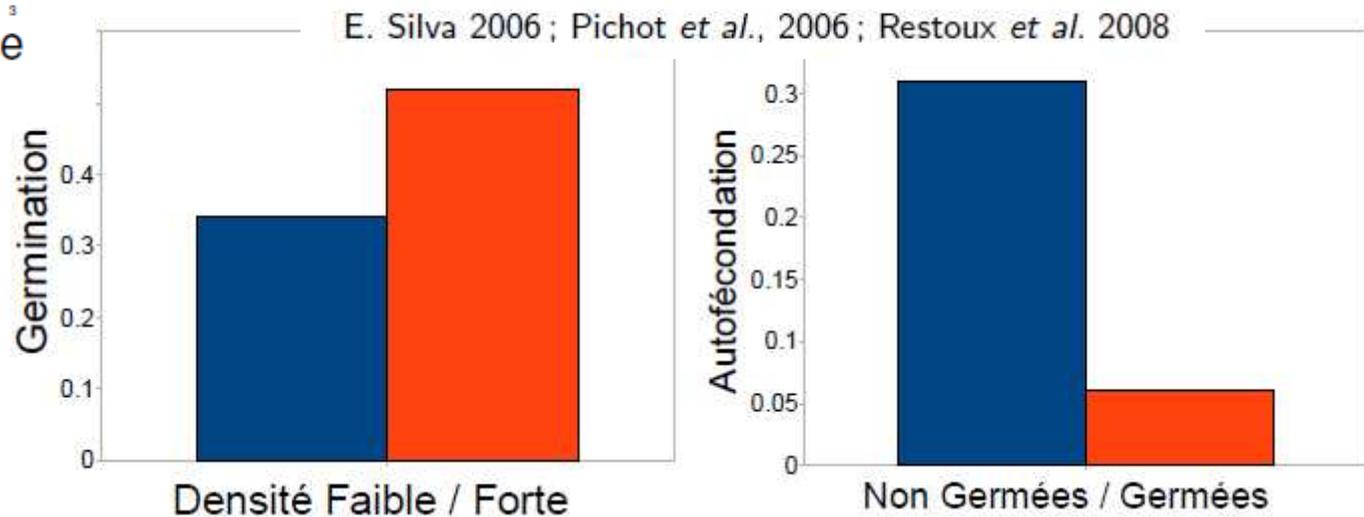
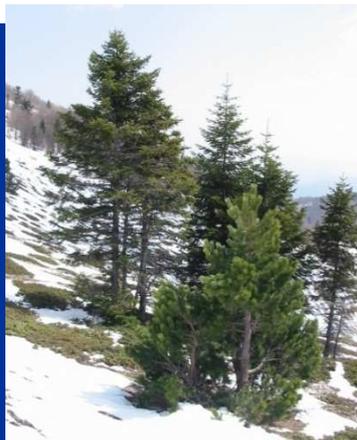


Densité et structure spatiale : ici encore le forestier peut intervenir

Maintien de la diversité génétique en population marginale



L'autofécondation augmente quand la densité diminue, mais les graines autofécondées sont contre-sélectionnées (purge génétique) => adaptation locale.



Gestion forestière : importance des peuplements marginaux, adaptés à des conditions « extrêmes »

Les écosystèmes forestiers et les changements climatiques

Grâce aux flux de gènes et à la sélection, les arbres peuvent donc s'adapter rapidement

... mais dans certaines limites !

Les limites de l'adaptation et des flux de gènes pour faire face aux changements climatiques

- Malgré une forte diversité génétique, plusieurs genres se sont éteints en Europe aux cours des changements climatiques du Quaternaire (cycles glaciaires): *Taxodium*, *Sequoia*, *Cedrus*, ...

Les limites de l'adaptation pour faire face aux changements climatiques en limite d'aire



Dépérissements (*Abies alba* surtout) dans le Ventoux après la canicule de 2003

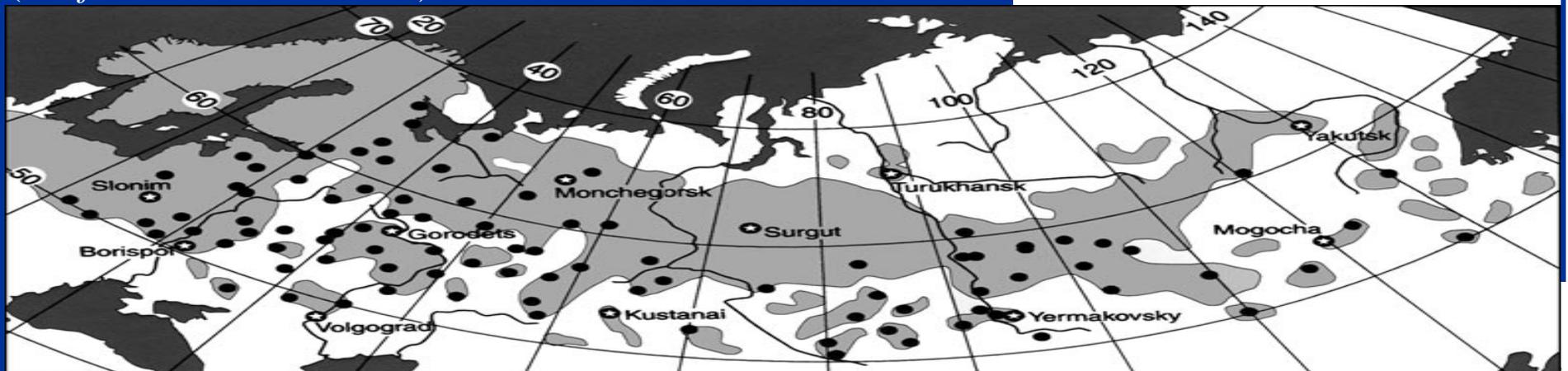
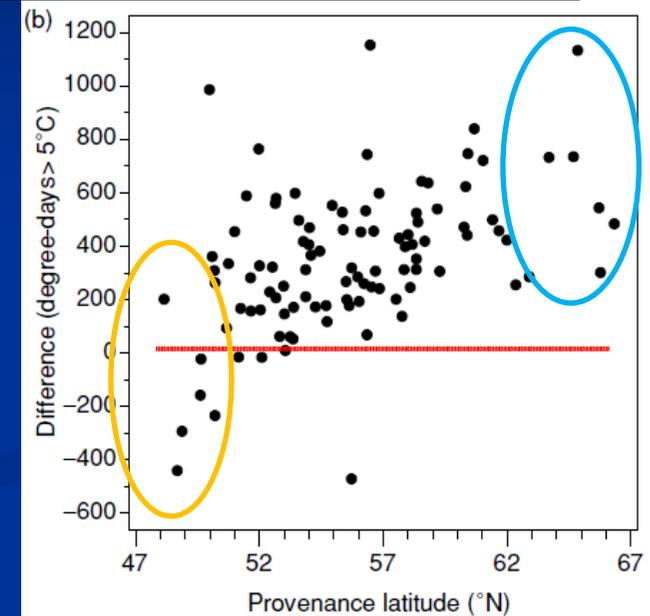
En limite d'aire de répartition, les origines locales ne sont pas toujours les meilleures !



Les limites de l'adaptation et des flux de gènes pour faire face aux changements climatiques

- les populations des marges nord occupent des habitats plus froids que leur optimum
- les populations des marges sud occupent des habitats un peu plus chauds ou proches de leur optimum

(Rehfeld et al., GBC 2002)



Les limites de l'adaptation pour faire face aux changements climatiques

- Il faudra de 1 à 12 générations pour l'adaptation (mesurée sur la croissance en hauteur) aux changements climatiques chez *Pinus sylvestris* selon le lieu d'origine des populations.

==> 50 à 1000 ans pour s'adapter !

(Rehfeld et al., GBC 2002)

Les limites de l'adaptation pour faire face aux changements climatiques

- Des caractères importants pour l'adaptation peuvent être inversement corrélés et leur combinaison ne pas offrir de prise à la sélection.

Exemple : résistance à la sécheresse et croissance en hauteur . Les arbres les plus grands sont aussi les moins résistants à la sécheresse.



***Les outils de gestion disponibles pour adapter
(au sens de la gestion) les espaces forestiers
aux changements climatiques***

- **Migration assistée** (espèces et/ou provenances) pour tirer partie de la diversité entre populations.
- Plantation à **forte densité** pour favoriser la sélection naturelle.
- **Gestion mélangée** (espèces – occupation de l'espace) pour favoriser la migration et la diversité génétique.
- Favoriser les **populations marginales** : sélection naturelle dans des conditions « extrêmes »

**Atelier du réseau AFORCE - Jeudi 12 mai 2011, FCBA (Paris)
« La génétique, un élément clé pour l'adaptation des forêts au
changement climatique »**

**Les flux de gènes entre provenances et
espèces : état des lieux et perspectives**

Réfléchir à des pratiques de gestion plus
«adaptatives» pour la forêt de demain

