



# **La diversité génétique des arbres forestiers : un enjeu d'importance face aux changements climatiques**

**Catherine Bastien**

**UR0588, « Amélioration, Génétique et Physiologie forestières »,  
INRA-Orléans**

2163 Avenue de la pomme de pin  
CS40001, F45075 Orléans Cedex 2

# Plan

- La **diversité génétique** au sein des espèces forestières: une composante majeure de biodiversité des écosystèmes forestiers
- Comment **mesurer** la diversité génétique intra-spécifique ?
  - par le phénotype
  - à l'aide d'outils moléculaires
- Les **changements climatiques** et leurs **impacts** sur les forêts
- Quelles **alternatives adaptatives** pour les espèces forestières?
  - plasticité phénotypique ou acclimation
  - adaptation des populations
  - migration
- Quelles **interventions humaines** possibles ?

Laisser faire? Accompagner? Anticiper ? Conserver?

A photograph of a forest with various pine trees, including a dead tree, under a blue sky. The trees are of different sizes and stages of growth, illustrating intraspecific diversity. The background shows a mountain range under a clear blue sky.

# La diversité intraspécifique des arbres forestiers

# DIVERSITÉ BIOLOGIQUE :

Le concept de **diversité biologique**, ou **biodiversité**, a été défini par la Convention sur la Biodiversité comme « *la variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes* »

(**Article 2** de la Convention sur la Biodiversité, 1992).

# Une grande richesse d'espèces même si les dernières glaciations ont appauvri la flore européenne

## Nb d'espèces autochtones

	Résineux	Feuillus	
EUROPE	5	45	
AMERIQUE	23	148	(Latitude > 45° N)

→ Exploration de l'intérêt d'espèces exotiques  
(Douglas, Chêne rouge, Cèdre)

## Effet limité de la domestication

- Début de notre ère: besoins domestiques ou industriels
- XIIe - XVIe siècle: développement de la sylviculture (3 à 5 générations)
- Milieu du XIXe siècle: transfert de populations et introduction d'espèces exotiques

# Des aires naturelles de distributions vastes .....

## chêne sessile



## hêtre



## Pin maritime



## Pin sylvestre



Des habitats et climats variés .....

# Des espèces longévives.....



qui doivent s'adapter à des environnements changeants

# Des espèces allogames ...

Peuplier noir



Espèce dioïque

Pin sylvestre



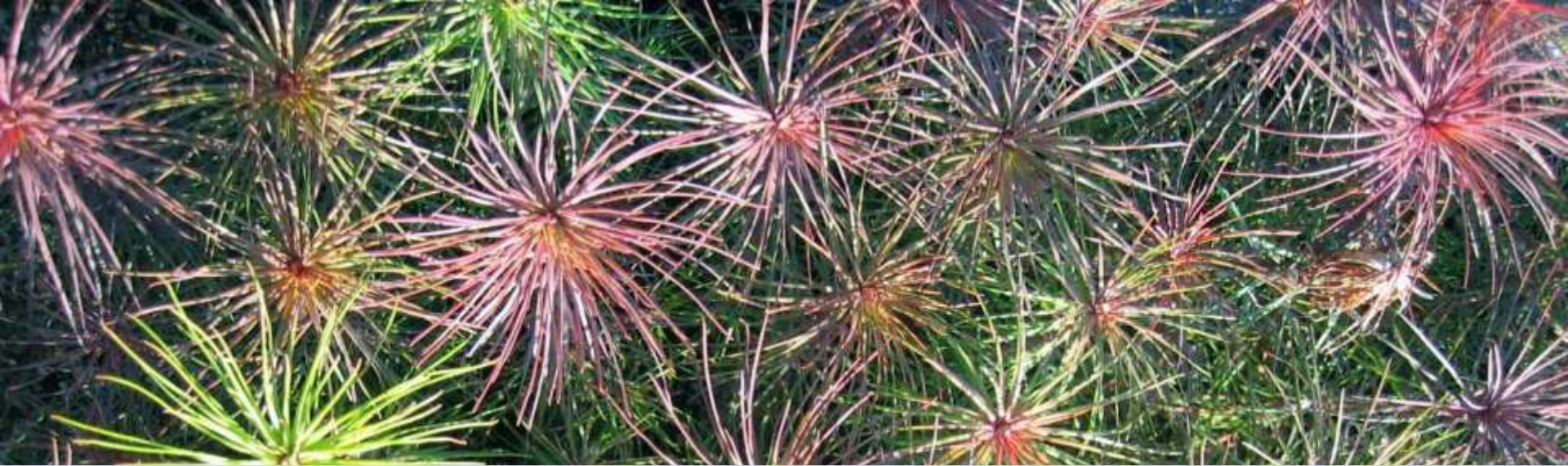
Inflorescences séparées

Merisier



Un système d'auto-incompatibilité

Avec une reproduction favorable au brassage génétique



**Comment mesurer la diversité génétique ?**



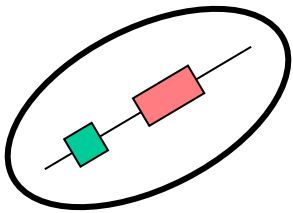


# Phénotype et Génotype



P PHENOTYPE

= pour un caractère donné, **valeur observée ou mesurée** sur un individu ou groupe d'individus . Résultat de l'action du milieu sur le génotype



G GENOTYPE

= pour un caractère donné, **arrangement particulier de gènes** caractérisant un individu ou un groupe d'individus

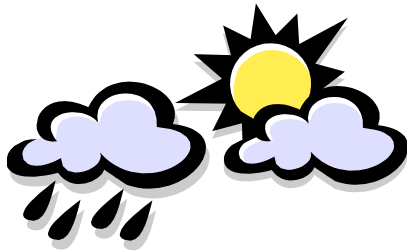
# Appréciation de la diversité génétique par le phénotype

$$P = G + E + G \times E$$

**G** → Génotype

**E** → Environnement

**G × E** → Interaction entre le génotype et le milieu



↑ Installation de dispositifs expérimentaux multisites  
(*Chênes, Douglas, Mélèzes, Pin sylvestre, Cèdre, Merisier*)

# Appréciation de la diversité génétique par le phénotype

- **Rassembler** des collections de populations venant de l'ensemble de l'aire de répartition de l'espèce

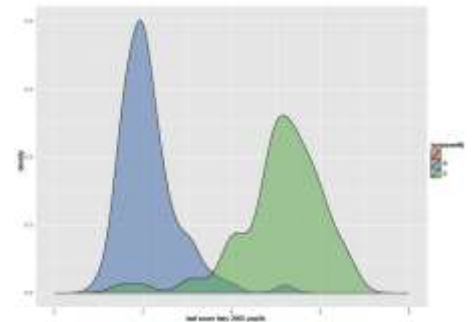


Provenances chênes blancs

- **Comparer** les populations dans un environnement commun en dispositif expérimental (répétition, randomisation)



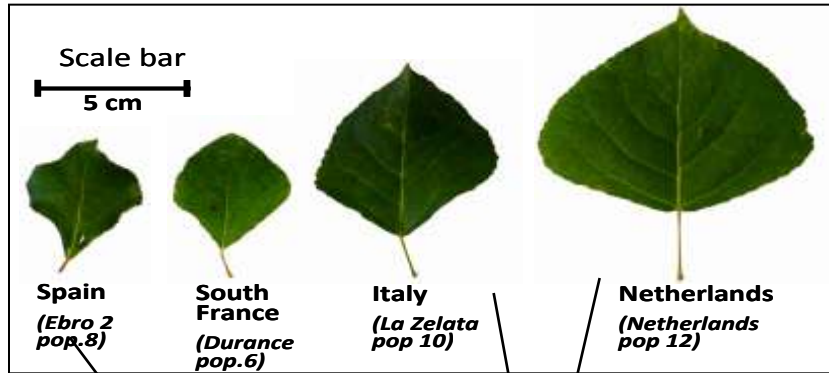
- **Mesurer** les différences entre populations pour un grand nombre de caractères d'intérêt
- $Q_{st}$  = *Mesure la différenciation entre populations*



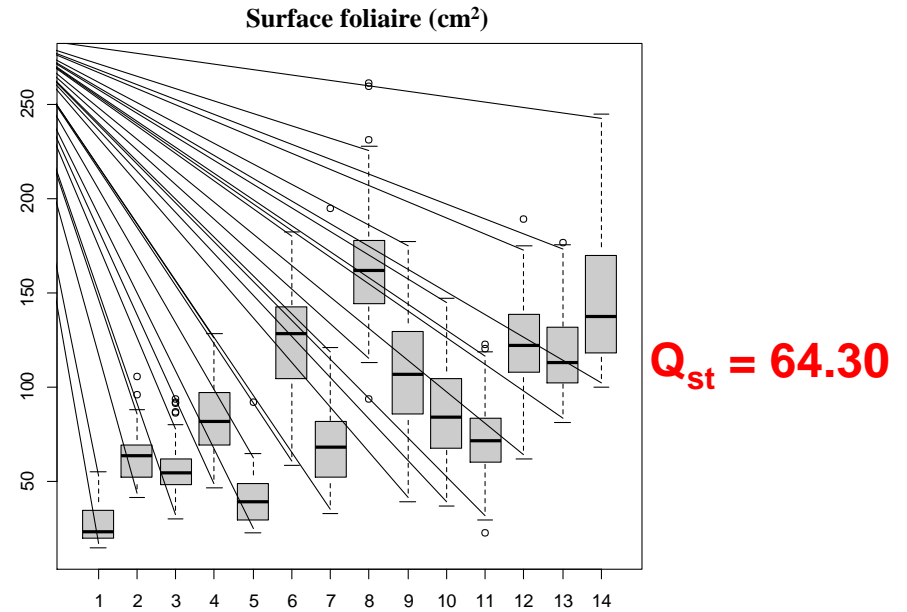
# Appréciation de la diversité génétique par le phénotype : quels traits?

*Des caractères morphologiques*

*Surface foliaire, longueur pétiole, ...*



*Peuplier noir*



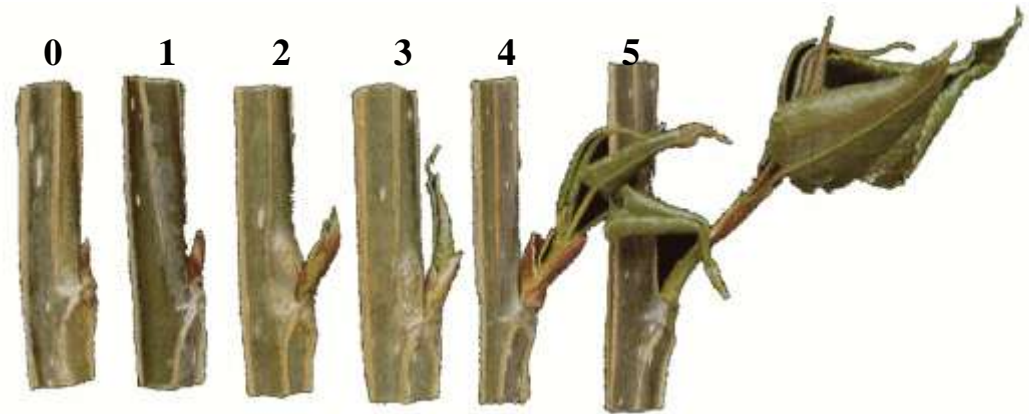
- *Une grande variabilité génétique entre populations mais aussi intra-population*
- *Un gradient latitudinal marqué (adaptation locale)*

# Appréciation de la diversité génétique par le phénotype : quels traits?

*Calage de la phénologie de la croissance*

*Débourrement végétatif*

→ Éviter les gelées tardives de printemps



*Formation du bourgeon terminal*

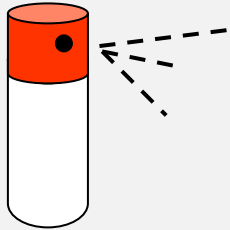
→ Éviter les gelées précoces d'automne  
Endurcissement pour l'hiver



# Appréciation de la diversité génétique par le phénotype : quels traits?

*Résistance aux ravageurs (maladies, insectes)*

*Inoculation contrôlée*



*Contrôle de la variabilité  
de l'agent pathogène*

*Inoculation naturelle*

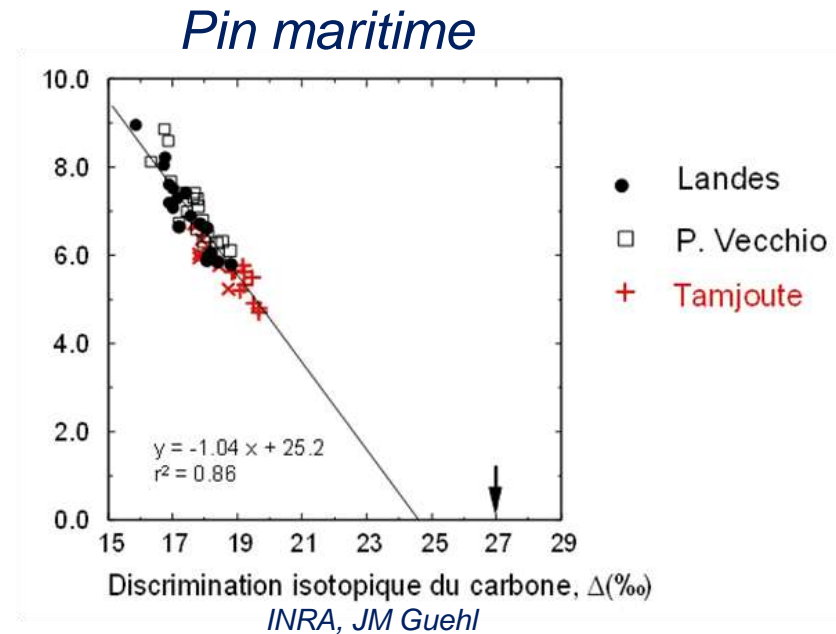
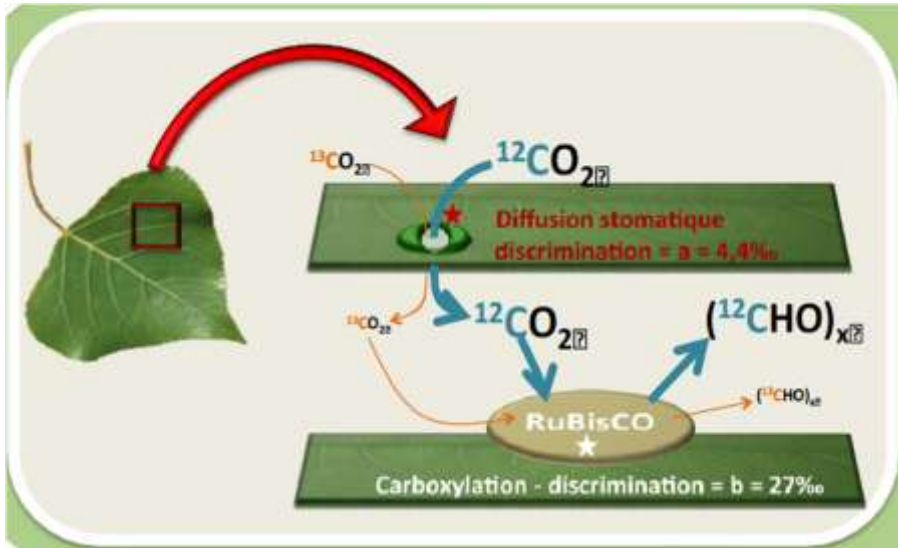


Score de la feuille la plus infectée

*Réponse de la plante*

# Appréciation de la diversité génétique par le phénotype : quels traits?

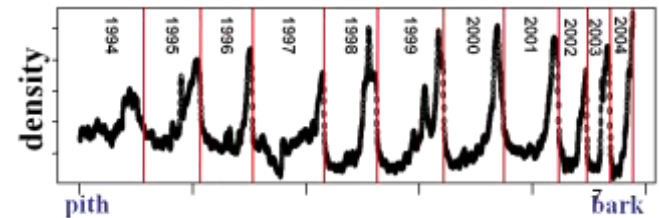
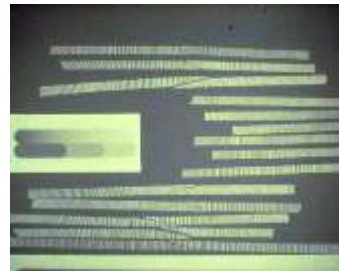
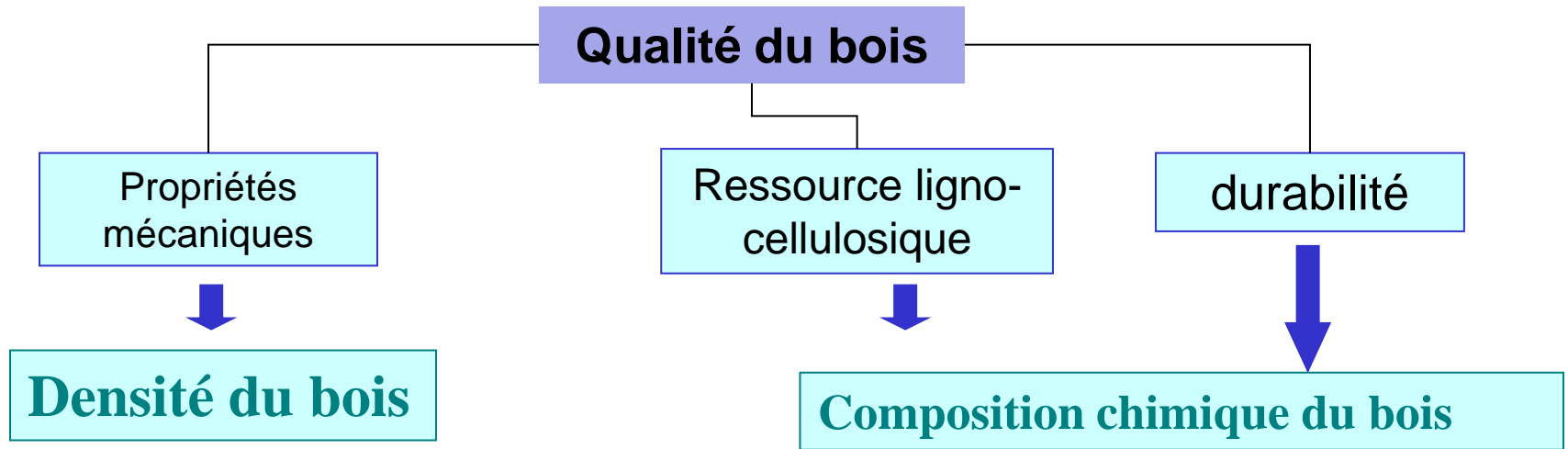
*Efficiéce d'utilisation de l'eau*  
*= Photosynthèse / Transpiration*  
*= Matière sèche accumulée / eau consommée*



*Une méthode de phénotypage haut-débit d'un caractère physiologique complexe*

*La discrimination isotopique du C durant l'assimilation de CO<sub>2</sub> est liée à l'efficiéce d'utilisation de l'eau*

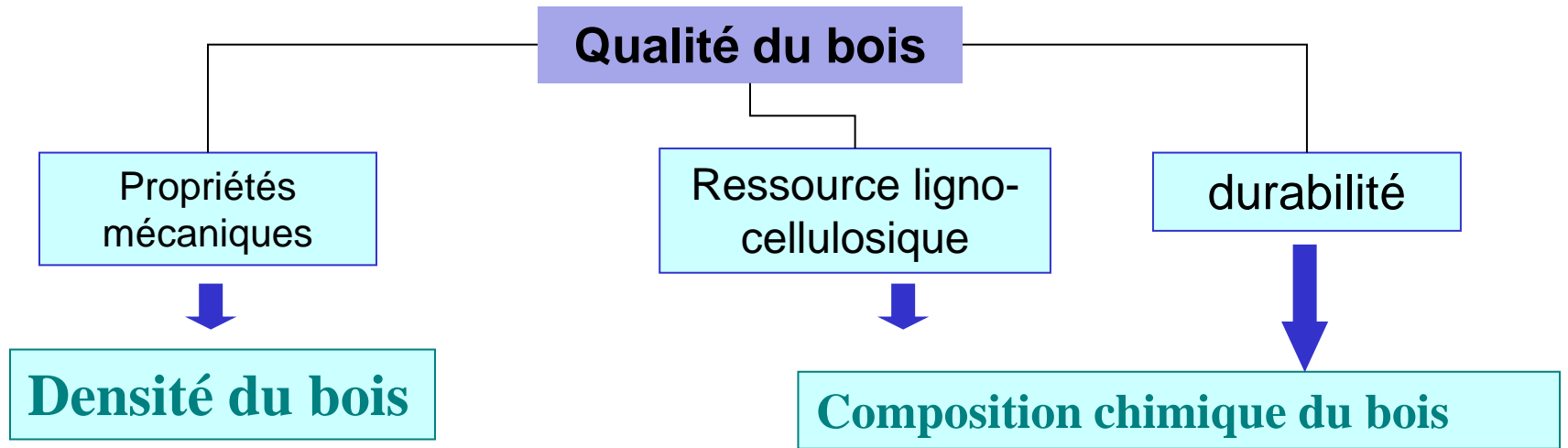
# Appréciation de la diversité génétique par le phénotype : quels traits?



*La microdensitométrie : Une méthode de phénotypage haut-débit*



# Appréciation de la diversité génétique par le phénotype : quels traits?



*La spectrophotométrie proche infra-rouge : Une méthode de phénotypage haut-débit*

# Appréciation de la diversité génétique à l'aide de marqueurs moléculaires

Qu'est ce qu'un marqueur moléculaire?



- fragment d'ADN
- position définie sur un chromosome
- reproductible
- séquence codante ou non
- polymorphe
- reproductible

Qu'est ce que du polymorphisme?

- une différence de séquence entre 2 individus ou 2 allèles d'un individu
- révélé par les marqueurs moléculaires

# Appréciation de la diversité génétique à l'aide de marqueurs moléculaires

De quels tissus est extrait l'ADN?

Tissus vivants



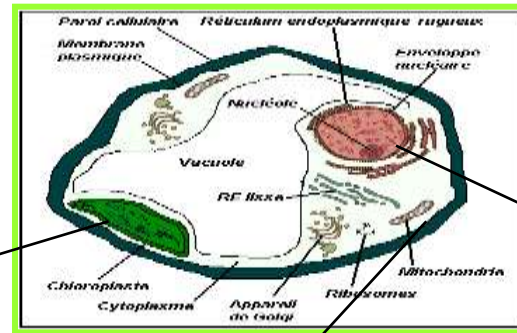
Tissus morts



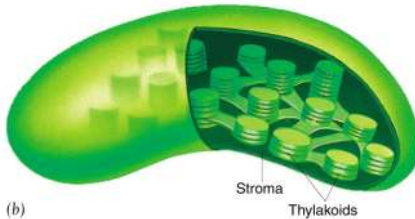
Possible mais  
rendement plus faible

Cambium, feuilles, bourgeons, racines

# 3 origines d'ADN chez chaque plante



## Génome chloroplastique 135-160 kb

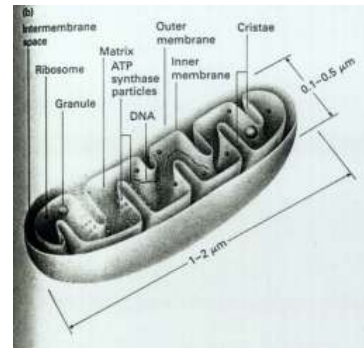


Hérédité uniparentale

Hérédité paternelle  
(conifères)

Hérédité maternelle  
(feuillus)

## Génome mitochondrial 2500 kb

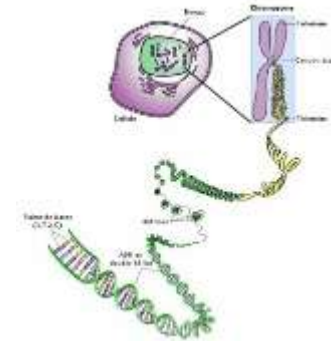


Hérédité uniparentale

Hérédité maternelle  
(conifères)

Hérédité paternelle  
(feuillus)

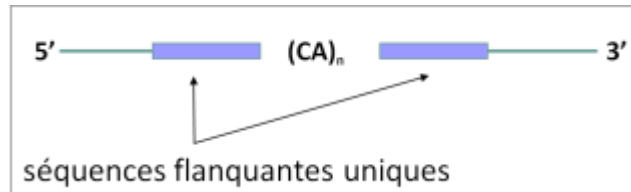
## Génome nucléaire Le plus grand: 25-30 000 Mb



Hérédité maternelle et  
paternelle

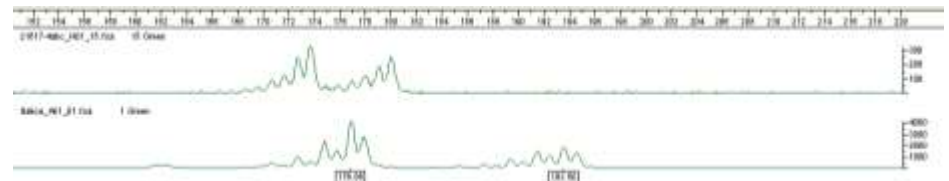
# Les deux types de marqueurs les plus utilisés (1)

## Marqueurs microsatellites (SSR ou STR)



- **polymorphisme de répétitions** en tandem de 1 à 6 nucléotides  
exemple : ...TCTCTCTCTCTC...  
          ...TATTATTATTAT...  
          ...GATAGATAGATA...
- répétition de quelques unités à plusieurs dizaines
- marqueurs **codominants**
- **polymorphisme très élevé**, multiallélique
- régions flanquantes très conservées

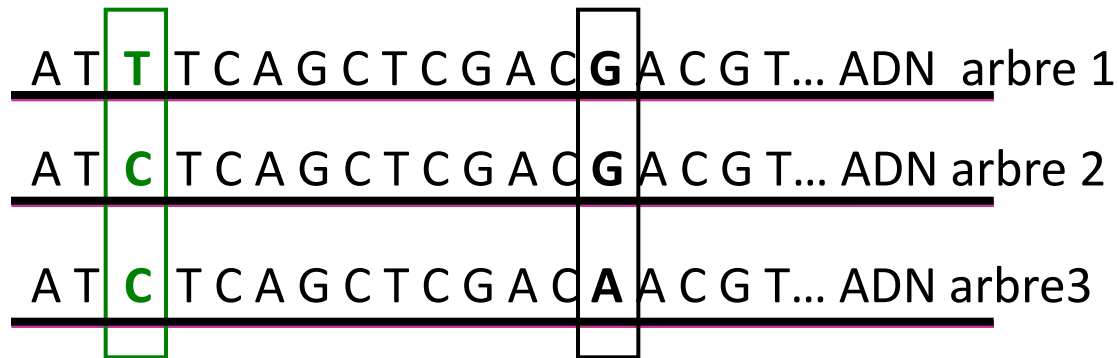
*Lecture au séquenceur*  
*Multiplexage possible*



## Les deux types de marqueurs les plus utilisés (1)

### Un saut technologique: les puces à SNP

SNP = « Single Nucleotide Polymorphism »  
= polymorphisme de l'ADN en une base



**SNP avec 2 allèles : C ou T**

**SNP avec 2 allèles : G ou A**

- marqueurs **codominants**
- polymorphisme **peu élevé** : bi-allélique
- mais existe en **très grand nombre** dans le génome
- ils se détectent par **séquençage de gènes** ou de **génomés entiers**

# Les arbres forestiers ont des génomes de grande taille !!!

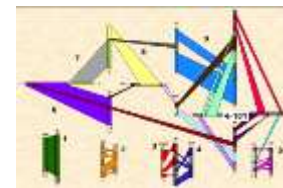
	Organisms	Genome size (bp)	% repetitive
	<i>E. coli</i>	4.6 millions	
	<i>Drosophila</i>	150 millions	
	<i>Humans</i>	3 billions	43%
	<i>A. thaliana</i>	130 millions (2n=10)	10%
Angiospermes	<i>Poplar</i>	550 millions (2n=38)	40%
	<i>Eucalyptus</i>	600 millions (2n=22)	6% ?
Gymnospermes	<i>Picea</i>	18-22 billions (2n=24)	70-75%
	<i>Pinus</i>	25 billions (2n=24)	-

## Peu d'arbres ont leur génome séquencé

Peuplier (*P. trichocarpa*) 2006

Eucalyptus (*E. grandis*) 2011

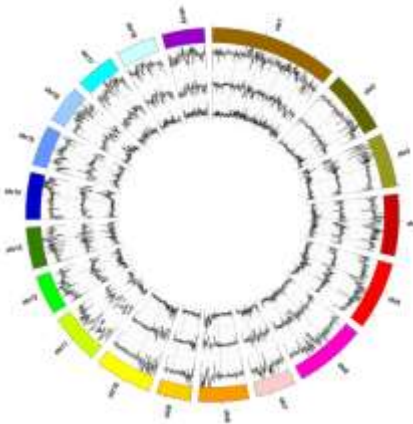
En cours .....Chêne sessile (nov 2011)



# Des possibilités de génotypage haut-débit !!

2011

Reséquençage de 52 individus de Peuplier noir

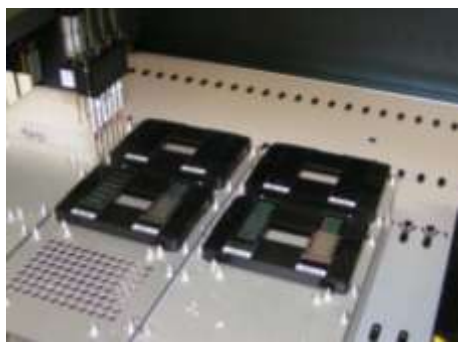


Identification de plus de 3,000,000 SNP



2012

Dessin de la première puce 20 000 SNP Illumina Golden Gate



génotypage de 1152 individus de peuplier noir

Puce bovine :



e :

: >1,500,000 SNP

és

0€ en 2012

20,0

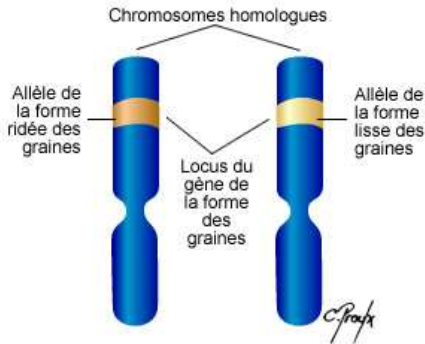


# Quelques définitions liés à la mesure de la diversité génétique

**Allèles** = différentes versions d'un même gène. Les allèles d'un gène occupent le même emplacement sur le chromosome

**Taux d'hétérozygotie** = mesure la diversité des deux allèles d'un gène

**Haplotype** = empreinte individuelle de tous les marqueurs génétiques testés sur un individu



**Richesse allélique** = Nb d'allèles différents au même gène dans une population donnée

Ind.	Pt302 04.A	Pt719 36.A	Pt873 14.A	Pt1516 9.A	Pt2608 1.A	Pt36480. A	Pt1254. A	Pt4113 1.A	Pt872 68.A	haplo
MC-Arti-1	141	144	112	125	105	141	61	135	162	50
MC-Arti-2	141	139	112	125	105	141	61	135	162	51

Le niveau de **Différenciation génétique** est apprécié à différentes échelles :

- Intra-individu
- Entre individus
- Entre populations
- Entre espèces

## Différenciation génétique – intra individu

### Ho

<i>Quercus petraea</i>	0,265
<i>Picea abies</i>	0,219
<i>Pseudotsuga mensiezi</i>	0,201
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,187
<i>Populus nigra</i>	0,177
<i>Pinus pinaster</i>	0,157
<i>Abies alba</i>	0,145

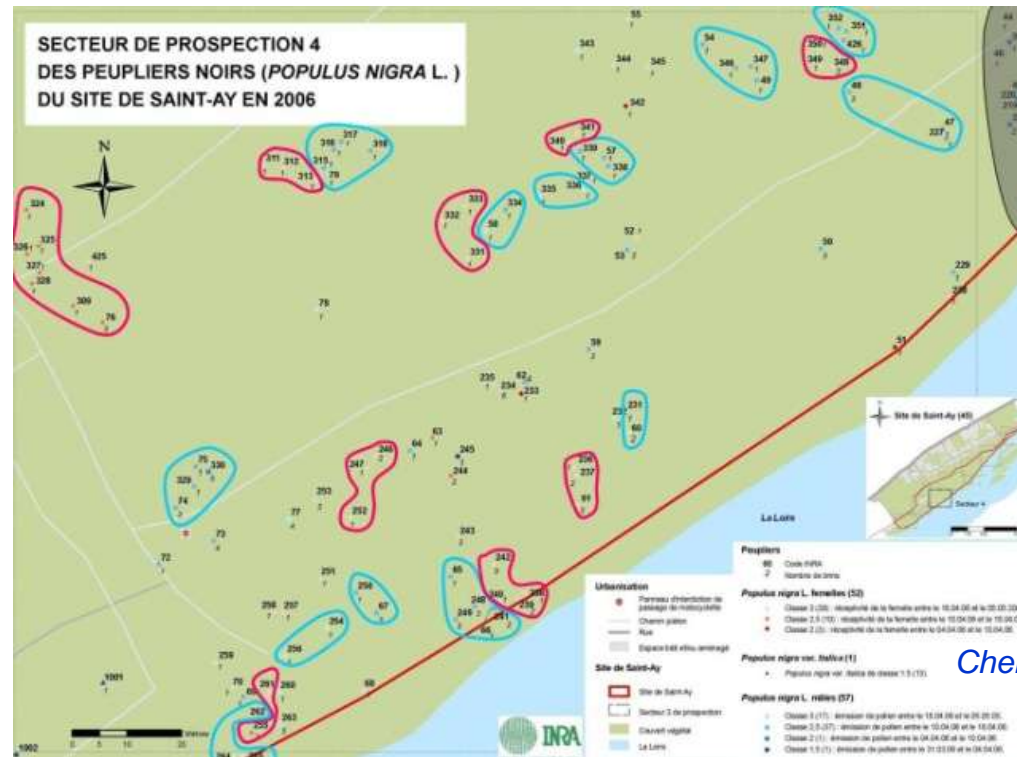
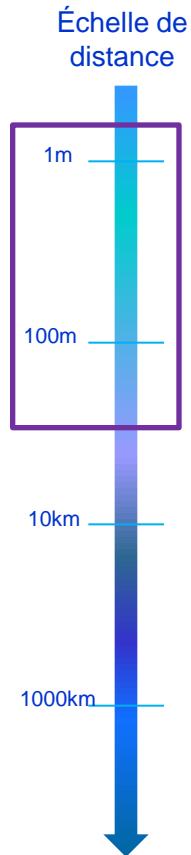
Des niveaux d'hétérozygotie élevés par rapport aux autres organismes vivants

### Ho

Plants	0,104
Invertébrés	0,100
Vertébrés	0,079
<i>Homo sapiens</i>	0,060

# Une nette différenciation entre individus permettant de caractériser le régime de reproduction

Importance de la multiplication végétative naturelle chez le peuplier noir



Chenault et al., TGG 2011

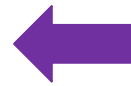
- $R=0.47 = (\text{Nb génotypes} \neq / \text{Nb arbres})$  une clonalité significative et uniforme
- des taches clonales bien agrégées de 2 à 18 copies

# Une nette différenciation entre individus permettant de caractériser le régime de reproduction

Des flux de pollen significatifs des peupliers d'Italie vers les peupleraies naturelles



© N. Chenault



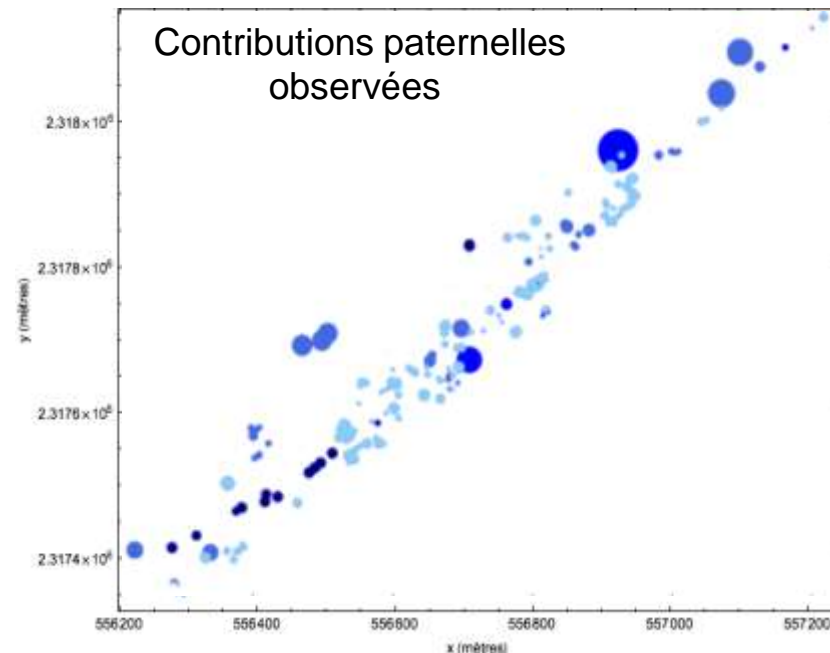
Peuplier d'Italie



413 *P.nigra* (229 ♀, 214 ♂)

13 '*italica*'

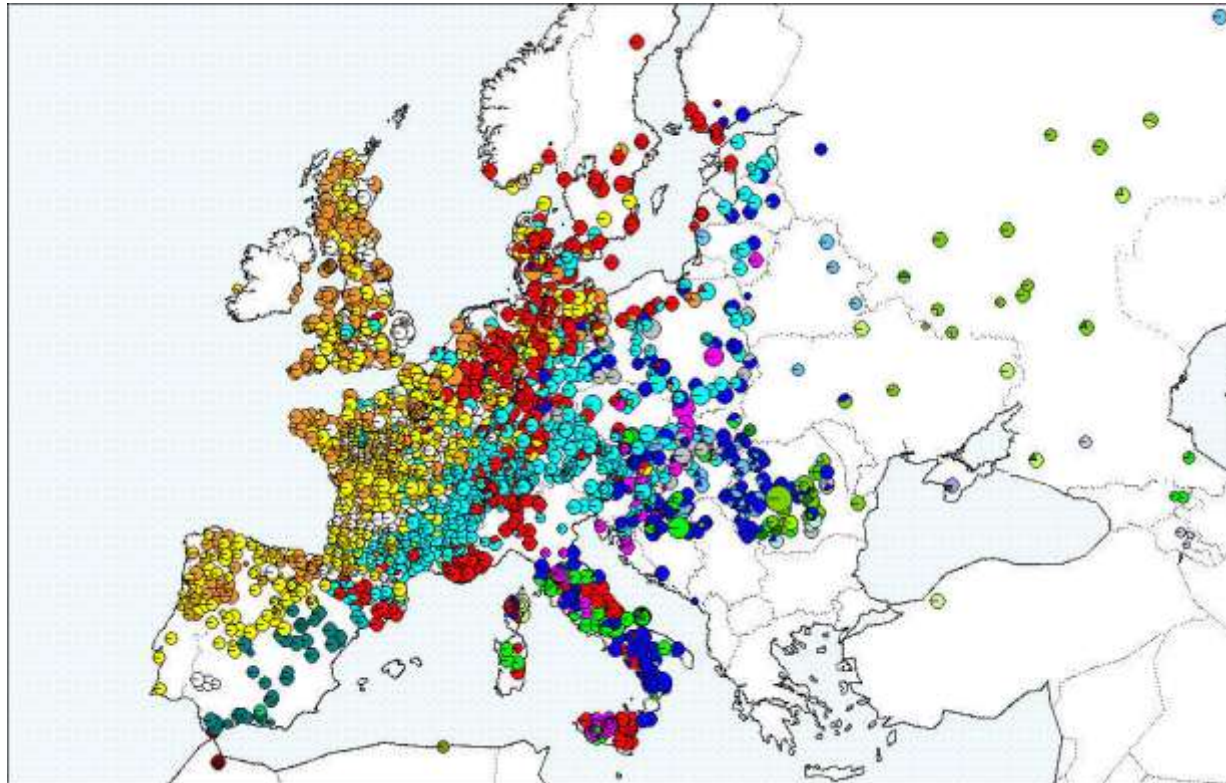
Génotypage 31 desc  
(48-96 graines/desc – 9 SSR)



cv '*italica*' : 1,9% (1350 graines)

# Une nette différenciation géographique des populations naturelles

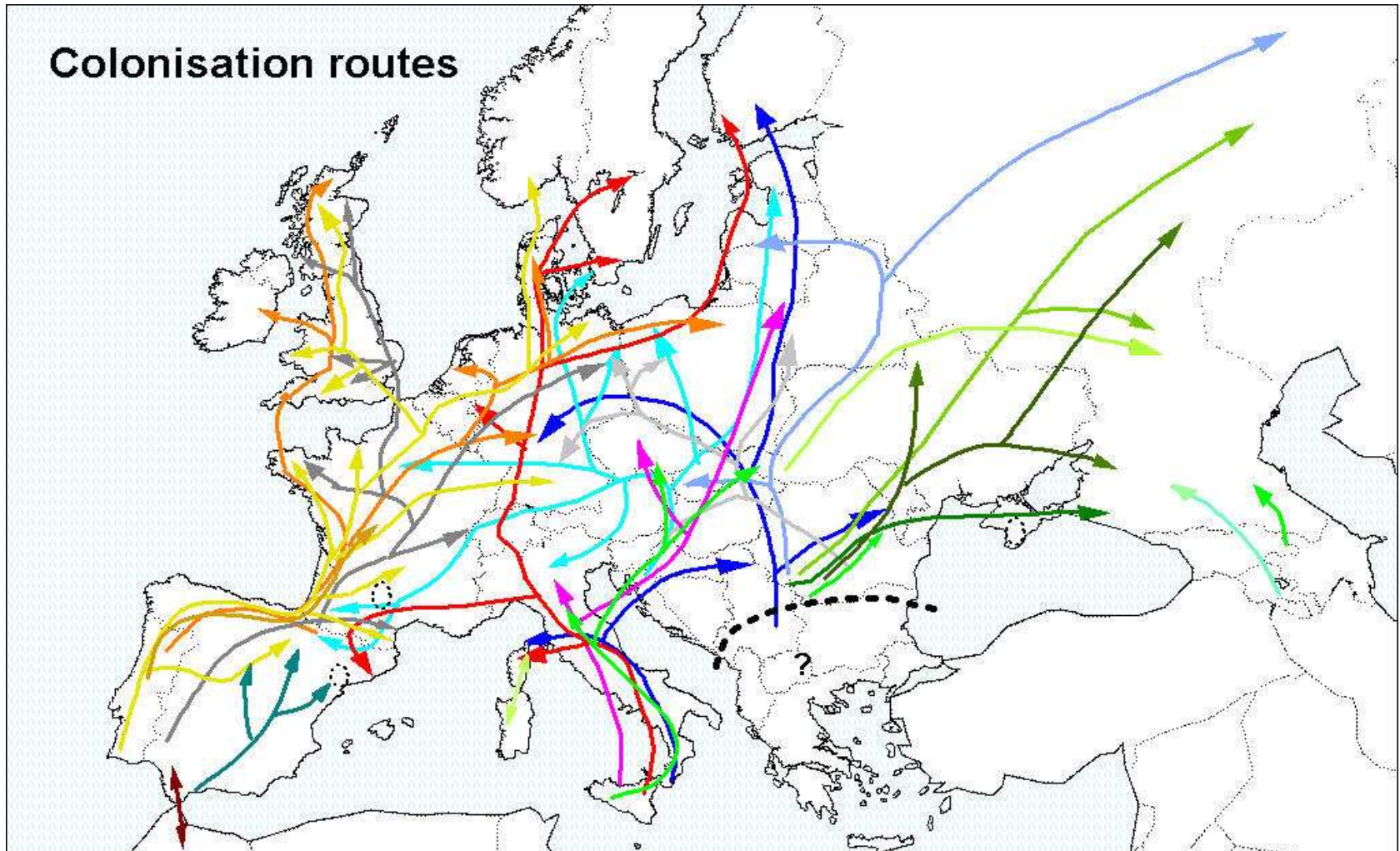
## Distribution des haplotypes chloroplastiques



2673 populations  
42 haplotypes

Aire naturelle chênes blancs

# Une nette différenciation géographique liée à l'histoire évolutive du chêne



Aire naturelle chênes blancs

# Une nette différenciation géographique des populations naturelles

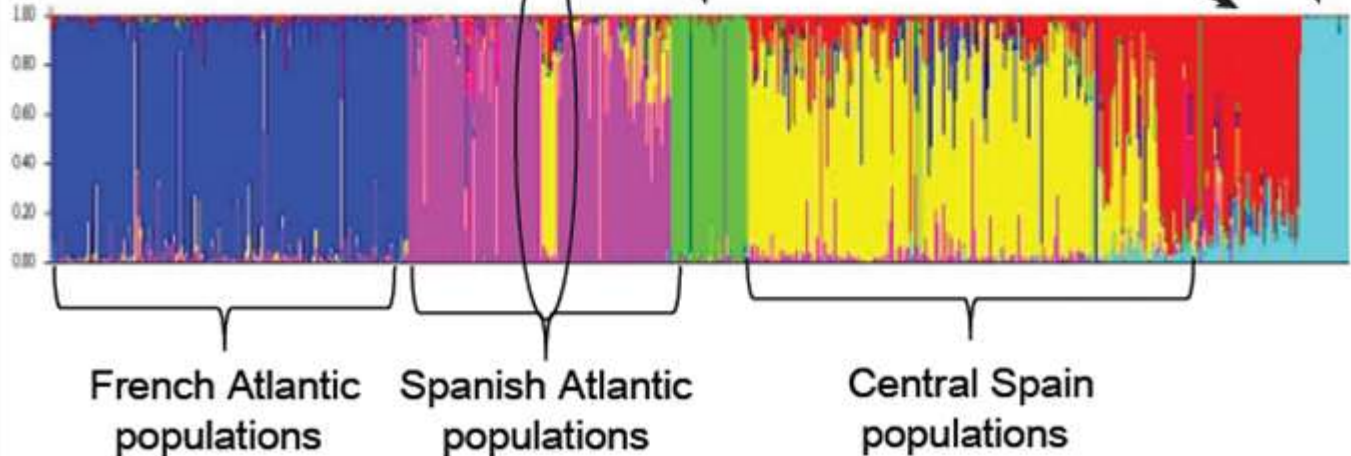
260 SNPs

A plantation with  
Central Spain origin!

Corsica

Southern  
Spain

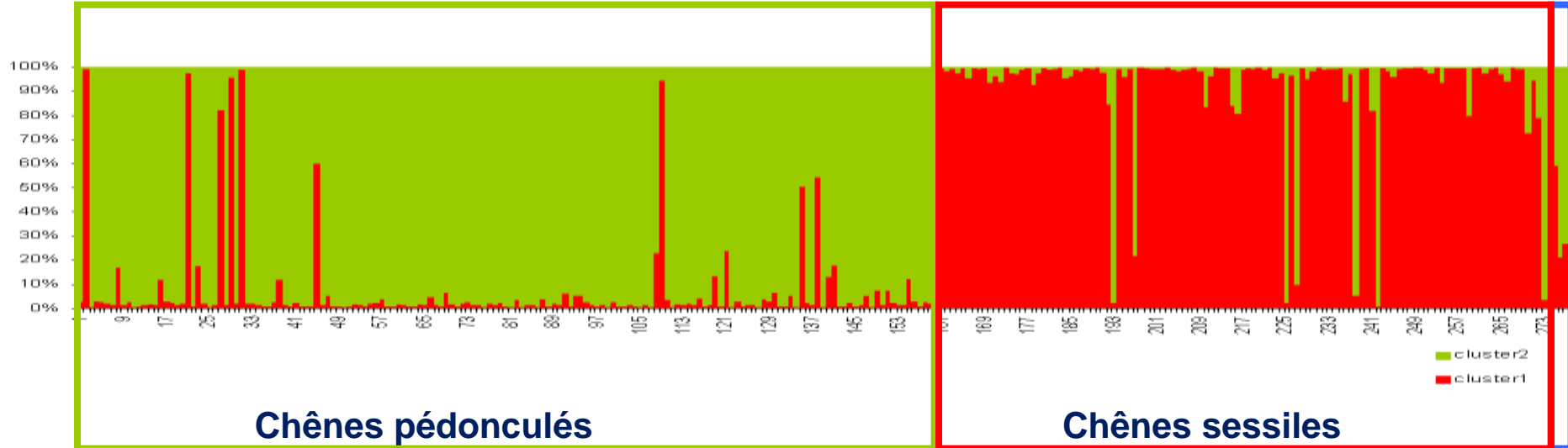
Morocco



Pin maritime

# Une bonne différenciation entre espèces

## Résultats STRUCTURE 16 marqueurs SSR



Population	Assignment clusters (au seuil de 0.5)		Nombre d'individus
	1	2	
Pédonculé	0.07	<b>0.93</b>	159
Sessile	<b>0.91</b>	0.09	114
Intermédiaire	0.42	0.58	5



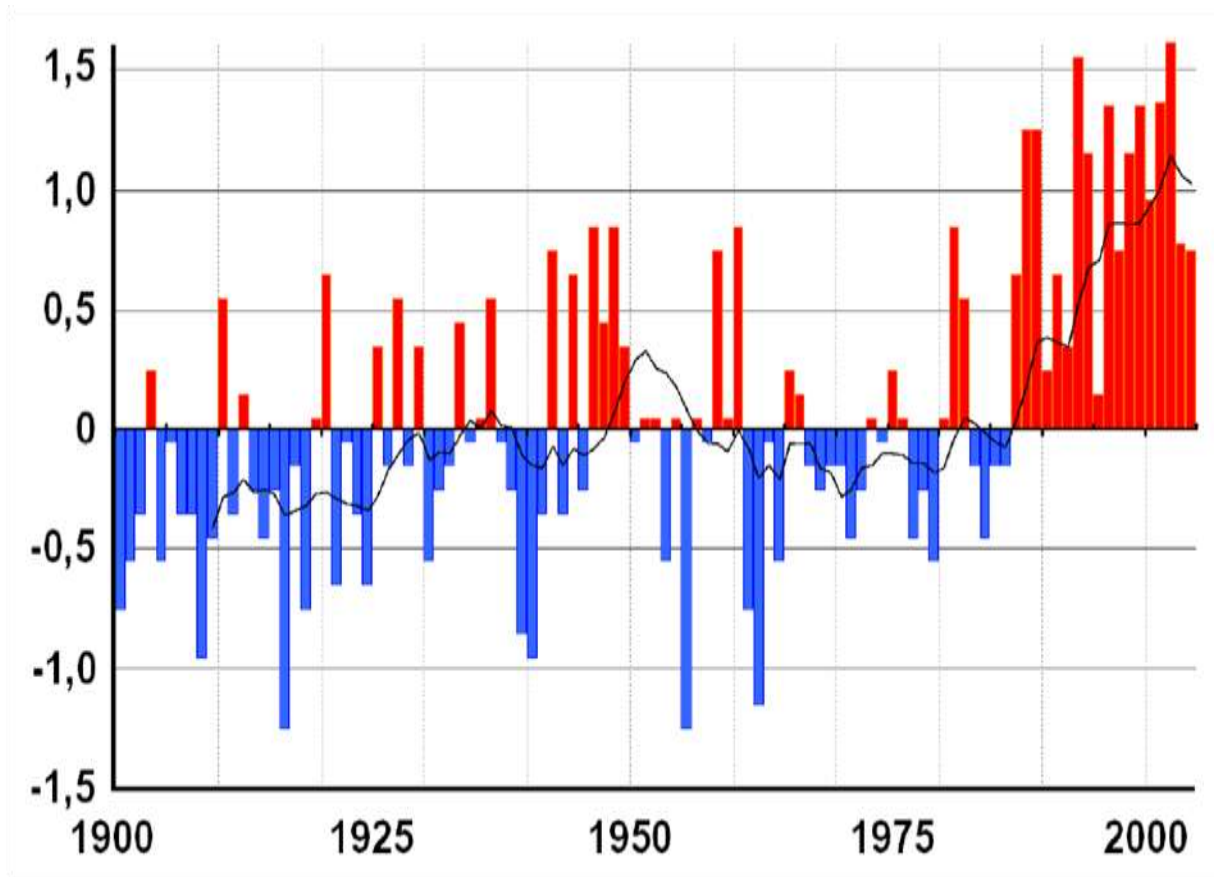


# Les changements climatiques et leurs impacts sur les forêts

**Mortalité de sapin pectiné en juillet 2005 après la sécheresse 2003, SE France (© ONF)**

# Evolution de la température moyenne en France

(Source Météo France)



*« L'intensité ( $\Delta$ /unité de temps) des changements climatiques annoncés n'a jamais été atteinte depuis le dernier réchauffement post-glaciaire !*

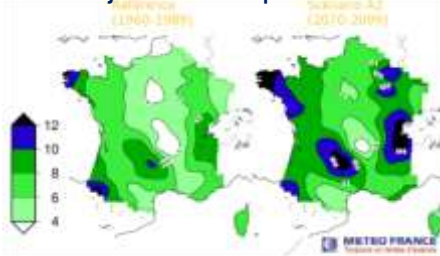
# Climat en France: Evolution attendue à l'horizon 2010

Nb jours de canicule en été



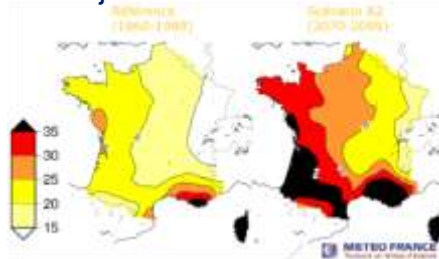
- Des étés plus chauds

Hiver : Nb jours avec pluie >10 mm



- Des pluies hivernales plus marquées

Été : Nb jours secs consécutifs



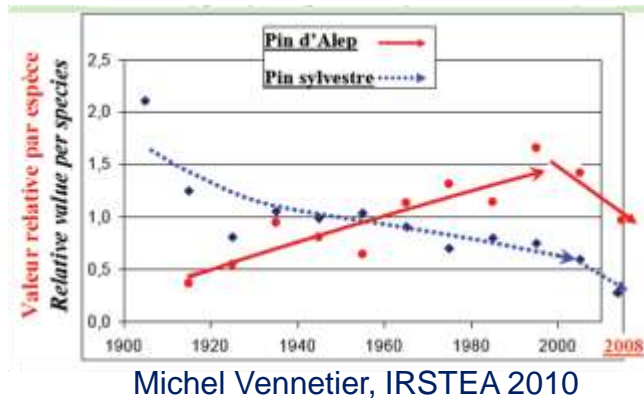
- Plus sec en été surtout dans le Sud

Mais...

Une augmentation des moyennes et des variances  
Beaucoup d'incertitudes → utiliser plusieurs scénarios

# Impacts visibles sur la croissance et la mortalité des forêts en place

- Des arbres âgés de grande taille dépérissent brutalement
  - Sapin dans le Sud-Est
  - Hêtre sur le Mont Ventoux
  - Chêne pédonculé à Vierzon



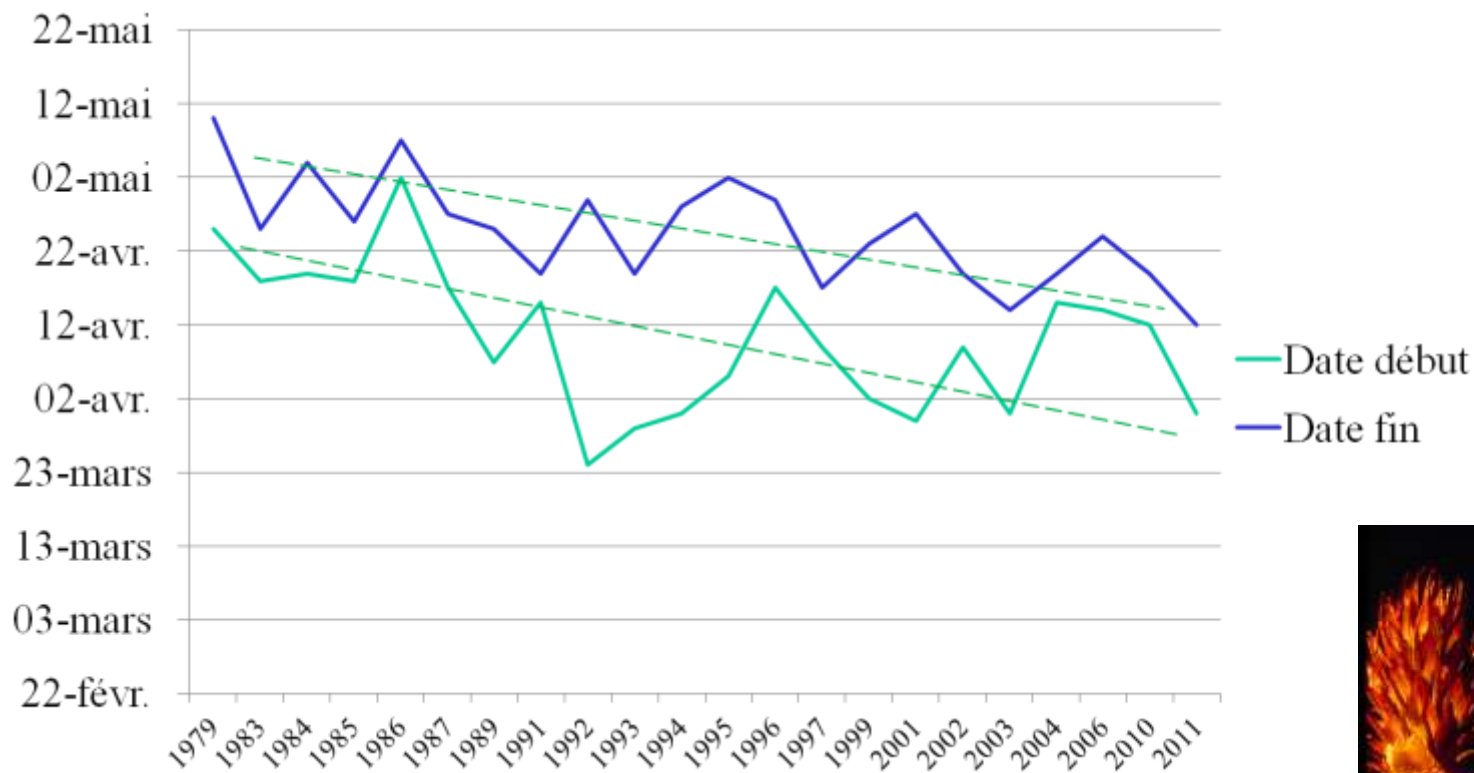
- La biomasse produite décline dans localement

- L'installation de nouveaux semis devient irrégulière et peu fréquente localement



# Les rythmes saisonniers changent .....

- Evolution des dates de début et de fin de croisements contrôlés (floraison) de Douglas à l'INRA d'Orléans



# Une augmentation des attaques de ravageurs (Insectes et champignons pathogènes)

## Extension des aires de distribution des ravageurs

### La chenille processionnaire du pin

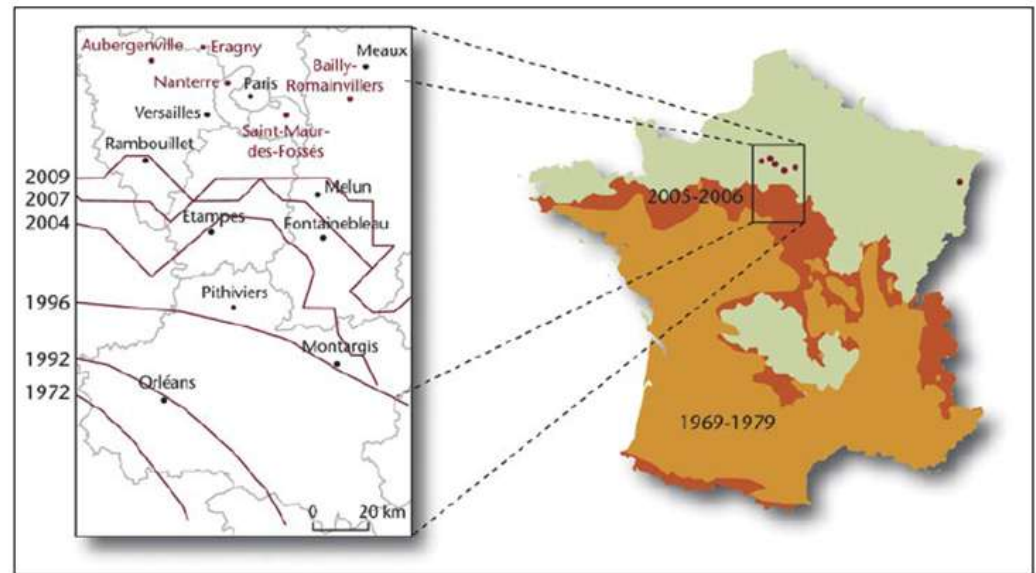


Figure 2 – Progression de la chenille processionnaire du pin en France et zoom sur les Régions Centre et Île-de-France. Les points rouges indiquent les foyers isolés.

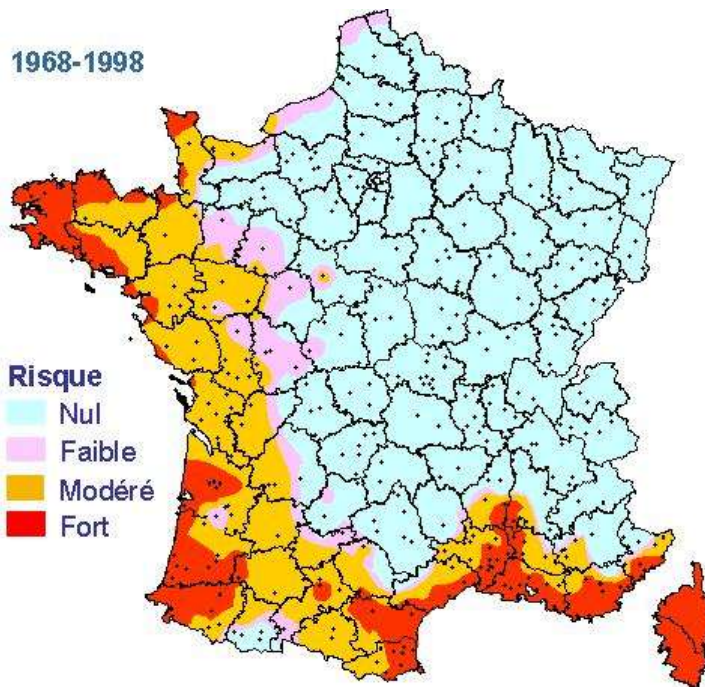
Elle migre vers le Nord à la vitesse  
de 5,5km par an et en altitude à la  
vitesse de 0,5m par an

# Une augmentation des attaques de ravageurs (Insectes et champignons pathogènes)

Extension des aires de distribution des ravageurs

## Encre du chêne (*Phytophthora cinnamomi*)

1968-1998 Extension actuelle



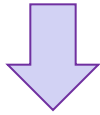
2068-2098 Potentiel d'extension



# Une augmentation des risques d'incendies de forêt

**+22%** entre 1961-1980 et  
1980-2005

- Augmentation en  
fréquence et intensité



- Les régimes de feu ont  
tendance à touché de  
plus en plus des arbres  
âgés





# Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes



## Klaus

24 Janvier 2009

Sud-Ouest

170 000 ha détruits à plus de 60%



## Martin

28 Décembre 1999

Alsace


80% des peuplements autochtones de pin  
sylvestre détruits

# Pour en savoir plus sur le changement climatique

age Historique Marque-pages Outils ?

ipcc | http://www.ipcc.ch/    ipcc

Rechercher  Games  Réparez (15) erreurs PC  ipcc

  
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change  
   
Languages  IPCC web pages 

Home

Organization

Procedures

Working Groups / Task Force

Activities

Calendar of Meetings

Meeting Documentation

News and Outreach

Publications and Data

Presentations and Speeches

IPCC Scholarship Programme

Links

Contact




### Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation

Report Press Videos SREX Website

SRREN Fifth Assessment Report AR4 - Climate Change 2007

### Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (SRREN)



**Report**

- [SRREN Website](#)
- Summary for Policymakers/Technical Summary: [Arabic](#) - [Chinese](#) - [English](#) - [French](#) - [Russian](#) - [Spanish](#)
- [Full Report](#) - printed volume now available from Cambridge University Press

**Videos**

- Youba Sokona on Climate Change TV, SBSTA 34, Bonn

### NEWS and EVENTS

#### IPCC launches Special Report on Extreme Weather Events

The IPCC released its Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX) on 28 March. The report assesses the evidence that climate change has led to changes in climate extremes and the extent to which policies to avoid prepare for, respond to and recover from the risks of disaster can reduce the impact of such events. Please click [here](#) for an IPCC press release on the report, and [here](#) for the report itself.

[Recording](#) of the SREX press conference on 28 March

SREX outreach events - [Media Advisory](#) **New**

### IPCC 35<sup>th</sup> Plenary Session

6-9 June 2012, Geneva, Switzerland

**Documents**

- [Doc. 2: Programme & Budget](#)

Phone: +41-22-730-8208 /84/84  
Email: IPCC-Seo@wmo.int

Copyright 2012  
Scams notice  
Disclaimer

 [Share](#) |    



Quels mécanismes évolutifs  
possibles pour les arbres  
forestiers ?

# Les solutions pour une adaptation aux futurs climats

## 1- Partir :

migrer/coloniser de nouveaux habitats plus favorables

## 2- Rester :

- s'acclimater en modifiant son phénotype dans le nouvel environnement subi (plasticité phénotypique)

*Pas de changement des fréquences alléliques*

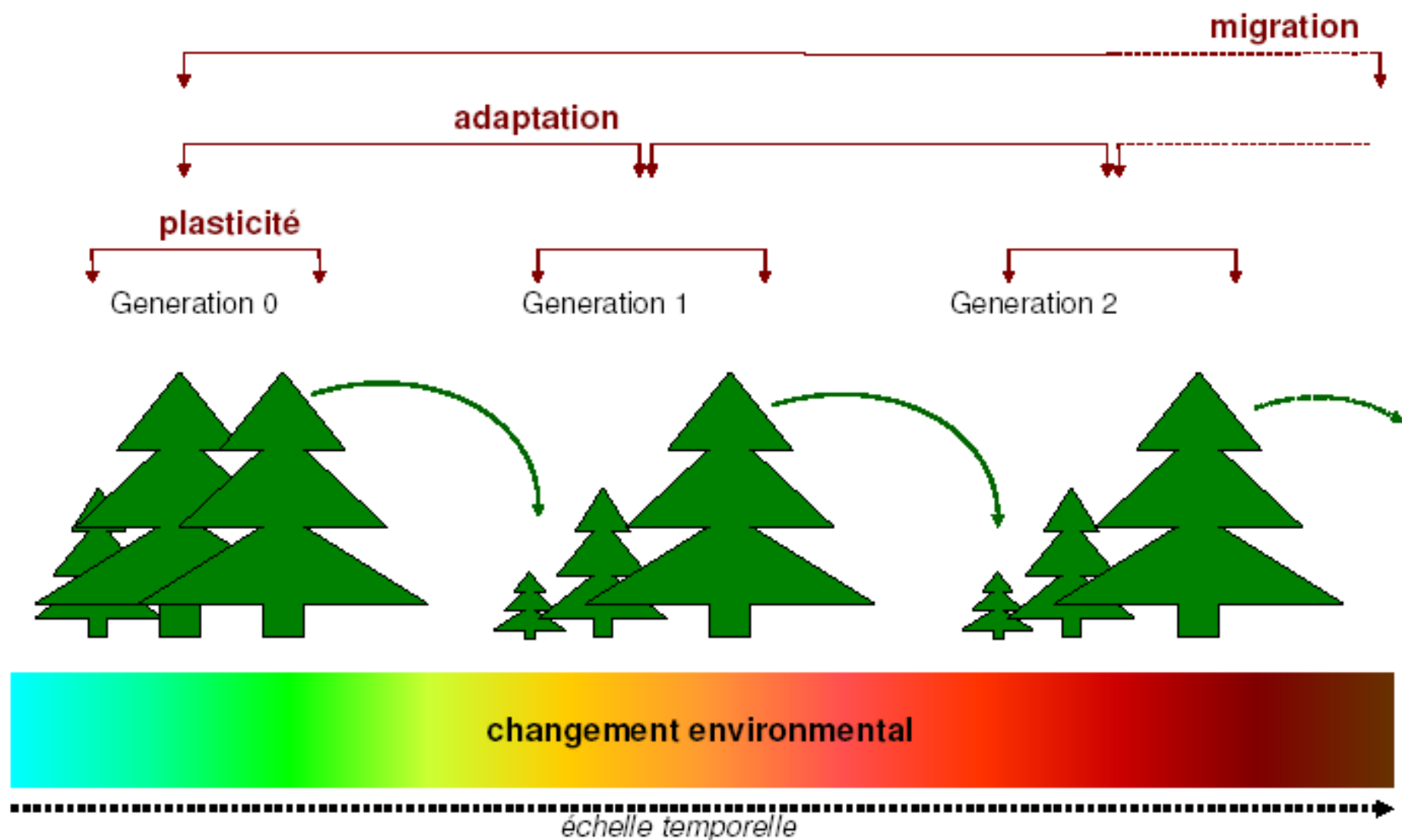
- Évoluer grâce à la sélection naturelle et retenir les individus les mieux adaptés

*Modification significative des fréquences alléliques  
(recherche de signature de sélection dans les gènes)*

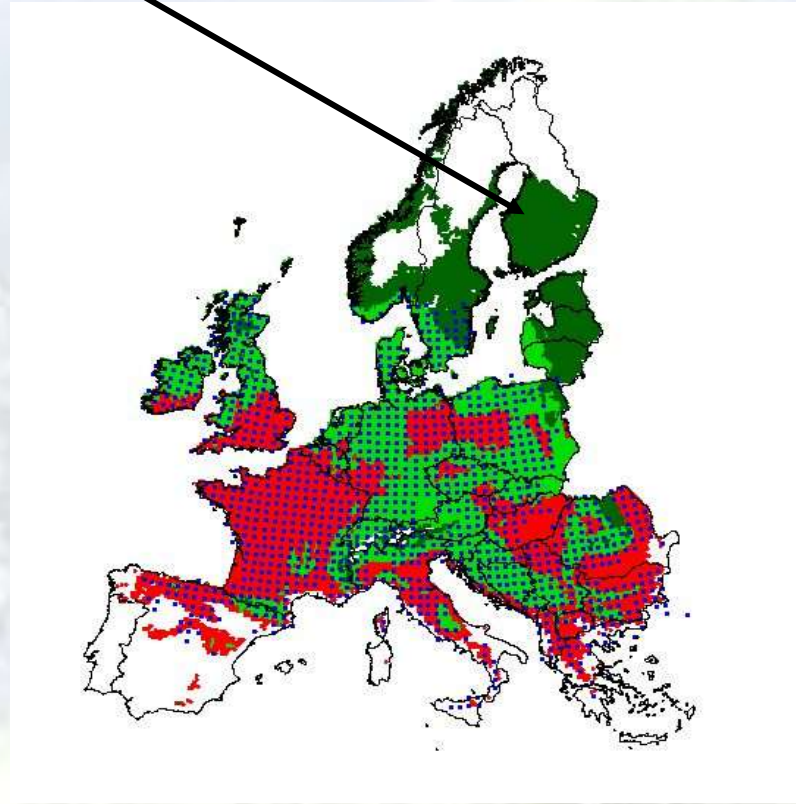
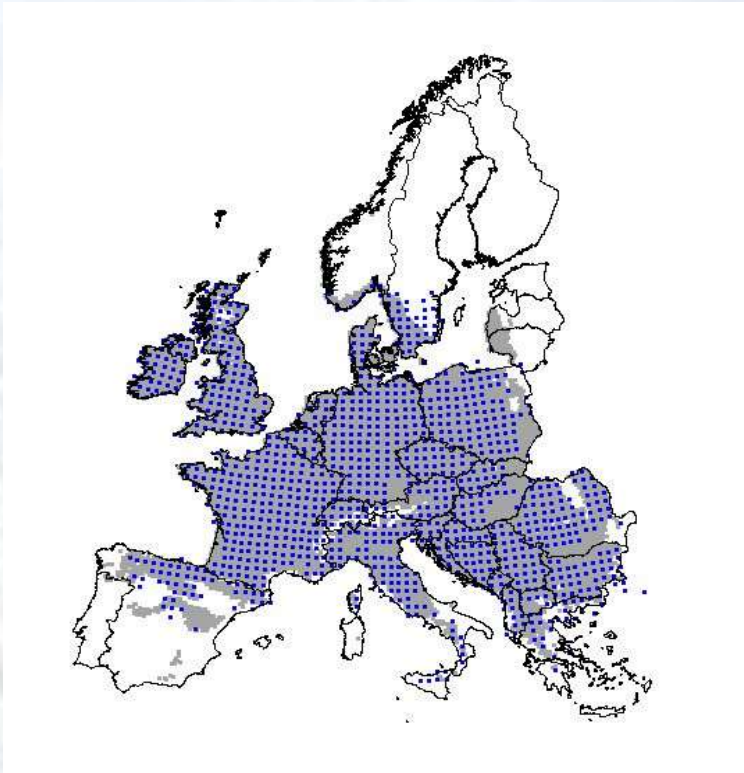
## 3- Disparaître:

Extinction de populations locales

*Temps changement climatique ~ temps d'une génération ~ temps de l'action à son effet*



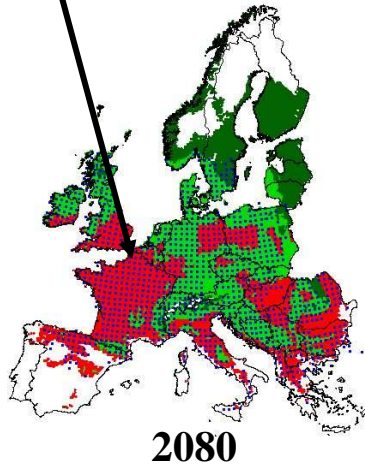
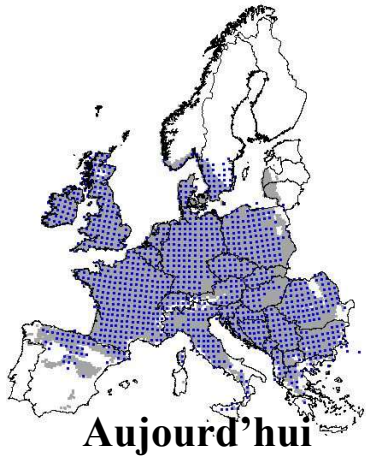
**Que se passera-t-il dans la partie nord de l'aire?**



**MIGRATION ? COMPETITION AVEC LES ESPECES  
PRESENTES ?**

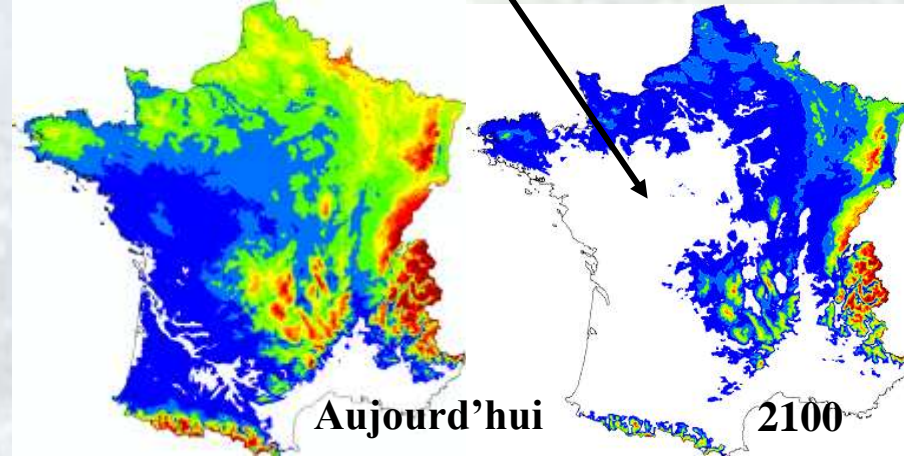
**DEPLACEMENT DE 100 A 500 KM DE LA LIMITE DE  
L'ENVELOPPE BIOCLIMATIQUE**

# Que se passera-t-il dans les parties centrales de l'aire



*Quercus petraea* - BIOMOD

Thuiller (2003)



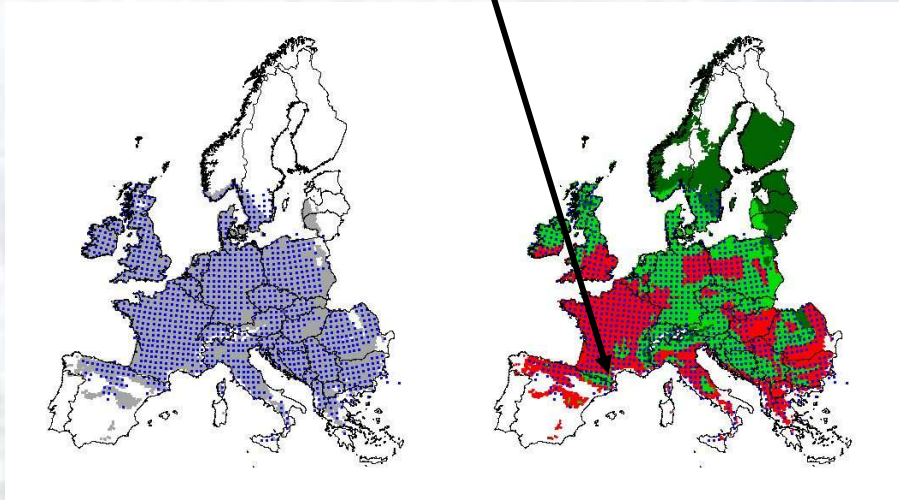
*Fagus sylvatica* - Nancy NBM

Badeau et al (2005)

## DEPERISSEMENT ? ADAPTATION ?

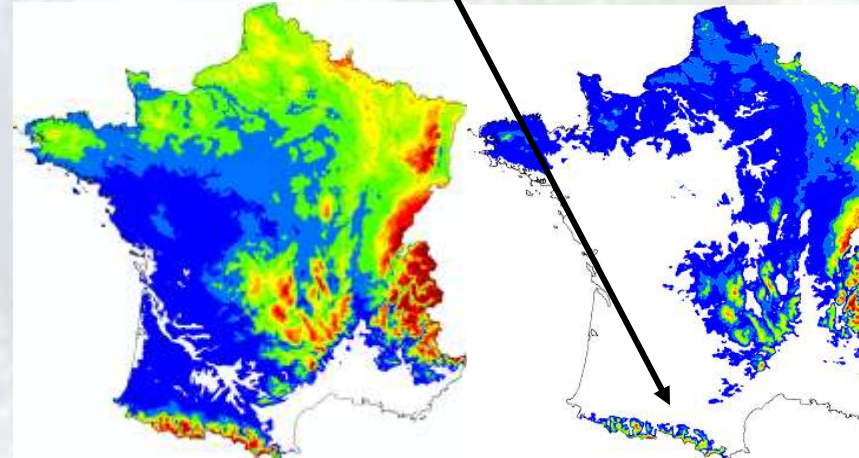
DEPLACEMENT DE **100 A 500 KM** DE LA LIMITE DE L'ENVELOPPE BIOCLIMATIQUE

# Que se passera-t-il au Sud de l'aire ?



*Quercus petraea* - BIOMOD

Thuiller (2003)



*Fagus sylvatica* - Nancy NBM

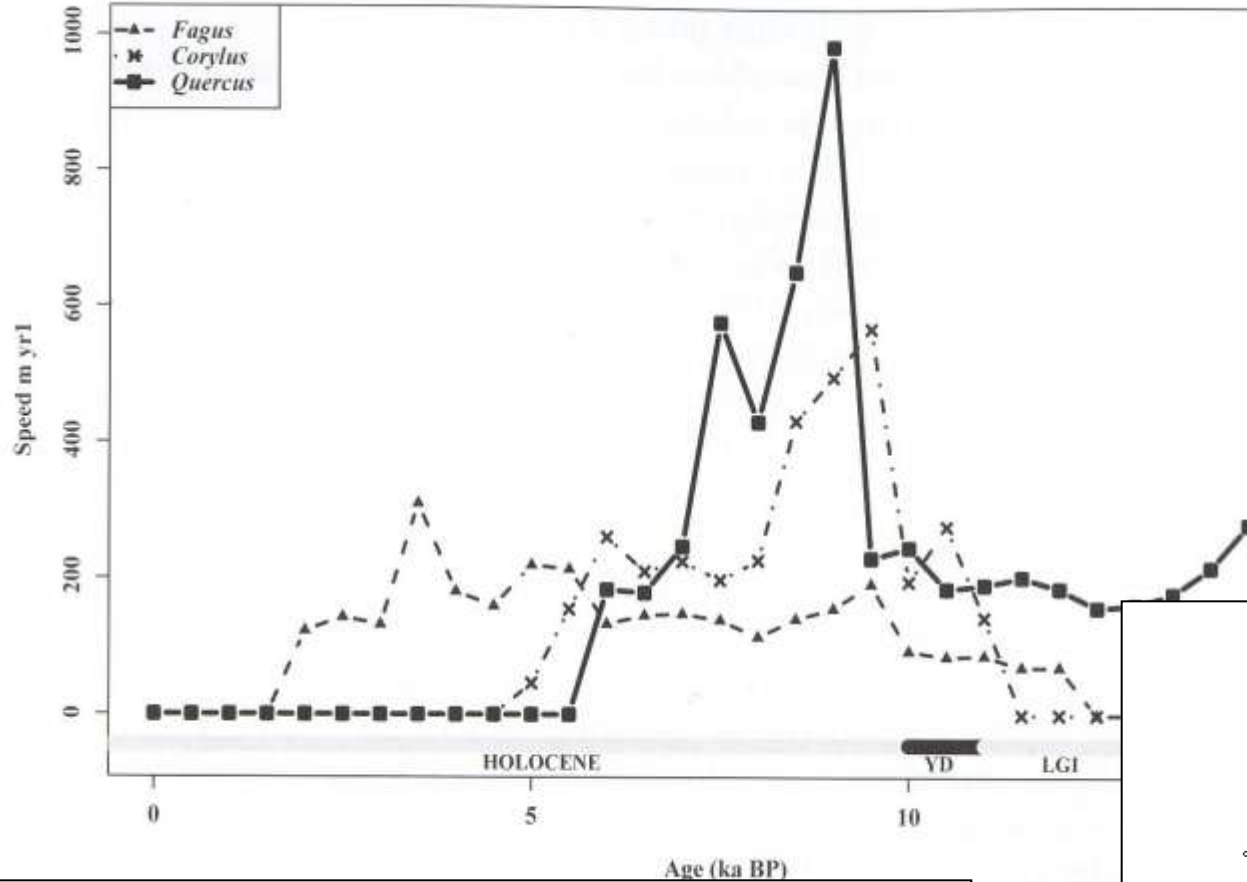
Badeau et al (2005)

***DEPERISSEMENT ? DIFFERENCIATION GENETIQUE ?***

REGIONS BIOCLIMATIQUEMENT EQUIVALENTES  
MAINTENUES **ISOLEES EN ALTITUDE**



# Migration: les leçons du passé

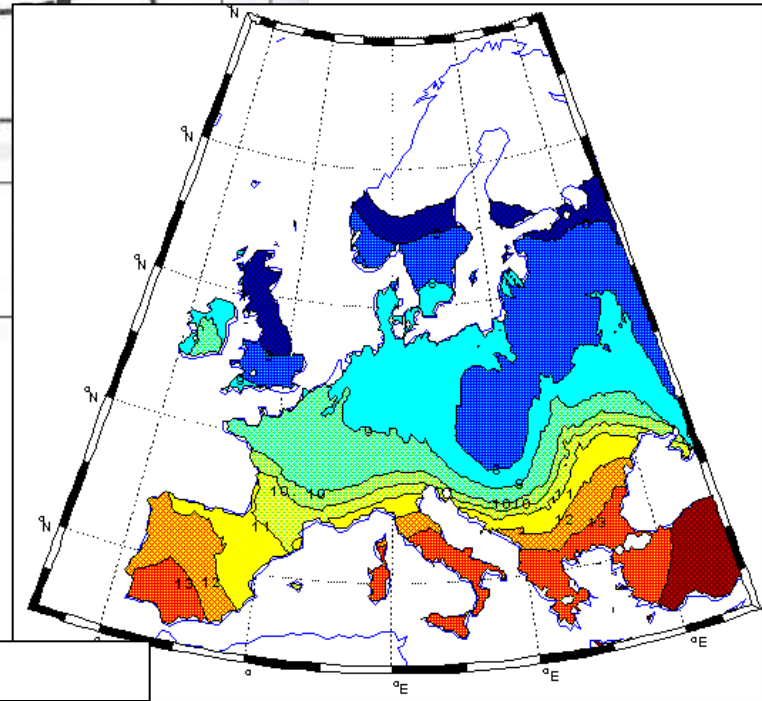


Carte isochrone des pollens de chêne

Brewer et al., 2005 *Botanical Journal of Scotland* 57: 41-57

20 à 50 Km en 100 ans

100 à 500 Km en 100 ans



Brewer et al., 2002 *Forest Ecology & Management* 156: 27-48

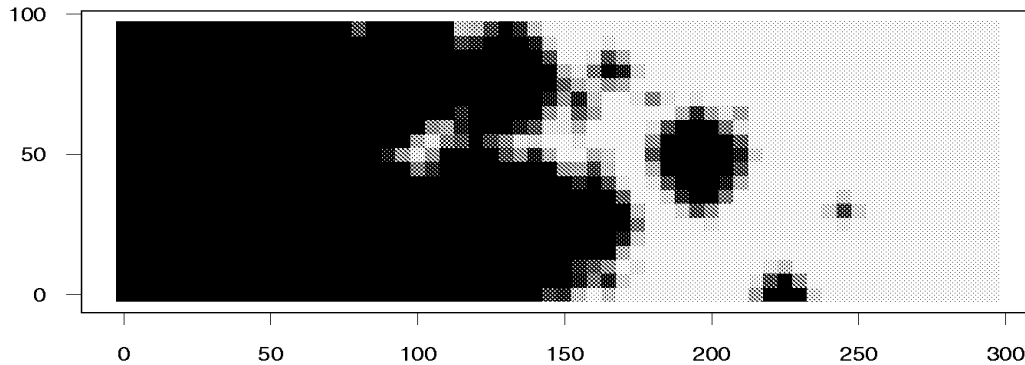
# Migration

Espèce		Vitesse recolonisation (m/an)		Distance de dispersion (km/génération)	Type de dispersion	Type biologique des graines
		Grande Bretagne	Europe			
<i>Betula</i>	Bouleau	250	>2000	2,5	vent	Graine ailée
<i>Corylus</i>	Noisetier	500	1500	7,5	animaux	Noix
<i>Ulmus</i>	Orme	550 (100 en limite nord)	500-1000	8	vent	Samare
<i>Quercus</i>	Chêne	350-500 (50 en limite nord)	150 - 500	7 - 10	animaux	Glands
<i>Pinus</i>	Pin	Angleterre: 100 – 700 Ecosse : 150 Irlande: 150 - 200	1500	1 – 7 1,5 1,5 - 2	vent	Graine ailée
<i>Alnus</i>	Aulne	500 – 650 (50-100 limite nord)	500 - 2000	5 - 6	vent	Graine ailée
<i>Tilia</i>	Tilleul	450 – 500 (50 – 100 limite nord)	300 - 500	10	vent	Graine ailée
<i>Fraxinus</i>	Frêne	50 - 200	200 - 500	1 - 3	vent	Samare
<i>Fagus</i>	Hêtre	100 - 200	200 - 300	4 - 8	animaux	noix

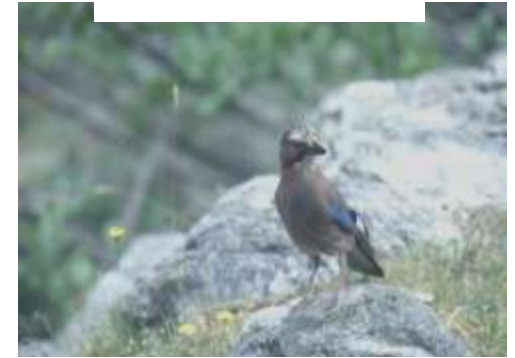
# Migration

## EFFICACITE DES MECANISMES DE DISPERSION

-Dispersion par « saut de puces »



## Le Geai

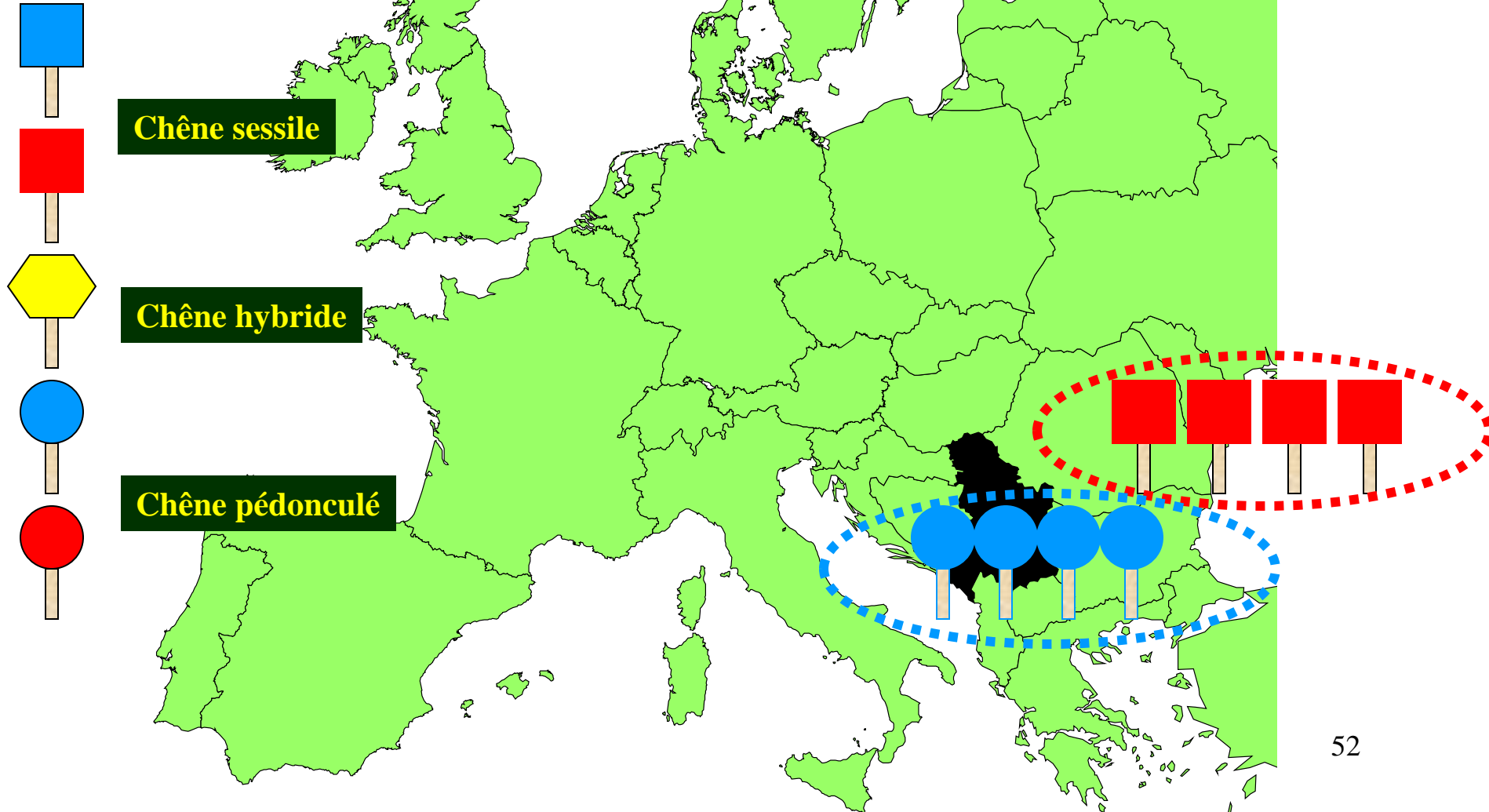


Un grand reboiseur  
**5.000 à 10.000 glands/ an**  
**2.500 à 5.000 plants vivants.....**

-Migration « par pollen » via hybridation par un espèce relais

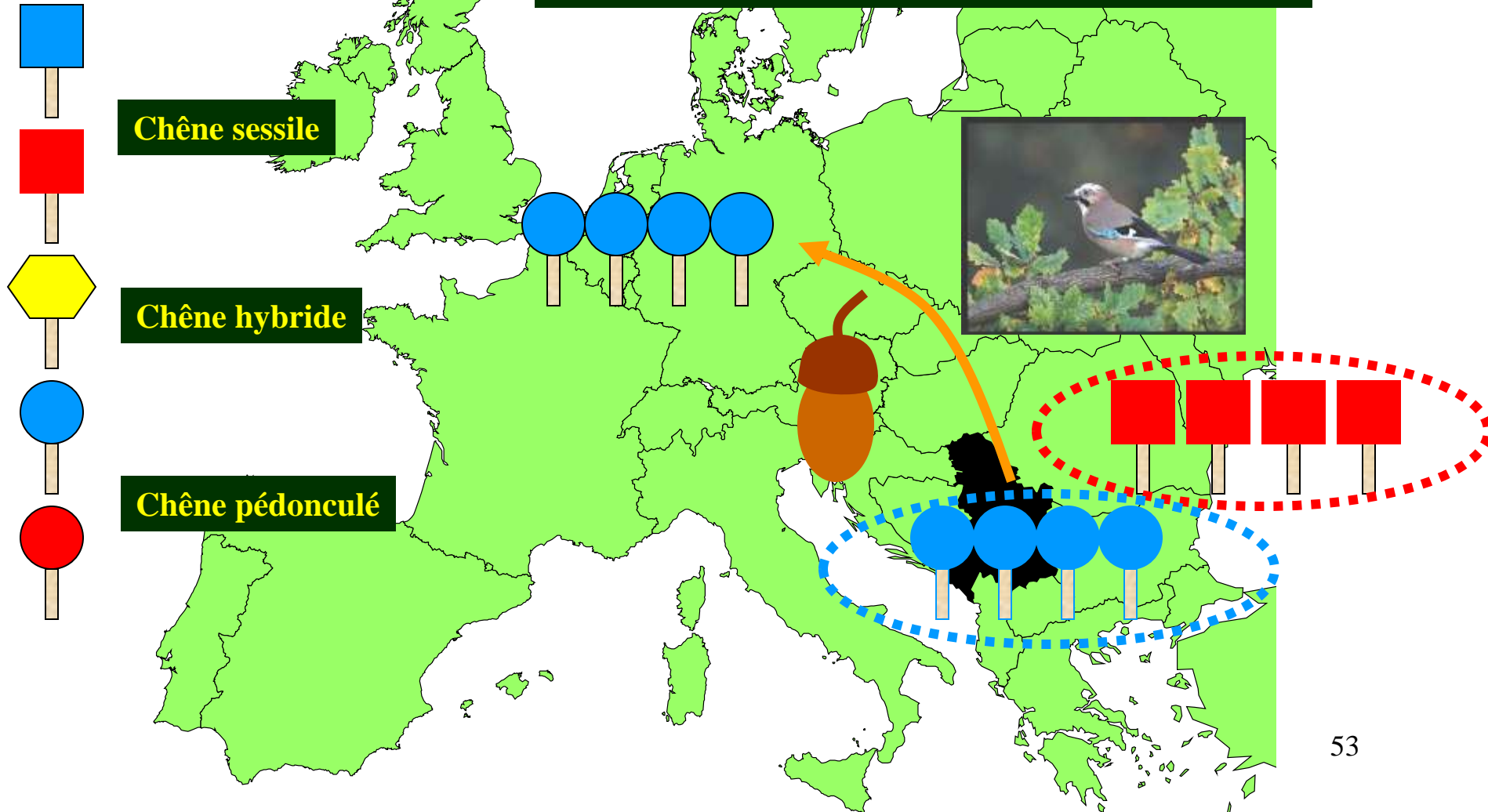
# ROLE DES ESPECES DANS LA RECOLONISATION POST-GLACIAIRE

## Etape 1 : les chênes sont dans les refuges



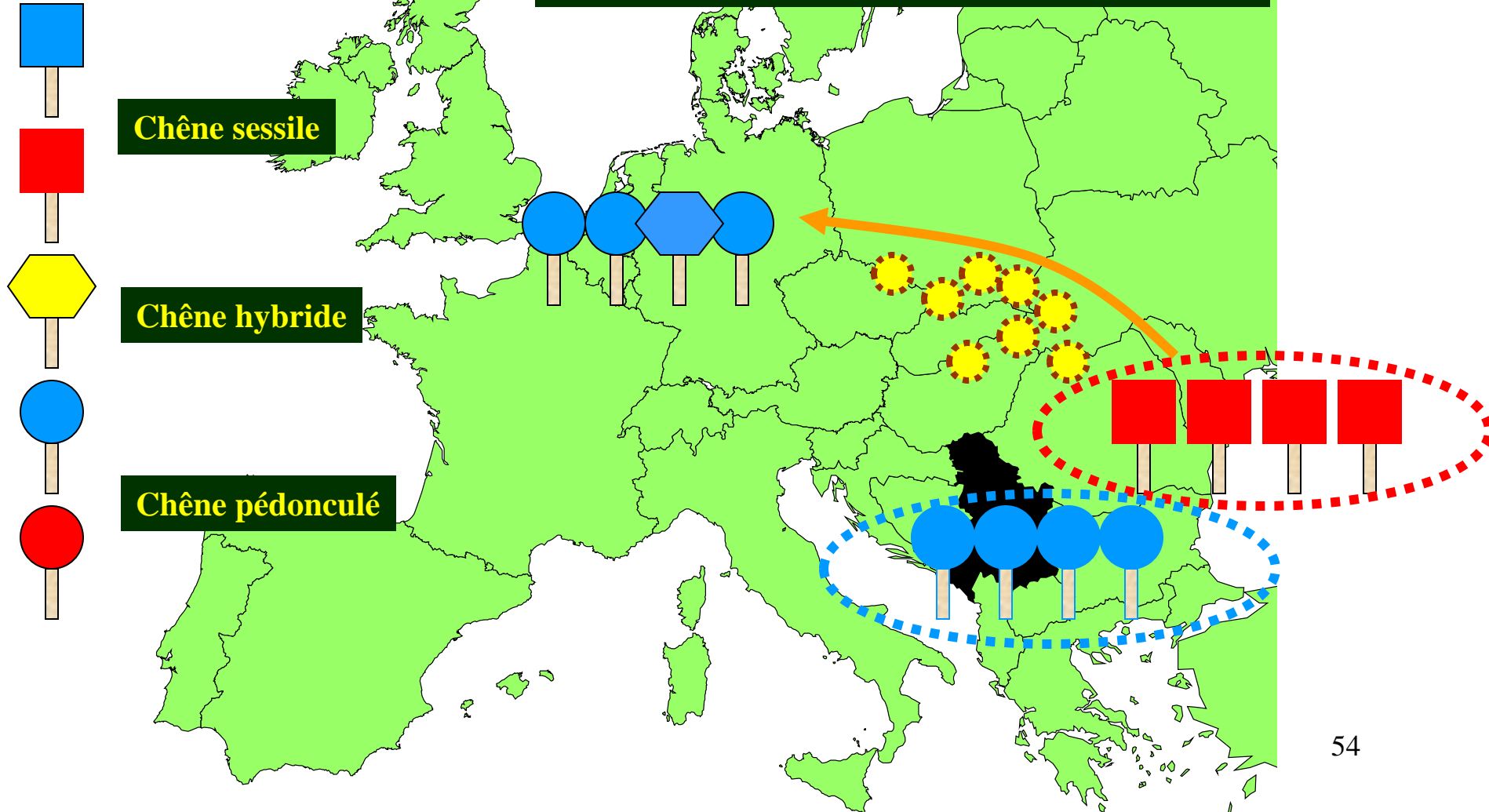
# ROLE DES ESPECES DANS LA RECOLONISATION POST-GLACIAIRE

## Etape 2 : le pédonculé recolonise l'Europe

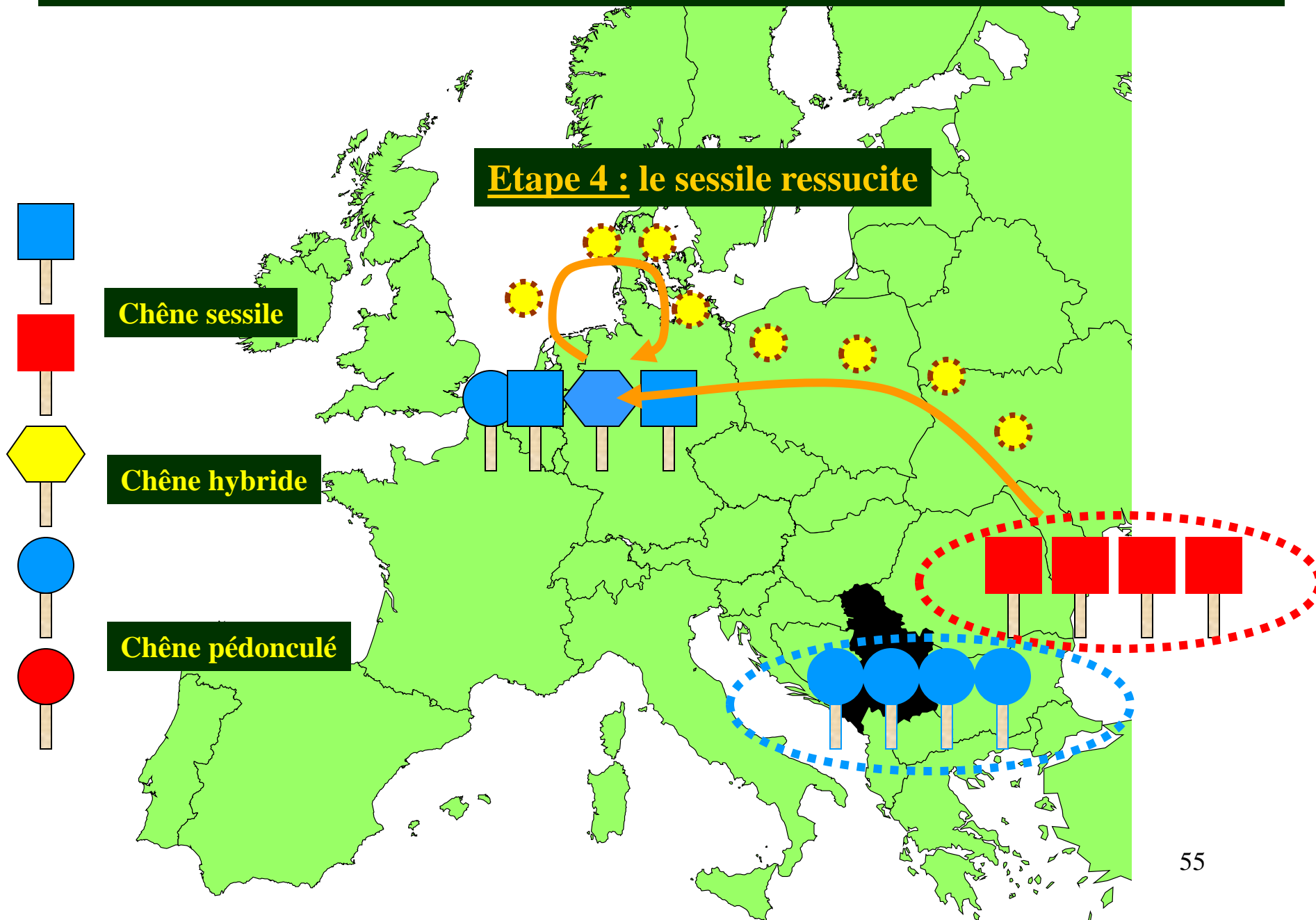


# ROLE DES ESPECES DANS LA RECOLONISATION POST-GLACIAIRE

## Etape 3 : le sessile colonise le pédonculé

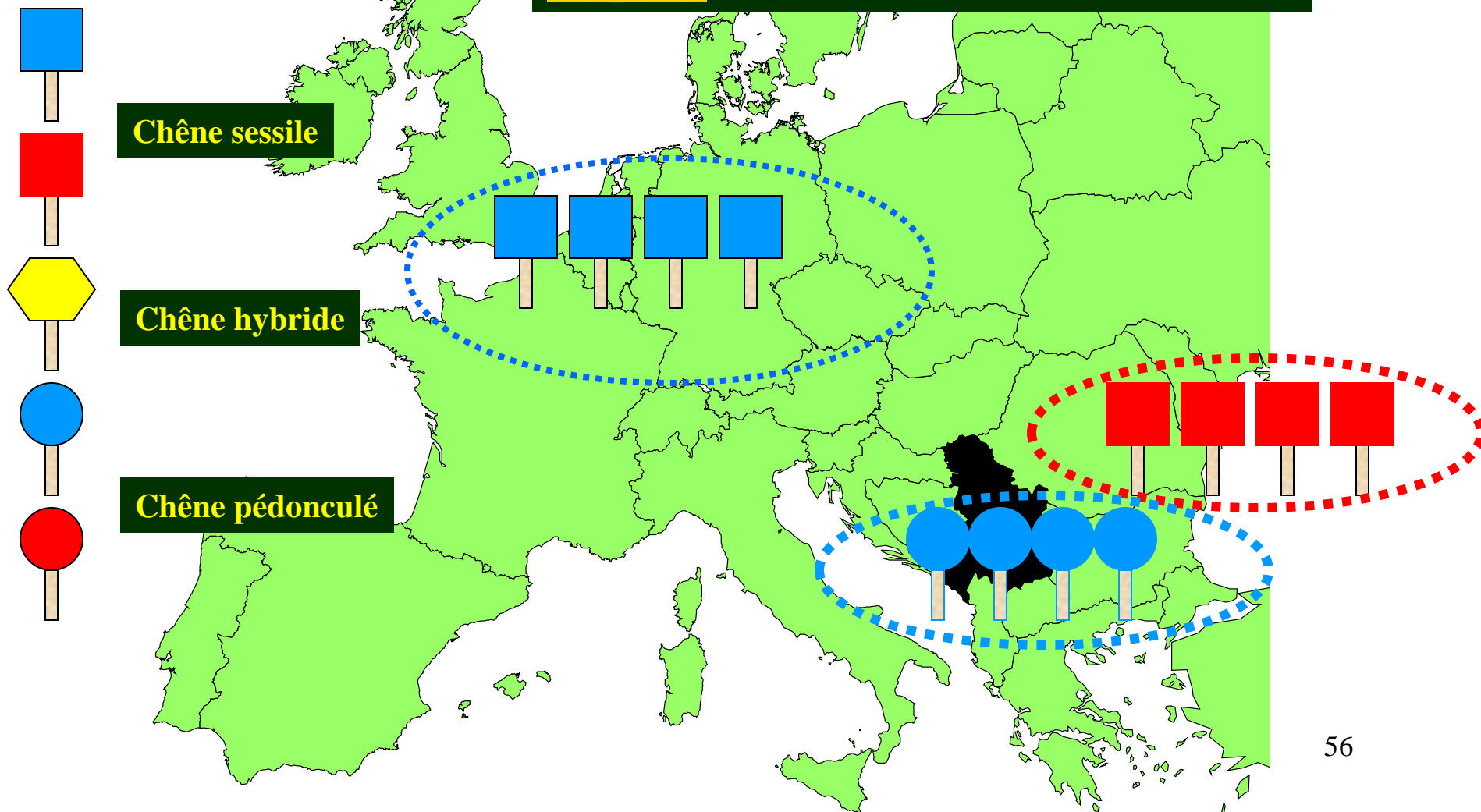


# ROLE DES ESPECES DANS LA RECOLONISATION POST-GLACIAIRE



# ROLE DES ESPECES DANS LA RECOLONISATION POST-GLACIAIRE

## Etape 5 : le sessile s'installe définitivement



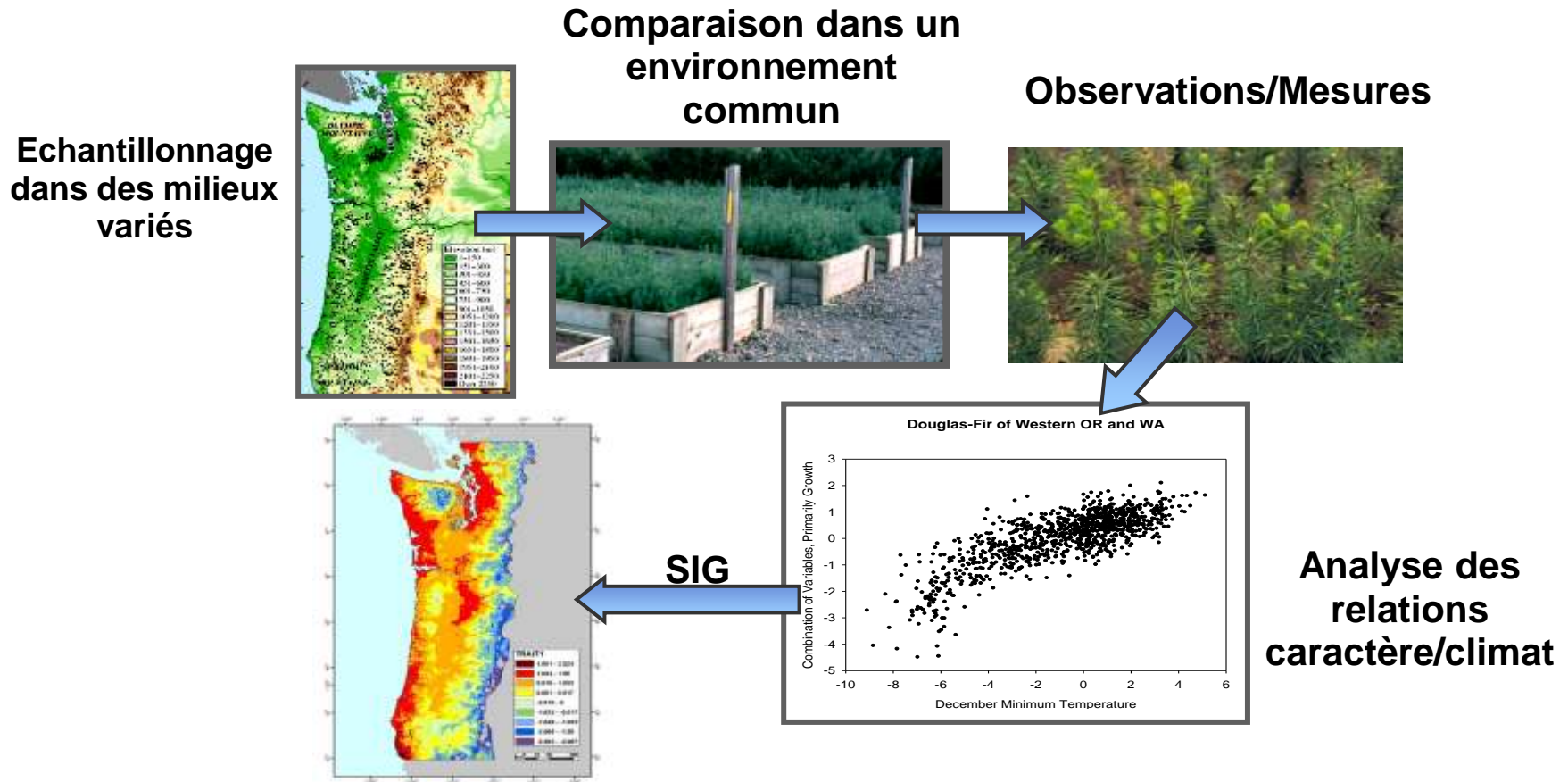


# Adaptation

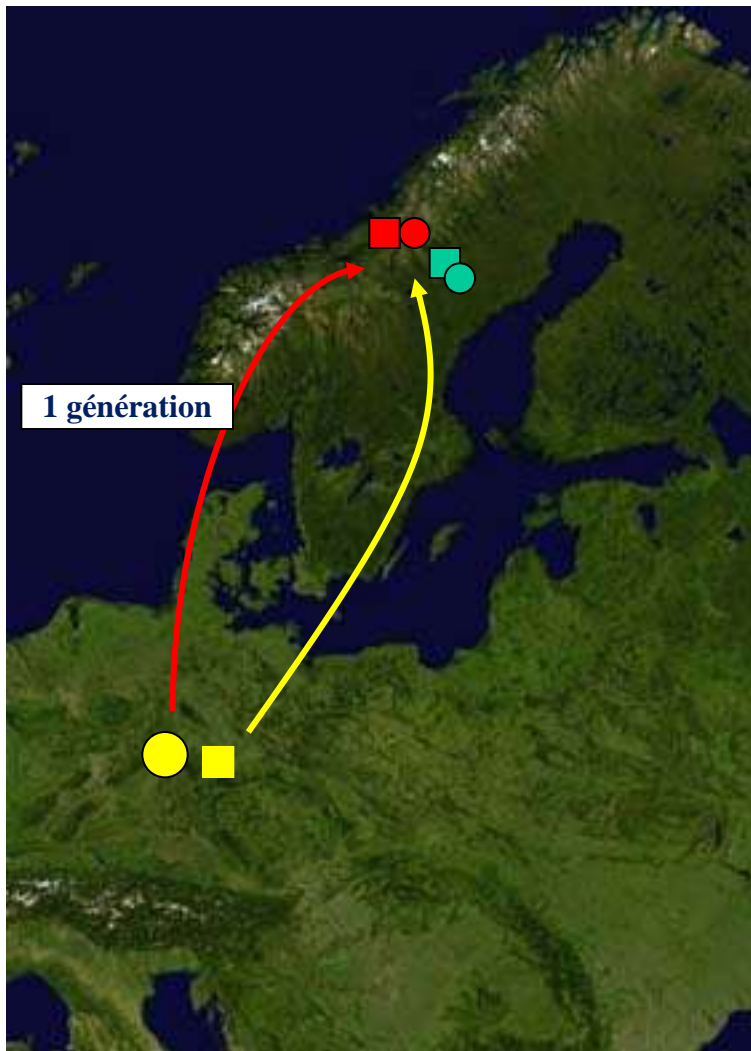
## Comment la mettre en évidence ?

Tester les corrélations entre les performances pour un caractère donné et les paramètres décrivant les environnements d'origine

*Exemple espèce exotique : Douglas*

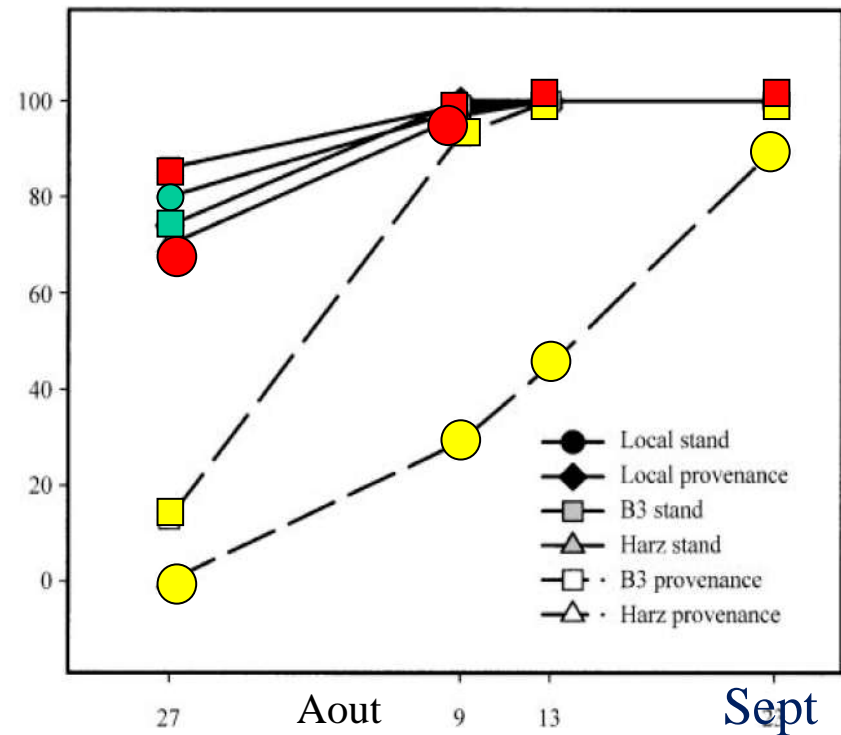


# Adaptation locale: elle peut être rapide !



Epicéa commun

% plants avec  
bourgeons



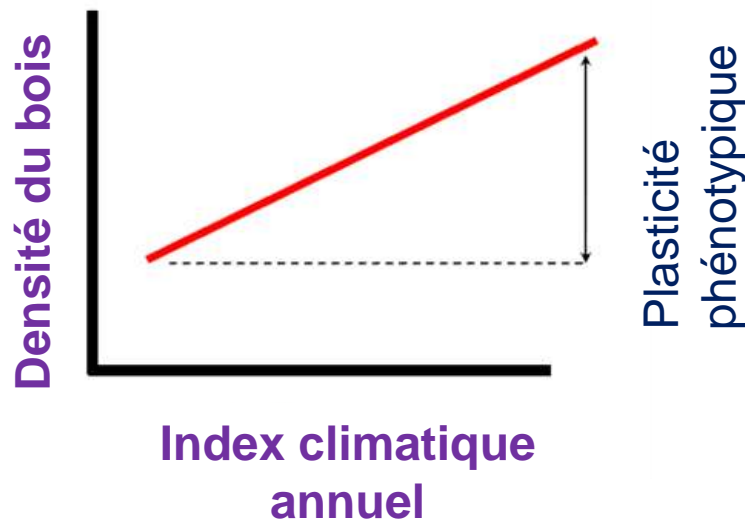
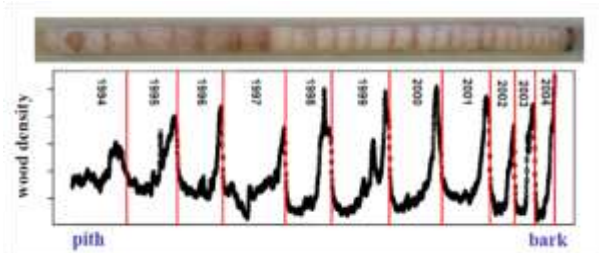
Skroppa & Kohmann, 1997 Forest Genetics 4:171-177

# Plasticité phénotypique

= Capacité d'un génotype à produire différents phénotypes en fonction de l'environnement

Exemple : Les arbres modifient leur phénologie et leur croissance en réponse aux changements d'environnements (débourrement, arrêt de croissance, floraison, surface foliaire, transpiration,...)

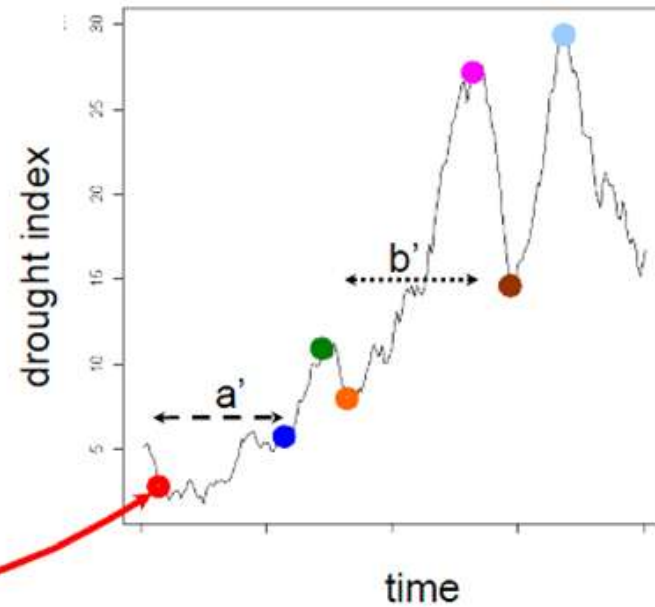
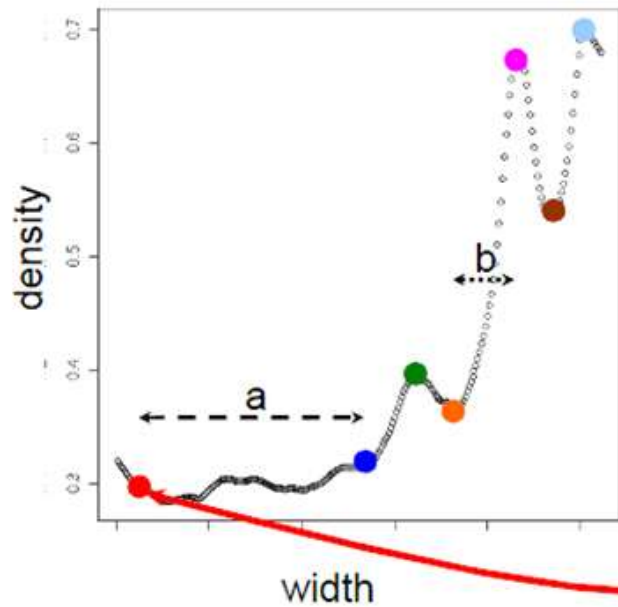
Elle est évaluée à l'aide d'une norme de réaction



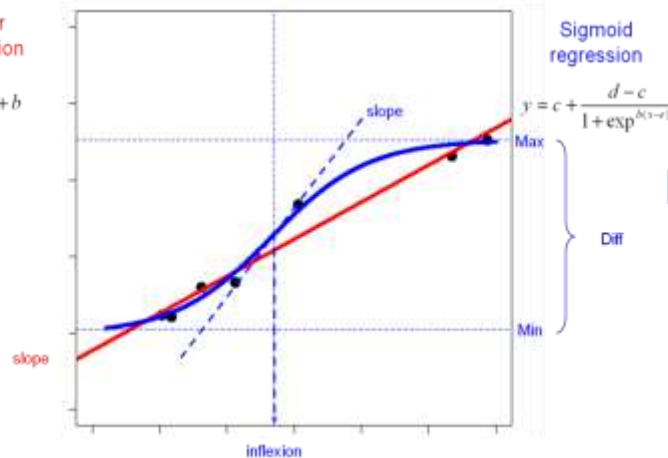
# Plasticité phénotypique

Dendroplasticité

## Méthode des points de rupture



Linear regression  
 $y = a \times x + b$



Les paramètres de la courbes servent à décrire la plasticité observée

Chez le pin maritime, une variabilité génétique pour ces paramètres a été mise en évidence

# CONCLUSIONS

- **MIGRATION LIMITEE AU NORD**

Migration Naturelle limitée

Compétition entre espèces

- **ADAPTATION LOCALE AU CENTRE**

Favorisée par les flux de gènes

Continuité ou fragmentation de l'aire

- **ADAPTATION LOCALE AU SUD ??**



# Comment peut-on aider les arbres forestiers à s'adapter aux climats futurs ?

1. Déplacer les populations dans un environnement favorable dans les 50 à 100 prochaines années (migration assistée)  
..... *Qqs essais , beaucoup d'hésitations*
2. Promouvoir une migration naturelle et des flux de gènes entre populations adjacentes: *éviter la fragmentation des populations et maintenir des corridors*

Mais,

- la dispersion de graines peut être insuffisante
- la dispersion du pollen sera elle aussi affectée par l'évolution des températures



# Comment peut-on aider les arbres forestiers à s'adapter aux climats futurs ?

1. Déplacer les populations dans un environnement favorable dans les 50 à 100 prochaines années (migration assistée)
2. Promouvoir une migration naturelle et des flux de gènes entre populations adjacentes
3. Augmenter la diversité génétique:
  - installer des mélanges de populations sur des paysages assez grands
  - maintenir grâce à une gestion raisonnée la diversité au sein des populations

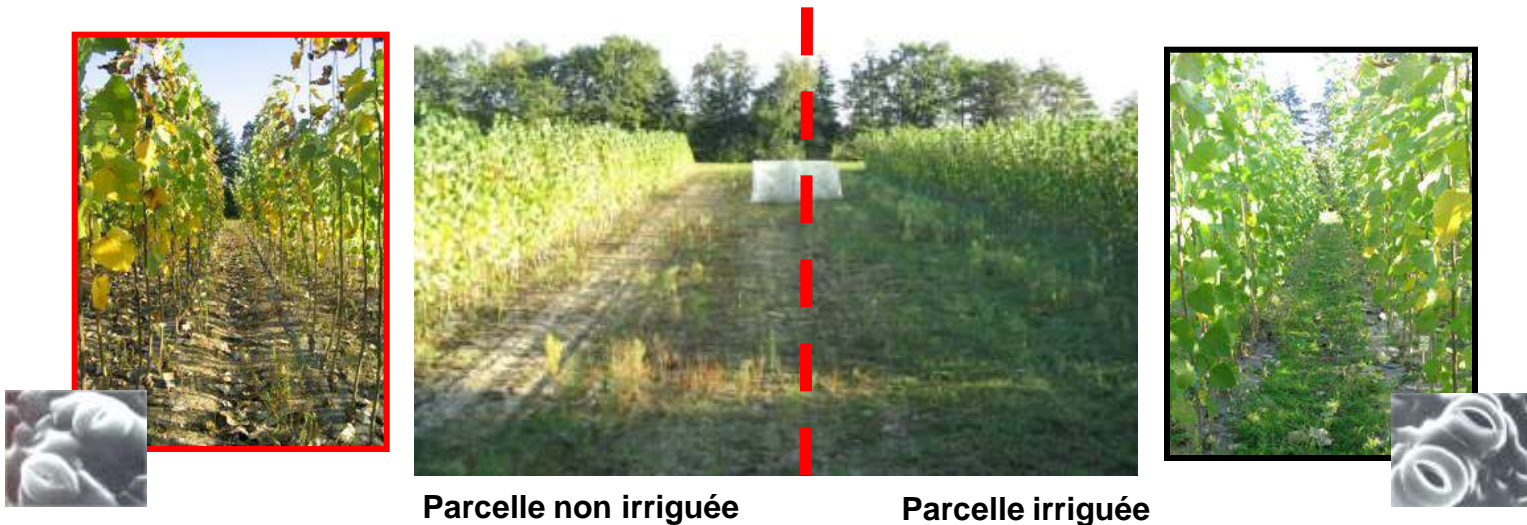


# Comment peut-on aider les arbres forestiers à s'adapter aux climats futurs ?

1. Déplacer les populations dans un environnement favorable dans les 50 à 100 prochaines années (migration assistée)
2. Promouvoir une migration naturelle et des flux de gènes entre populations adjacentes
3. Augmenter la diversité génétique
4. Promouvoir la sélection de nouvelles variétés sélectionnées sur des caractères adaptatifs

# Préparer des variétés forestières pour un contexte climatique (et économique) en évolution

- 1- Définition de critères de sélection liés à plasticité / adaptation
  - Dissection de caractères d'adaptation/plasticité dans un contexte environnemental changeant :
    - Survie : résistance / tolérance (pathogènes, temp. extrêmes, sécheresse, saison de veg.)
    - Prod. biomasse : allocation du carbone, efficacité d'utilisation de l'eau
    - Qualité du matériau bois : Lignine/cellulose, durabilité, ..
  - Liaisons entre caractères (notamment prod. biomasse vs autre car.)
  - Compromis de sélection multi caractère en fonction des contraintes environnementales (latitude, climat, sol)



# Préparer des variétés forestières pour un contexte climatique (et économique) en évolution

## •2- Développer des stratégies d'amélioration pour des objectifs à court et long termes

- Recombinaison, évaluation, sélection
- Structuration optimale des populations pour des stratégies d'amélioration à long terme
- Méthodes de diffusion (espace / temps) de variétés associant optimisation du gain économique et contrôle de l'impact environnemental

# Comment peut-on aider les arbres forestiers à s'adapter aux climats futurs ?

1. Déplacer les populations dans un environnement favorable dans les 50 à 100 prochaines années (migration assistée)
2. Promouvoir une migration naturelle et des flux de gènes entre populations adjacentes
3. Augmenter la diversité génétique
4. Promouvoir la sélection de nouvelles variétés sélectionnées sur des caractères adaptatifs
5. Raisonner la conservation des ressources génétiques

# Un engagement national



Commission  
Ressources  
Génétiques  
Forestières



UNE CHARTE  
POUR LA CONSERVATION  
DES RESSOURCES GÉNÉTIQUES  
DES ARBRES FORESTIERS EN FRANCE

# Comment gérer les ressources génétiques naturelles originales ?



Les niveaux actuels de  
ne sont ni des états stables,  
ni idéaux,  
mais des valeurs instantanées  
résultant de processus dynamiques

*taille de population*  
*diversité génétique*  
*adaptation*

=> **Gérer l'évolution** de la ressource  
(gestion dynamique)

=> conservation statique en cas d'urgence

# Historique au niveau national

Réseau  
Hêtre

Note service  
ONF

- Premières réflexions début années 1980
- Groupe de travail dès 1986

Réseau  
Sapin

Circulaire  
DERF

Création  
CRGF

Réseau  
Chêne  
sessile

Charte  
Nationale  
RGF

Projets  
réseaux

1986

1987

1989

1991

1992

1992

1998

200...

**Pin maritime** (UC sélectionnées en partie) ; **Epicéa** (liste arrêtée début 2007) ; **Pin sylvestre** (démarrage prospections 2007)

### La conservation *in situ* vise :

- à **préserver le potentiel d'adaptation** des espèces ou des populations **sur le long terme**,
- tout en les **laissant évoluer dans leur milieu**, pour répondre aux **évolutions futures** de leur environnement.

Ce sont les **générations futures** plutôt que les arbres en place qui importent.

### Objectifs :

- assurer la réalisation d'une **régénération par voie sexuée en quantité suffisante** pour permettre le renouvellement des unités du réseau de conservation ;
- assurer une **diversité et une structuration génétiques de cette régénération** lui permettant d'assurer son propre renouvellement ;
- **maintenir les caractéristiques** écologiques et génétiques des unités du réseau de conservation **au fil des générations**



*Merci de votre attention ....*

PHILADELPHIA MUSEUM OF ART



MONET

