

Évolution de la biodiversité

Raphaël Boulay

Département d'Aménagement

Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte

Objectifs

- 1) Les grands principes de la biologie évolutive
- 2) Les bases de génétique des populations
- 3) Les clés permettant de comprendre l'évolution de la biodiversité et les enjeux liés au changement global

- 1) Qu'est ce que l'Évolution?
 - a) Pourquoi étudier l'Évolution?
 - b) Brève histoire de la pensée évolutionniste
 - c) Preuves de l'évolution
- 2) La transmission génétique

**Évolution biologique : modification des caractères
des êtres vivants au cours des générations.**

Cette définition exclue:

- 1) Les modifications du monde abiotique



Évolution biologique : modification des caractères des êtres vivants au cours des générations.

Cette définition exclue:

- 1) Les modifications du monde abiotique
- 2) Les modifications au cours du développement (ontogénèse)



Évolution biologique : modification des caractères des êtres vivants au cours des générations.

Cette définition inclue:

- 1) La microévolution = phénomènes évolutifs ayant lieu dans les populations.
- 2) La macroévolution = phénomènes évolutifs à une échelle paléontologique et conduisant à la formation des espèces.

Pourquoi étudier l'Évolution?

Raison philosophique : D'où vient l'homme? Quelle est sa place dans la nature ? Quel est son future ?

=> Débat avec la religion et notamment le créationnisme



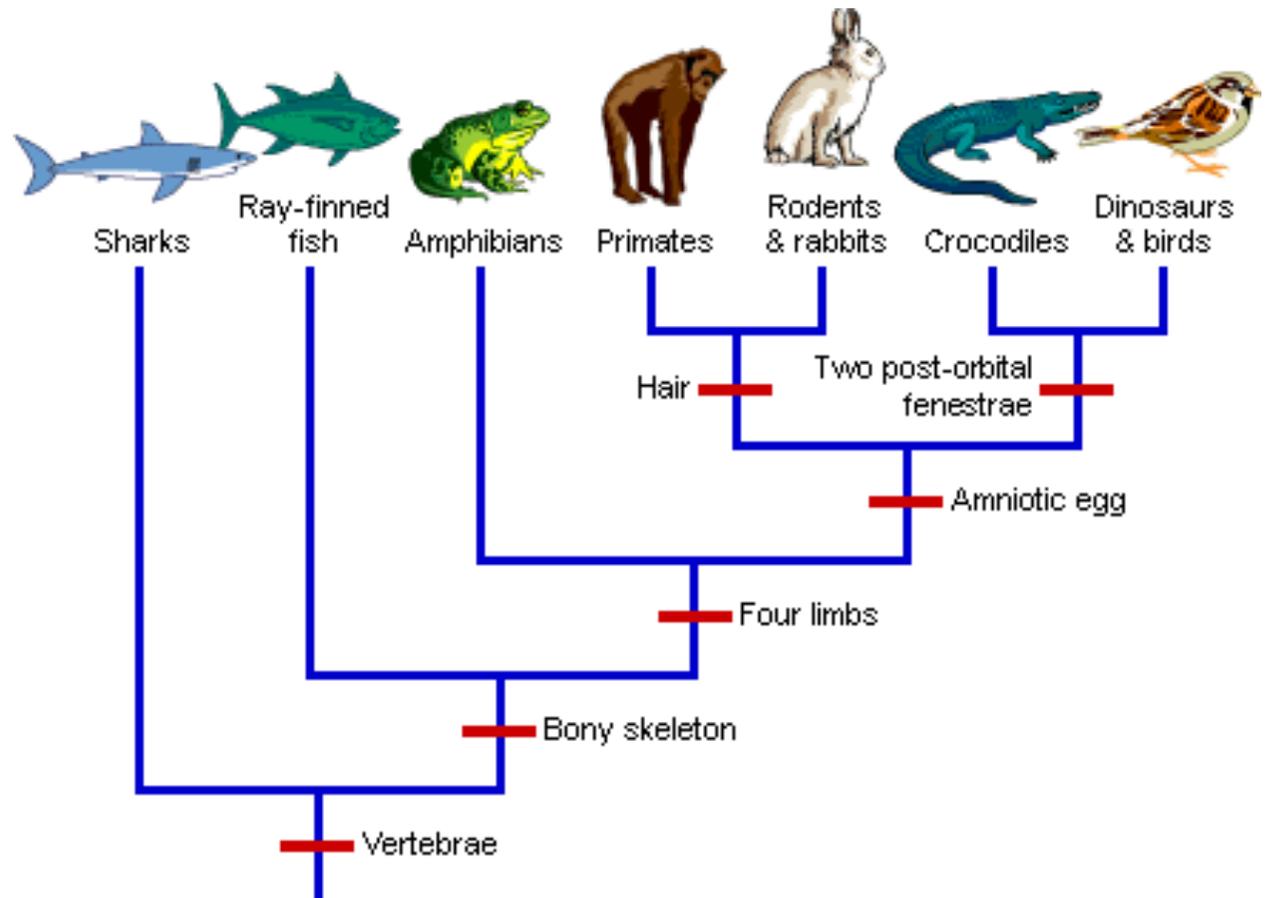
*« Nothing in biology makes sense but
in light of Evolution »*

(Theodosius Dobzhansky)

Pourquoi étudier l'Évolution?

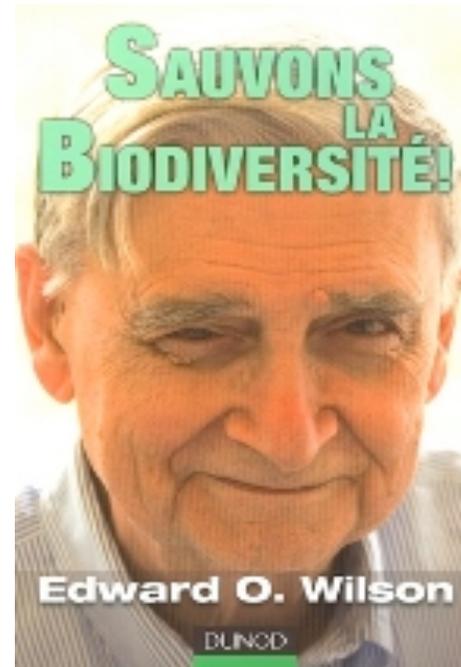
Raison biologique:

La nature n'est pas un musée.



Pourquoi étudier l'Évolution?

Biodiversité : Ensemble de la diversité du vivant



Ouvrage recommandé:

La diversité de la vie (E.O. Wilson)

Pourquoi étudier l'Évolution?

Biodiversité : Ensemble de la diversité du vivant



Gènes



Espèces



Ecosystèmes

Perte de biodiversité: menace pour la planète

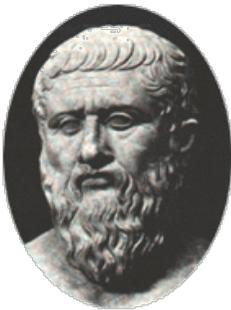
Comprendre le passé pour prédire l'avenir de la biodiversité



Intérêt en biomédecine:
évolution des virus
(HIV), résistance aux
antibiotiques...

La pensée évolutionniste

- Les philosophes Grecs:



Platon (424-348 av. JC): **Courant essentialiste** reconnaît les différentes espèces mais considère que le monde a toujours existé dans sa forme actuelle.



Aristote (384-322 av. JC) : Étude des animaux et *Scala Naturae*.



- Les religions monothéistes:



Dieu créa la Terre il y a 6000 ans telle que nous la connaissons aujourd'hui.

- Le 18ème siècle, les Lumières

Idée de progrès, avancement des connaissances et mise en cause partielle des dogmes religieux en Europe occidentale



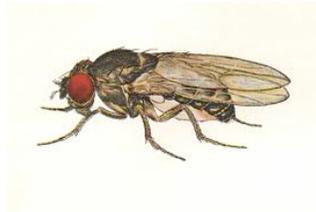
Carl von Linné (1707-1778) :

Nomenclature binomiale

Genre *espèce*



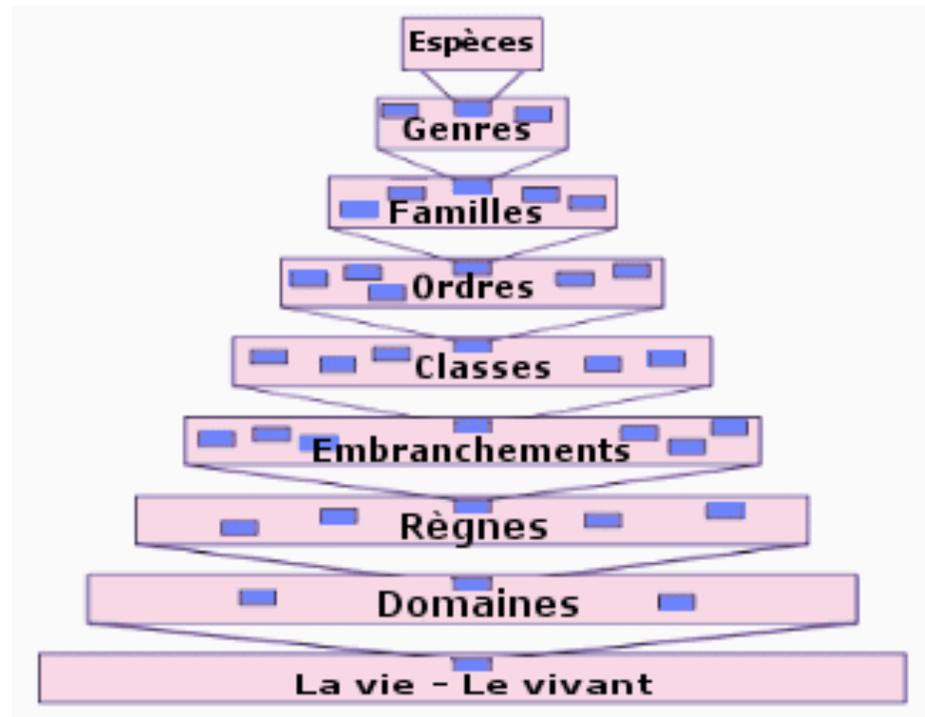
Drosophila melanogaster



Drosophila pseudoobscura

- Le 18ème siècle, les Lumières

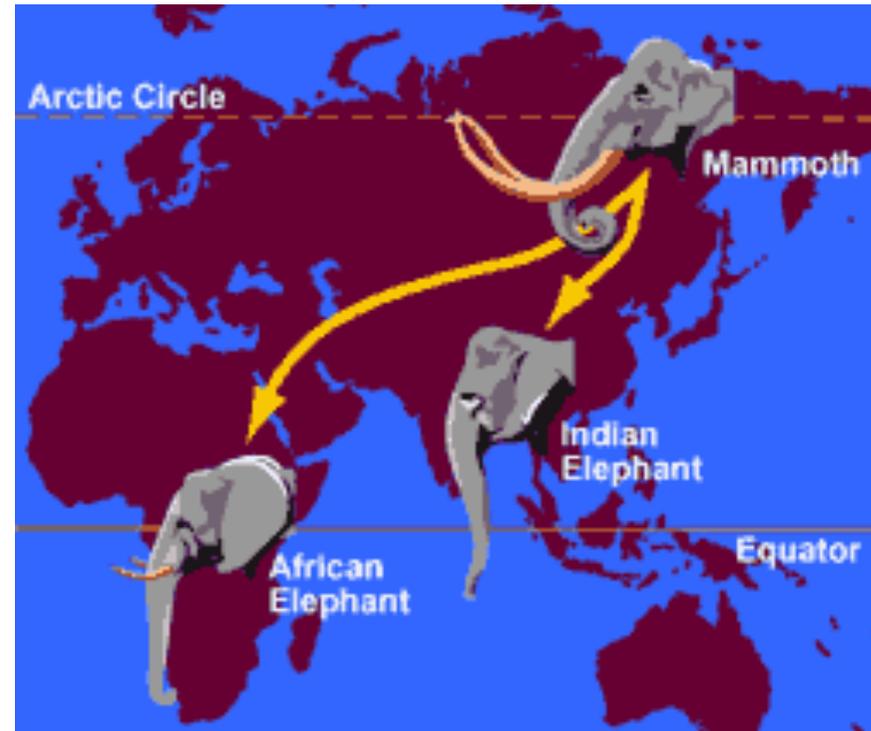
Idée de progrès, avancement des connaissances et mise en cause partielle des dogmes religieux en Europe occidentale



- Le 18ème siècle, les Lumières



Comte de Buffon (1707-1788) : conteste l'âge biblique de la Terre sur la base de fossiles



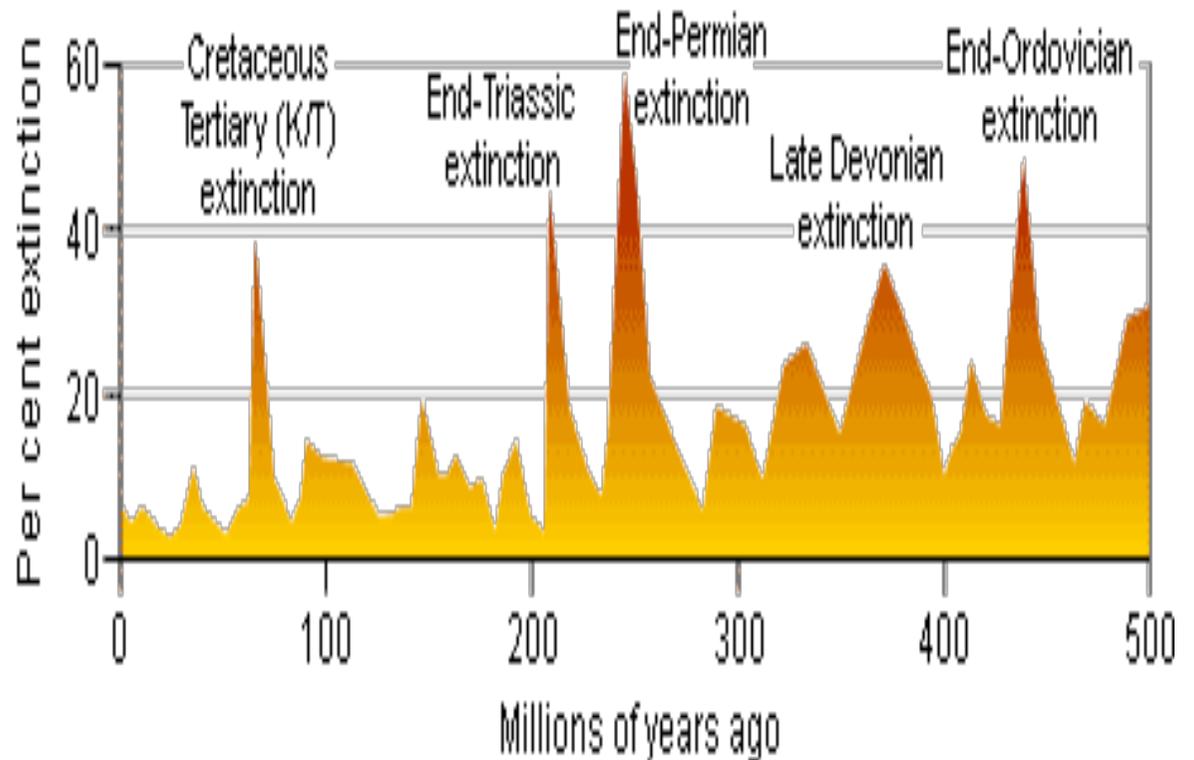
Suggère la transformation par migration

- Le 18ème siècle, les Lumières

Cuvier (1769-1832) : Paléontologue au Muséum de Paris



Certaines espèces disparaissent (extinction suite à des catastrophes => catastrophisme)



- Le 18ème siècle, les Lumières

Lamarck (1744-1829) : Naturaliste (Paris)



Toutes les espèces, y compris l'Homme, évoluent à partir d'ancêtres: L'Homme n'est plus à part dans l'évolution.



wrong



right

- Le 18ème siècle, les Lumières

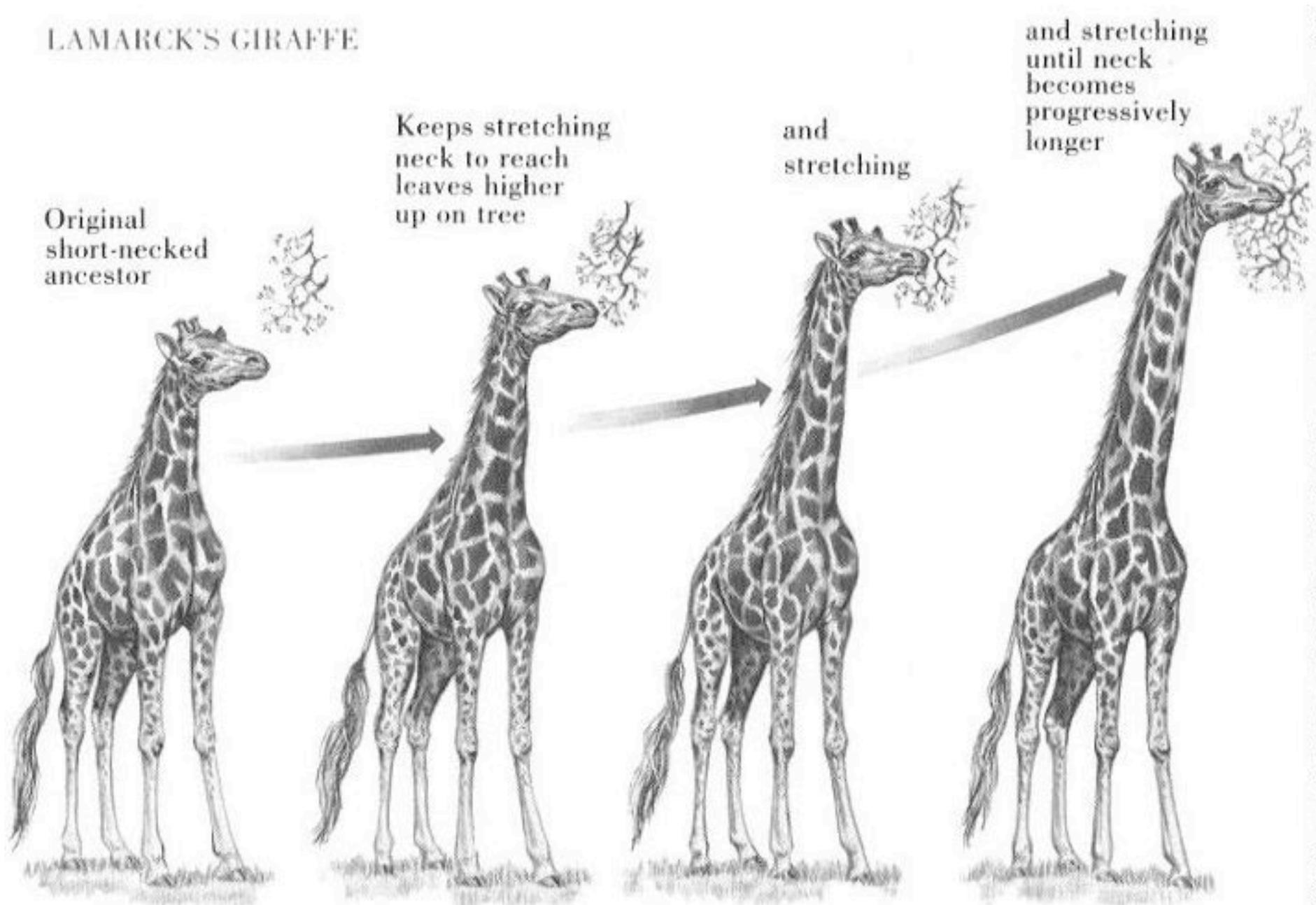
Lamarck (1744-1829) : Naturaliste (Paris)



Complexification des espèces

Première théorie de l'évolution basée sur l'hérédité des caractères acquis

LAMARCK'S GIRAFFE



Original short-necked ancestor

Keeps stretching neck to reach leaves higher up on tree

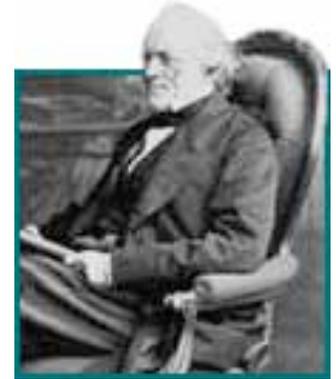
and stretching

and stretching until neck becomes progressively longer

Driven by inner "need"

- Le 18ème siècle, les Lumières

Lyell (1797-1875) : Géologue, Oxford



S'oppose au “catastrophisme” de Cuvier.

- 1) Les processus géologiques actuels sont ceux qui ont donné lieu à la géographie contemporaine
- 2) Ce sont des processus lents
- 3) La Terre est donc très vieille ce qui donne du temps à l'évolution des espèces.

- Charles Darwin (1809-1882)



1831-1836: Voyage autour du Monde sur le Beagle

- Les îles Galapagos et l'adaptation écologique
1000 km du continent
Peu de migrations => beaucoup d'espèces endémiques

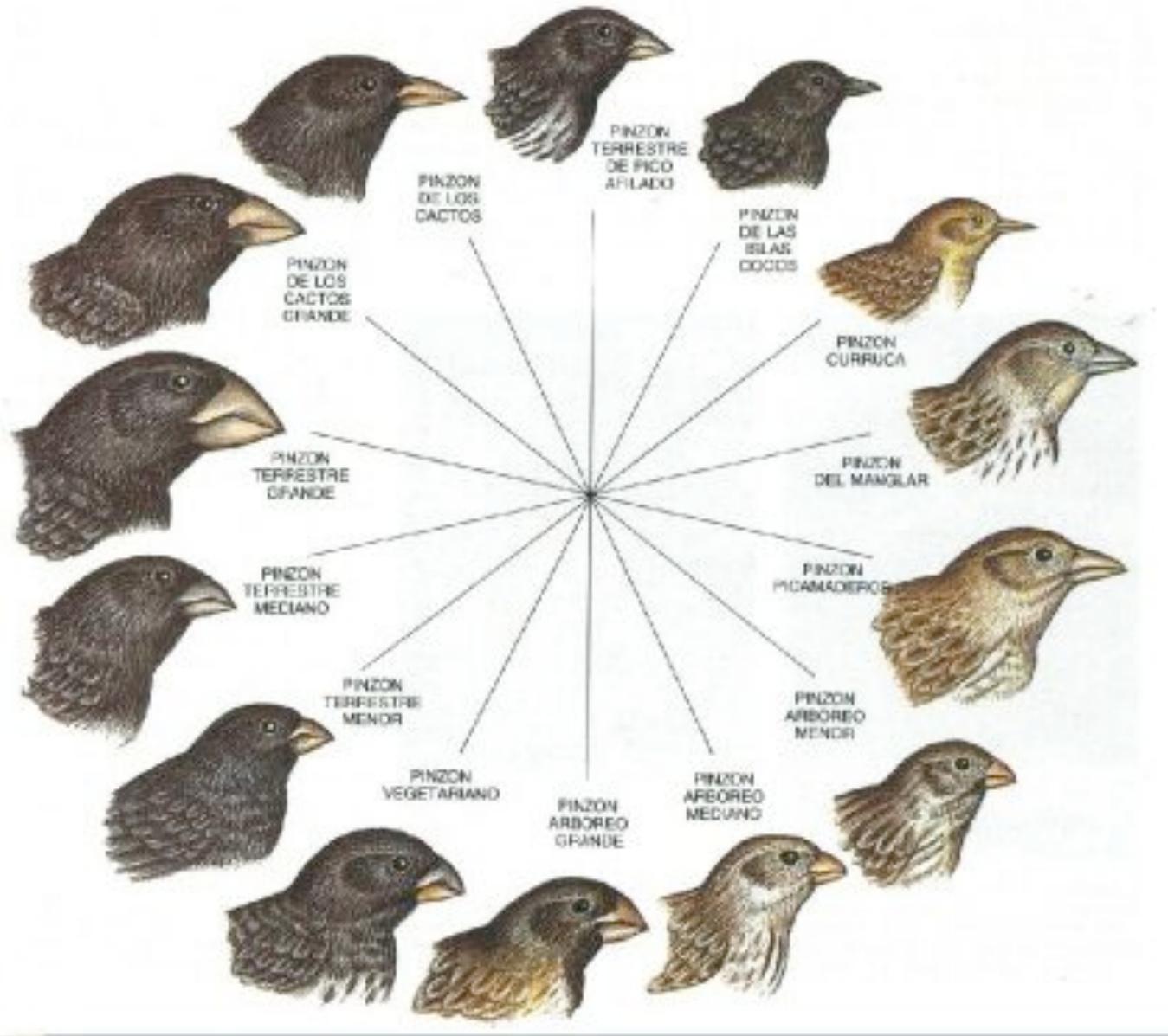


Une espèce endémique est une espèce ayant une aire de distribution limitée à un territoire concret

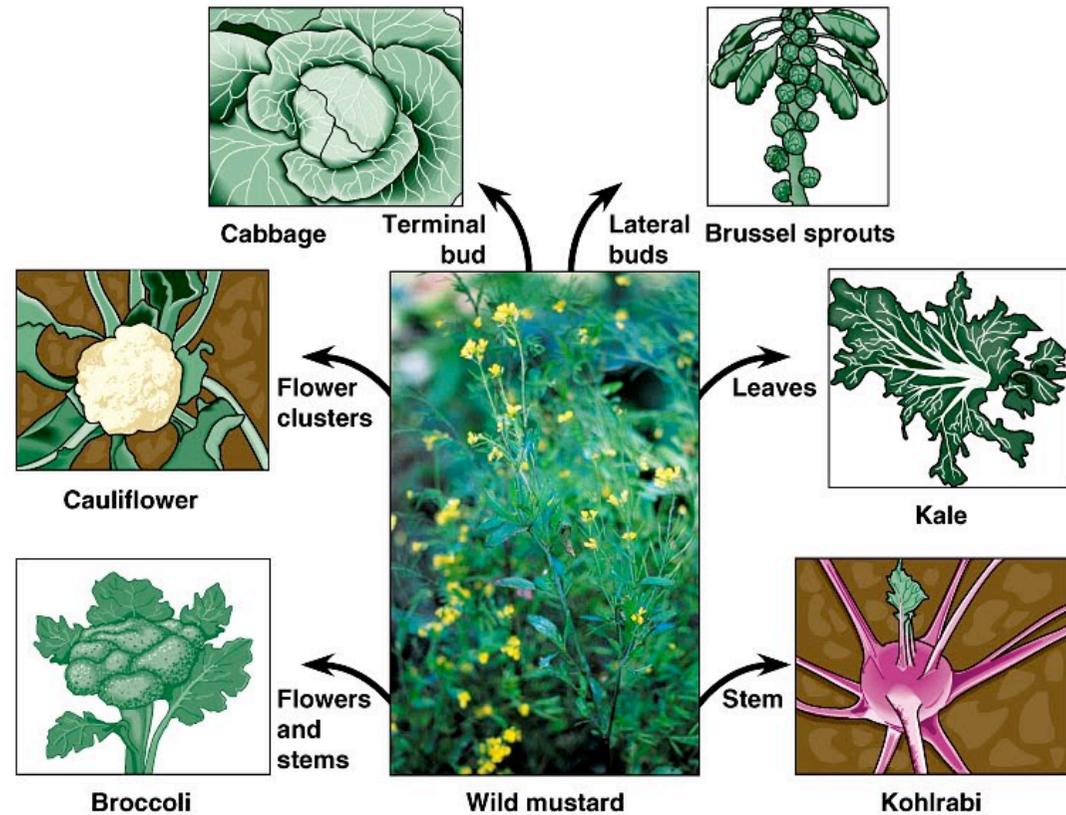
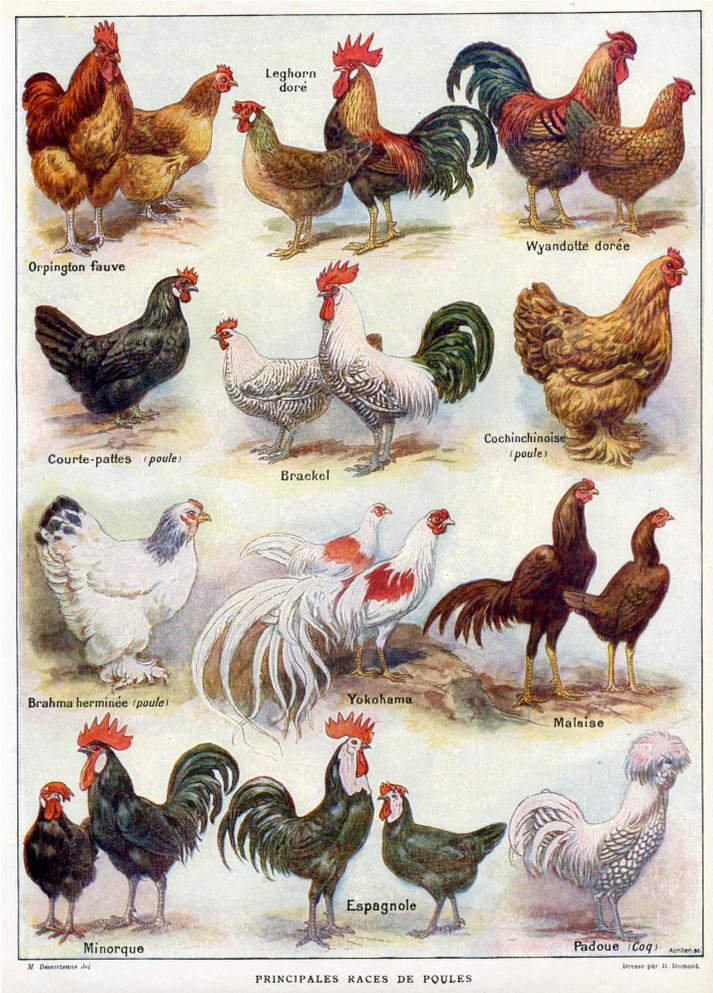


13 espèces de pinsons: Diversité morphologique en relation avec le mode de vie.

Radiation
évolutive

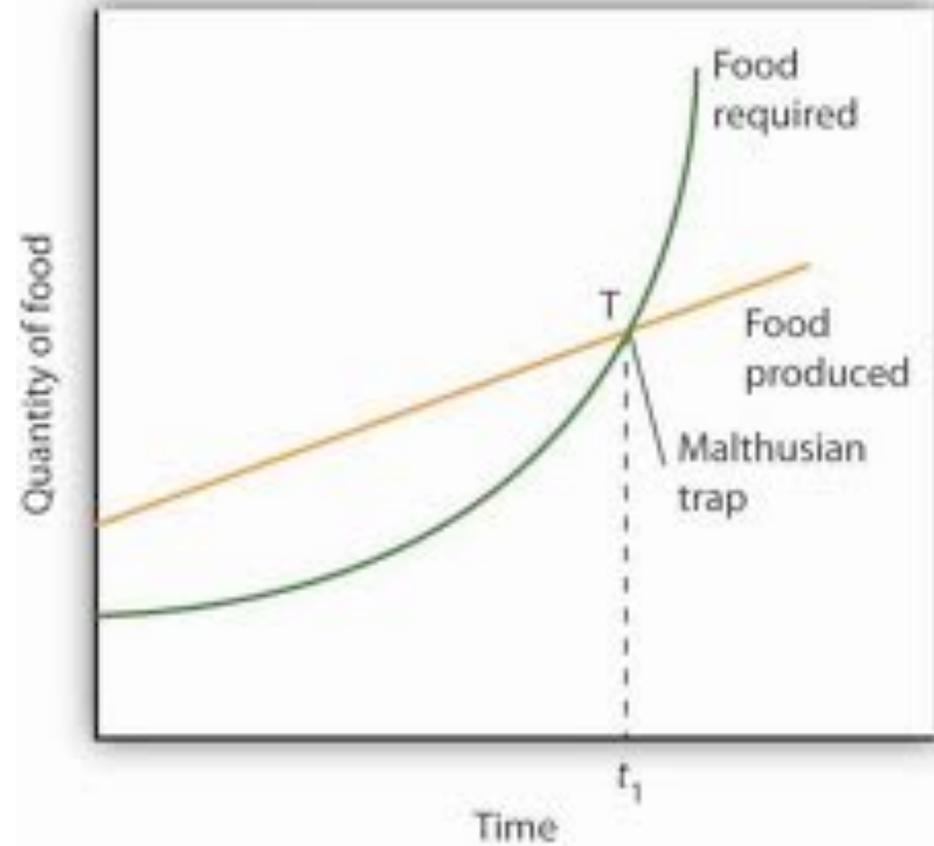


• La Sélection artificielle



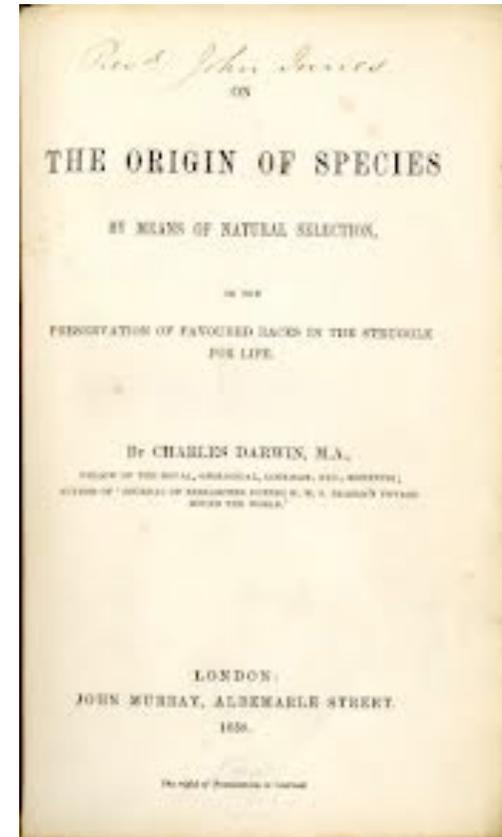
Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

- La Théorie de Thomas Malthus (1766-1834)

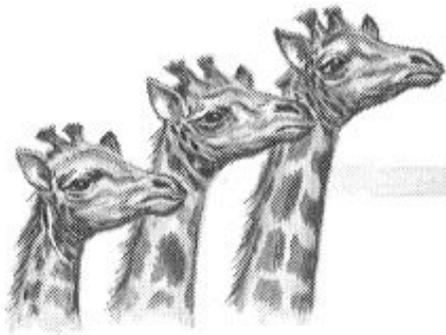


- 1859 – L'Origine des espèces au moyen de la sélection naturelle

1. À l'intérieur d'une population, les individus diffèrent par leur succès reproducteur et par leurs phénotypes (ex: la taille).
2. Le phénotype et le succès reproducteur sont corrélés (ex: les individus de grande taille ont plus d'enfants).
3. Le phénotype est héréditaire.



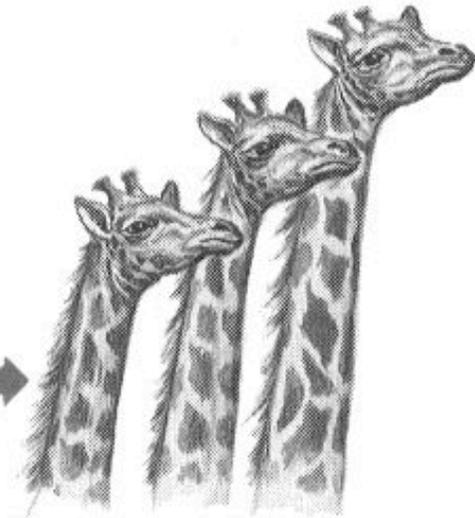
DARWIN'S GIRAFFE



Original group
exhibits variation
in neck length

Natural selection
favors longer
necks: better
chance to get

higher leaves
Favored character
passed on to next
generation



After many,
many generations
the group is still
variable, but
shows a general
increase in
neck length

- Différence avec la théorie lamarckienne:

1) Les caractères acquis au cours du développement ne sont pas transmissibles aux générations suivantes.

2) L'environnement sert de filtre pour trier les individus les plus adaptés.

• Loi sur l'hérédité

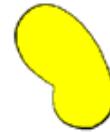


Gregor Mendel
(1822-1884)

LOI DE MENDEL

Parents

Graines lisses et jaunes



Graines ridées et vertes

Première génération



Toutes les graines
sont lisses et jaunes

Génération suivante
4 phénotypes possibles



Graines lisses et jaunes

9/16



Graines lisses
et vertes

3/16



Graines ridées
et jaunes

3/16



Graines ridées
et vertes

1/16

- Loi sur l'hérédité

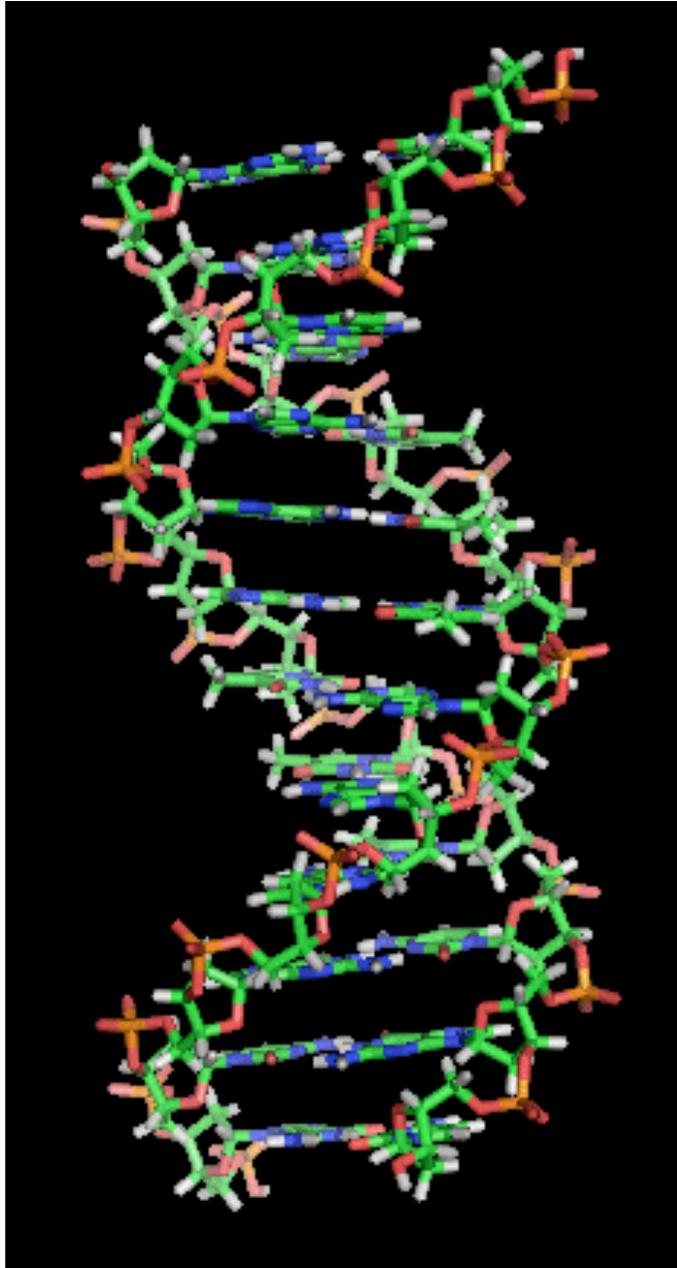


Thomas H. Morgan
(1866-1945)



Découvre la première mutation induite par l'environnement
Démontre que les gènes sont situés sur les chromosomes, dans
les cellules et sont le support de l'information génétique

- La Structure de l'ADN -



James Watson (1928 -)

Francis Crick (1916 – 2004)

Rosalind Franklin (1920 -1958)

- La théorie de l'évolution au XXI siècle

L'évolution des espèces et la place de l'homme au sein de la biodiversité ne sont pas encore admis par une grande partie de nos sociétés.

États Unis, Brésil, Turquie – plus de 50% de la population adhère aux thèses créationnistes.

France – environ 10% est ouvertement créationniste mais 35% n'a pas d'opinion tranchée.

Preuves de l'évolution

Le créationnisme repose sur 3 arguments:

1. Les espèces n'ont pas changé depuis leur création
2. Les espèces ont été créées indépendamment
3. Les espèces ont été créées récemment (~ 6000 ans)

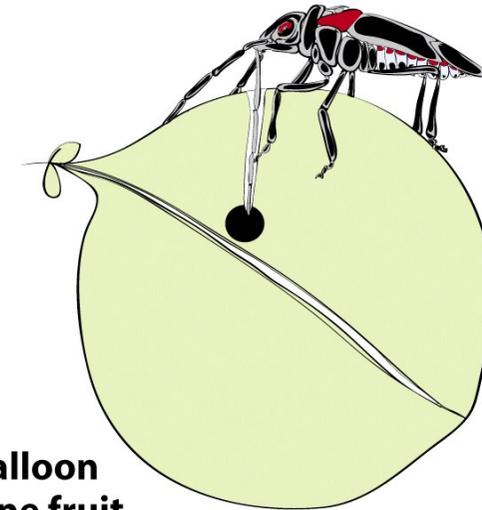
Les espèces changent elles?



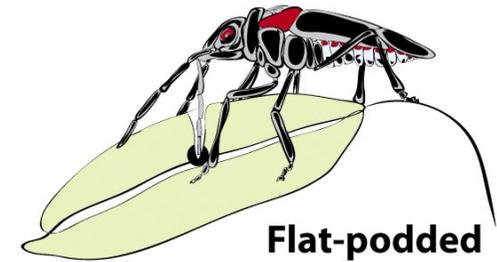
Vigne sauvage
native de Floride



Vigne
ornementale
introduite à partir
de 1920



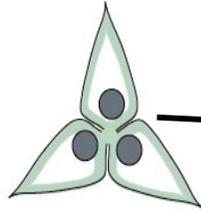
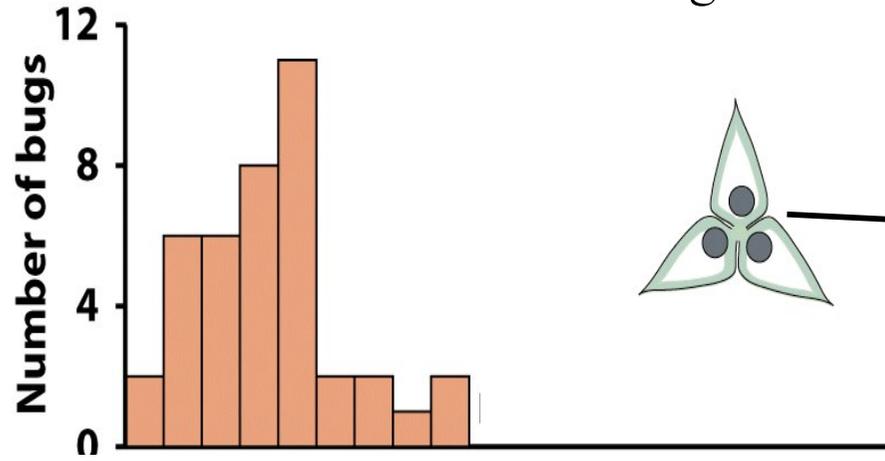
**Balloon
vine fruit**



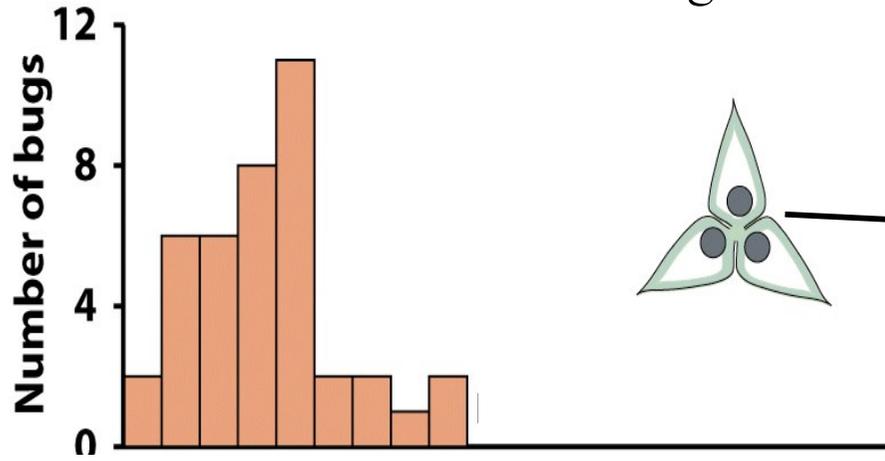
**Flat-podded
golden rain tree fruit**

Figure 2-2 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

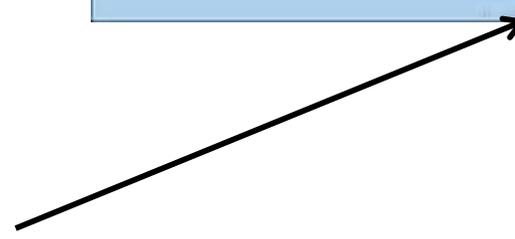
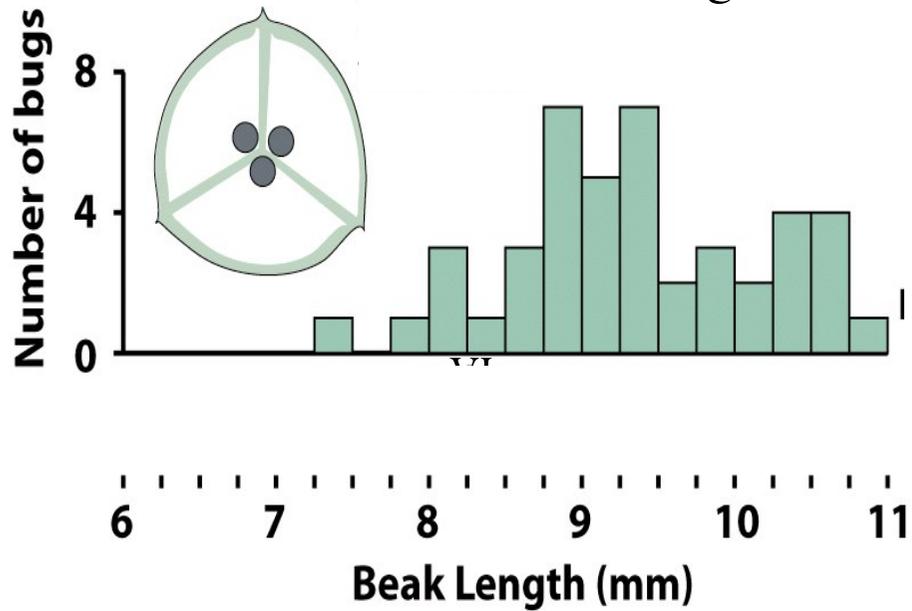
Punaises collectées sur la vigne introduite



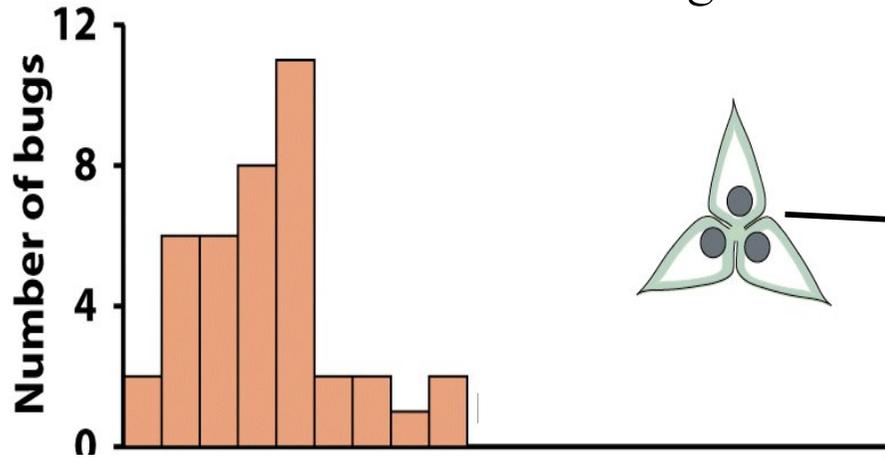
Punaises collectées sur la vigne introduite



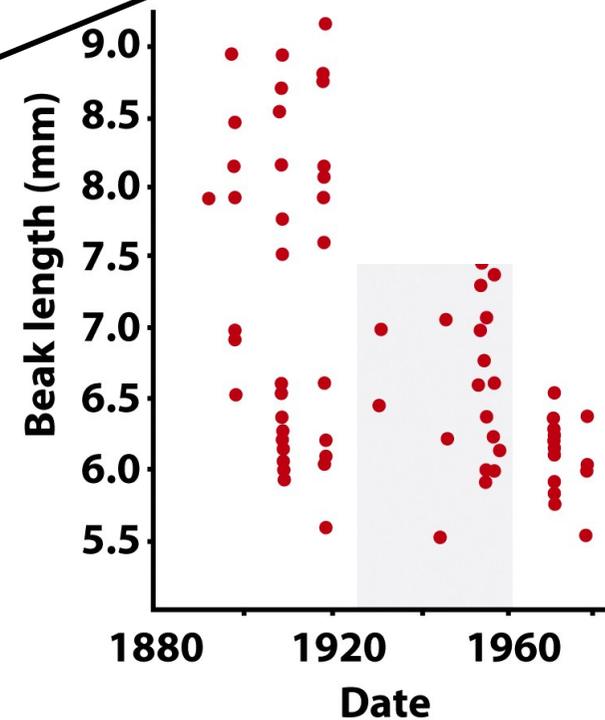
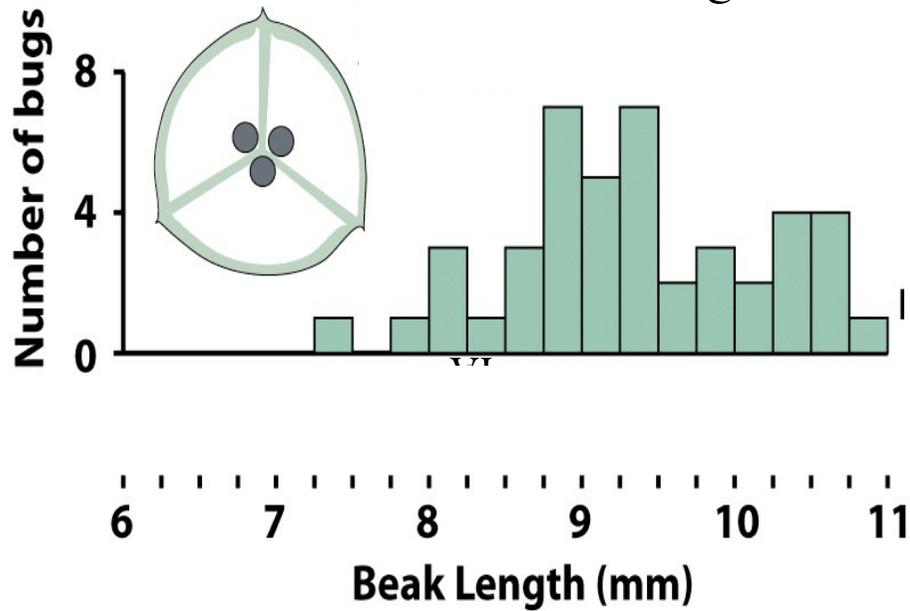
Punaises collectées sur la vigne native



Punaises collectées sur la vigne introduite



Punaises collectées sur la vigne native



Les espèces changent elles?



Les espèces changent elles?



Figure 2-8 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Certaines espèces disparaissent

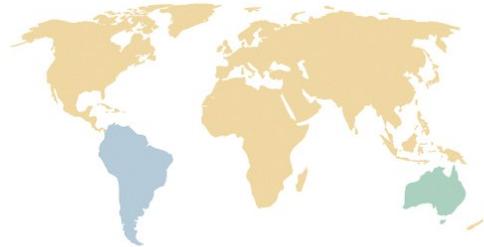
Le grand cerf d'Irlande (genre *Megaloceros*)

Les fossiles sont des traces d'organismes ayant vécu dans le passé. Leur existence même est une preuve de l'Évolution biologique.

Les espèces changent elles?

Faune d'Argentine

Tatou
(actuel)



Glyptodon
(fossile)



Faune d'Australie



Wombat
(actuel)

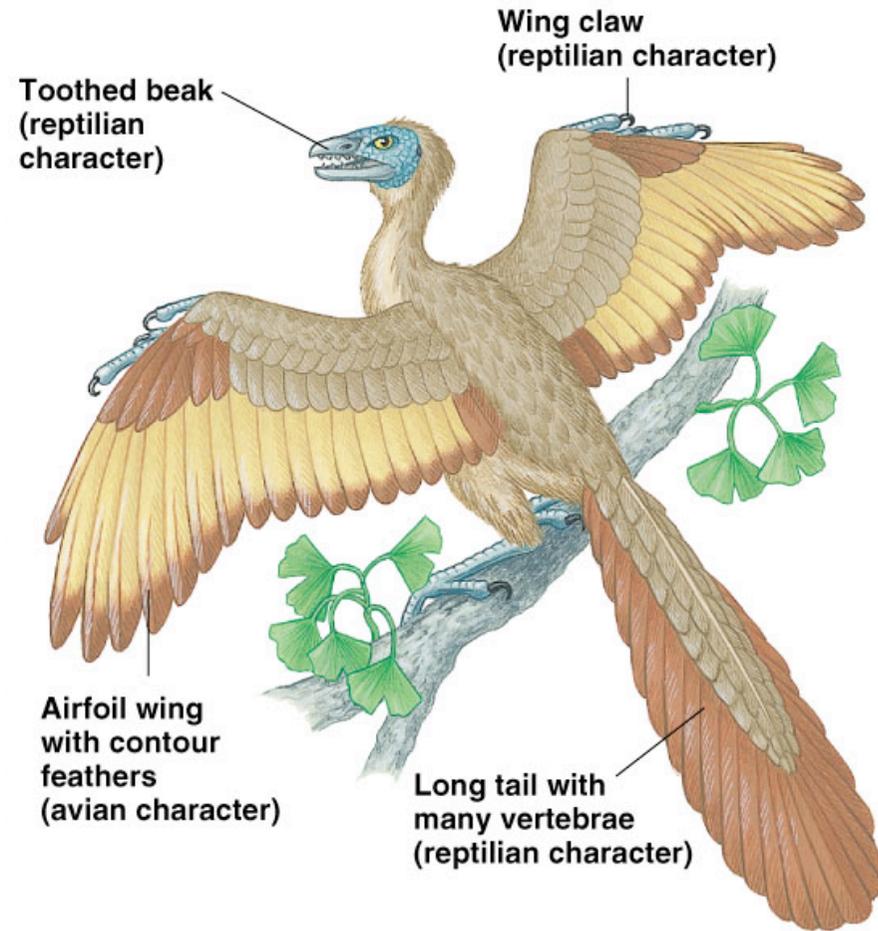


Diprotodon
(fossile)

La faune actuelle d'un continent ressemble aux fossiles locaux. C'est la "loi de la succession" qui suggère une transformation des espèces au cours du temps pour aboutir à la faune actuelle.

Les espèces changent elles?

Certaines espèces
témoignent de transitions



Archaeopteryx

Les espèces ont-elles été créées de façon indépendante?

- Les homologues témoignent d'ancêtres communs

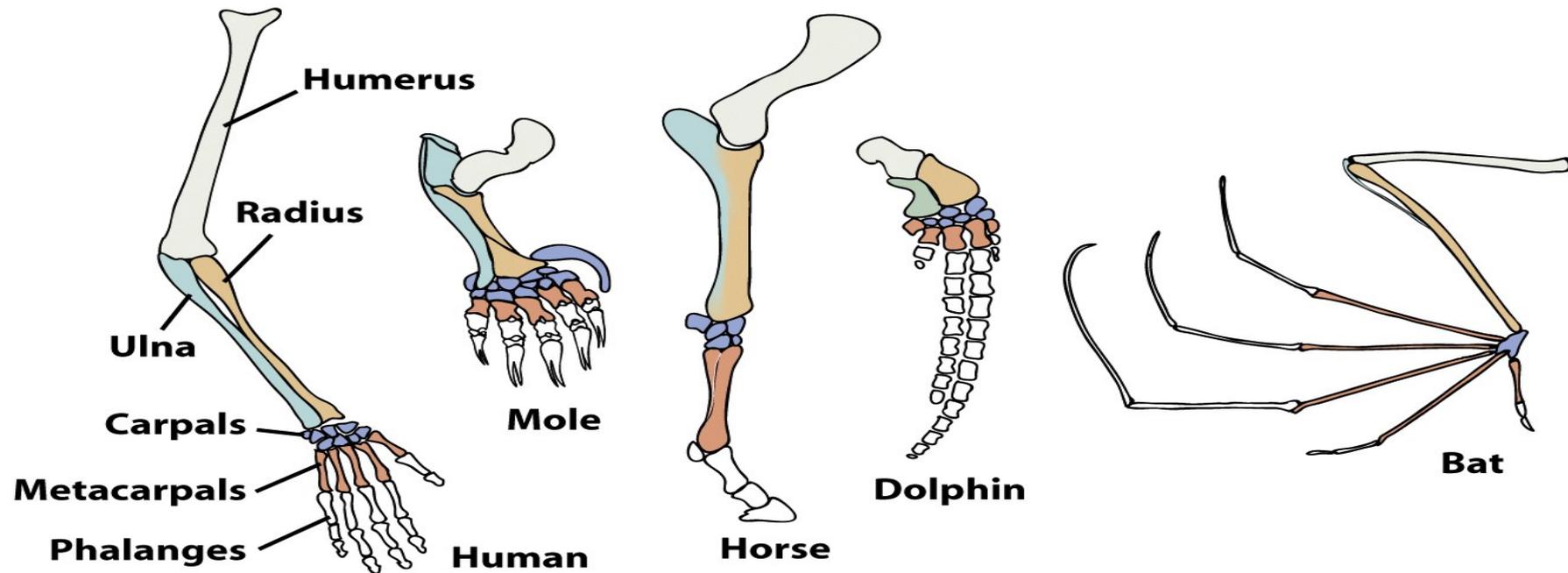


Figure 2-18 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Les pattes avant des mammifères ont des fonctions différentes mais l'arrangement de leurs os sont similaires.

Les espèces ont-elles été créées récemment?

- La Terre est vieille

Les mécanismes géologiques actuels sont ceux qui ont mené à la formation de la Terre => La Terre a donc beaucoup plus de 6.000 ans.

Les roches lunaires ont à peu près 4.5 Milliards d'années.

Principal Message du Cours

L'étude de l'Évolution Biologique est une science jeune permettant d'expliquer l'origine de la vie sur Terre.

Il est impossible de concevoir la biodiversité actuelle sans prendre en compte son évolution.

Les preuves de l'évolution biologique sont:

- 1) Les espèces changent
- 2) Les homologues témoignent d'ancêtres communs.
- 3) Le temps géologique est très long et permet l'évolution des espèces.

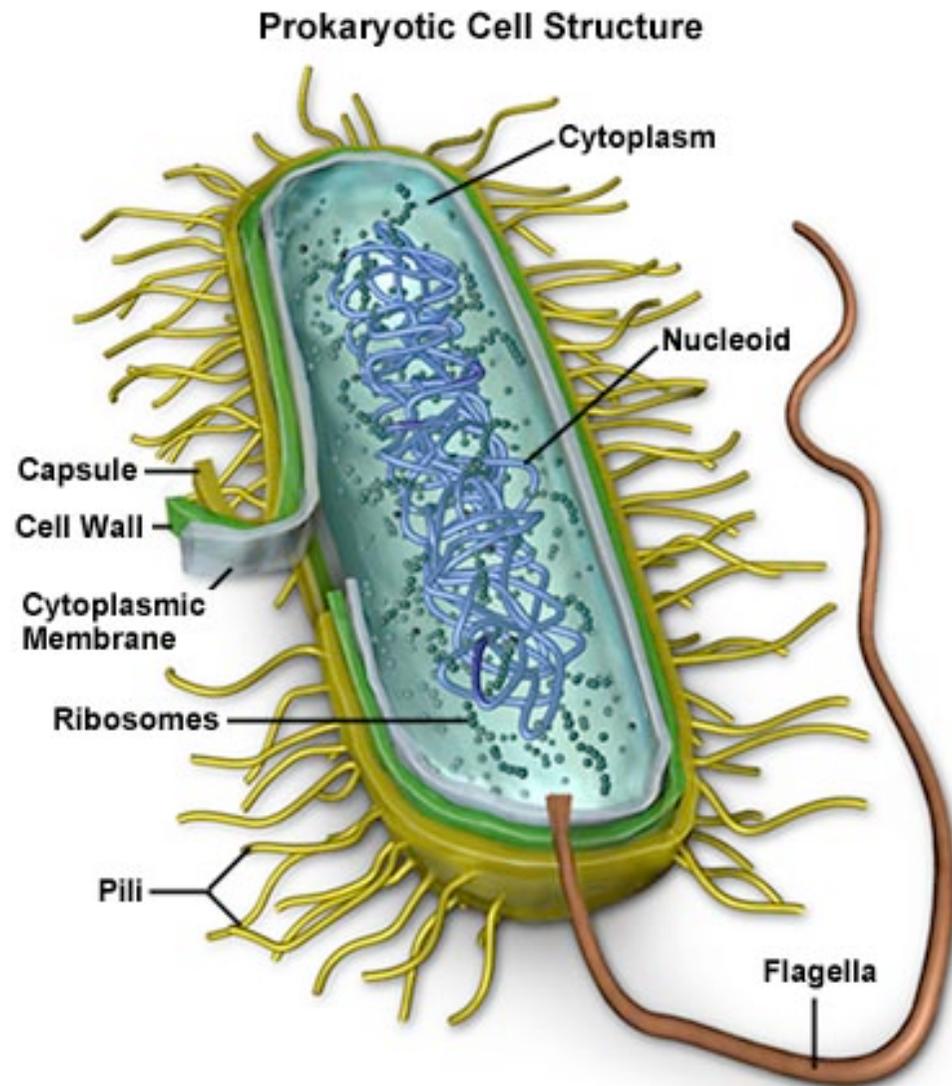
La Transmission Génétique

Plan du Cours

1. Le fonctionnement cellulaire

1. Les gènes et l'hérédité

La Cellule Procaryote



Apparition il y a 3.6 Mrd d'années

Organismes unicellulaires (Archae et Bactéries)

Peu d'organelles

Génome circulaire (ADN), libre dans le cytoplasme

La Cellule Eucaryote



Plus grande taille;
Origine: 2 Mrds
d'années

Le génome (ADN) est
enfermé dans le noyau

Composition Chimique des Cellules

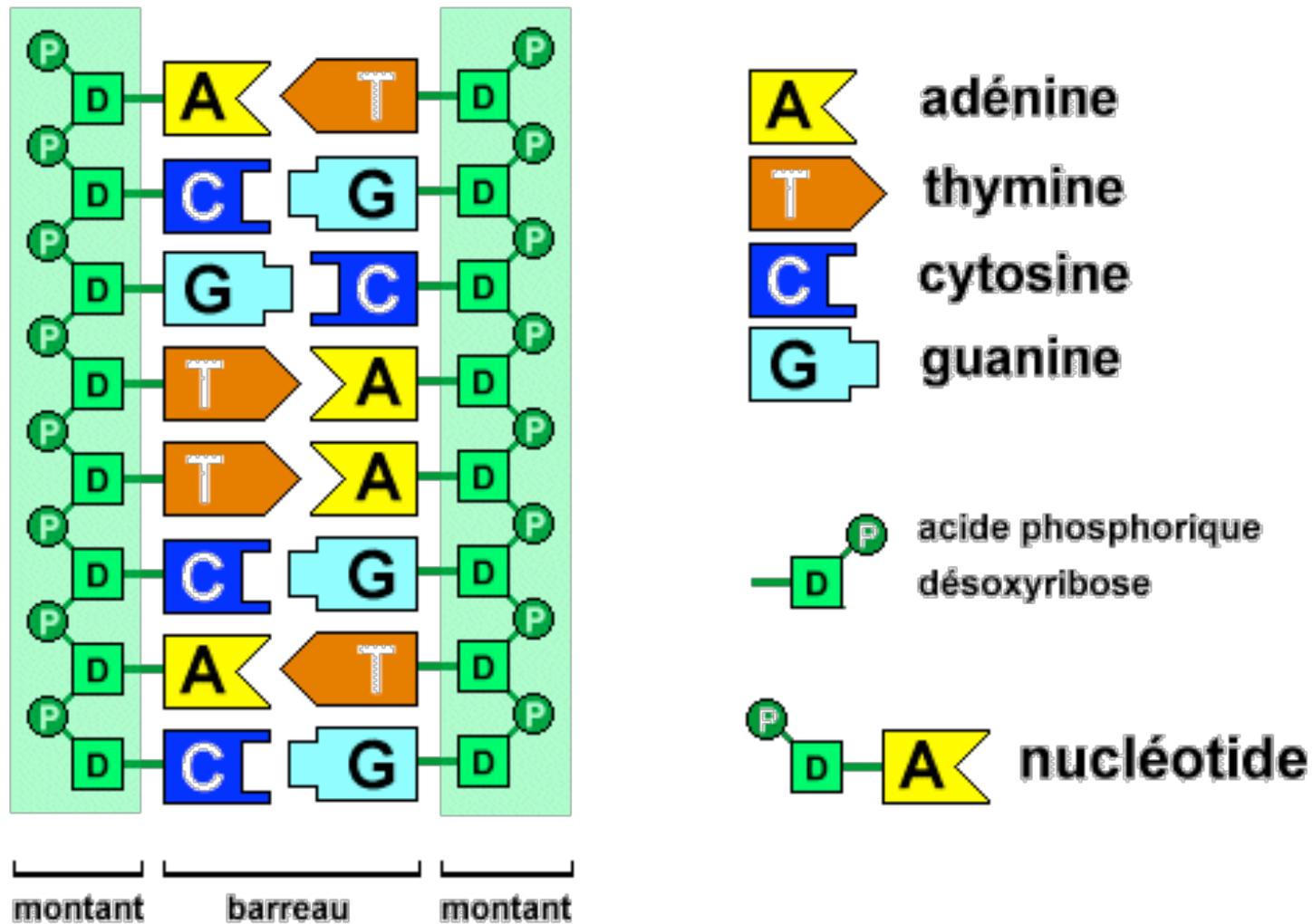
- 99% de la masse d'une cellule est composée C – O – N – H
- Principales molécules organiques:
 - **Acides gras**: réserves énergétiques et constituants des membranes.
 - **Sucres**: réserves énergétique
 - **Acides aminés**: composants de base des protéines
 - **Bases azotées**: Thymine (T), Adénine (A), Guanine (G), Cytosine (C) et Uracile (U): composants de l'ADN

Les Chromosomes

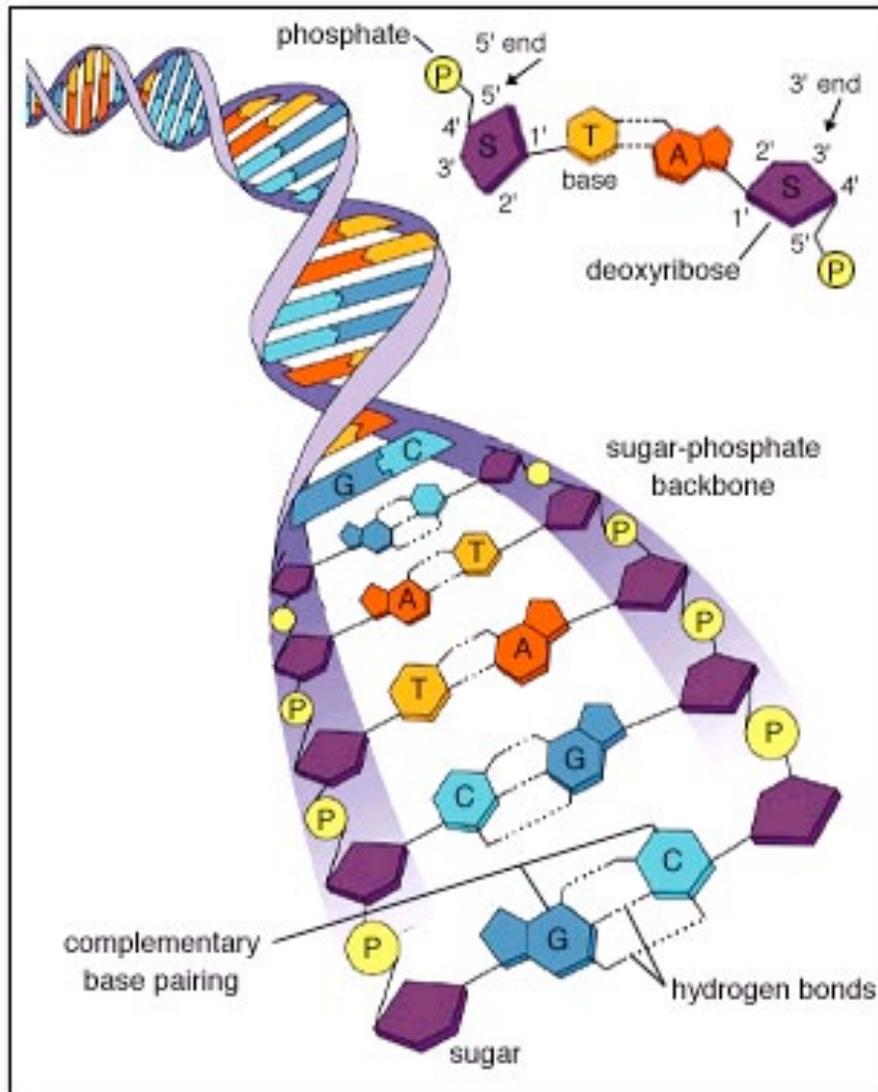


- ADN condensé autour de protéines (histones).
- Organismes **diploïdes**: $2n$ chromosomes
- Homme: $2n = 44 + (XY \text{ ou } XX)$

L' Acide désoxyribonucléique

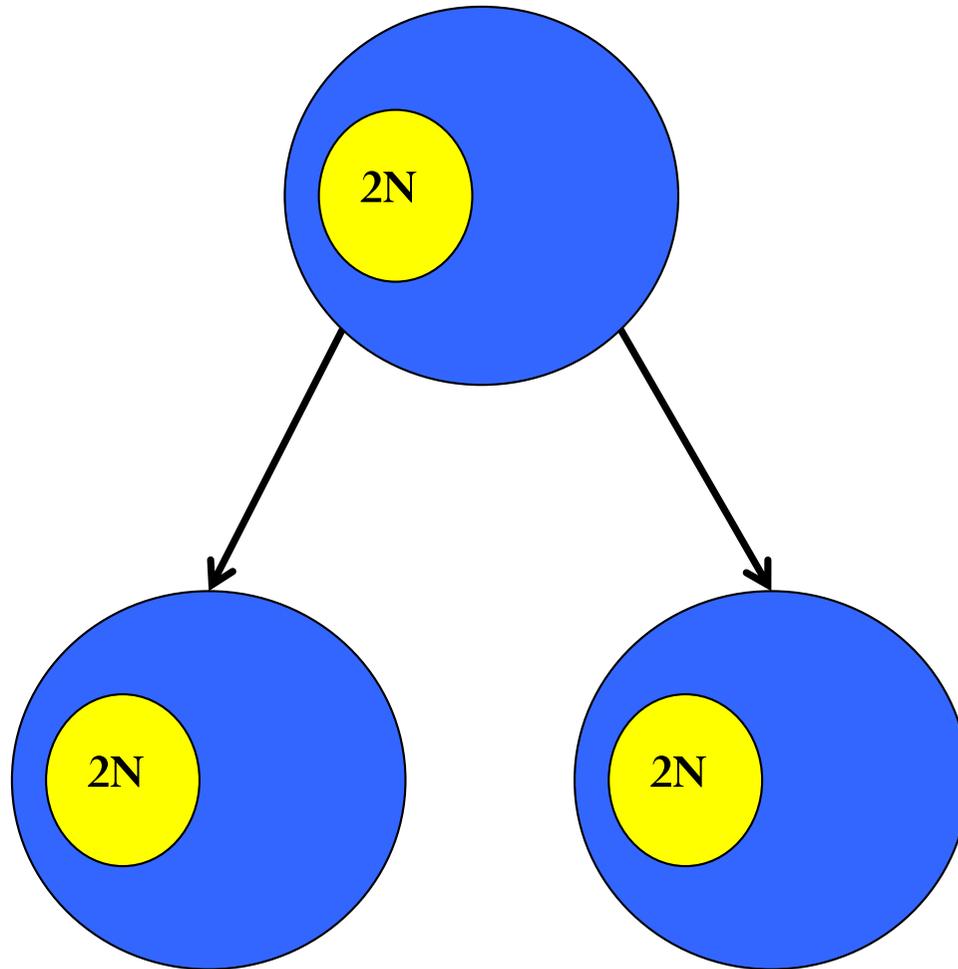


Structure en double hélice



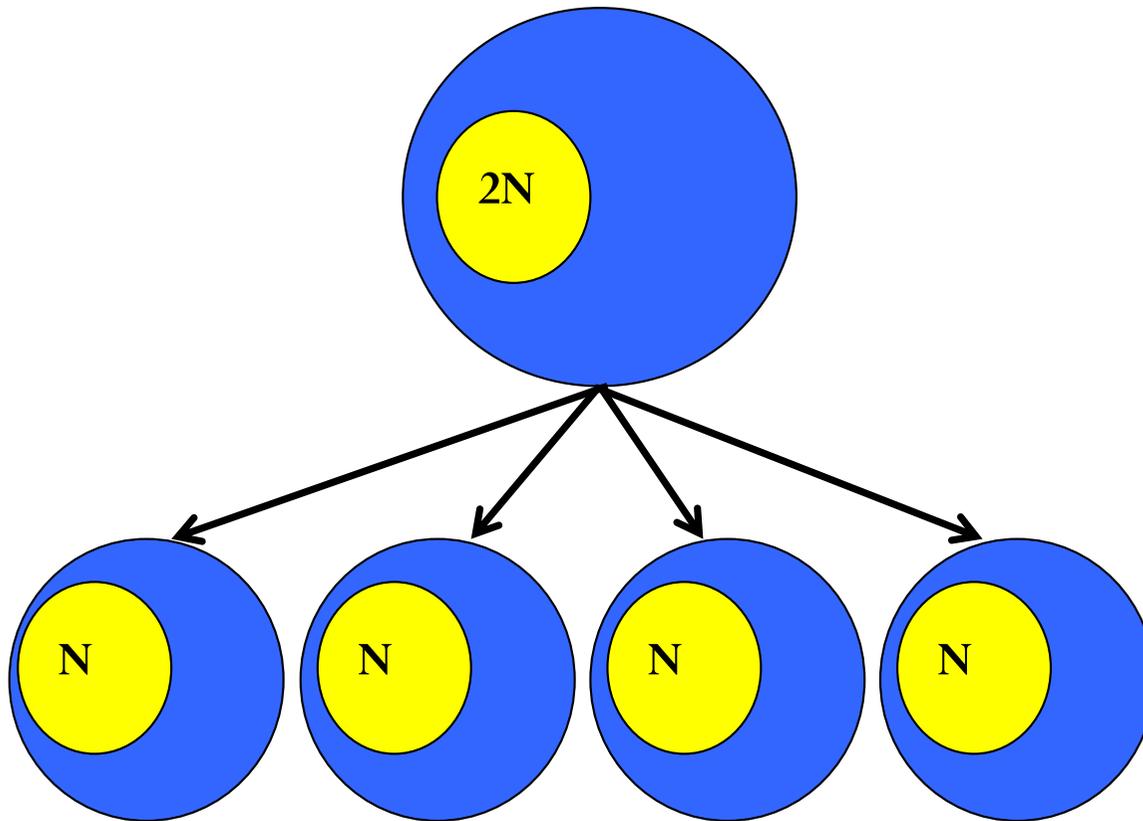
2 brins enroulés l'un autour de l'autre et reliés par des liaisons spécifiques permettant une réplication fidèle.

La Mitose



Division d'une cellule diploïde ($2n$ Chromosomes) pour former 2 cellules possédant exactement le même patrimoine génétique.

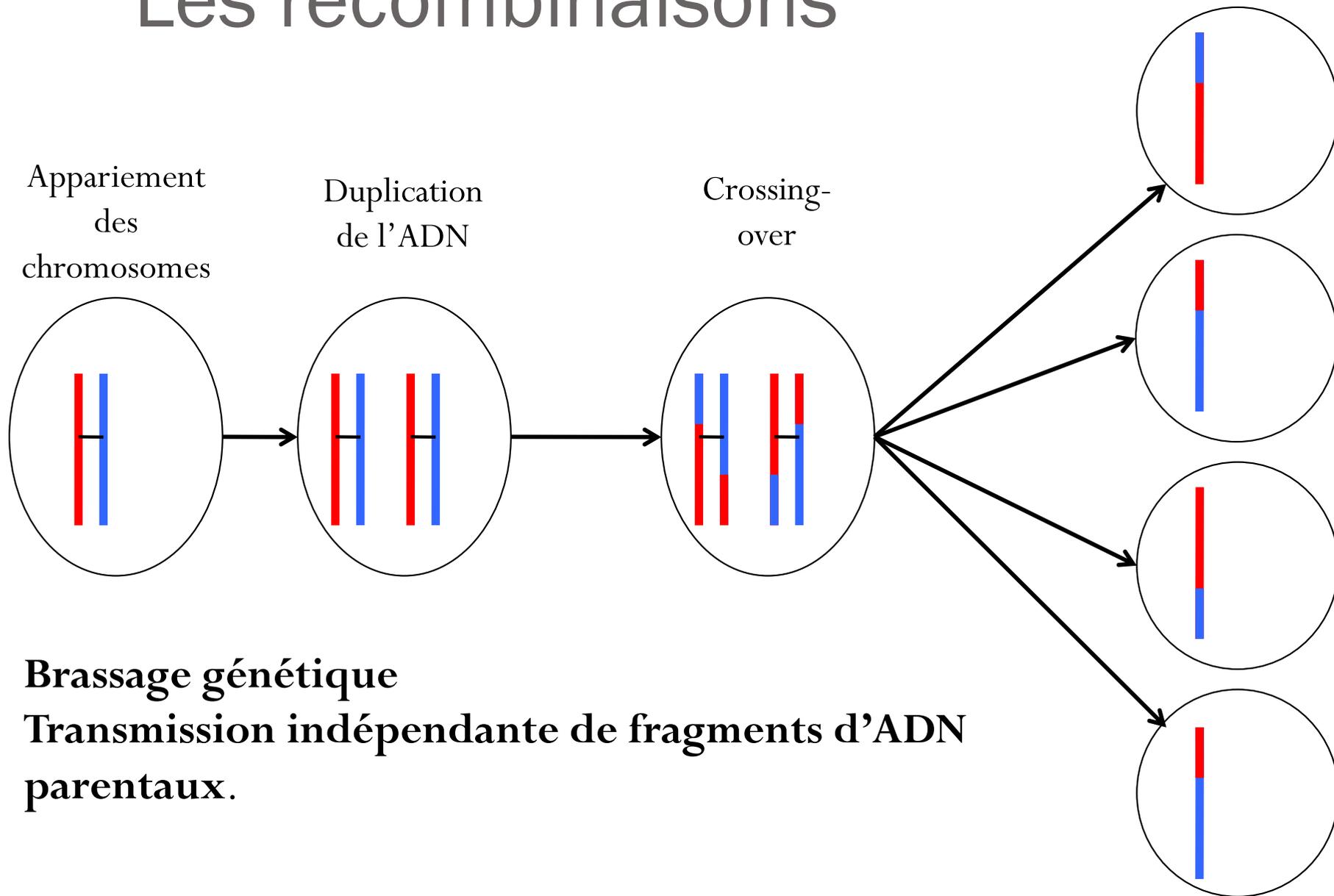
La Méiose



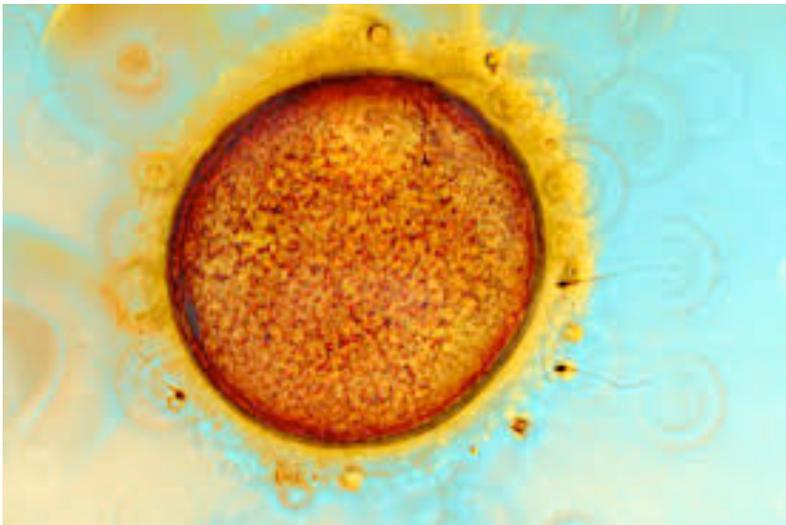
Division d'une cellule diploïde ($2n$ Chromosomes) pour former 4 cellules possédant chacune la moitié du patrimoine génétique.

=> Formation des gamètes (oocytes et spermatozoïdes)

Les recombinaisons

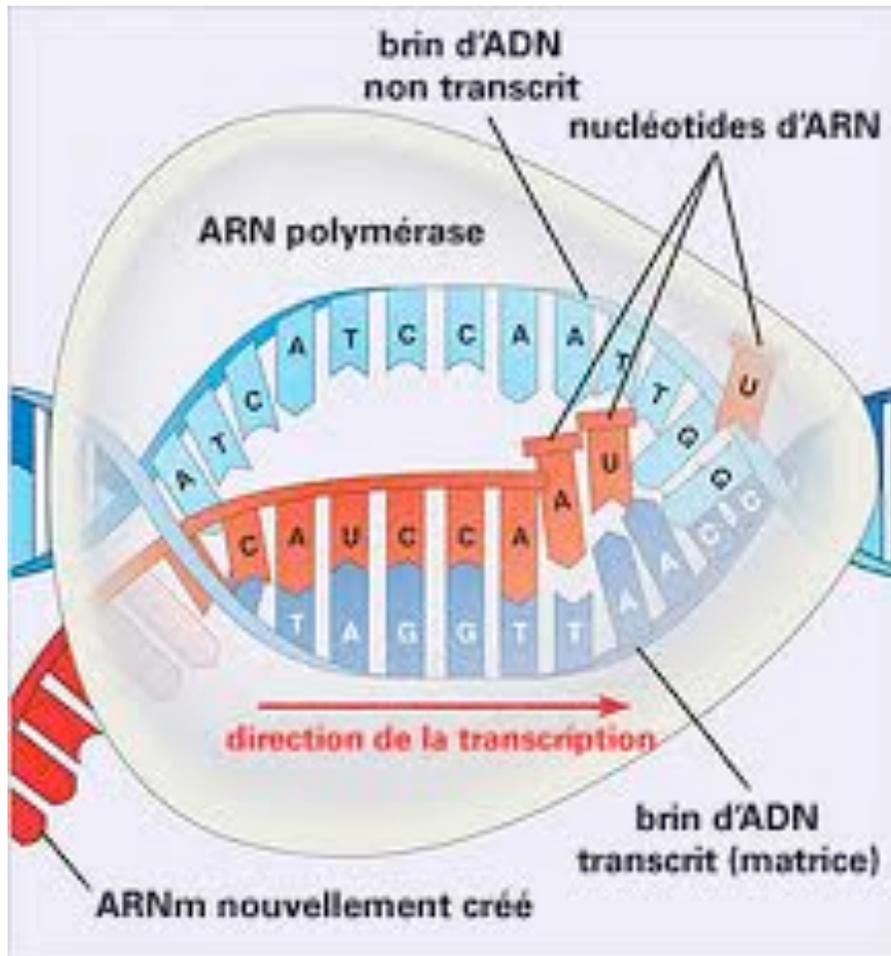


La reproduction sexuée



- La fusion des gamètes mâles et femelles permet la formation d'un zygote diploïde contenant la moitié des patrimoines maternels et paternels.

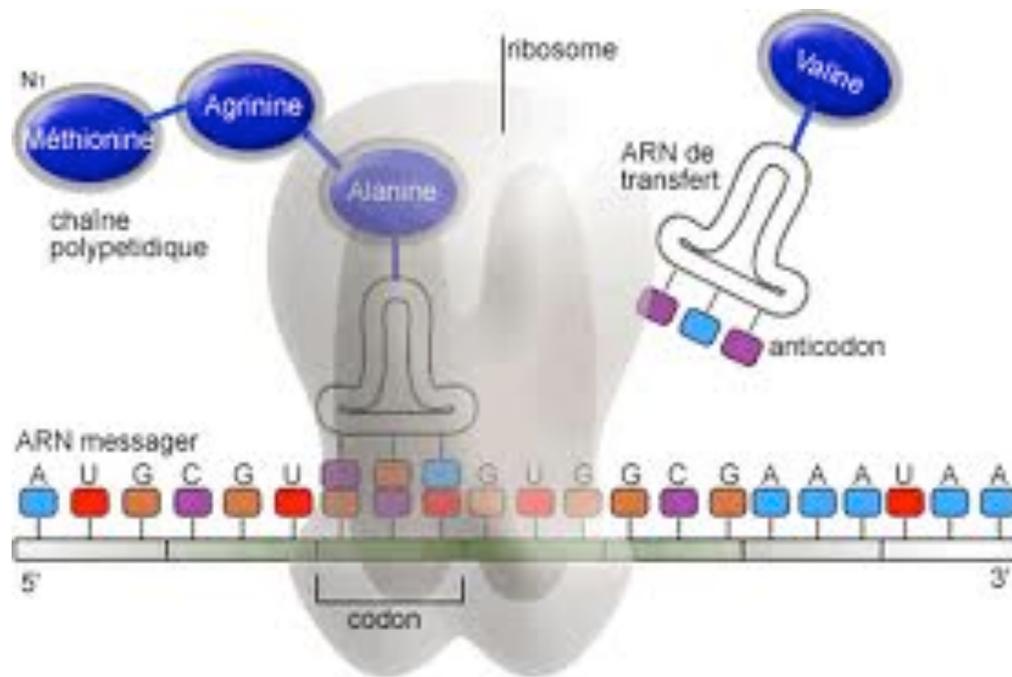
La Synthèse des Protéines



- **ARN – Acide Ribonucléique;** complémentaire de l'ADN obtenu par **transcription.**

- L'Uracile remplace la Thymine.

La Traduction de l'ARN



L'ARN est traduit par les ribosomes.

Codon: succession de 3 nucléotides auquel correspond un acide aminé (AA).

Les AA sont enchainés pour former des **polypeptides** puis des protéines.

Le code génétique

Deuxième nucléotide

Premier nucléotide

	U		C		A		G		
U	UUU	phényl- alanine	UCU	sérine	UAU	tyrosine	UGU	cystéine	U C A G
	UUC		UCC		UAC		UGC		
	UUA	leucine	UCA		UAA	STOP	UGA	STOP	
	UUG		UCG		UAG		UGG	tryptophane	
C	CUU	leucine	CCU	proline	CAU	histidine	CGU	arginine	U C A G
	CUC		CCC		CAC		CGC		
	CUA		CCA		CAA	glutamine	CGA		
	CUG		CCG		CAG		CGG		
A	AUU	isoleucine	ACU	thréonine	AAU	asparagine	AGU	sérine	U C A G
	AUC		ACC		AAC		AGC		
	AUA		ACA		AAA	lysine	AGA		
	AUG	méthionine	ACG		AAG		AGG	arginine	
G	GUU	valine	GCU	alanine	GAU	acide aspartique	GGU	glycine	U C A G
	GUC		GCC		GAC		GGC		
	GUA		GCA		GAA	acide glutamique	GGA		
	GUG		GCG		GAG		GGG		

Troisième nucléotide

2. Les gènes et l'hérédité

Un gène est:

- Une unité de transmission génétique.
- Une séquence d'ADN correspondant à la synthèse de polypeptides.
- Attention: L'expression « un gène = une protéine » est très souvent fausse.

Les Mutations Génétiques

- Modification de la séquence d'ADN.
- Remplacement d'un ou plusieurs nucléotides.
- Beaucoup de mutations arrivent au cours de la méiose: accidents dans la réplication de l'ADN.
- Certaines mutations peuvent être induites lors du développement (pas transmises).

Les Mutations Génétiques

La plupart des mutations sont silencieuses => pas d'effet sur le phénotype pour plusieurs raisons:

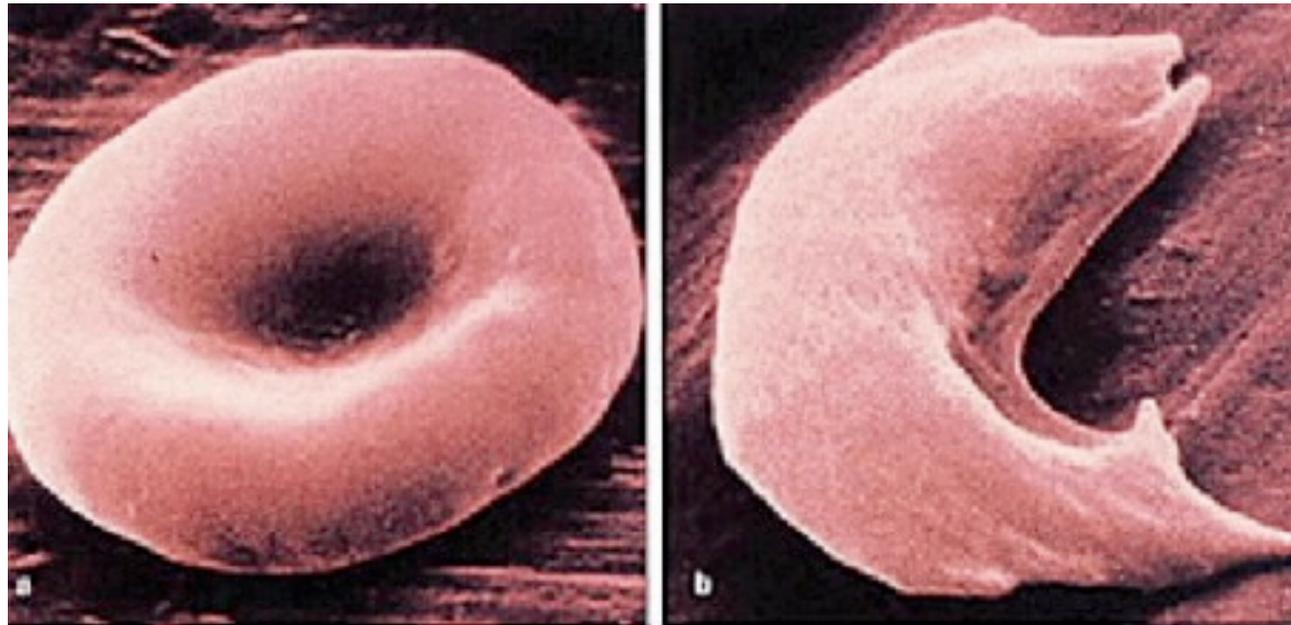
- Le fragment d'ADN muté ne code pour aucun polypeptide.
- La mutation n'affecte pas la séquence du polypeptide (plusieurs codons peuvent coder pour le même AA).
- La protéine est réparée au cours de sa synthèse.

Les Mutations Génétiques

- **Les mutations sont à l'origine de la diversité génétique et la base de l'évolution!**
- Deux organismes de la même espèce ont des génomes pratiquement identiques.
- Les mutations permettent la formation des **allèles**: versions d'un même gène.

L'anémie falciforme

Anémie falciforme (drépanocytose): maladie affectant les globules rouges qui prennent une forme de faucille et obstruent les vaisseaux sanguins.

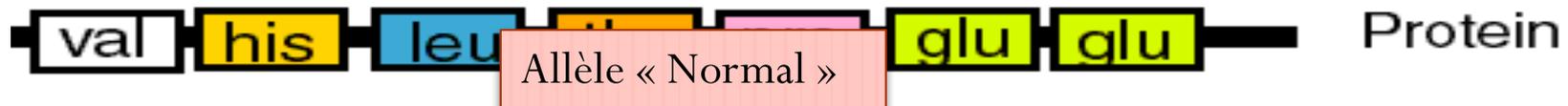


L'anémie falciforme

Normal Cells

CAA GTA AAC ATA GGA CTT CTT DNA

GUU CAU UUG UAU CCU GAA GAA mRNA



Sickle Cells

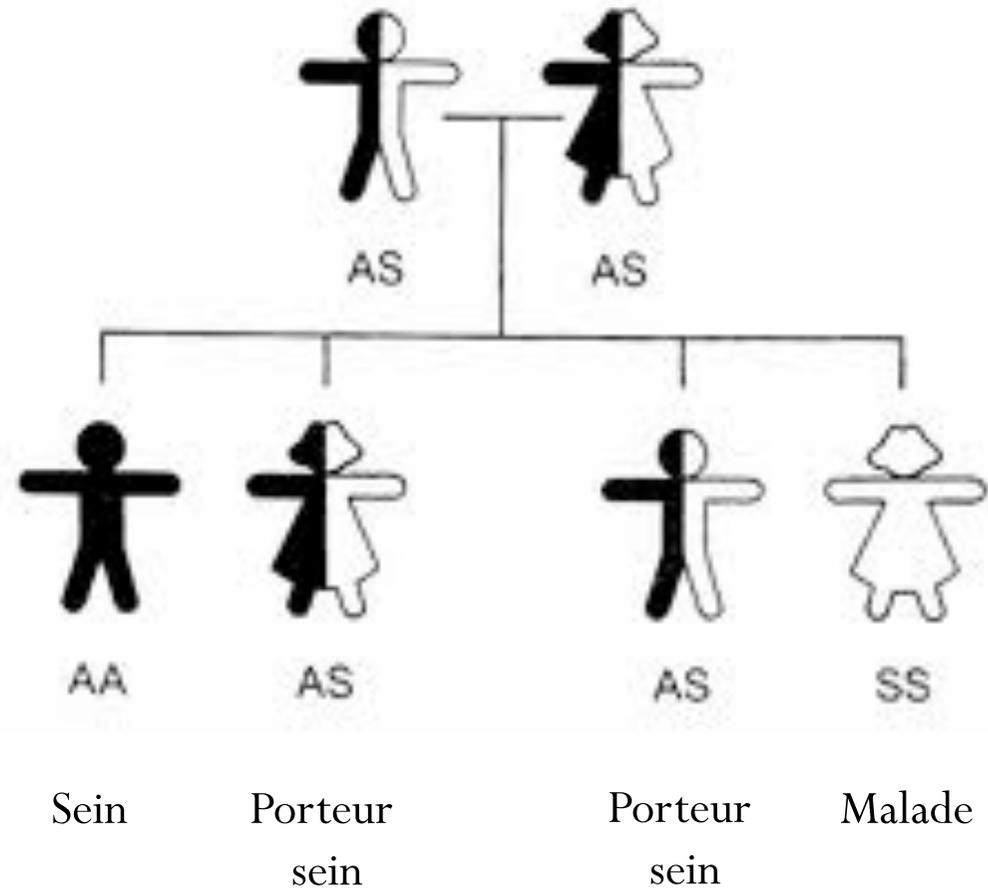
CAA GTA AAC ATA GGA CAT CTT DNA

GUU CAU UUG UAU CCU GUA GAA mRNA



Ségrégation des gènes

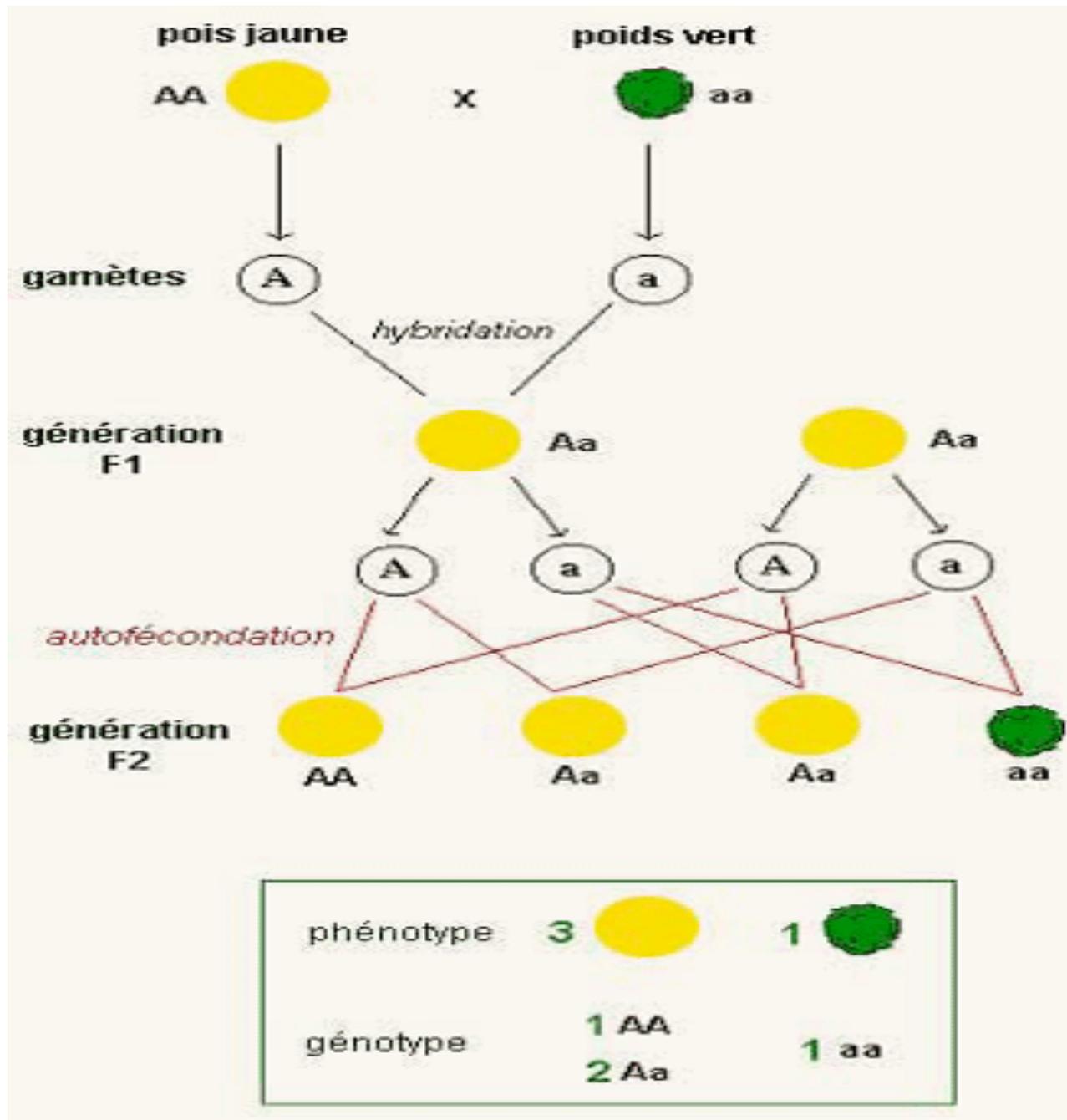
A: allèle « normal »,
dominant
S: allèle « sickle »,
récessif



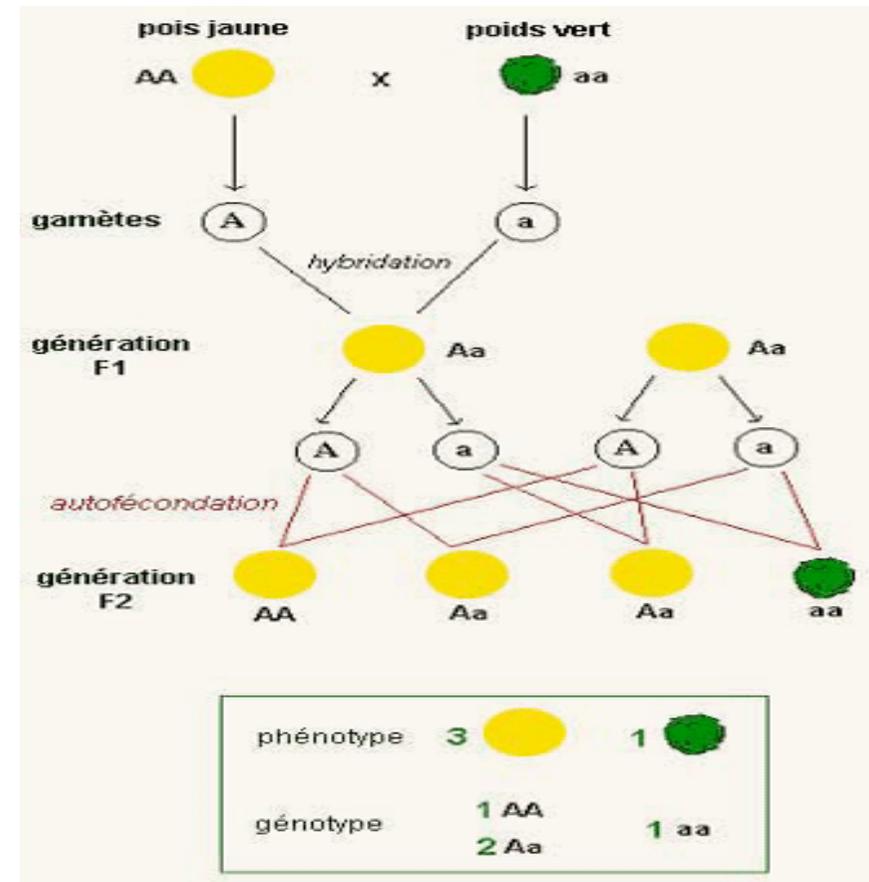
La transmission Mendélienne

- Expériences de Mendel (1822-1884)

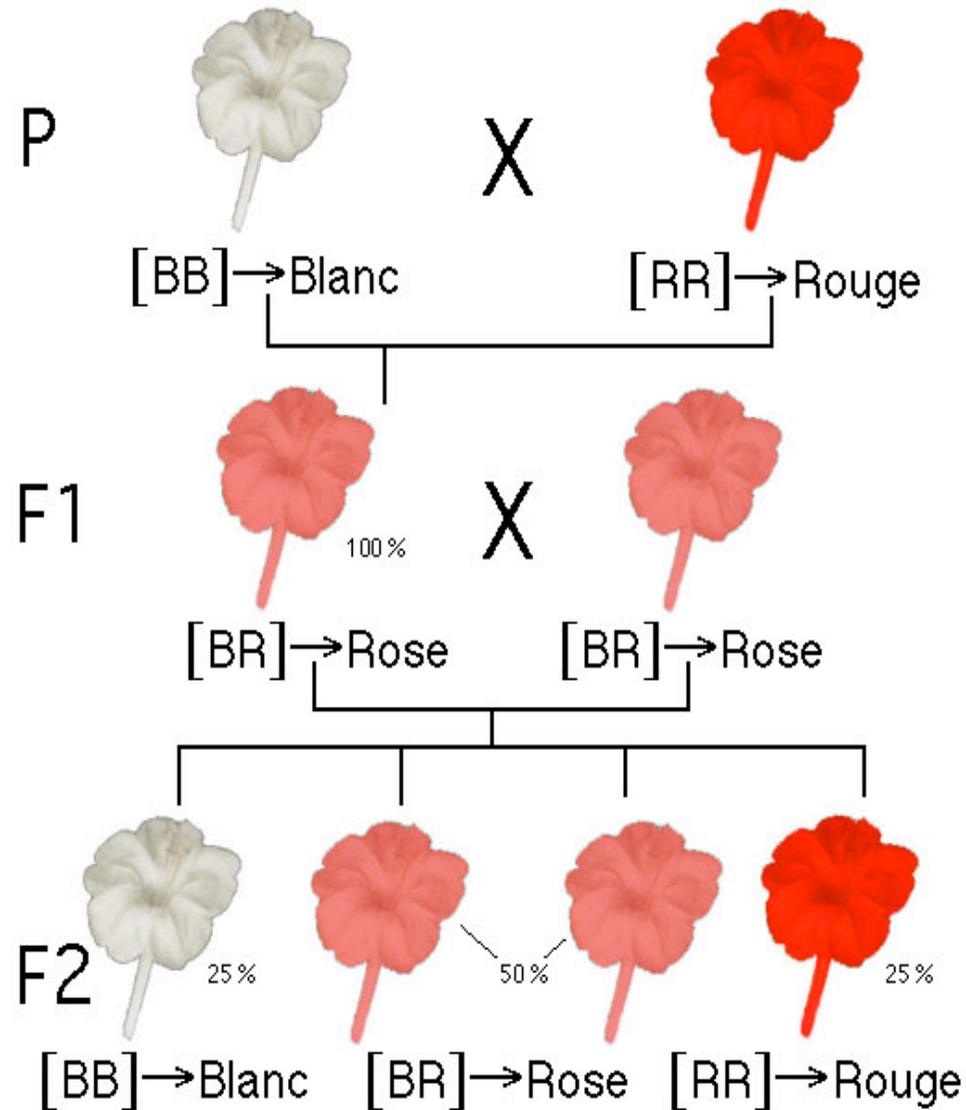




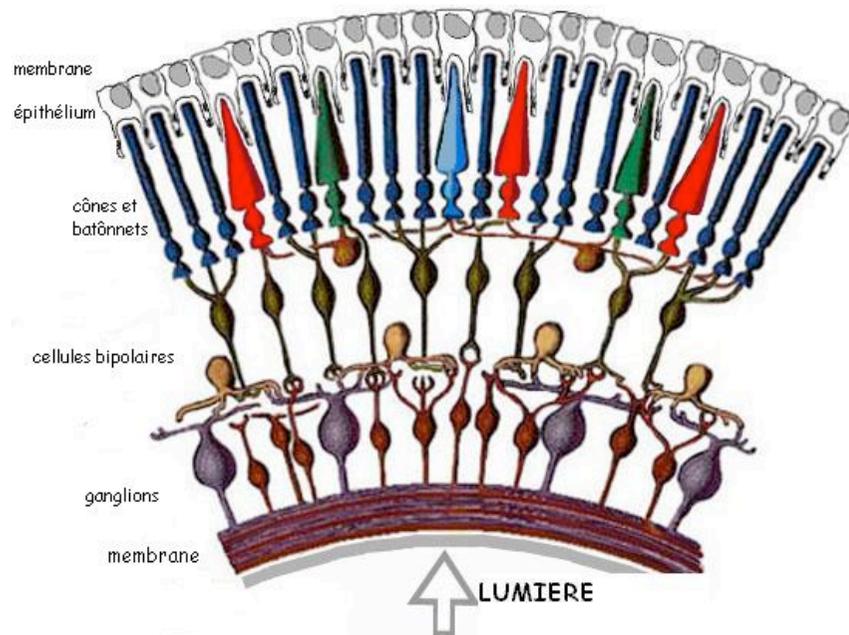
- Le caractère « vert » est récessif et n'est exprimé que dans les individus HOMOZYGOTES.
- Les Hétérozygotes sont capables de transmettre les gènes « verts »
- Le caractère « jaune » est dominant. Les homozygotes porteurs d'un gène jaune et les hétérozygotes sont jaunes.



La codominance :

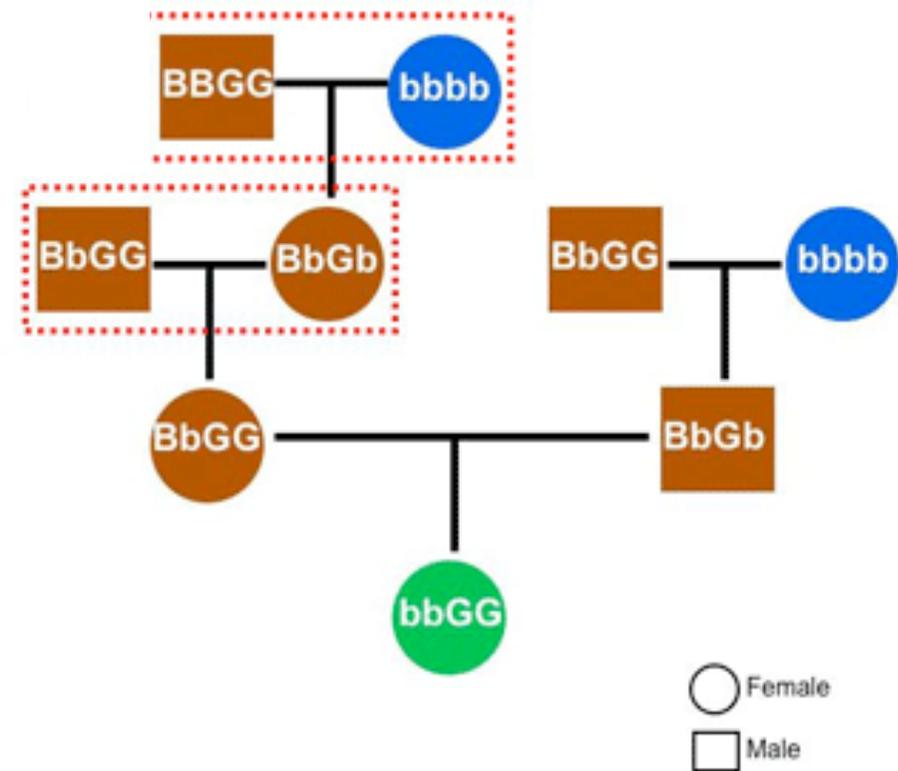


La couleur des yeux



Déterminée par plusieurs gènes situés sur plusieurs chromosomes (donc indépendants).

<i>HERC2</i>	<i>Gey</i>	Eye Color
BB	GG	Brown
BB	Gb	Brown
BB	bb	Brown
Bb	GG	Brown
Bb	Gb	Brown
Bb	bb	Brown
bb	GG	Green
bb	Gb	Green
bb	bb	Blue



Certains gènes peuvent rester cachés pendant de nombreuses générations



Gènes liés au Sexe

- Les yeux des Drosophiles – Thomas Hunt Morgan

Seulement 4 paires de chromosomes

Sexe déterminé par un chromosome x/y



Femelle



Mâle



Red-eyed wild-type fly



Gènes liés au Sexe

La mutation w se produit spontanément dans 1 mouche sur 100.000

White-eyed mutant fly

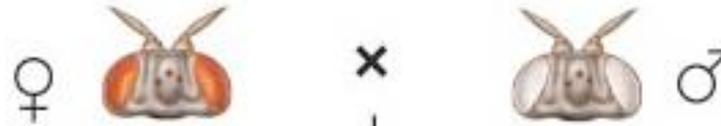


Red-eyed wild-type fly

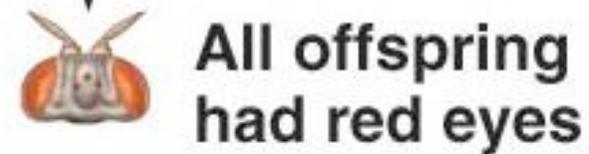
- Les yeux des Drosophiles – Thomas Hunt Morgan

EXPERIMENT

P
Generation



F₁
Generation



RESULTS

F₂
Generation

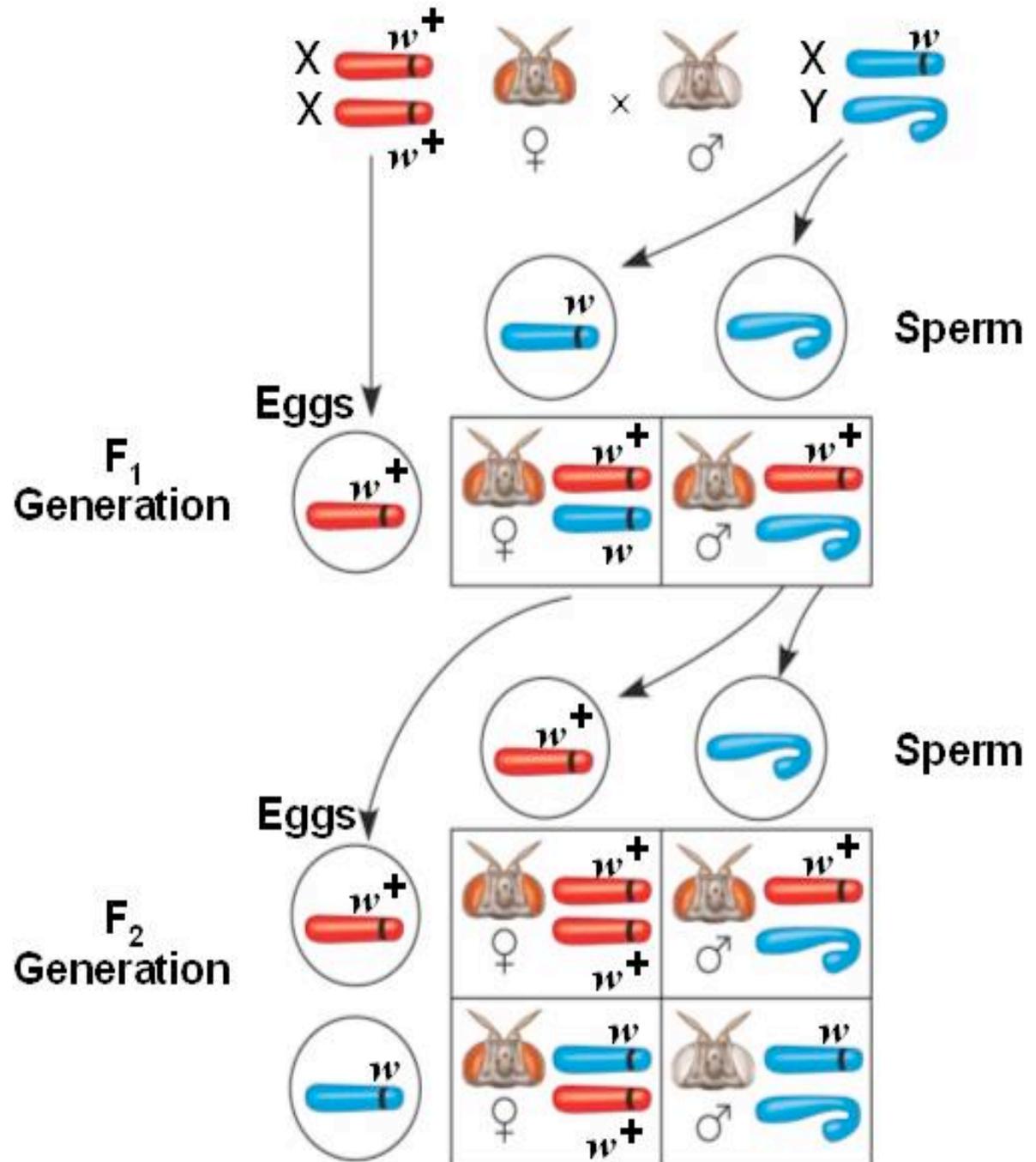


Seulement ½ des mâles ont les yeux blancs

CONCLUSION

Les Gènes codant pour la couleur des yeux sont liés au Sexe.

La mutation est transmise par la mère.



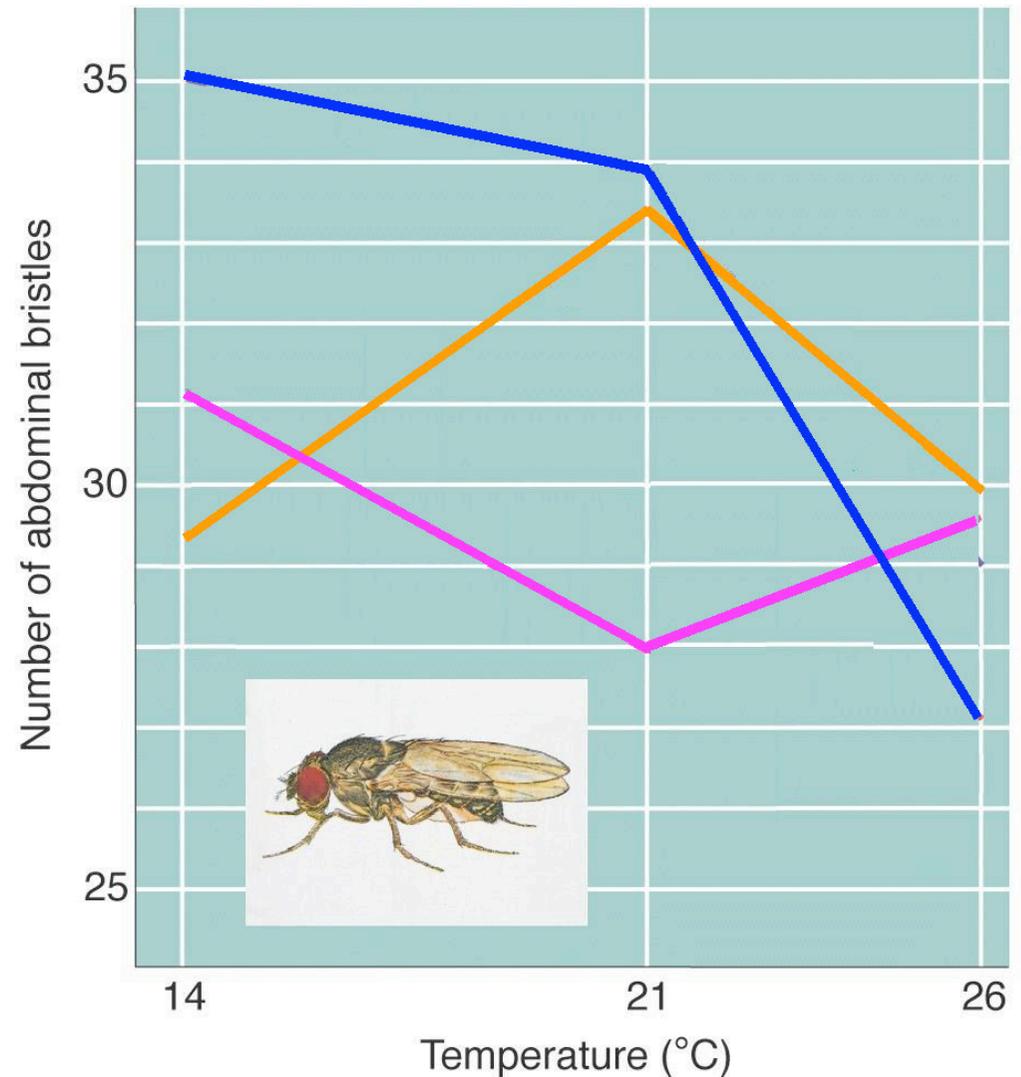
Traits quantitatifs



- La majorité des caractères physiologiques, morphologiques et comportementaux ne varient pas de façon discrète mais quantitative.
- Les caractères dépendent souvent de nombreux gènes ayant chacun de petits effets additifs ou non.

L'environnement

- L'environnement intervient aussi dans l'expression d'un phénotype.
- L'environnement n'a pas un effet additif mais interagit avec le génome.
- L'héritabilité définit la part de l'expression d'un caractère qui dépend des gènes.



Quel degré de variabilité génétique dans les populations naturelles?

Pour décrire la variabilité génétique on utilise:

1. Taux de polymorphisme

$$P = \frac{\text{Nbre de gènes polymorphes}}{\text{Nbre total de gènes étudiés}}$$

2. Hétérozygotie: Proportion de gènes hétérozygotes dans le génome d'un individu moyen

La Microévolution I: Sélection et Mutation

Compétition et sélection naturelle

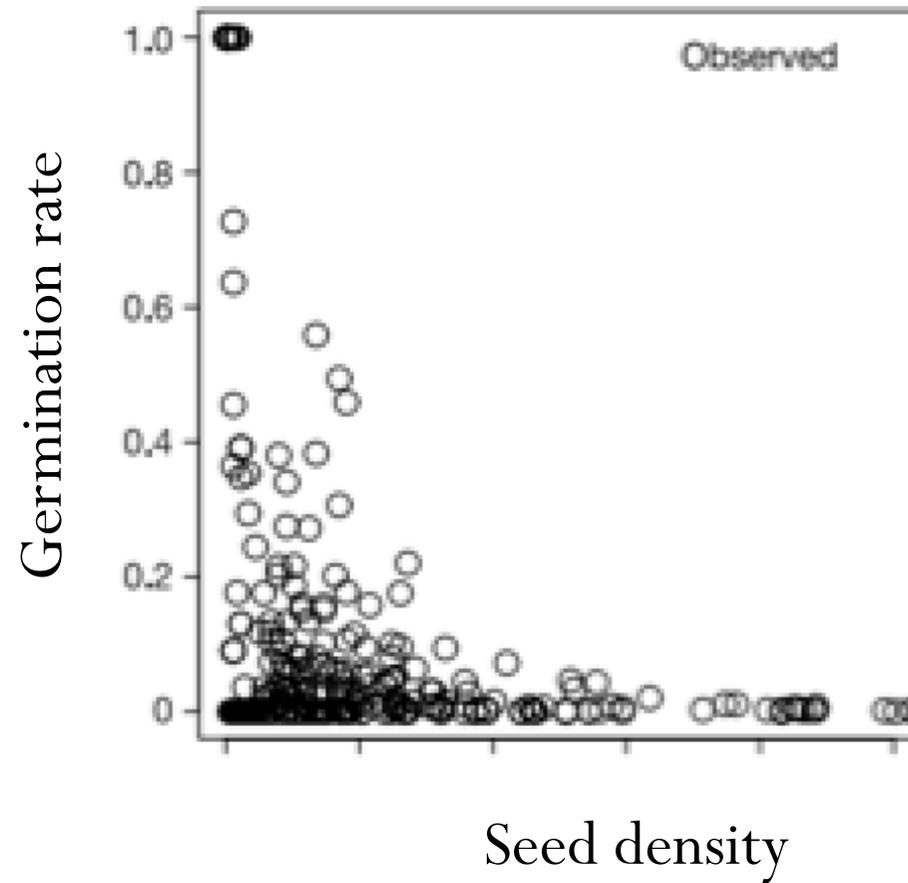
La compétition intraspecificue

- Interaction entre individus qui partagent un besoin pour des ressources limitées conduisant à une diminution de la survie, de la croissance et/ou de la reproduction des individus concernés.
- Tous les individus ne vont pas contribuer de façon identique à la génération suivante.
- Les caractères des individus qui contribuent le plus à la génération suivante sont sélectionnés.

La compétition par interférence



Compétition par exploitation



Compétition: Base de la Sélection Naturelle

- Pour que la sélection naturelle opère au niveau d'une population, trois conditions sont nécessaires:
 - Un ou plusieurs caractères doivent être héréditaires.
 - Les caractères doivent varier entre les individus.
 - La *fitness* des individus doit dépendre du/des caractères.

Directional selection

Stabilizing selection

Disruptive selection

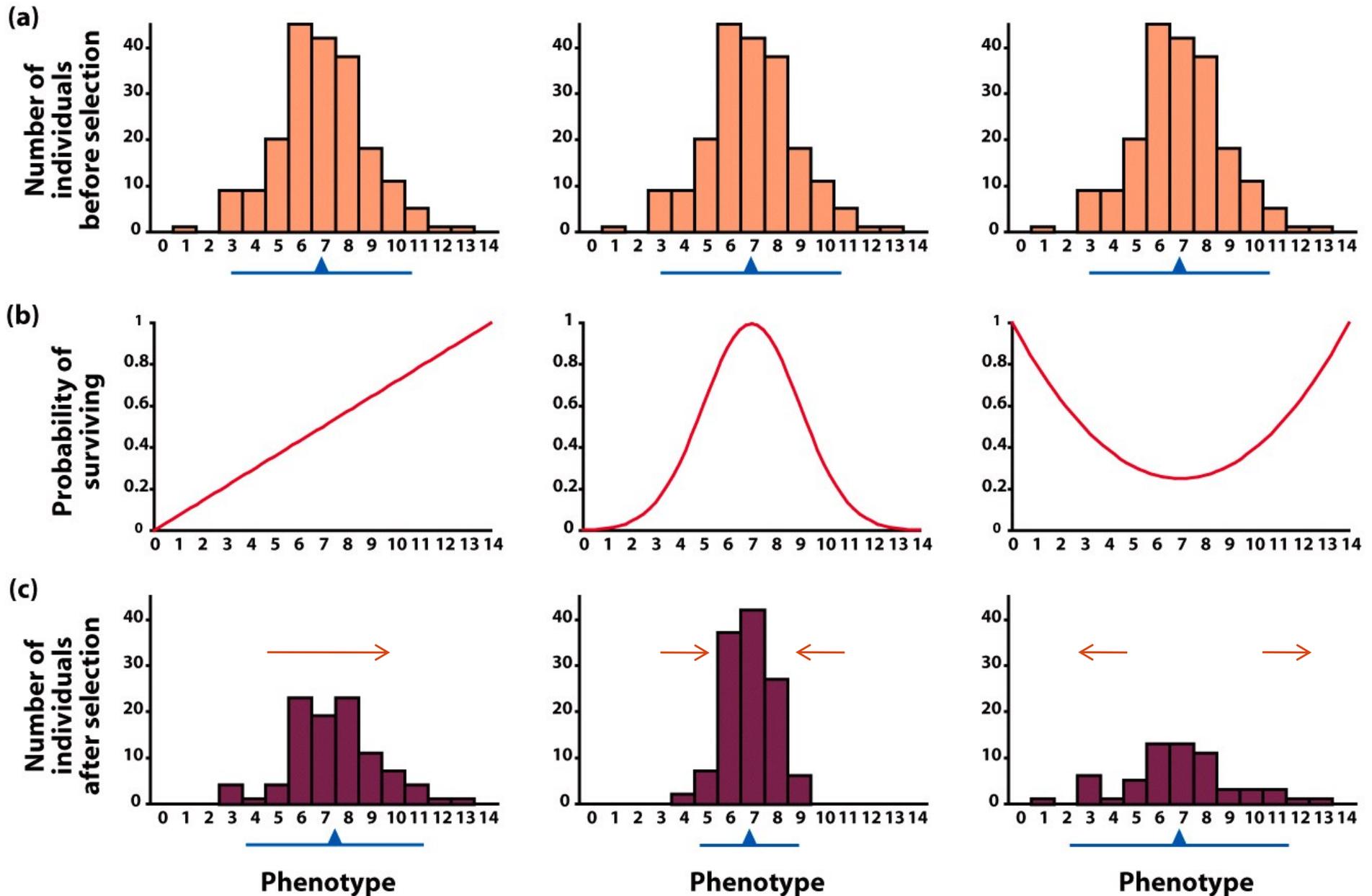
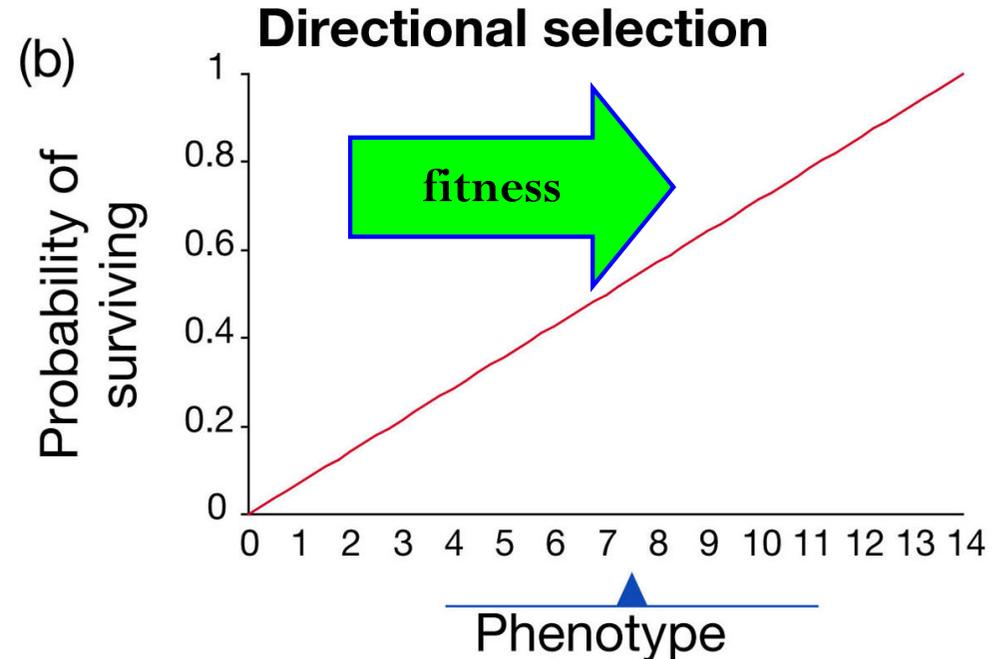
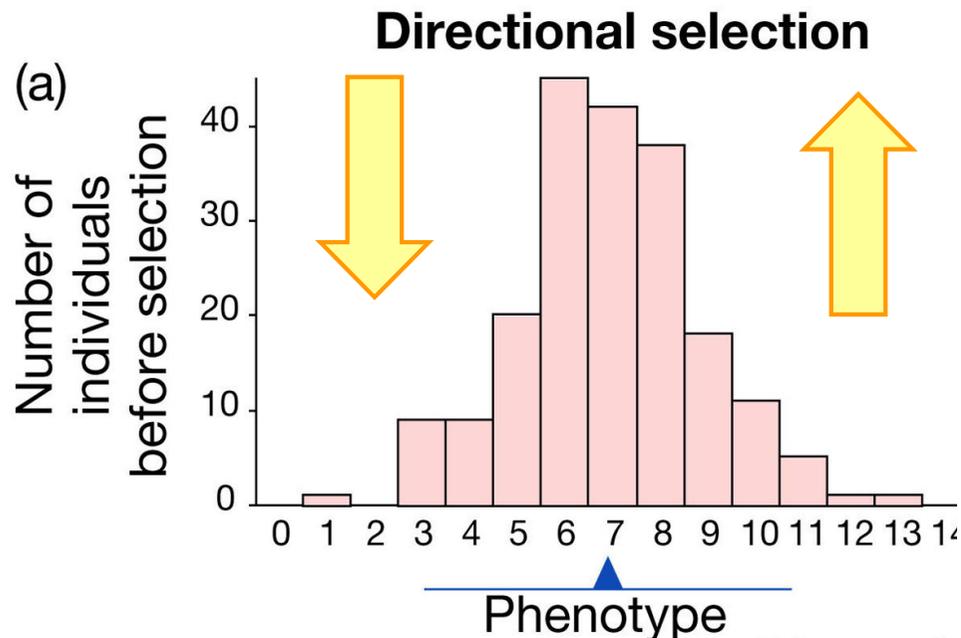


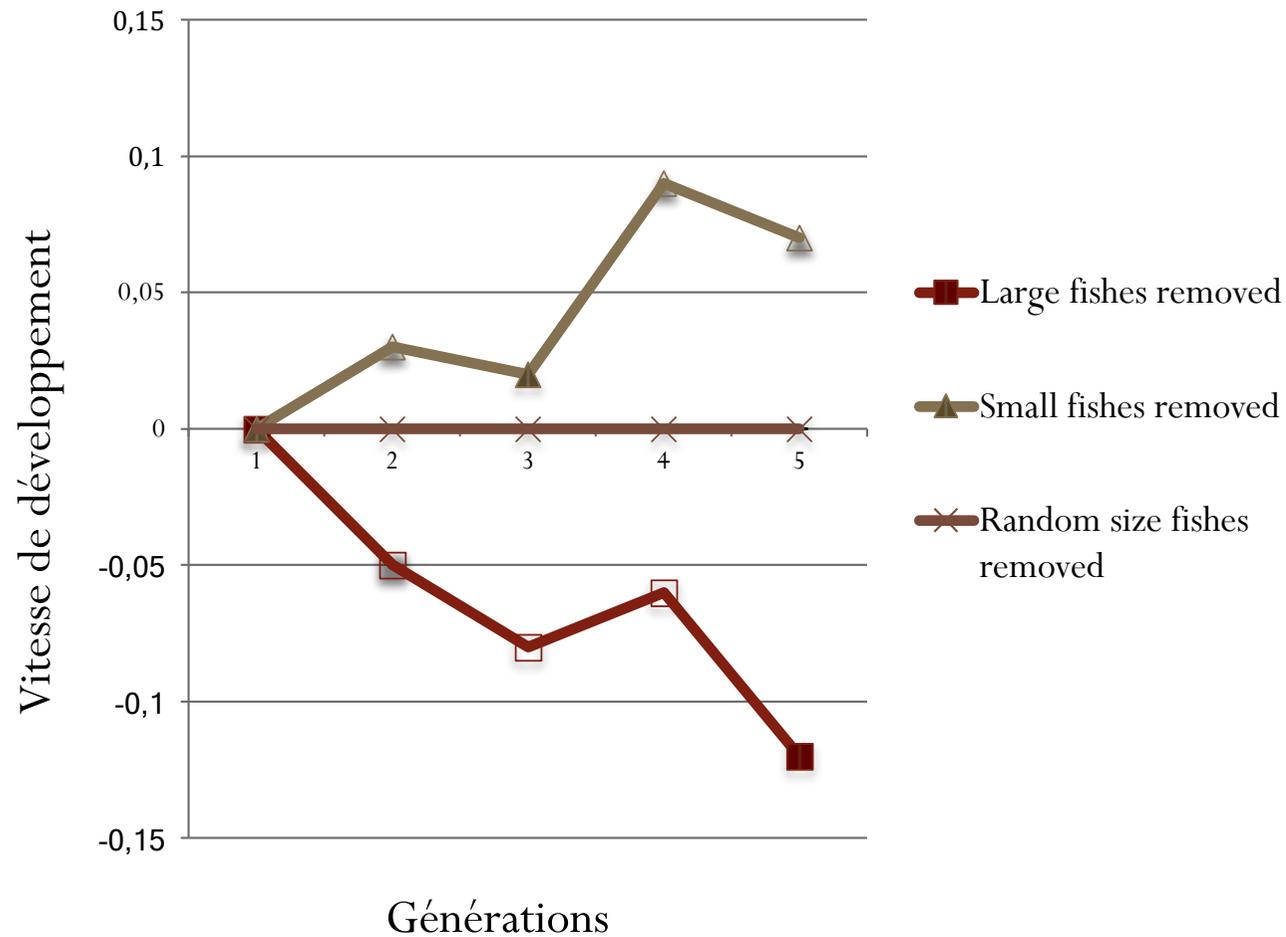
Figure 9-25 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Sélection directionnelle

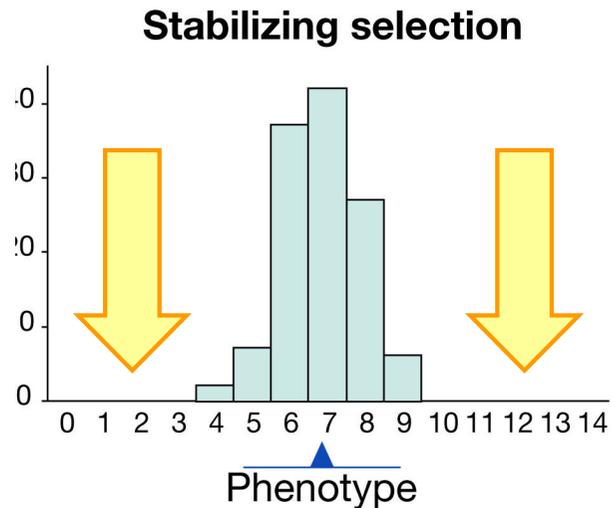
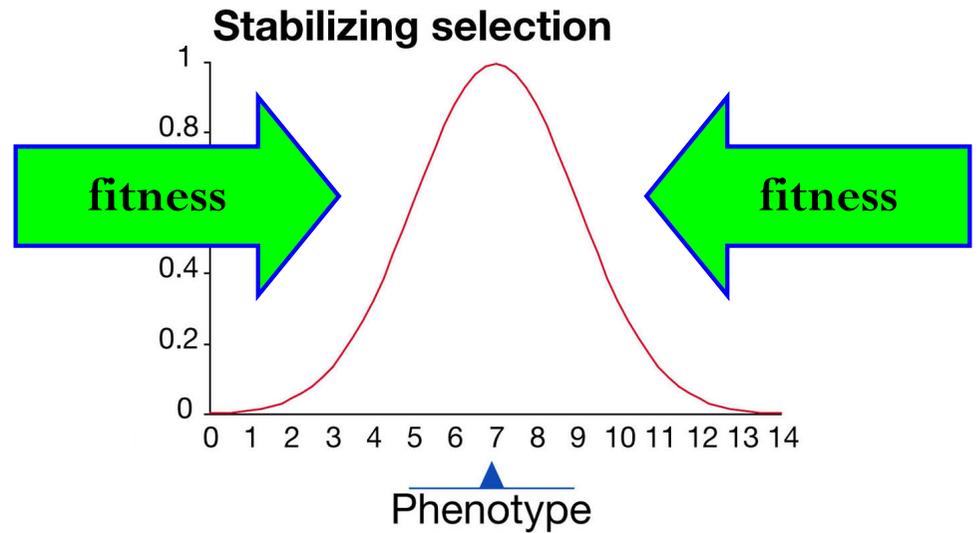
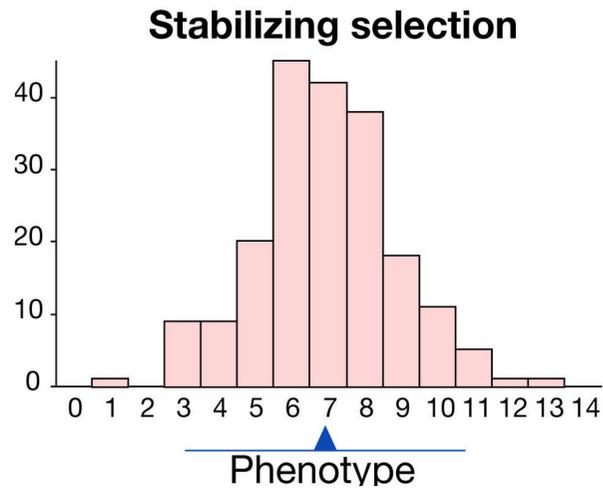


Les individus ayant une valeur élevée pour le caractère ont une plus grande fitness.

Effet de la pêche sélective sur le taux de croissance des poissons



Sélection stabilisante



Les individus ayant une valeur extrême sont défavorisés.

À la génération suivante, la moyenne est similaire mais la distribution est moins étendue.

Exemple de Sélection Stabilisante



Les femelles de la mouche *Eurosta solidaginis* pondent un seul œuf dans la tige de *Solidago altissima* (Asteraceae).

Exemple de Sélection Stabilisante



La plante répond en isolant la larve dans une galle.

La galle constitue un environnement protégé pour la larve.

Exemple de Sélection Stabilisante

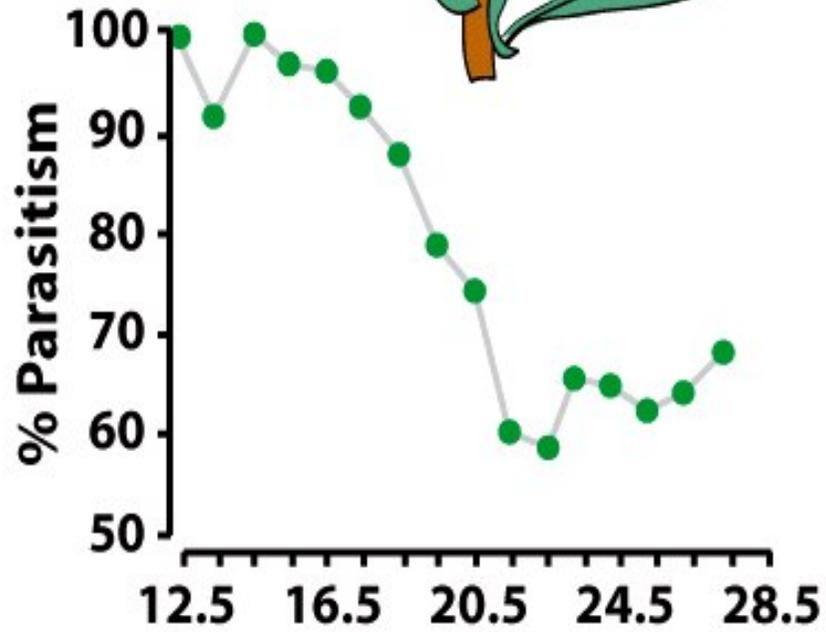
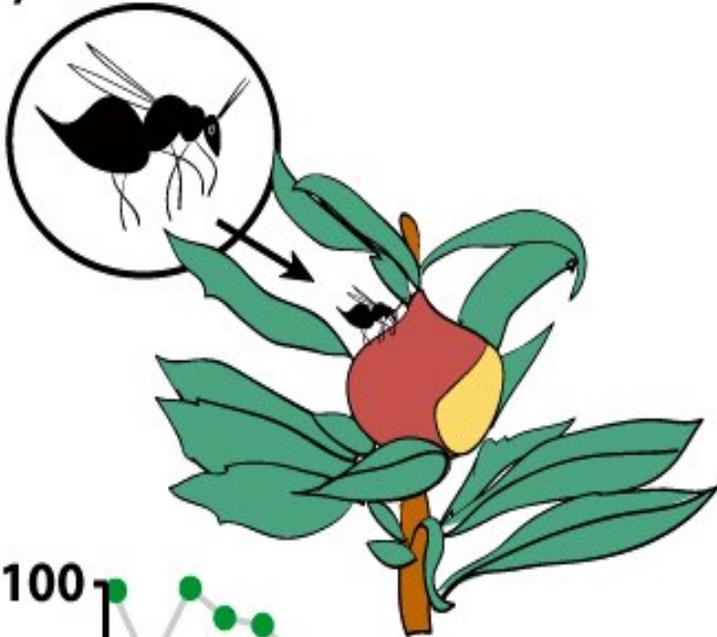


La galle devient plus dure et la larve va effectuer une pupaison pour devenir une mouche adulte qui sortira de la galle.

Exemple de Sélection Stabilisante

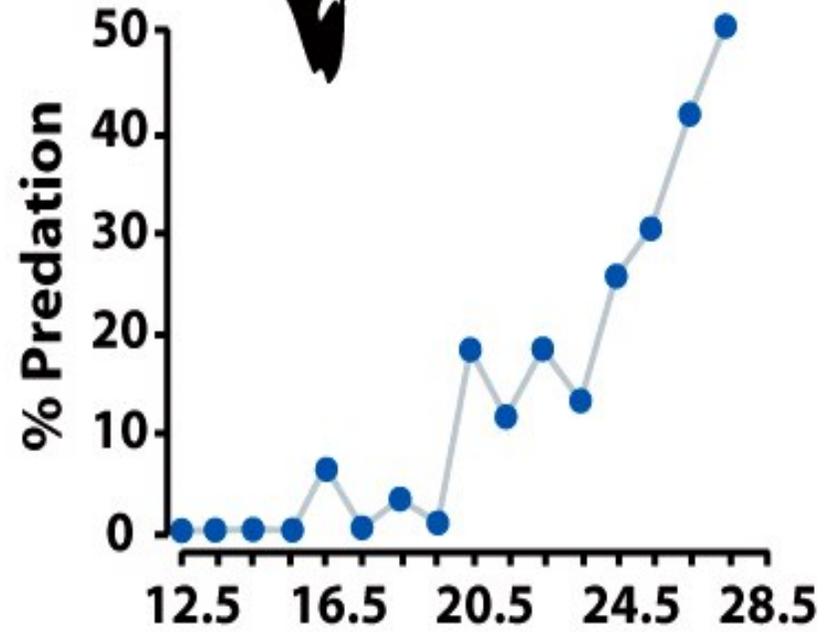


(a)

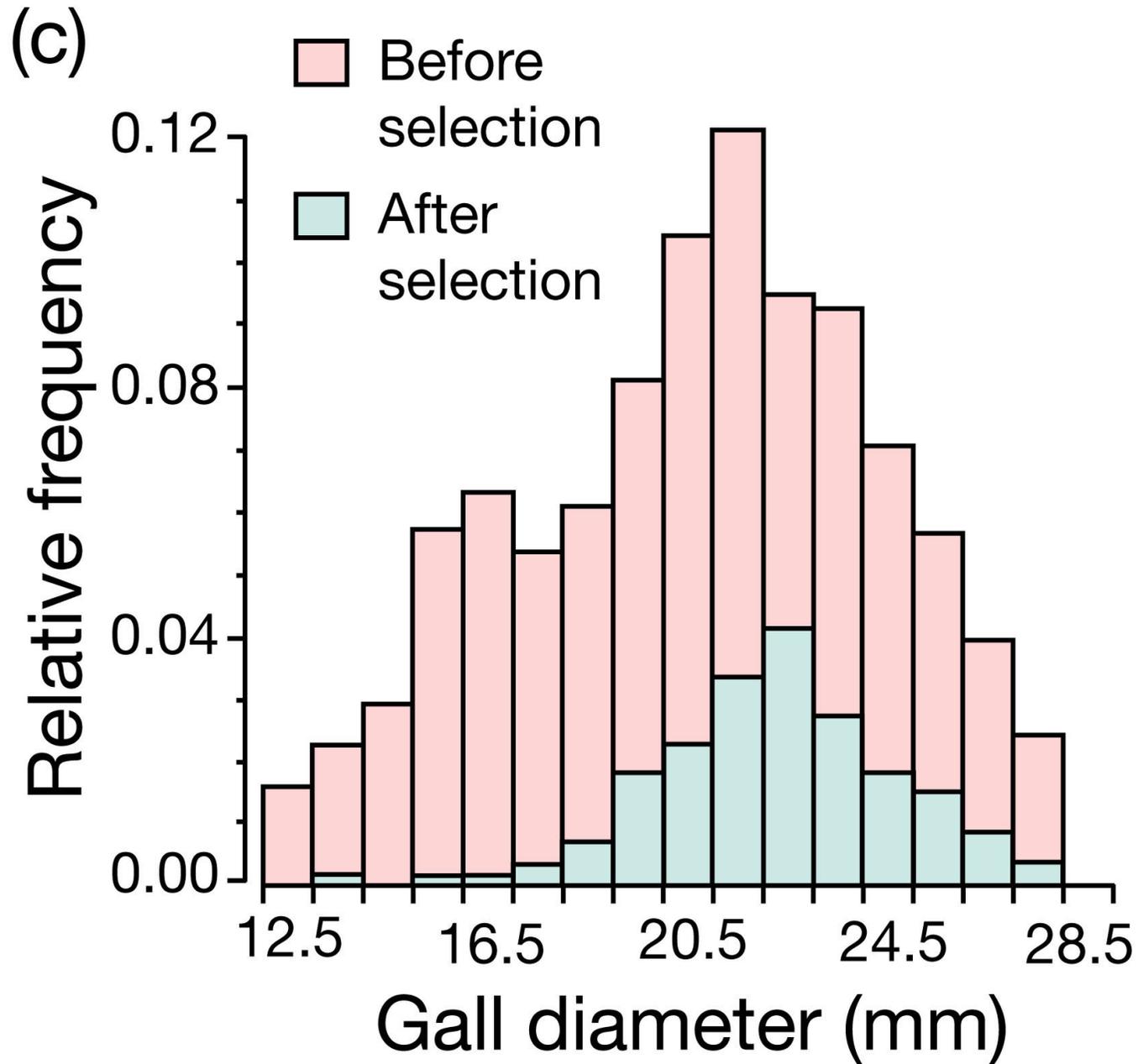


Taille des galls

(b)



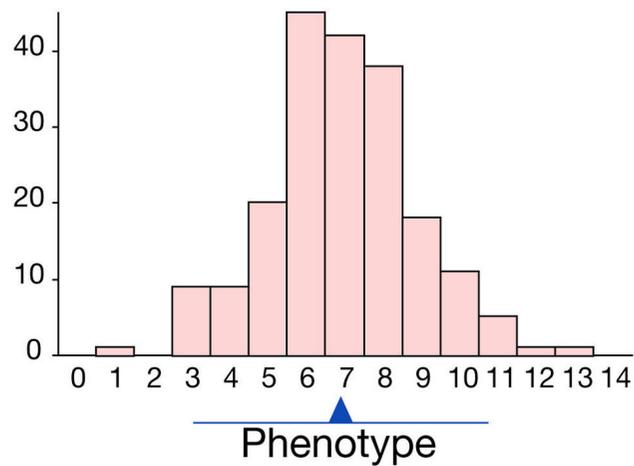
Taille des galls



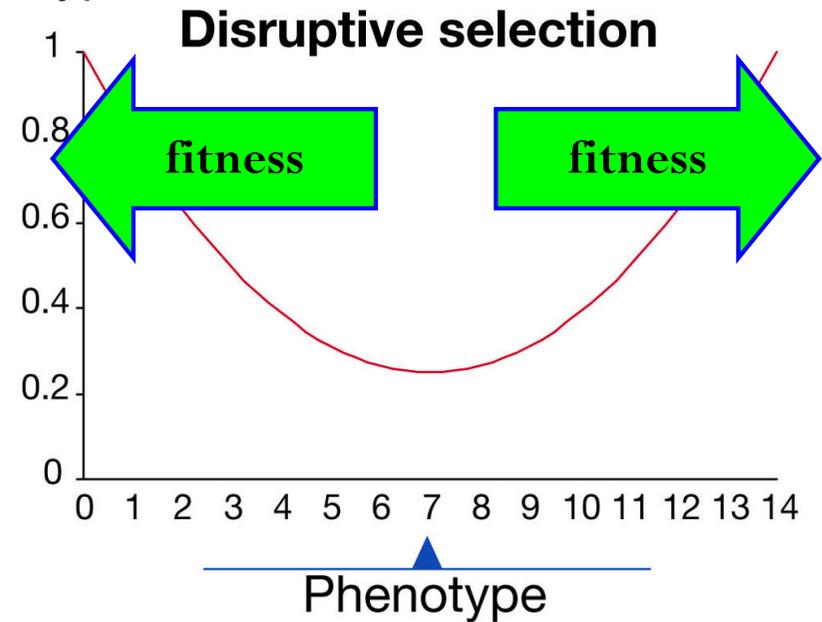
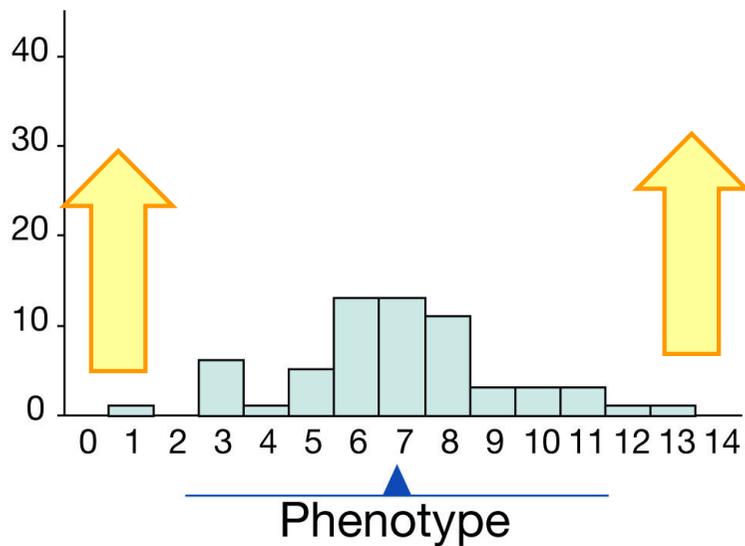
Copyright © 2004 Pearson Prentice Hall, Inc.

Disruptive Selection

Disruptive selection



Disruptive selection

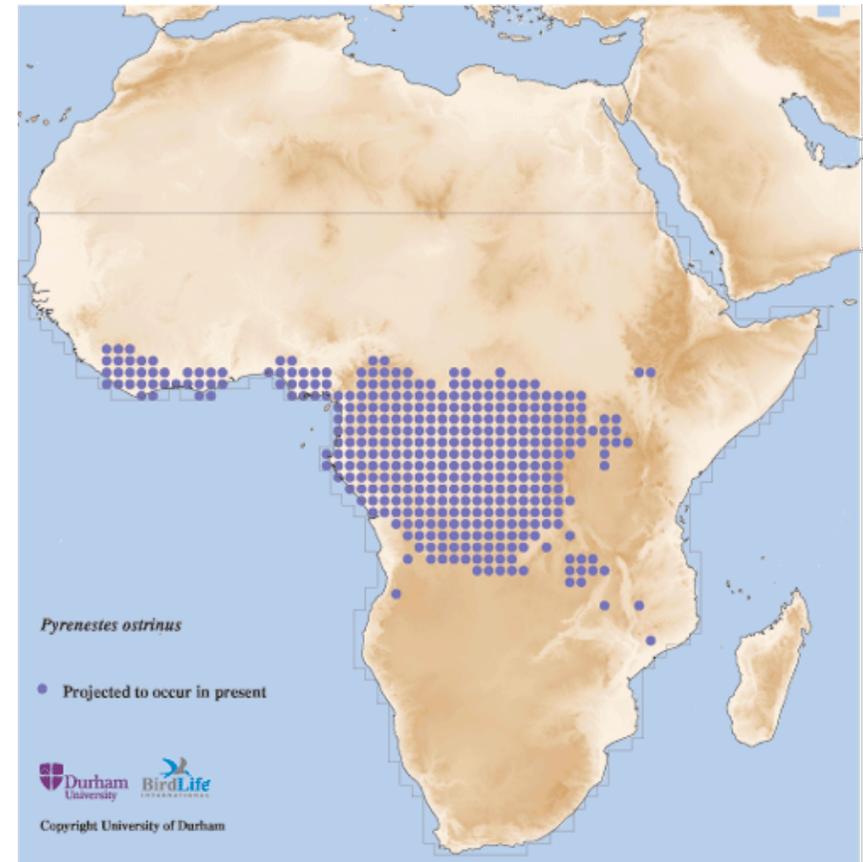


Les individus ayant une valeur centrale sont défavorisés
Après sélection, la distribution tend vers une de la binomiale

Exemple de Sélection Diversificatrice



Pyrenestes ostrinus: Espèce africaine granivore.

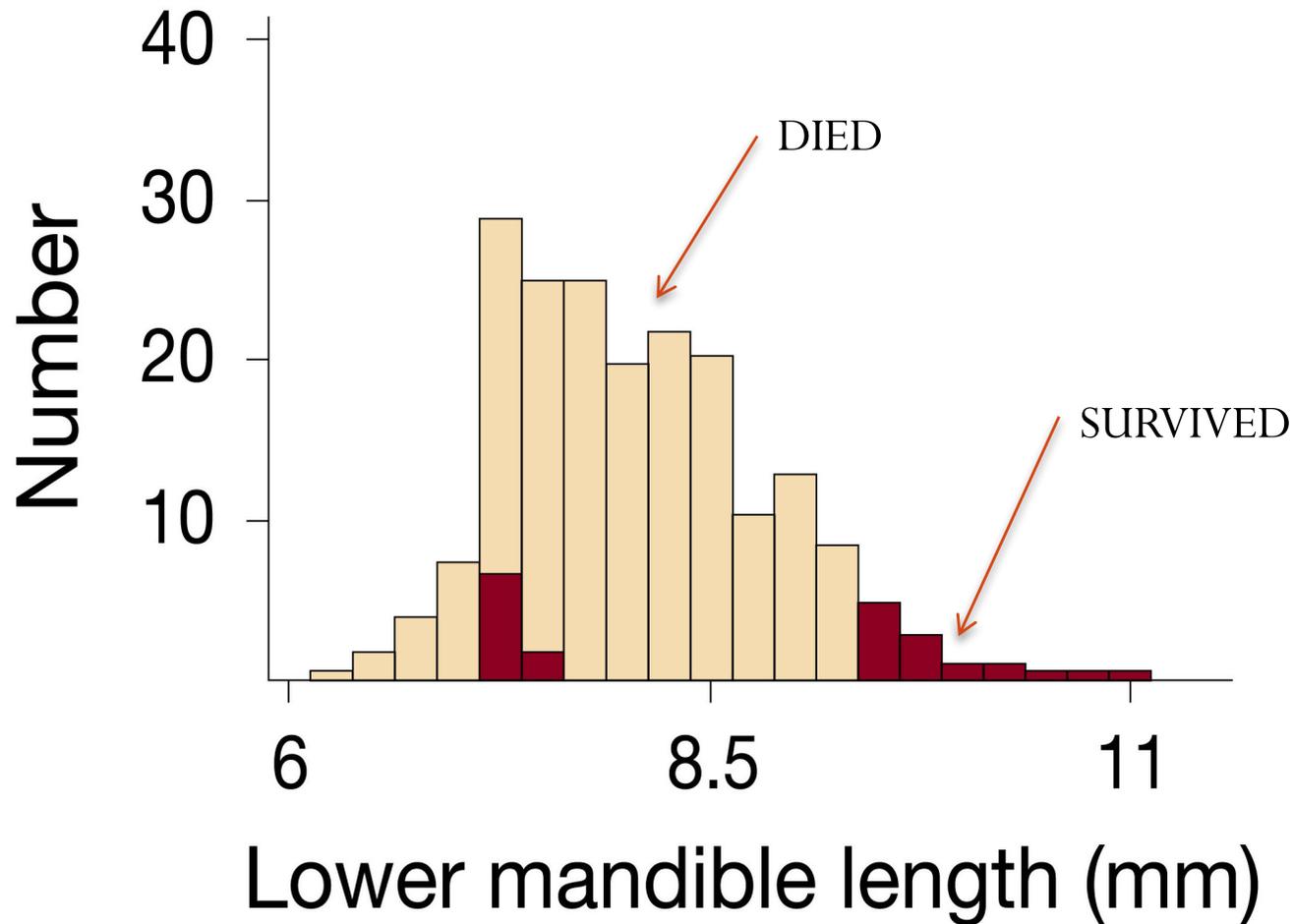


Exemple de Sélection Diversificatrice



Dans les populations naturelles, on trouve 2 tailles de bec.

Exemple de Sélection Diversificatrice

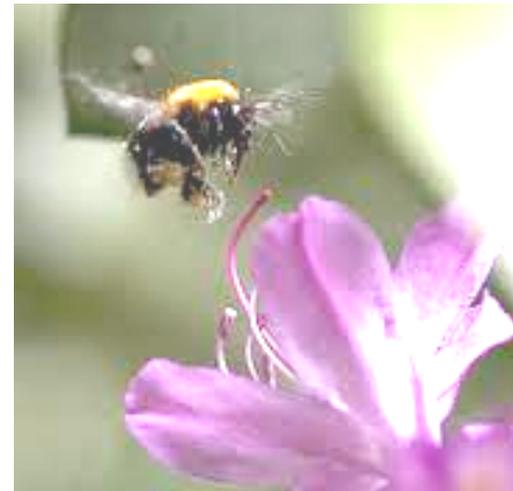


Copyright © 2004 Pearson Prentice Hall, Inc.

Le polymorphisme peut être maintenu par une sélection fréquence-dépendante

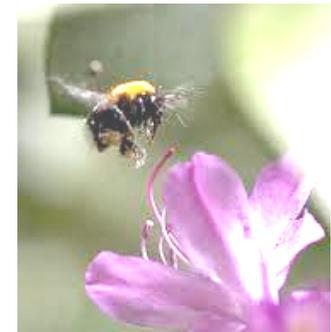
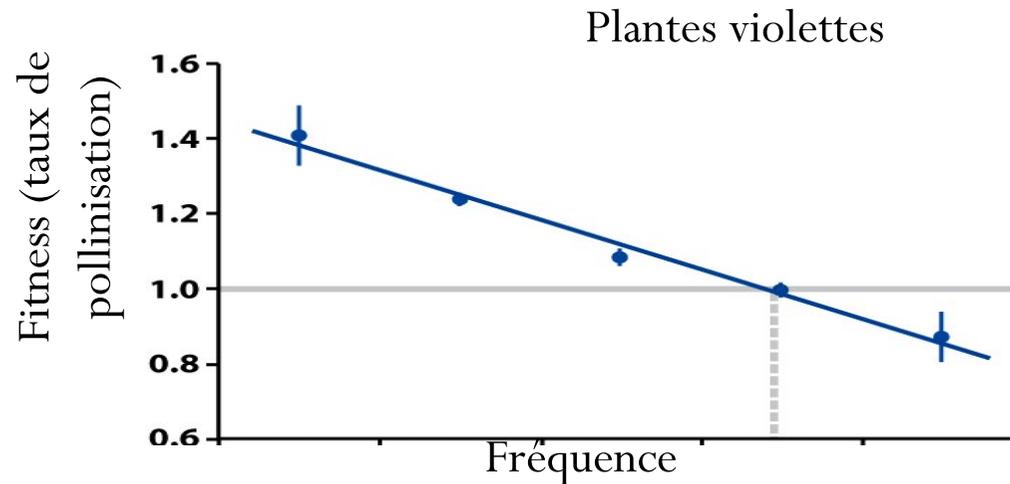


Figure 6-21a Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.



Orchidées *Dactylorhiza sambucina*
Décevantes pour les pollinisateurs:
Pollinisation par des bourdons qui n'obtiennent pas de nectar.

Le polymorphisme peut être maintenu par une sélection fréquence-dépendante



Plus une couleur est abondante moins sa fitness est grande.

Bases génétiques de la sélection naturelle

L'équilibre de Hardy-Weinberg

Pool de gènes initial (gamètes):

A : 60% a : 40%

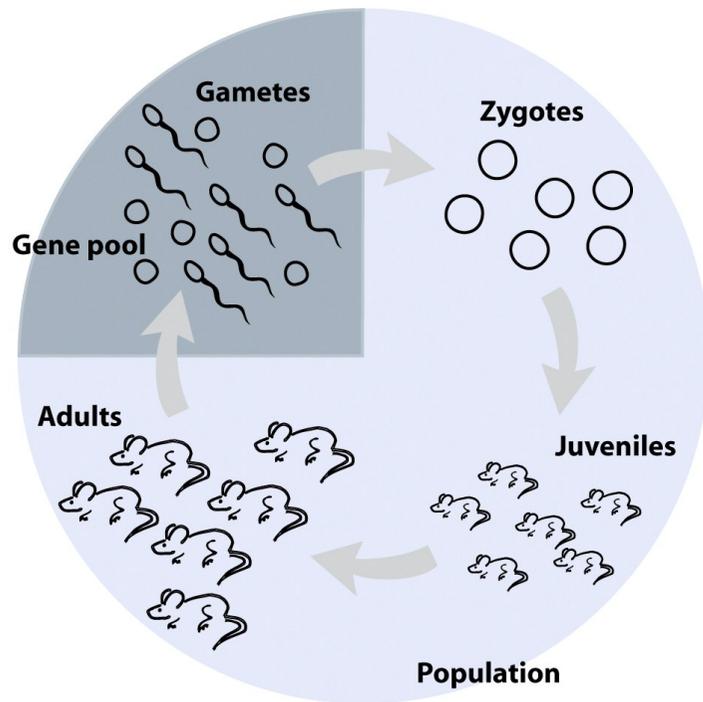


Figure 6-1 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

L'équilibre de Hardy-Weinberg

Pool de gènes initial (gamètes):

A : 60% a : 40%

Tirage au sort de 200 gamètes pour former 100 adultes:

AA : 34 Aa : 57 aa : 9 \Rightarrow 125 A / 75 a

\Rightarrow valeurs théoriques?

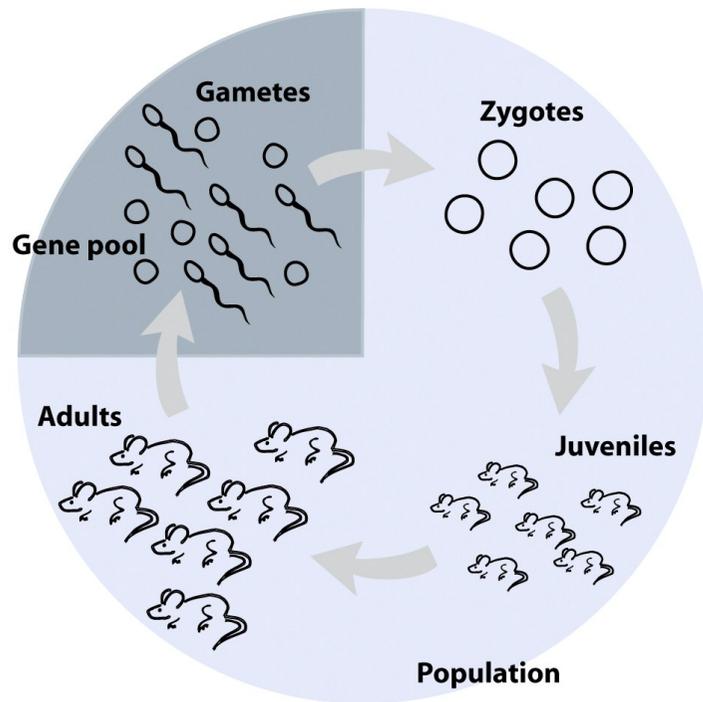
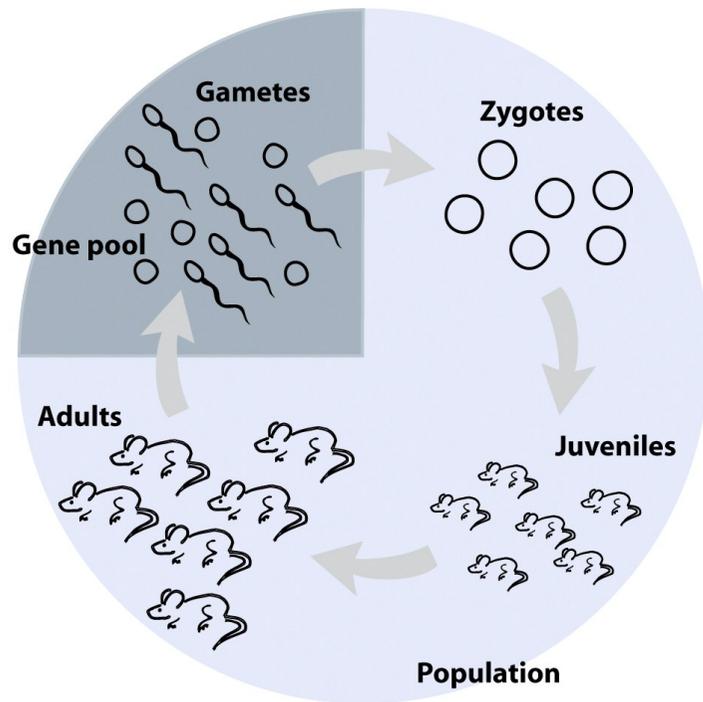


Figure 6-1 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

L'équilibre de Hardy-Weinberg

Pool de gènes initial (gamètes):

A : 60% a : 40%



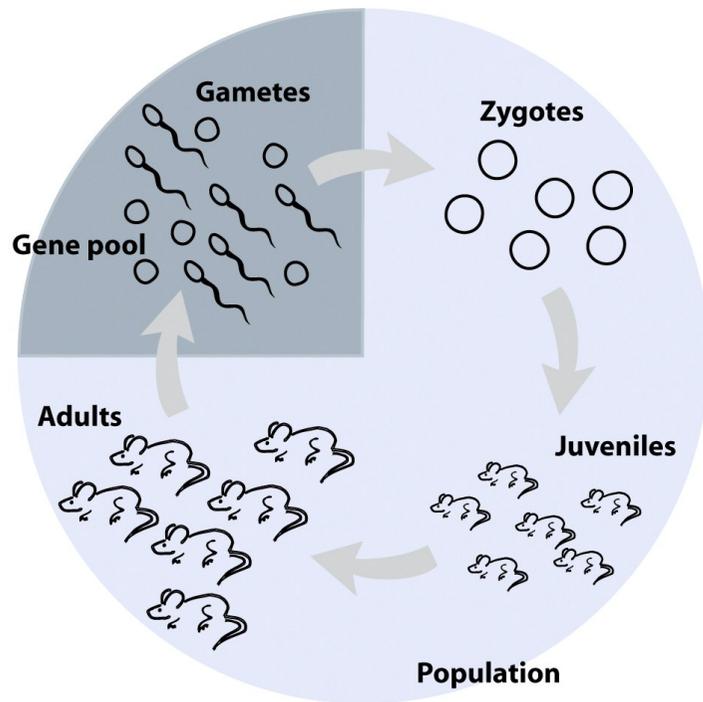
Tirage au sort de 200 gamètes pour former 100 adultes:

AA : 34 Aa : 57 aa : 9 \Rightarrow 125 A / 75 a

\Rightarrow 120 A / 80 a

Figure 6-1 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

L'équilibre de Hardy-Weinberg



Pool de gènes initial (gamètes):

A : 60% a : 40%

Tirage au sort de 200 gamètes pour former 100 adultes:

AA : 34 Aa : 57 aa : 9 \Rightarrow 125 A / 75 a

\Rightarrow 120 A / 80 a

Quelles fréquences alléliques à la génération suivante?

L'équilibre de Hardy-Weinberg

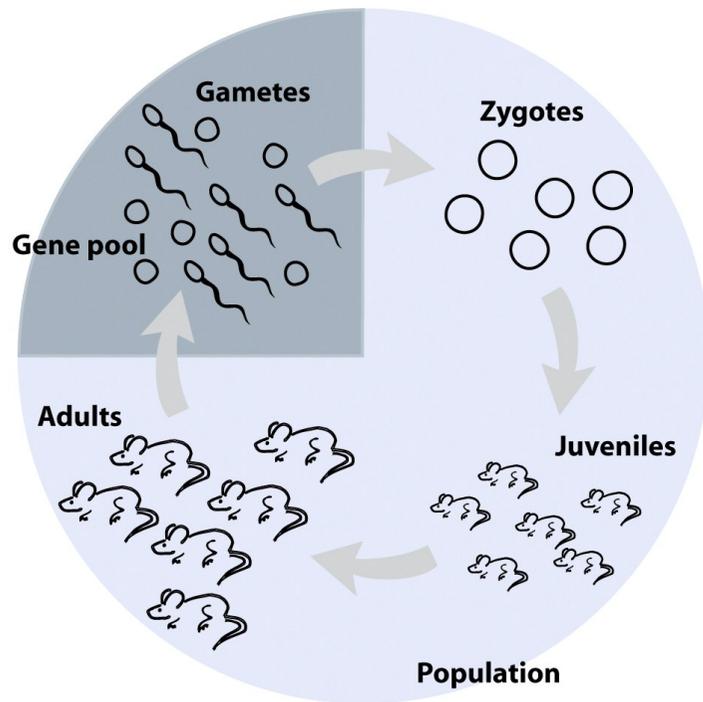


Figure 6-1 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Pool de gènes initial (gamètes):

$A: 60\%$ $a: 40\%$

Tirage au sort de 200 gamètes pour former 100 adultes:

$AA: 34$ $Aa: 57$ $aa: 9$ $\Rightarrow 125 A / 75 a$

$\Rightarrow 120 A / 80 a$

Quelles fréquences alléliques à la génération suivante?

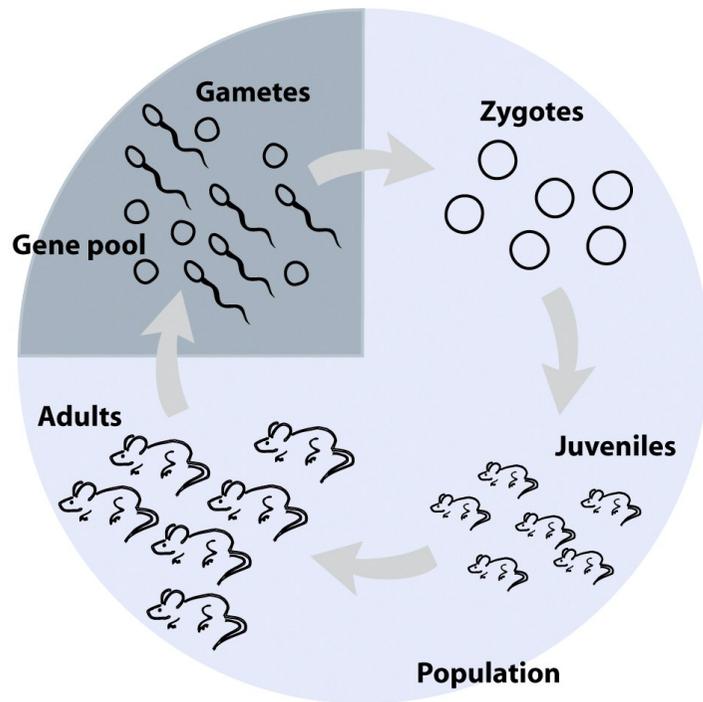
Chacun des 100 adultes produit 10 gamètes:

$A: 340 + 570 / 2 = 625$ (**62.5%**)

$a: 90 + 570 / 2 = 375$

(**37.5%**)

L'équilibre de Hardy-Weinberg



Pool de gènes initial (gamètes):

$A: 60\%$ $a: 40\%$

Tirage au sort de 200 gamètes pour former 100 adultes:

$AA: 34$ $Aa: 57$ $aa: 9$

$AA: 41$ $Aa: 44$ $aa: 15 \Rightarrow 126 A / 74 a$

$AA: 34$ $Aa: 49$ $aa: 17 \Rightarrow 117 A / 83 a$

Chacun des 100 adultes produit 10 gamètes:

$A: 340 + 570/2 = 625$ (62.5%) $a: 90 + 570/2 = 375$
(37.5%)

Figure 6-1 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

L'équilibre de Hardy-Weinberg

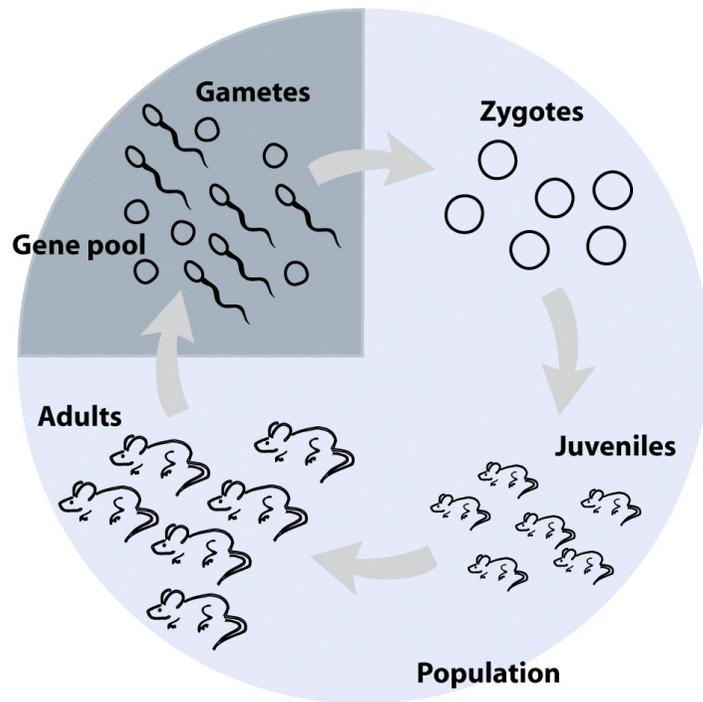


Figure 6-1 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Pool de gènes initial (gamètes):

A : 60% a : 40%

Tirage au sort de 200 gamètes pour former 100 adultes:

AA : 34 Aa : 57 aa : 9

AA : 41 Aa : 44 aa : 15

AA : 34 Aa : 49 aa : 17

Chacun des 100 adultes produit 10 gamètes:

A : $340 + 570/2 = 625$ (62.5%) a : $90 + 570/2 = 375$
(37.5%)

A : $410 + 440/2 = 630$ (63.0%) a : $150 + 440/2 = 370$
(37.0%)

A : $340 + 490/2 = 585$ (58.5%) a : $170 + 490/2 = 415$
(41.5%)

Les fréquences alléliques de la deuxième génération sont proches de celles de la première génération. Les écarts sont uniquement dus au hasard lors du tirage au sort des gamètes.

Soit UN gène A avec deux allèles A1 et A2 dont les fréquences sont

$$\text{Fr}(A1)=p$$

$$\text{Fr}(A2)=q; \quad \text{Calcul des fréquences génotypiques ?}$$

$$p+q=1$$

p et q sont aussi les fréquences des gamètes produits

Calcul des fréquences génotypiques

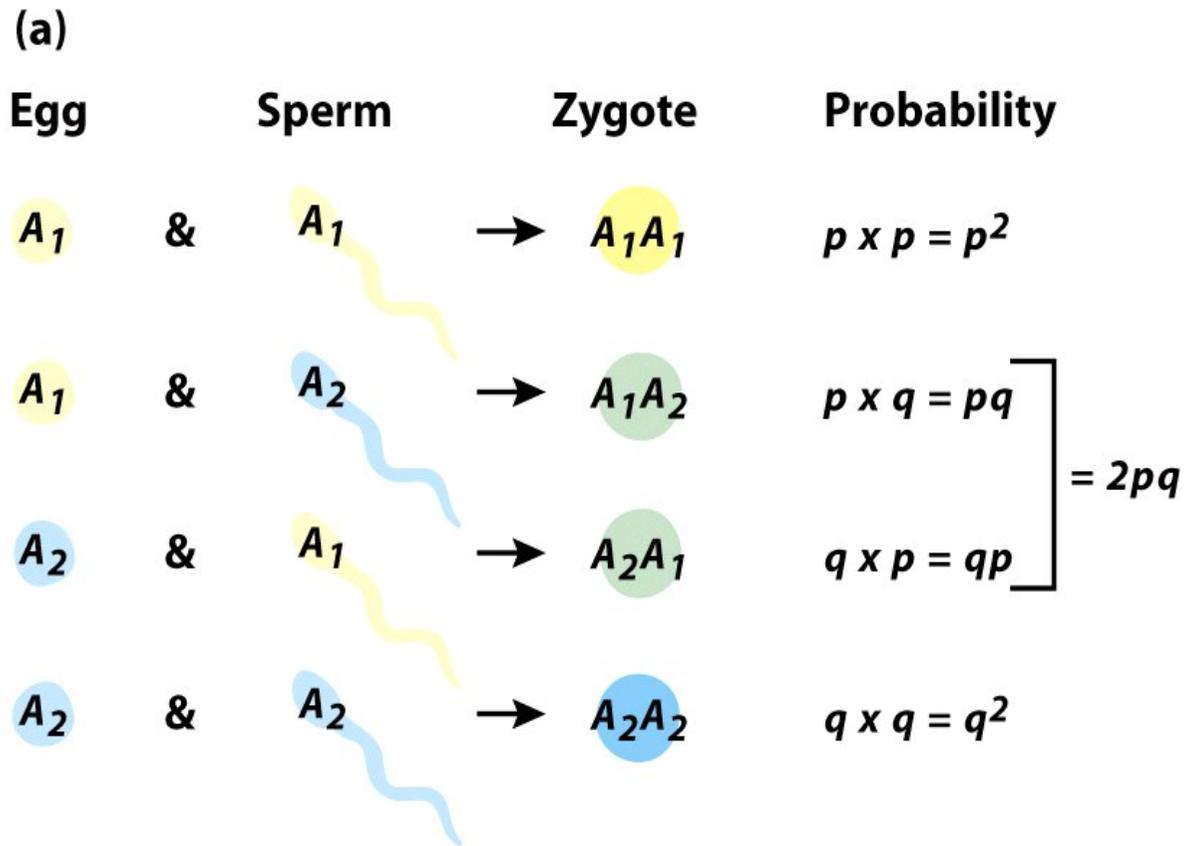


Figure 6-8 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Calcul des fréquences génotypiques

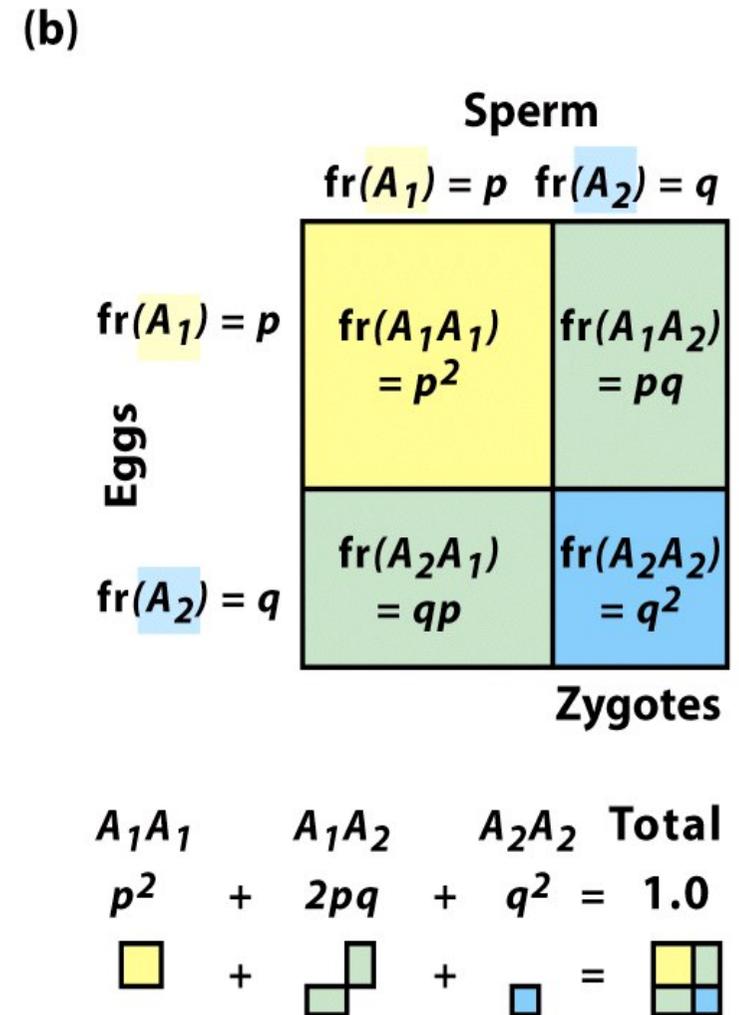
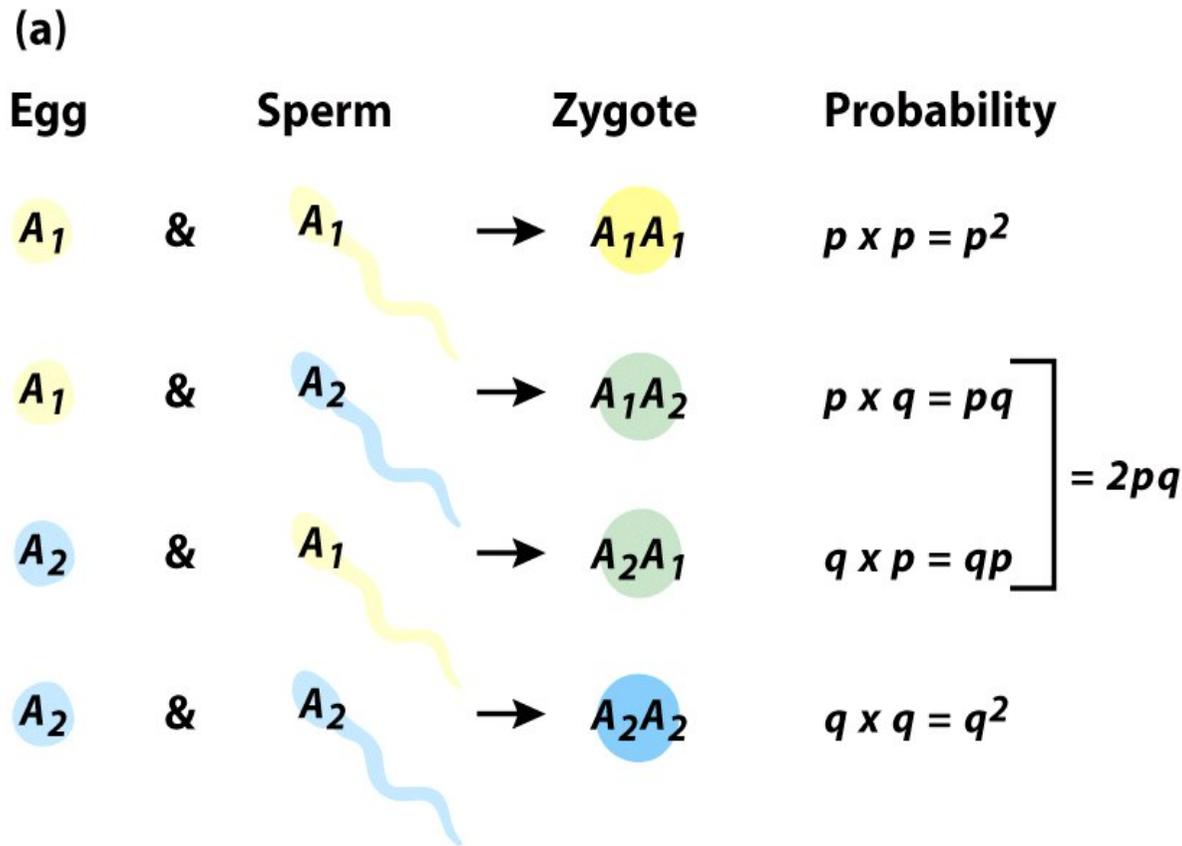
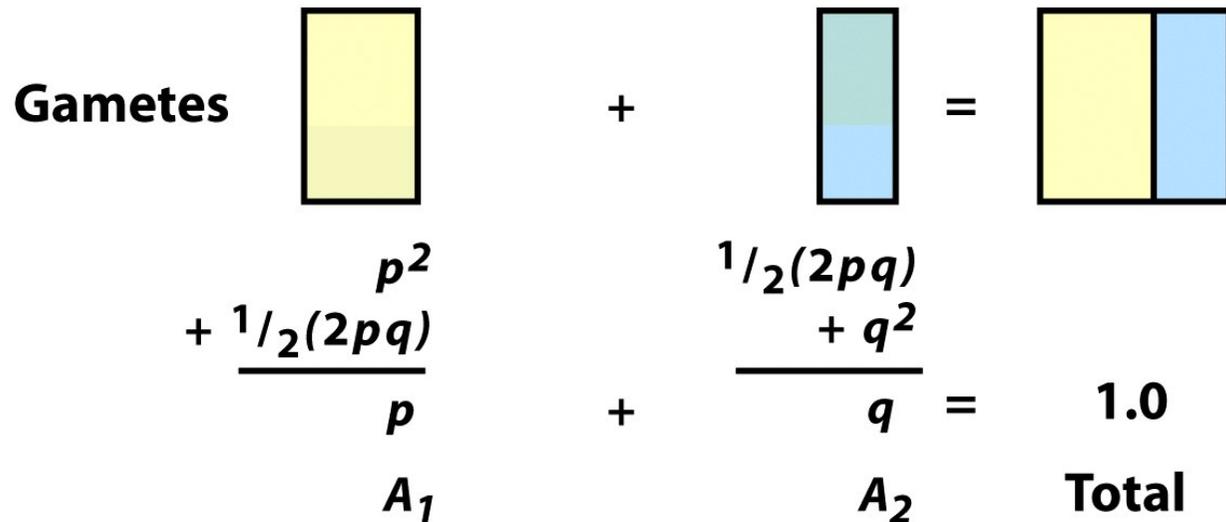
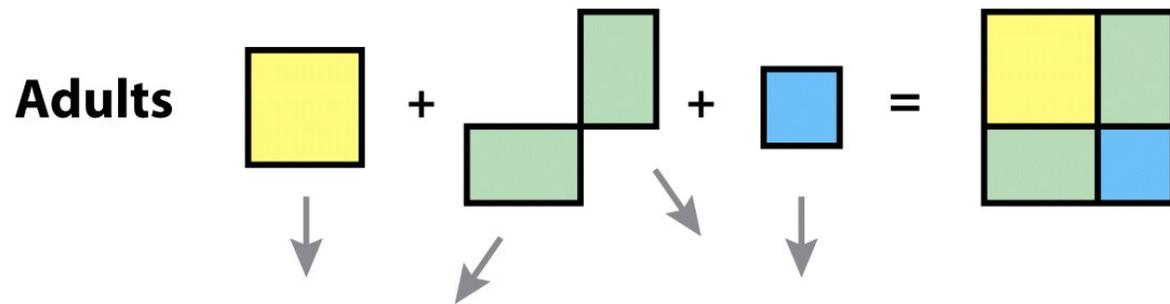


Figure 6-8 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

L'équilibre de Hardy-Weinberg

$$A_1A_1 + A_1A_2 + A_2A_2 = \text{Total}$$

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1.0$$



Calcul des fréquences alléliques finales:

Si rien n'intervient entre les deux générations, les fréquences alléliques sont inchangées

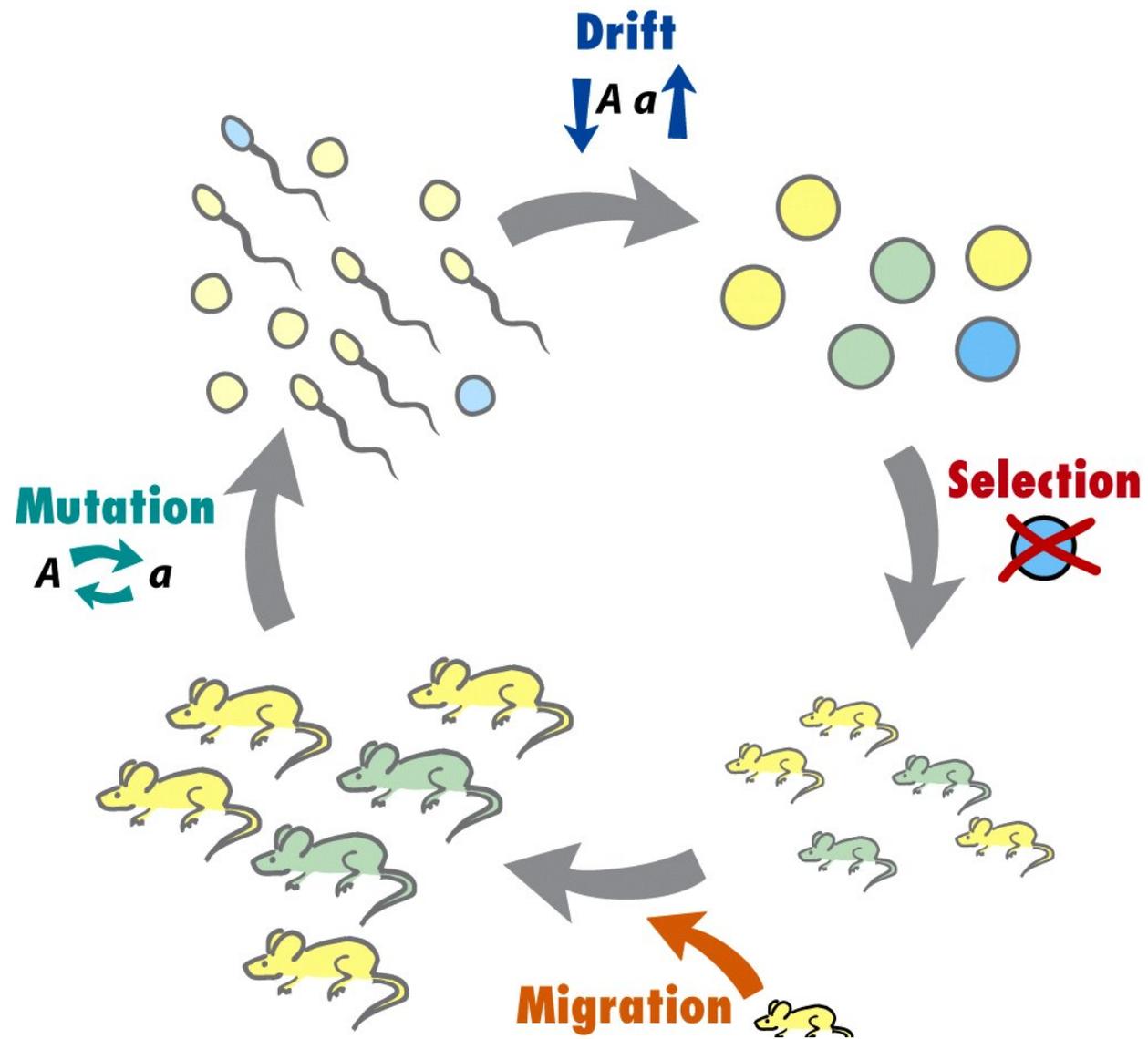


Figure 6-10 Evolutionary Analysis, 4/e
 © 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Le principe de HW décrit l'absence d'évolution dans une population si:

Pas sélection: tous les individus survivent et produisent des gamètes

Pas de mutation: aucun allèle n'est transformé entre les deux générations

Pas de migration: tous les individus restent dans la population

La population est infinie: La chance peut intervenir dans les petites populations et provoquer la dérive génétique

Les individus s'accouplent au hasard: Pas de choix du partenaire

Que se passe t'il s'il y a sélection?

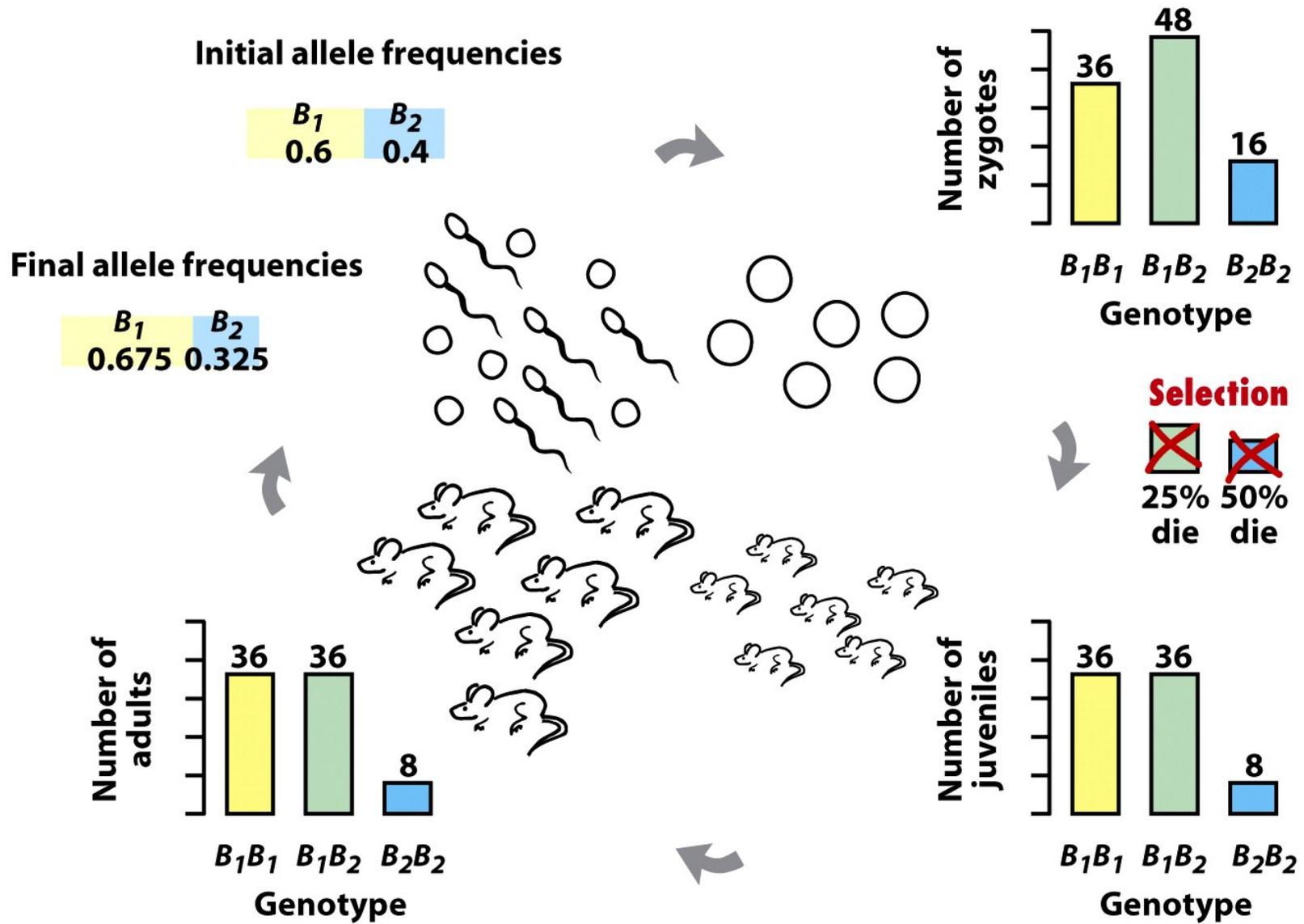


Figure 6-11 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

La fréquence de l'allèle B_1 a augmenté de 7.5 points en une génération.

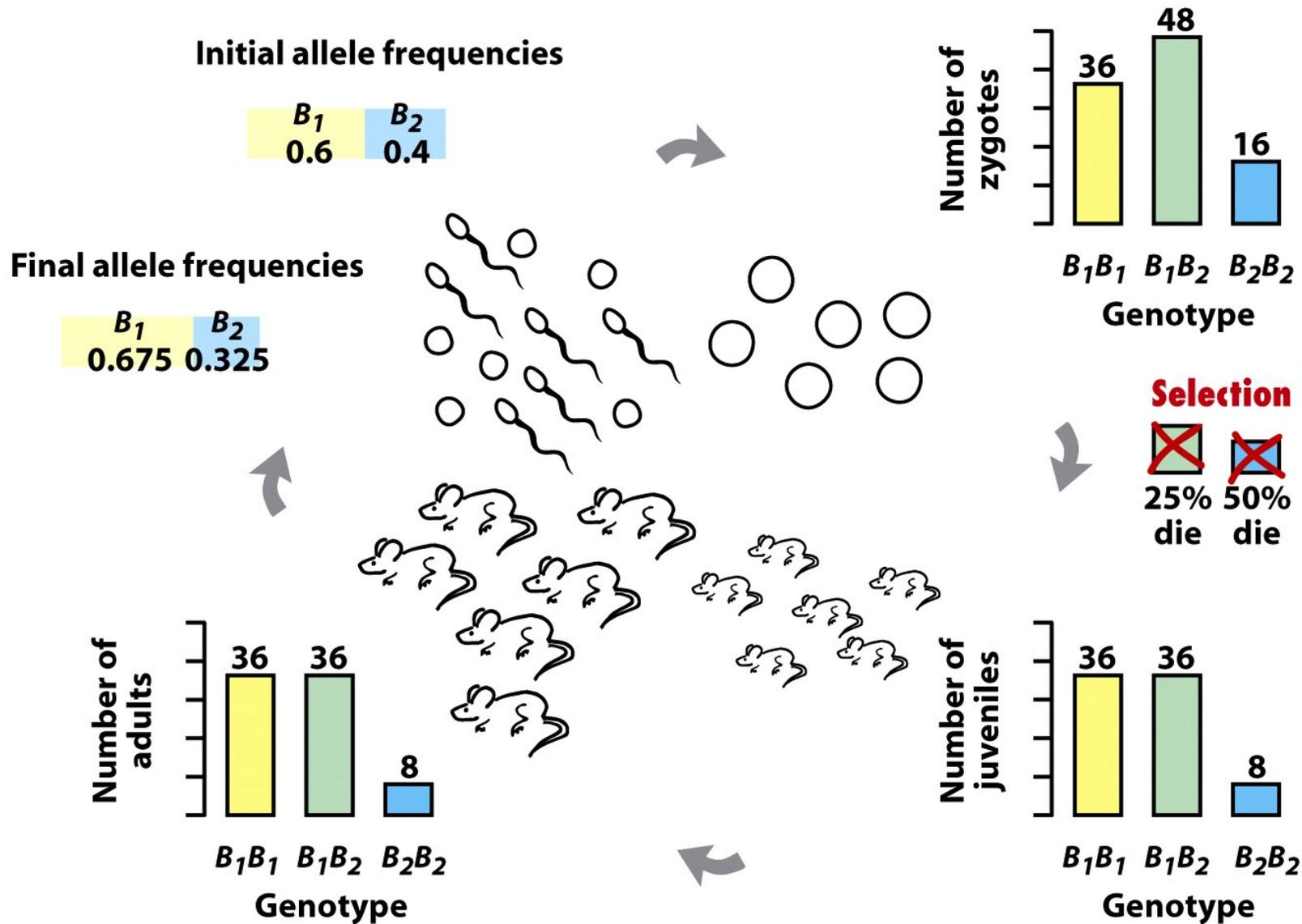


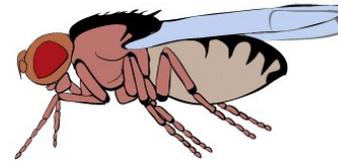
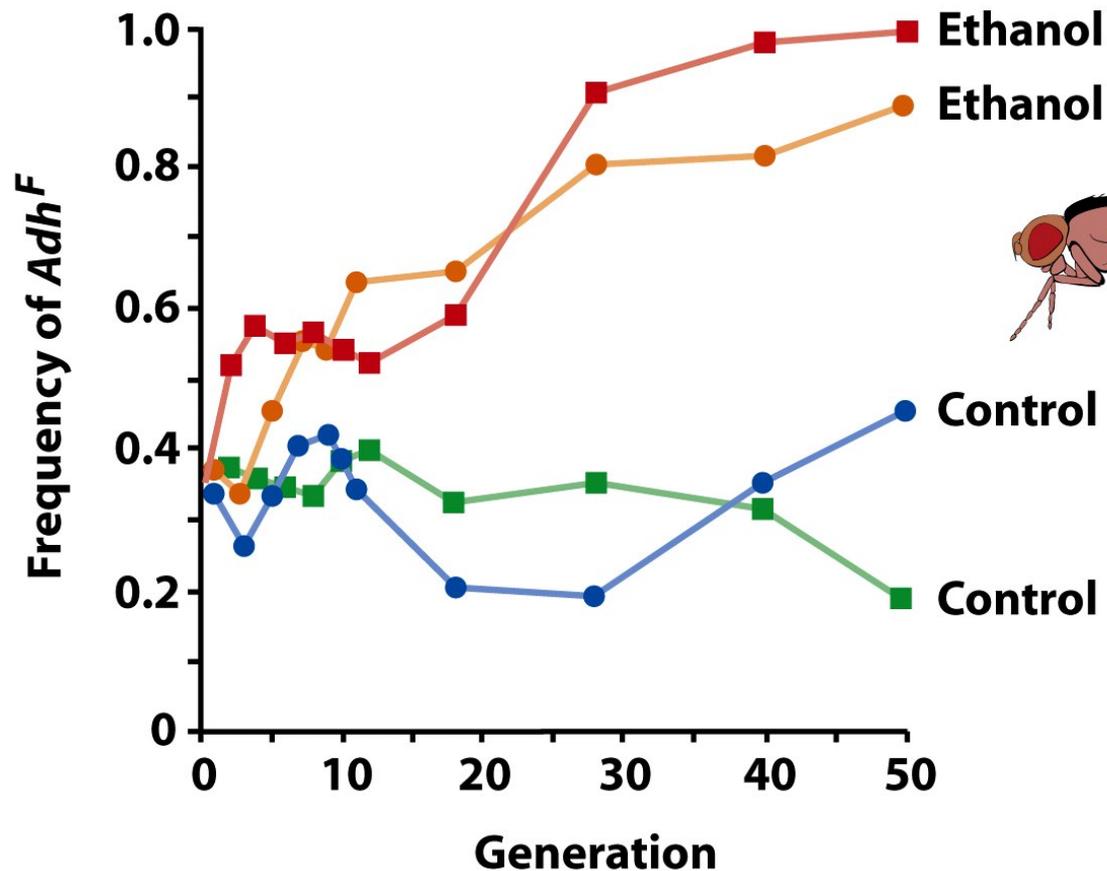
Figure 6-11 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Sélection de la résistance à l'éthanol chez la mouche du fruit

L'Alcohol Deshydrogenase (ADH) permet l'oxydation de l'éthanol en
aldéhyde: $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{-CH=O}$

L'allèle AdhF produit une protéine plus efficace dans la dégradation de
l'alcool que l'allèle sauvage Adh+

Sélection de la résistance à l'éthanol chez la mouche du fruit

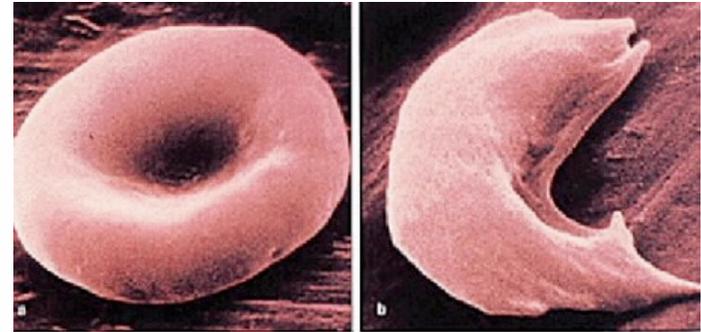
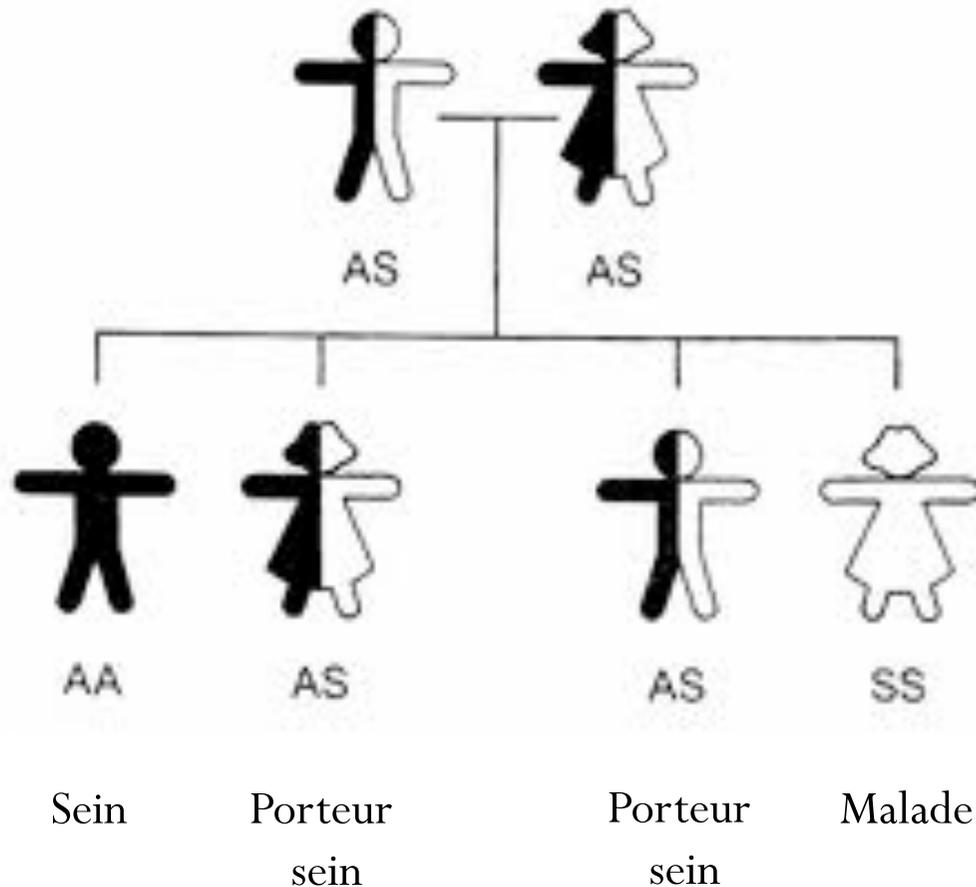


Les fréquences en milieu control (sans alcool) ne changent pas (respecte HW).

La fréquence de Adh^F en milieu alcoolisé augmente: il y a sélection

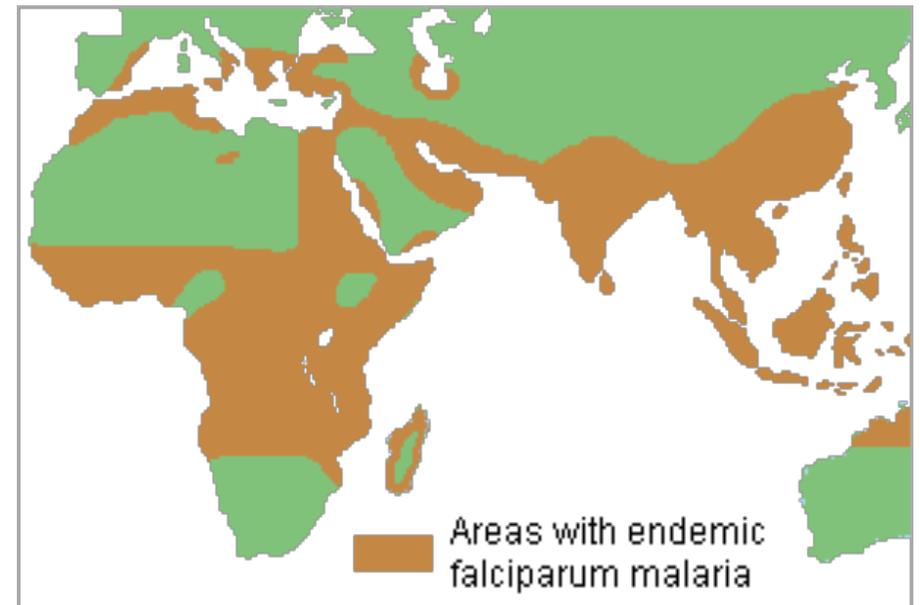
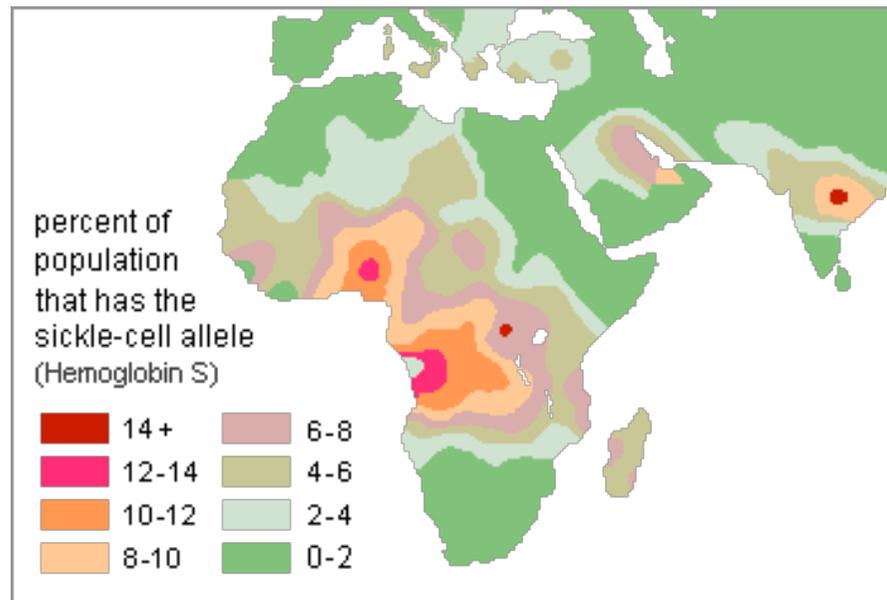
Figure 6-13 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Effet de la sélection sur la composition génétique des populations



Les homozygotes SS ne sont pas viables: Forte sélection négative sur l'allèle S

Sélection dans un système à 2 allèles: l'anémie falciforme

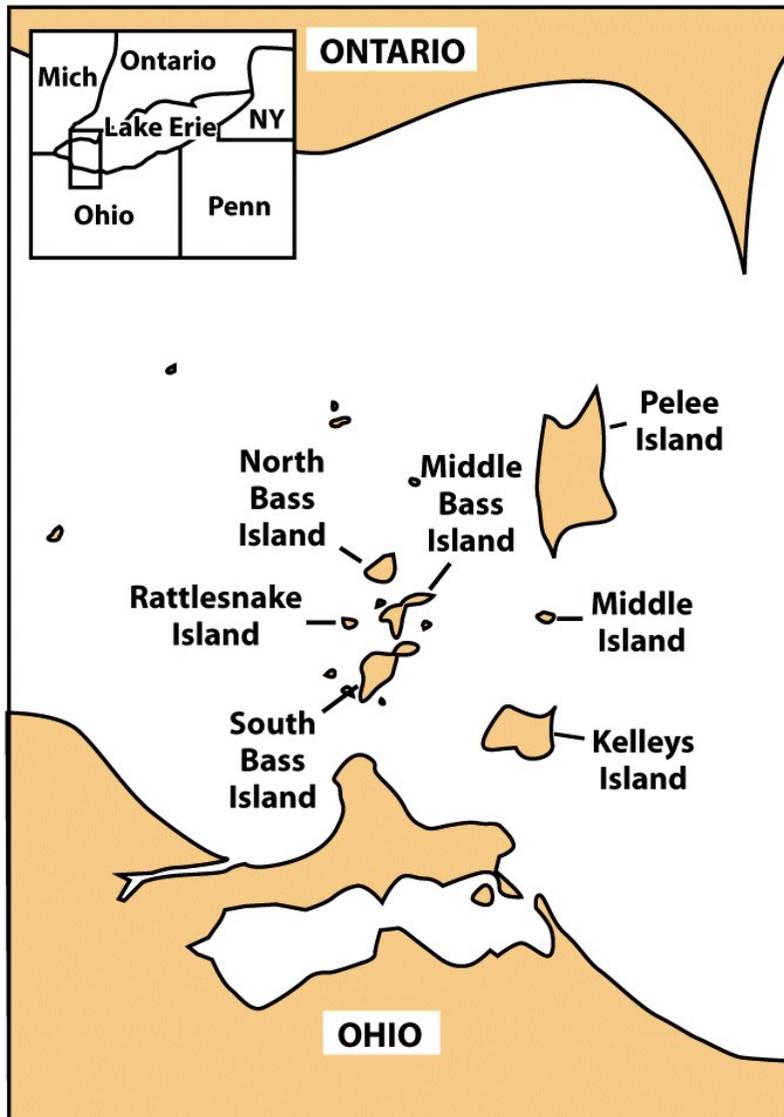


En Afrique et en Asie, les Hétérozygotes A/S résistent mieux que les homozygotes AA à la malaria causée par *Plasmodium falciparum*

Mutation

- Taux de mutation variables selon les espèces
- Insuffisants pour avoir un effet notable sur les fréquences alléliques même sur de nombreuses générations
- Couplée à la sélection les mutations peuvent soit se répandre lorsqu'elles sont bénéfiques soit (le plus souvent) être éliminées lorsqu'elles sont néfastes
- Les mutations neutres peuvent s'accumuler au cours des générations

Migration



Nerodia sipedon

Migration

Camouflage = Comportement anti prédateur:

Continent: La végétation abondante favorise une couleur uniforme.

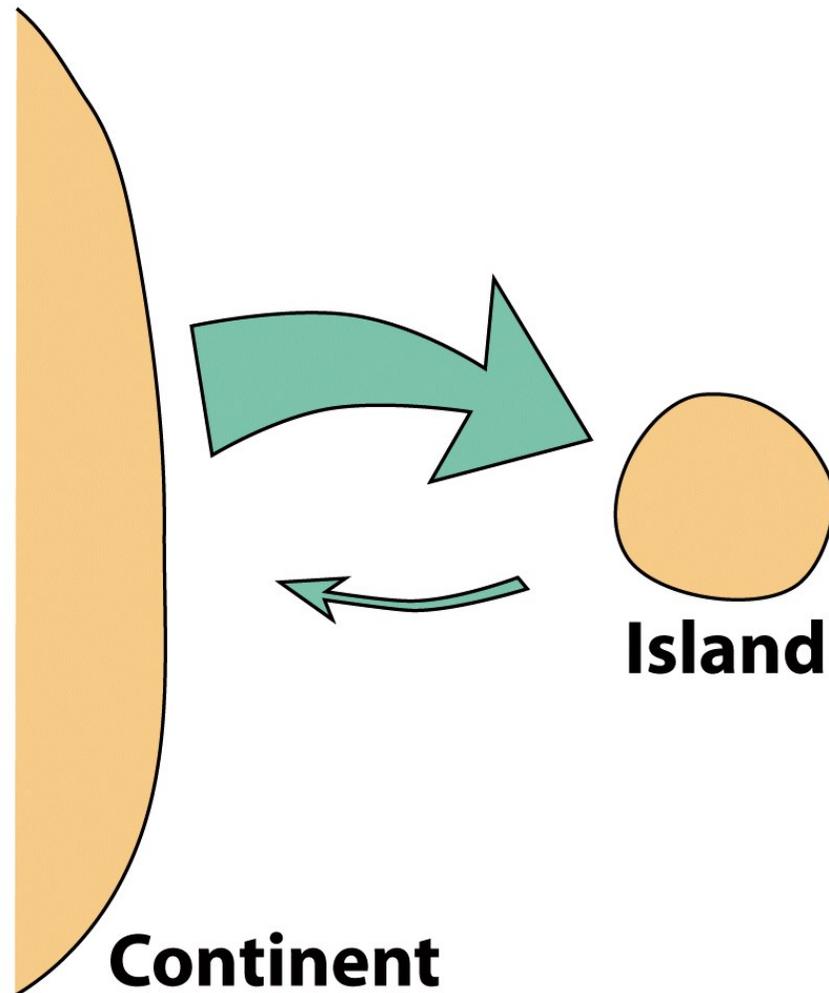
Iles: La faible végétation favorise une forme rayée plus claire.

Malgré cet avantage sélectif pourquoi l'allèle « *uniforme* » persiste t'il?



Nerodia sipedon

Migration



Plus fort taux de migration
depuis le continent vers les îles
que dans le sens inverse

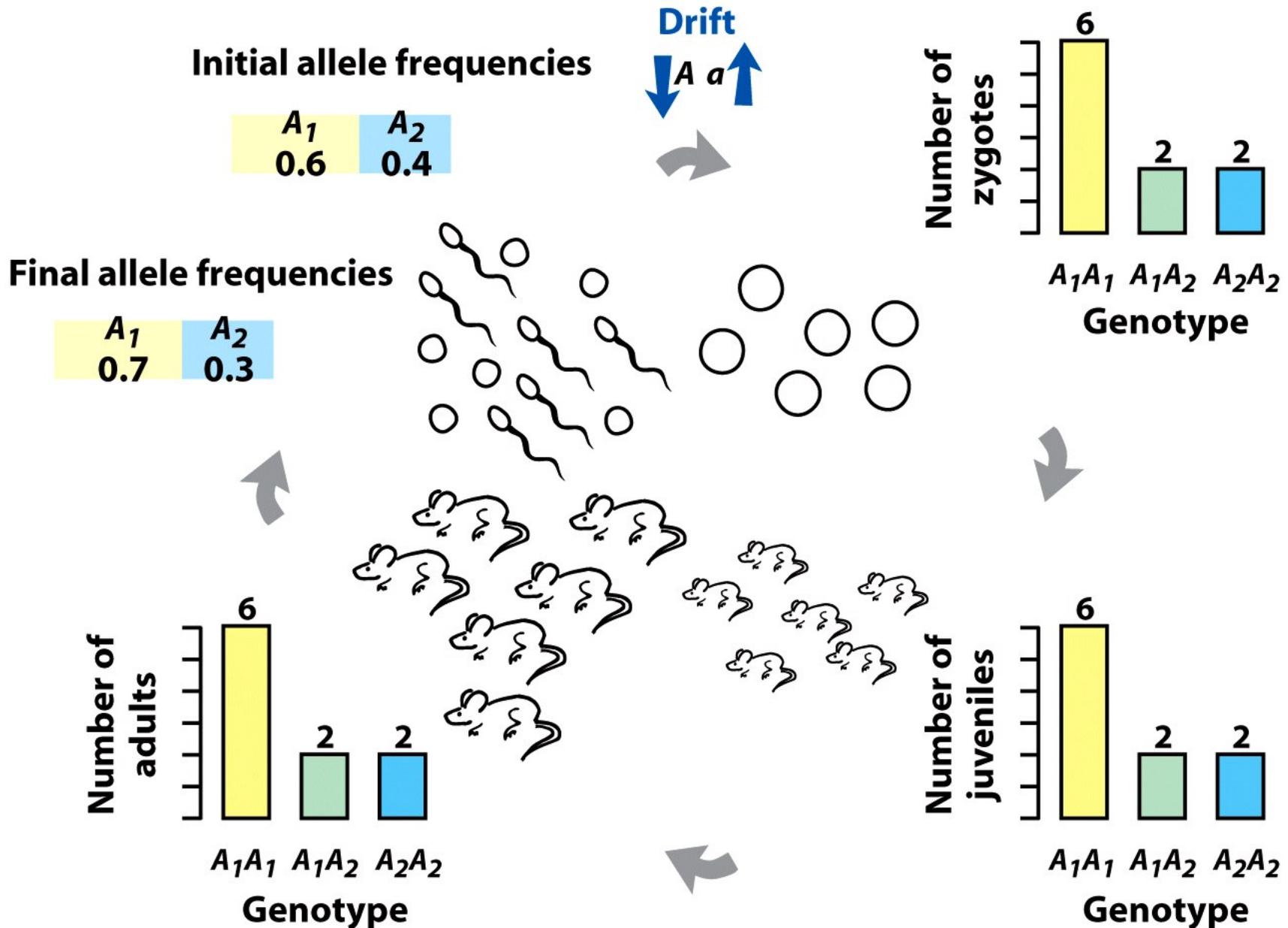
Apport permanent de l'allèle
"uniforme"

Figure 7-4 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

La dérive génétique

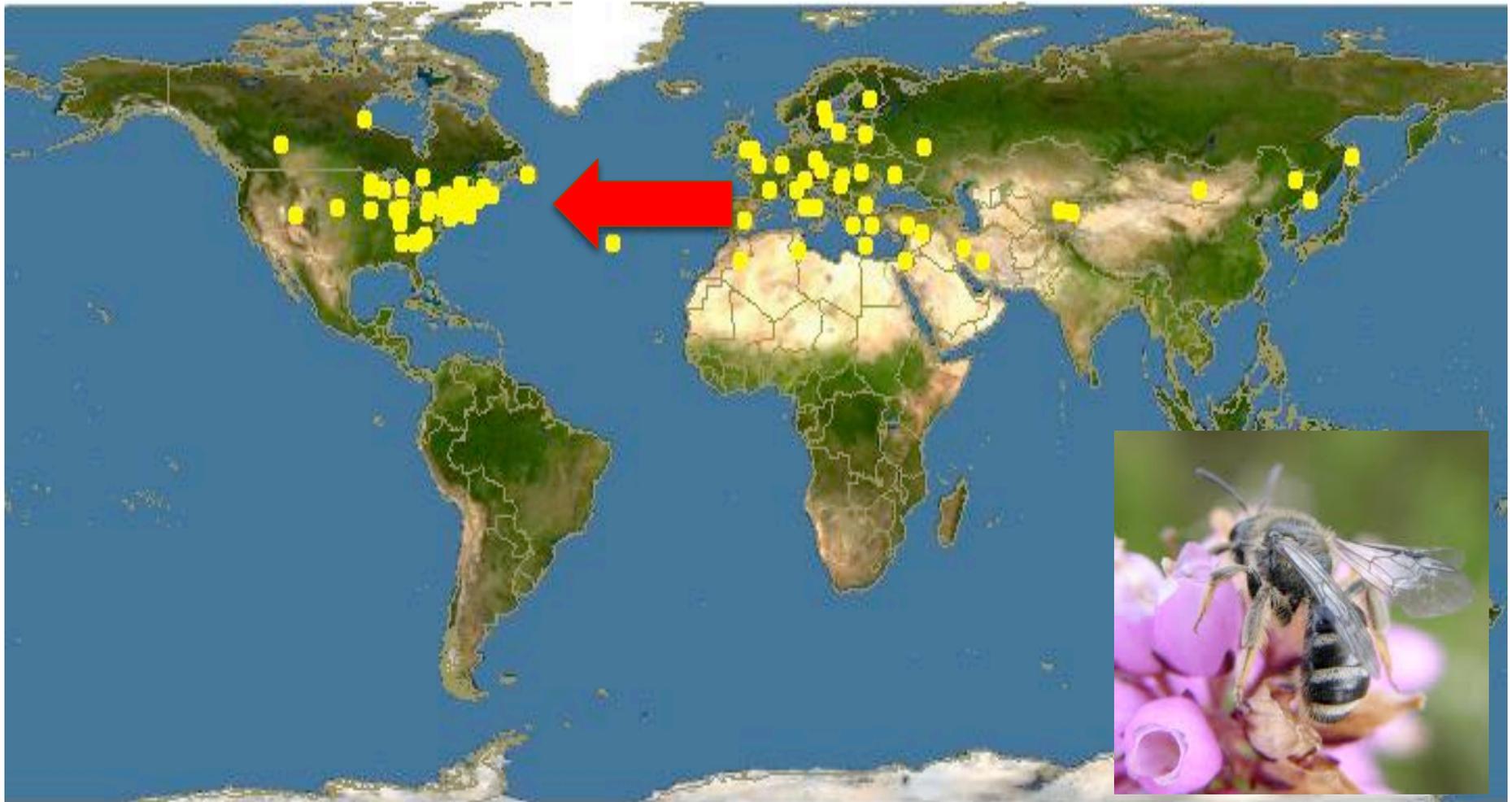
Dans les petites populations, le hasard peut avoir un effet majeur sur le tirage au sort des gamètes lors de la reproduction (cf loi des grands nombres)

La dérivation génétique



Effet fondateur

- L'effet fondateur a lieu lorsqu'une population est fondée par un petit groupe d'individus
- Par chance, certains allèles du pool d'origine vont être plus représentés
- L'effet fondateur provoque une diminution de la diversité allélique (certains allèles ne sont pas représentés)



Lasioglossum leucozonium

Hyménoptère: système haplo-diploïde:
femelles diploïdes; mâles haploïdes

Effet fondateur

Nombres d'allèles

Locus	H_{exp}		N_A^*	
	Native	Introduced	Native	Introduced
Leu-A22	0.842	0.477	13.00	2.00
Leu-A52	0.806	0.654	9.00	3.00
Leu-A73	0.796	0.534	8.00	2.74
Leu-B34	0.863	0.307	10.00	2.00
Leu-B60	0.951	0.558	18.00	2.91
Leu-B72	0.827	0.607	7.00	2.99
Average	0.848	0.523	10.83	2.61

*Based on a corrected sample size of 18 females.
doi:10.1371/journal.pone.0000868.t001

La population introduite pourrait dériver d'une seule femelle fécondée par un seul mâle

En général, l'effet fondateur réduit la diversité génétique et la capacité d'adaptation => effet négatif sur l'invasion.

La capacité d'invasion augmente avec la taille des propagules.

La consanguinité

Le Taux de consanguinité (F) est la probabilité que deux gènes homologues d'un individu soient identiques (= copies sans mutation d'un même gène de l'ancêtre commun).

Dépression de consanguinité chez l'homme

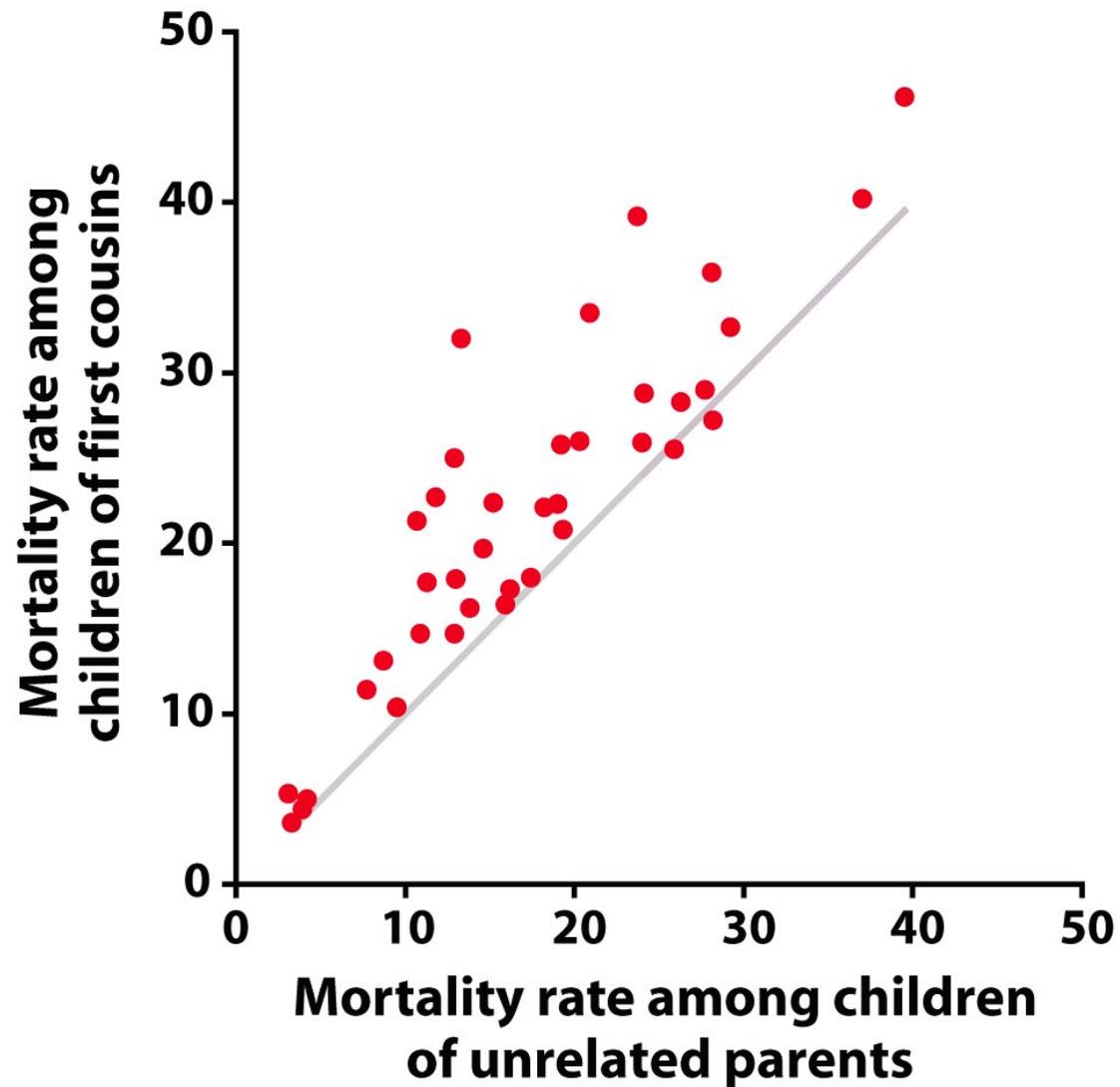
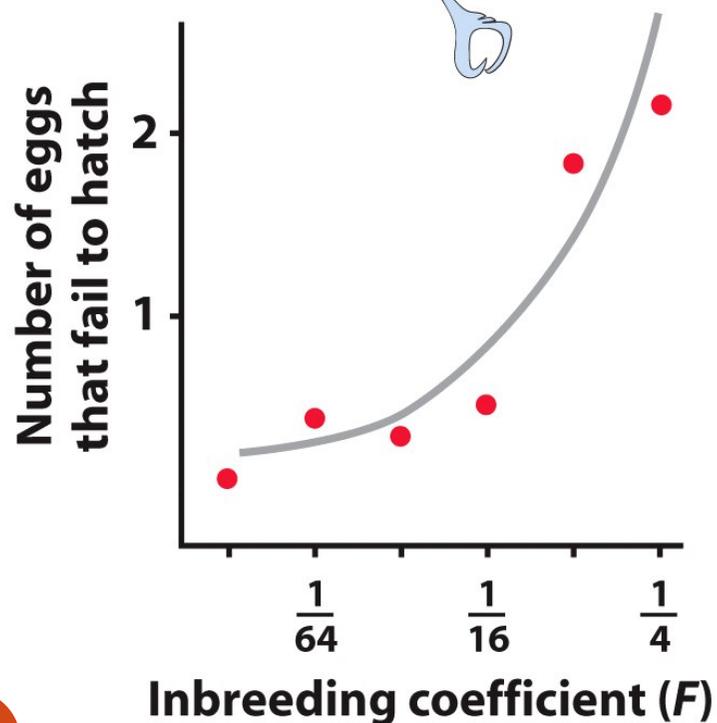


Figure 7-28 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Dépression de consanguinité chez la mésange



Le nombre d'œufs qui n'éclosent pas augmente avec la consanguinité

Principal message du cours

- La sélection naturelle peut être directionnelle, diversificatrice ou stabilisante
- L'équilibre de HW décrit l'absence de variation dans les fréquences alléliques entre générations en l'absence de sélection, mutation, migration, et dans une population grande et où les accouplements sont aléatoires
- La diminution de la taille d'une population peut permettre l'évolution « non adaptative » par la dérive génétique et l'augmentation de la consanguinité

Microévolution II: Adaptation

Adaptation

- **Résultat du façonnement des caractères par la sélection naturelle**
- **Un caractère est adaptatif s'il augmente la fitness de son porteur**
- **Tous les caractères ne sont pas adaptatifs**

Plan du Cours

- 1. Adaptation dans les Populations Naturelles**
- 2. Évolution de la reproduction sexuée**
- 3. Sélection sexuelle**
- 4. Altruisme et Sélection de Parentelle**
- 5. Niveaux de Sélection**

1. Adaptation dans les populations naturelles

La couleur du pelage ou des plumes d'espèces proches varie en fonction de la latitude

=> suggère Adaptation dans les relations proies-prédateurs

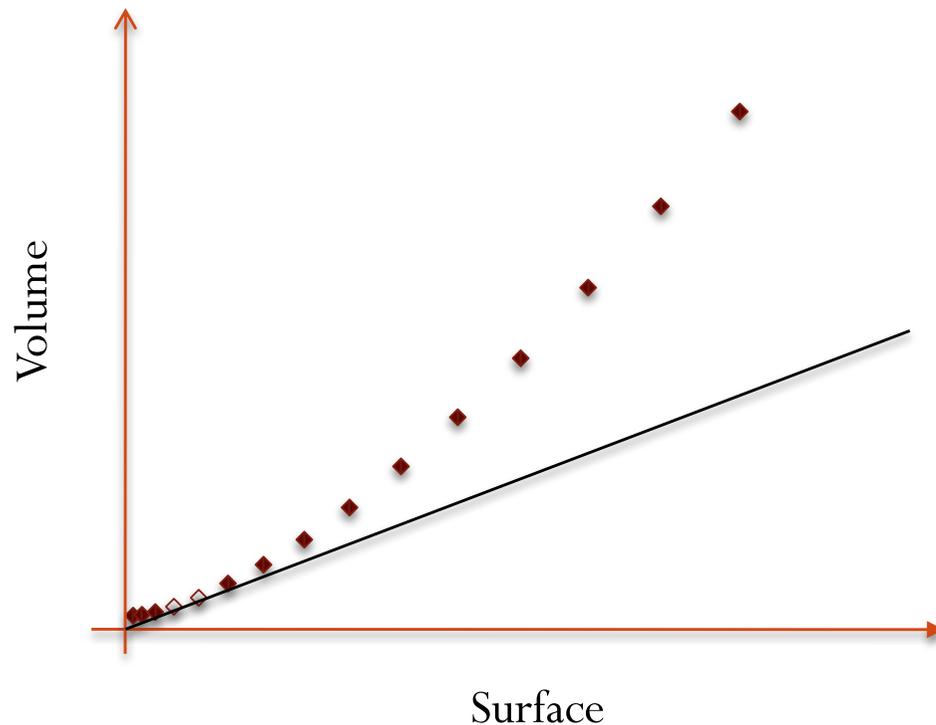
POLAIRE



TEMPÉRÉ



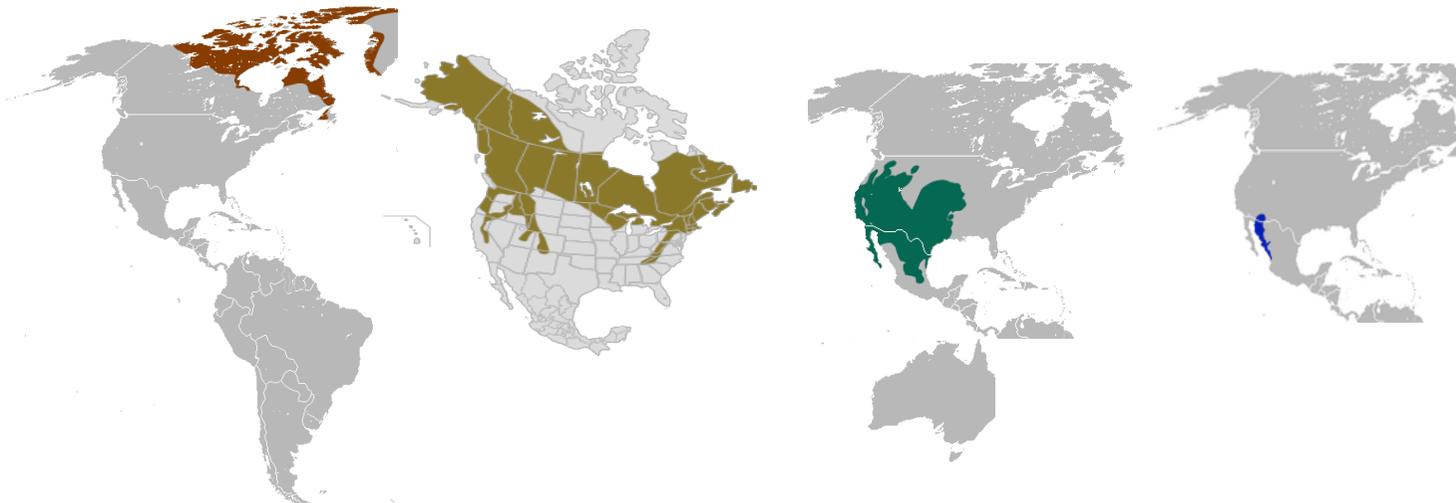
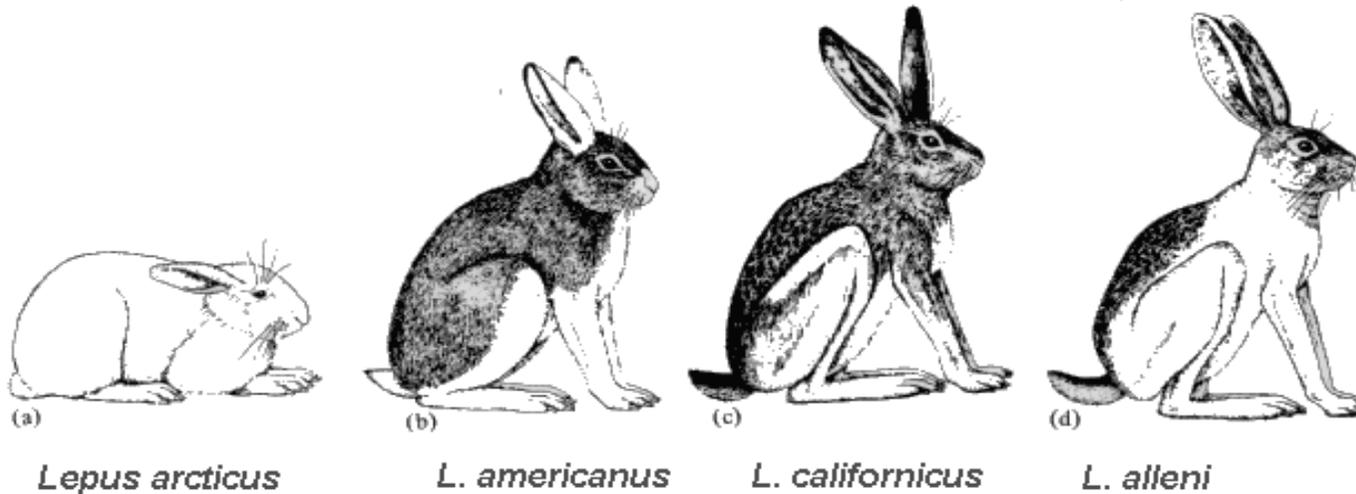
La Règle de Bergmann (1847): Relation positive entre la taille et la latitude



- La production de chaleur augmente avec le volume
- Les pertes de chaleur augmentent avec la surface
- La relation volume surface augmente avec la taille
- => suggère que la taille soit une adaptation au climat

Règle de Allen (1877)

- Relation négative entre la taille des appendices et la latitude
- => suggère adaptation au froid



Adaptation des plantes au climat

Désert



Réserves d'eau dans les feuilles et les tiges;
Production de cire.

Foret tropicale



Feuilles souples et grandes pour éliminer l'eau et capter la lumière.

Adaptation des plantes au climat

Foret



Écorce dure et épaisse;
Chute des feuilles

Taïga



Architecture évitant
l'accumulation de neige

Analyse expérimentale d'un caractère adaptatif

La pointe courbée du bec des pigeons



Chapter 10 Opener Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Hypothèse H1: permet de mieux se débarrasser des poux qui parasitent les plumes

Analyse expérimentale d'un caractère adaptatif

La pointe courbée du bec des pigeons



Chapter 10 Opener Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Hypothèse (H1): permet de mieux se débarrasser des poux qui parasitent les plumes

Hypothèse nulle (H0): pas de caractère adaptatif

Analyse expérimentale d'un caractère adaptatif

La pointe courbée du bec des pigeons



Chapter 10 Opener Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Pour démontrer que H_1 est vraie il faut soumettre H_0 à un test. H_0 est une position par défaut.

Si la probabilité que H_0 soit fausse est suffisamment forte, alors on peut accepter l'idée que H_1 soit vraie.

Analyse d'un caractère adaptatif

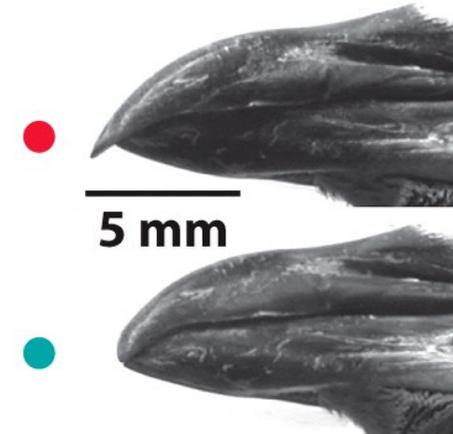
La pointe courbée du bec des pigeons

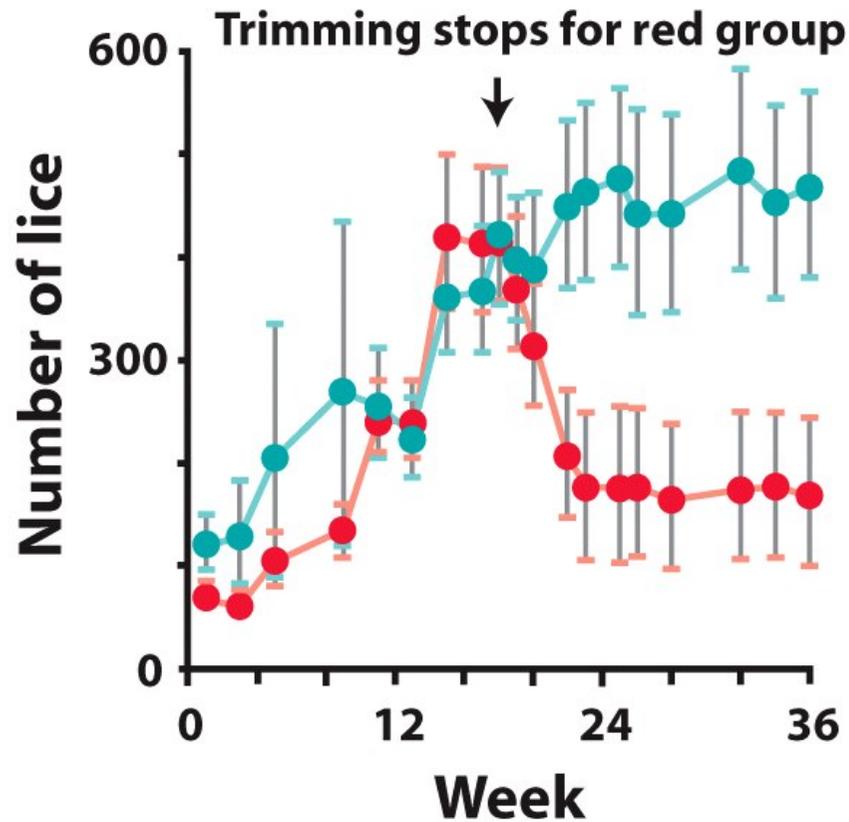
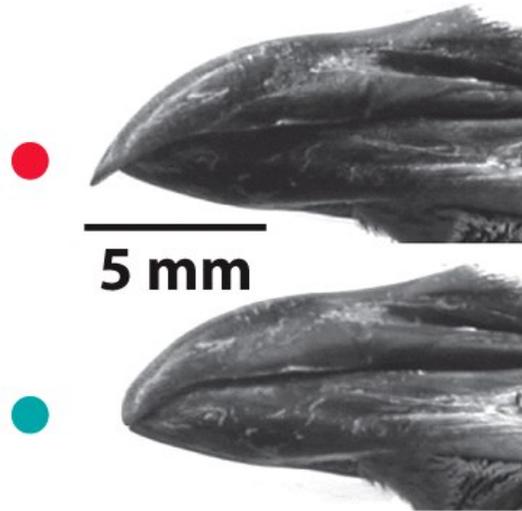


Chapter 10 Opener Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Hypothèse nulle: pas de caractère adaptatif

Hypothèse (H1): permet de mieux se débarrasser des poux qui parasitent les plumes





L'Hypothèse est vérifiée:
 La pointe courbée du bec des pigeons leur permet de réduire le nombre de poux

Limites de la sélection adaptative

De nombreux compromis physiologiques, énergétiques, développementaux contraignent l'adaptation des caractères aux pressions sélectives de l'environnement.

Il n'existe pas d'organisme parfait (contrairement à la vision théologique du monde vivant).

2. L'évolution de la reproduction sexuée

Deux modes de reproduction: asexuée (parthénogenèse) vs sexuée

La reproduction sexuée a un coût:

recherche de partenaire

maintien d'un territoire

maladies sexuellement transmissibles

deux fois moins efficace que la reproduction asexuée

Pourquoi la plupart des organismes utilisent la reproduction sexuée?

G.C. Williams: « The Outstanding puzzle in evolutionary biology »

Peu d'espèces ont le choix!



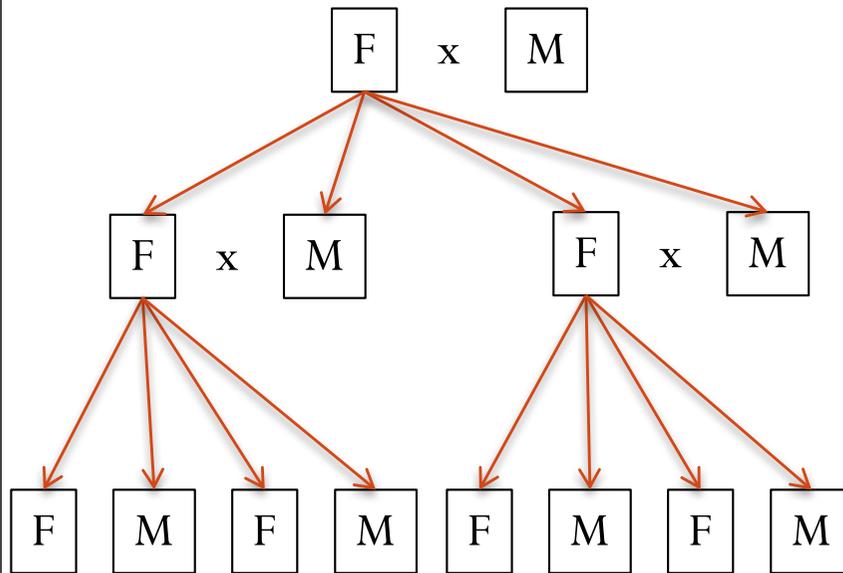
Pucerons (hémiptères)

Printemps-été: explosion des populations de pucerons grâce à la parthénogénèse

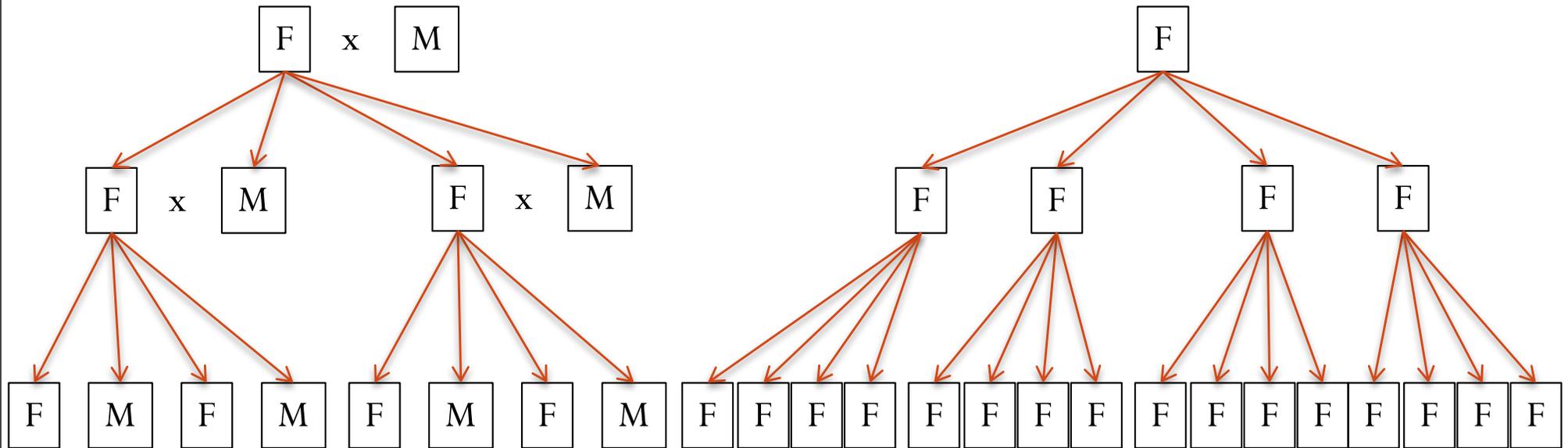
Automne: production de fondatrices (aillées) par reproduction sexuée

- John Maynard Smith: création d'un modèle nul pour tester l'avantage de la reproduction sexuée = situation idéale permettant de tester des hypothèses face au hasard
- Soit deux populations imaginaires se reproduisant l'une par parthénogenèse, l'autre de façon sexuée.
- Les deux populations sont fondées par une seule femelle (on pourrait multiplier par 1000 – le résultat ne change pas).
- **Condition 1:** les femelles sexuées et parthénogénétiques produisent le même nombre de descendants
- **Condition 2:** la survie de la descendance ne dépend pas du mode de reproduction

Reproduction sexués



Parthénogénèse



En théorie, la reproduction asexuée produit 2 x plus de descendants à chaque génération et devrait donc avoir un avantage évolutif?

=> Comme ce n'est pas le cas, au moins une des deux conditions de départ n'est pas vraie

Condition 1: les femelles sexuées et parthénogénétiques produisent le même nombre de descendants

Il est possible que cette condition soit falsifiée lorsque les mâles contribuent à l'élevage des jeunes



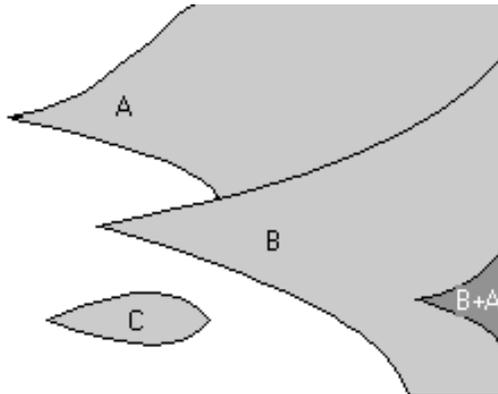
Pas le cas général

Dans la plupart des espèces les mâles contribuent très peu à la production de jeunes

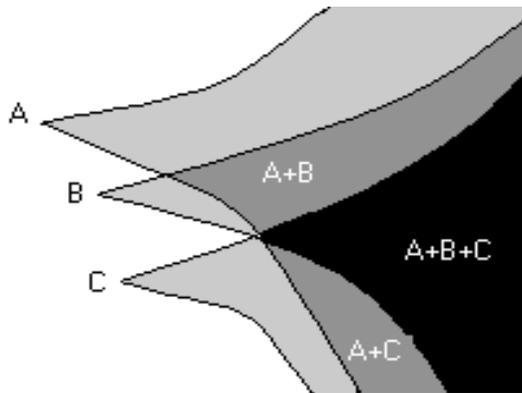
Condition 2: la survie de la descendance ne dépend pas du mode de reproduction

Cette condition est probablement fausse \Rightarrow La reproduction sexuée augmenterait la diversité génétique de la descendance et permettrait une meilleure adaptation?

Hypothèse 1: Fixation de mutations bénéfiques (*Maynard Smith*)



Reproduction asexuée: les mutations bénéfiques ne s'accumulent que si elles arrivent par chance dans la même lignée



Reproduction sexuée: les mutations bénéfiques apparues dans des lignées différentes peuvent être échangées lors des recombinaisons

Problème: les taux de mutations positives sont souvent beaucoup trop faibles pour compenser une perte de 50% de reproduction

Hypothèse 2: Purge des mutations délétères (*Alexey Kondrachov*)

L'apparition de mutations délétères est beaucoup plus probable

Organisme à reproduction asexuée:

Les mutations délétères s'accumulent à chaque génération:

Les enfants ont au moins autant de mutations délétères que leurs parents => **Fardeau génétique** important

Organisme à reproduction sexuée:

À chaque génération certains enfants vont avoir par chance moins de mutations délétères que leurs parents (grâce aux recombinaisons) et vont survivre mieux.

Là encore le taux mutations négatives n'est souvent pas suffisant pour compenser la perte face à la reproduction sexuée

Hypothèse 3: La reine rouge (*Leigh van Valen; William Hamilton*)

Analogie avec le roman de Lewis Carroll: la reine rouge court pour rester sur place

Les organismes évoluent dans un environnement changeant

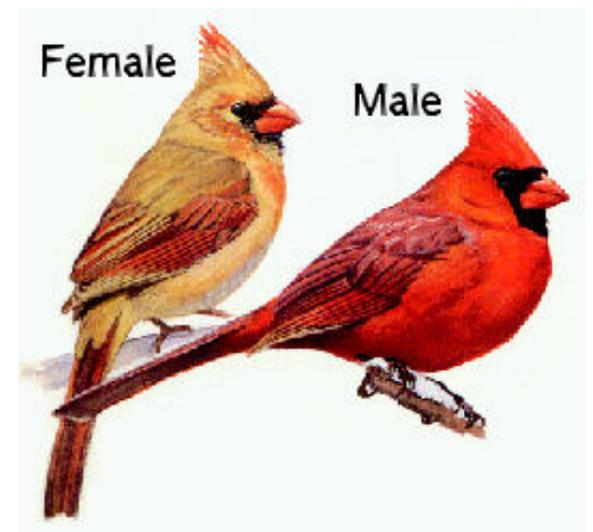
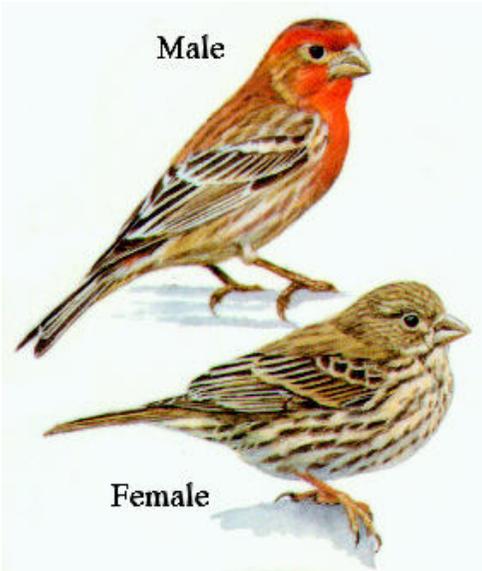
Ex: Parasites et hôtes sont en permanence en train de s'adapter les uns aux autres => concept de coévolution

La reproduction sexuée pourrait permettre une plus grande diversité de combinaisons de gènes => meilleure adaptation

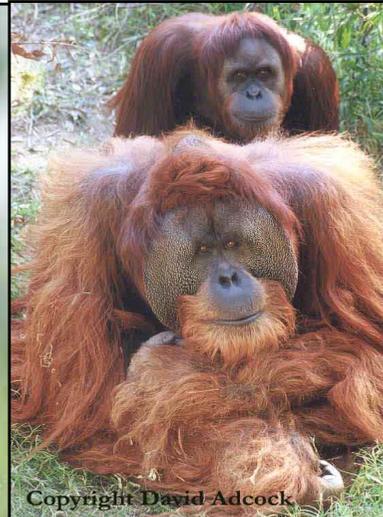


3. La sélection sexuelle

Dimorphisme sexuel



Dimorphisme sexuel



Les mâles et les femelles sont soumis à des pressions de sélection différentes

Dimorphisme sexuel

Espèces anisogames: la reproduction nécessite la fusion de gamètes de tailles différentes

Mâles: production de gamètes de petite taille, souvent mobiles

Femelles: production de gamètes de grande taille, souvent immobiles.

Exemple de dimorphisme sexuel chez l'homme

Corrélation entre la taille moyenne des hommes et des femmes dans 200 populations humaines:

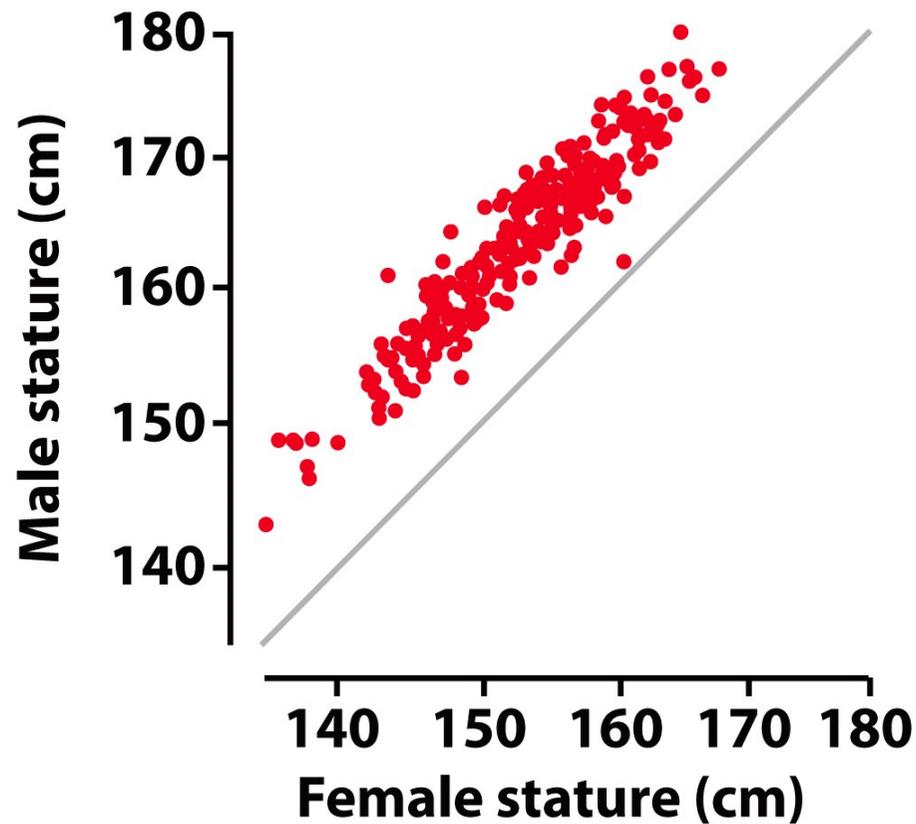


Figure 11-2 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Exemple de Dimorphisme sexuel chez les oiseaux: *Euplectes progne*

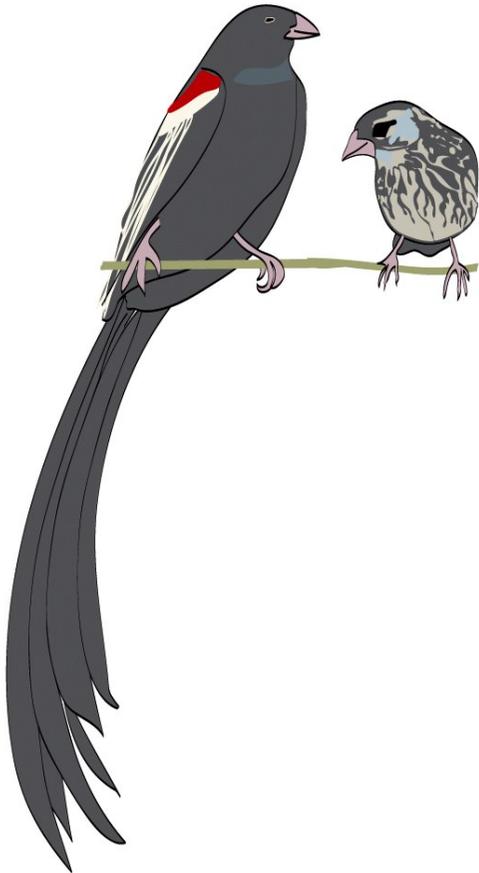


Figure 11-3 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

1. Les longues plumes de la queue et les couleur rouges sont couteuses à produire et constituent un handicap face aux prédateurs
2. Si la sélection naturelle favorise ces caractères chez les mâles, pourquoi pas aussi chez les femelles

Pongo abelii: Les femelles investissent plus que les mâles dans la descendance



Contribution des mâles:

15 mn d'accouplement + parade sexuelle



Contribution des femelles:

8 mois de gestation

3 ans d'allaitement

7 ans de protection des jeunes

Succès reproducteur asymétrique

1. Femelles: dépend directement du nombre de descendants
2. Mâles: dépend du nombre d'accouplements

Exemple: Succès reproducteur chez le triton rugueux (*Taricha granulosa*)



Rough-skinned newt (*Taricha granulosa*)

Figure 11-5a Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Regroupement des mâles dans des marres temporaires.

Les femelles visitent les marres, s'accouplent et pondent jusqu'à 300 œufs, puis elles quittent les marres.

À chaque instant t il y a plus de mâles que de femelles.

Pas de soins parentaux.

Succès reproducteur asymétrique

1. Prélèvement des œufs et élevage en captivité
2. Capture des adultes et prélèvements de sang
3. Détermination de la paternité et de la maternité =>
succès reproducteur des mâles et des femelles



Rough-skinned newt (*Taricha granulosa*)

Figure 11-5a Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Succès reproducteur asymétrique

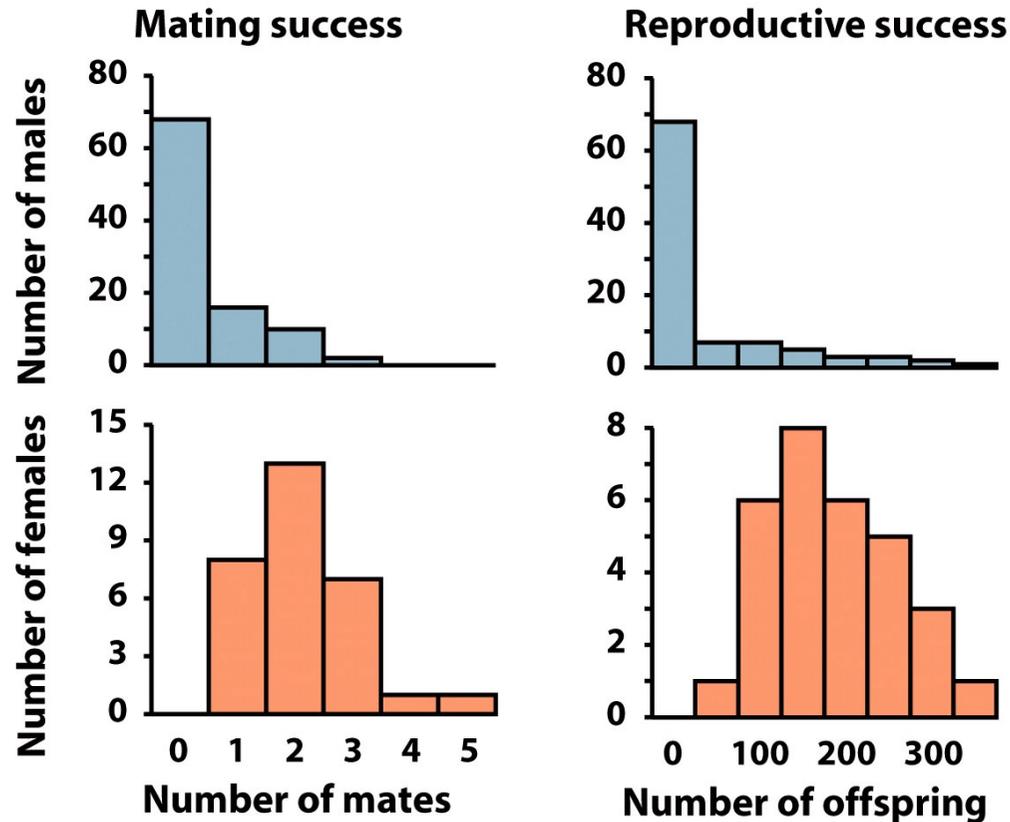


Figure 11-5b Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Le succès reproducteur des femelles est mieux réparti que celui des mâles.

La plupart des mâles n'ont aucune descendance alors que certains individus vont être à l'origine de tous les œufs.

Succès reproducteur asymétrique

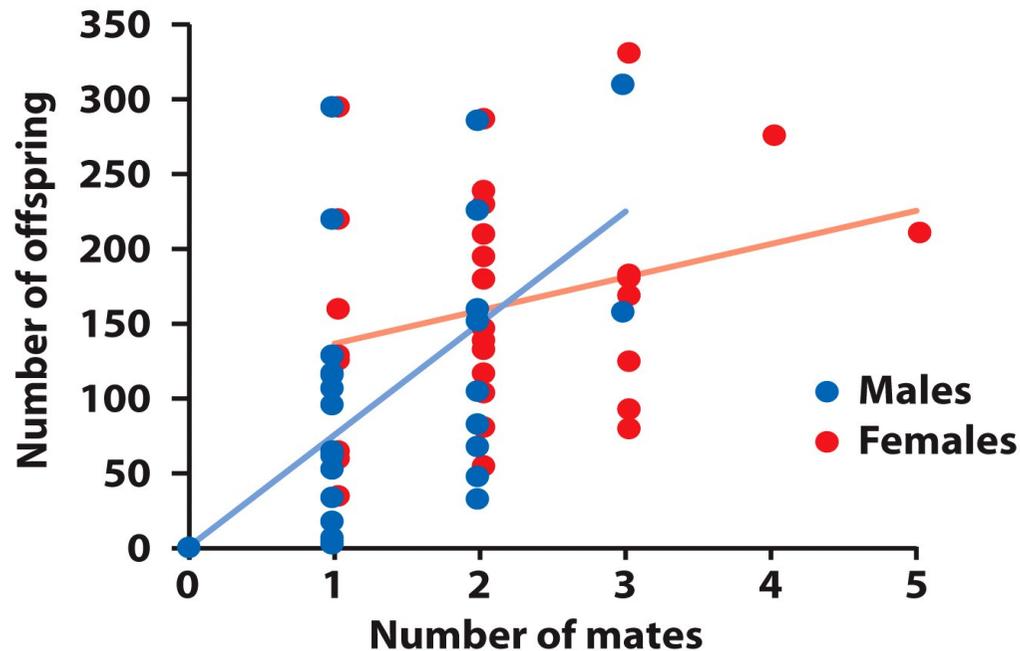


Figure 11-5c Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Le succès reproducteur des mâles est plus lié au nombre d'accouplements que celui des femelles.

La compétition pour la reproduction est plus forte chez les mâles que chez les femelles

Sélection sexuelle

La sélection sexuelle peut prendre deux formes:

- 1. Compétition entre mâles** (compétition intrasexuelle):
Les mâles entrent en compétition pour monopoliser le plus de femelles possible. La compétition entre mâles peut avoir lieu de façon directe ou indirecte, avant ou après la fécondation.
- 2. Choix des femelles** (compétition intersexuelle): Les femelles exercent une pression de sélection sur les traits des mâles.

Compétition entre mâles:

Les combats entre mâles peuvent avoir lieu pour maintenir un harem.

Commun chez les mammifères (cerfs, lions, antilopes, éléphants de mer...)

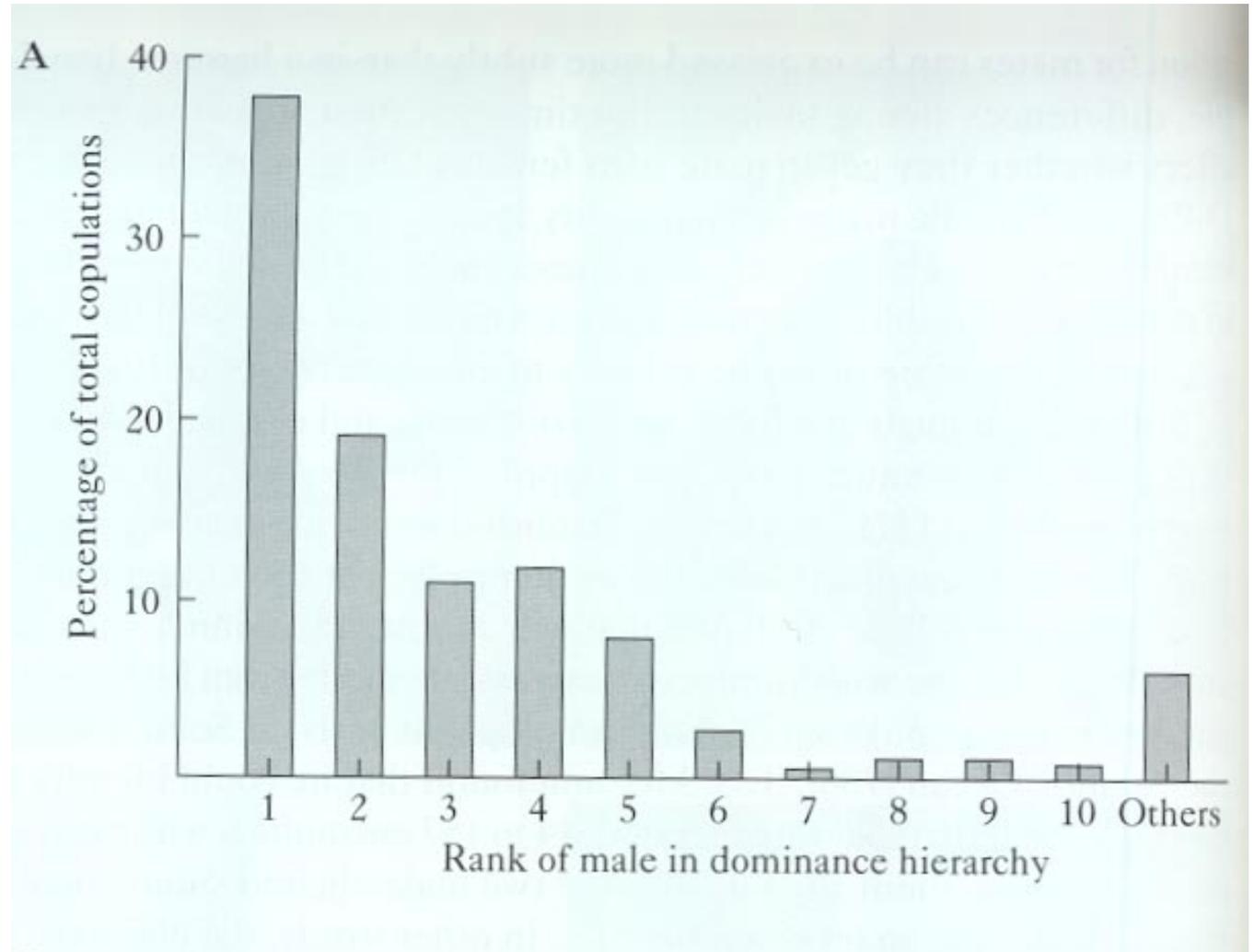


Exemple: La compétition entre mâles chez les Phocidae

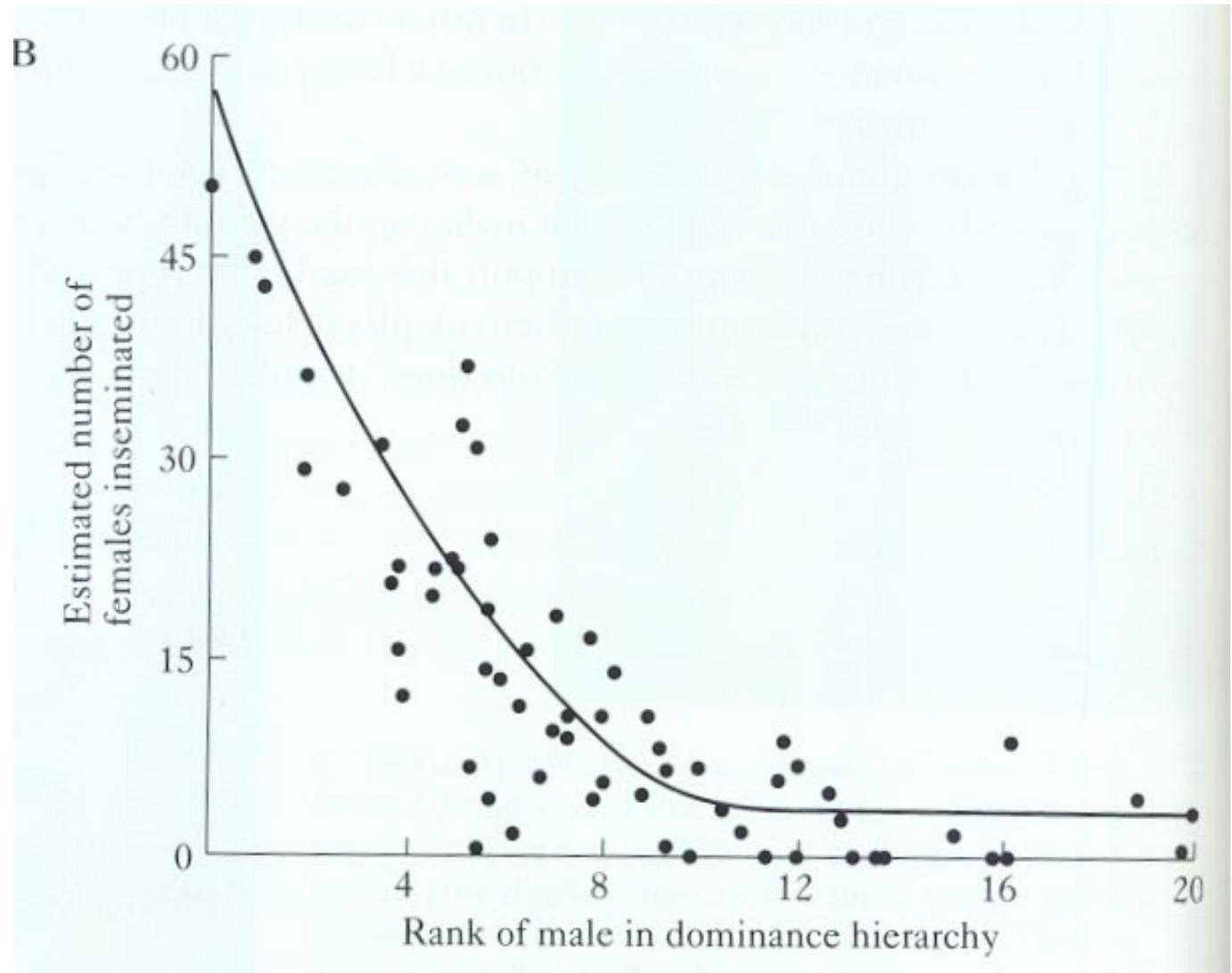


Otarie (*Arctocephalus australis*)

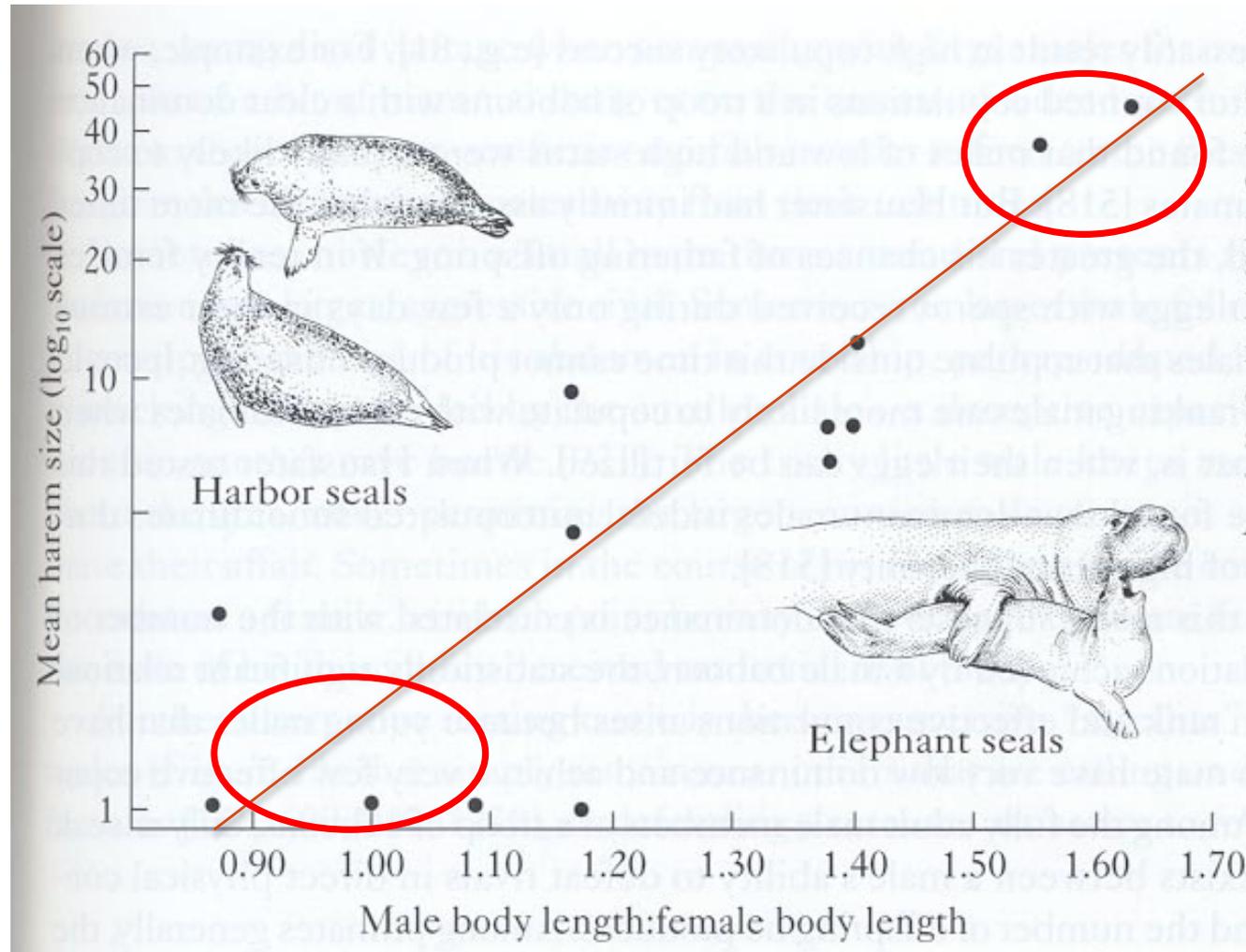
Forte relation entre la hiérarchie comportementale (succès face à d'autres mâles) et le succès reproducteur.



Forte relation entre la hiérarchie comportementale (succès face à d'autres mâles) et le succès reproducteur.



Niveau interspecific: Relation entre la taille du harem et le polymorphisme sexuel.



Beaucoup de femelles par harem:
Fort polymorphisme

Peu de femelles par harem:
Faible polymorphisme

Compétition spermatique



Infanticide

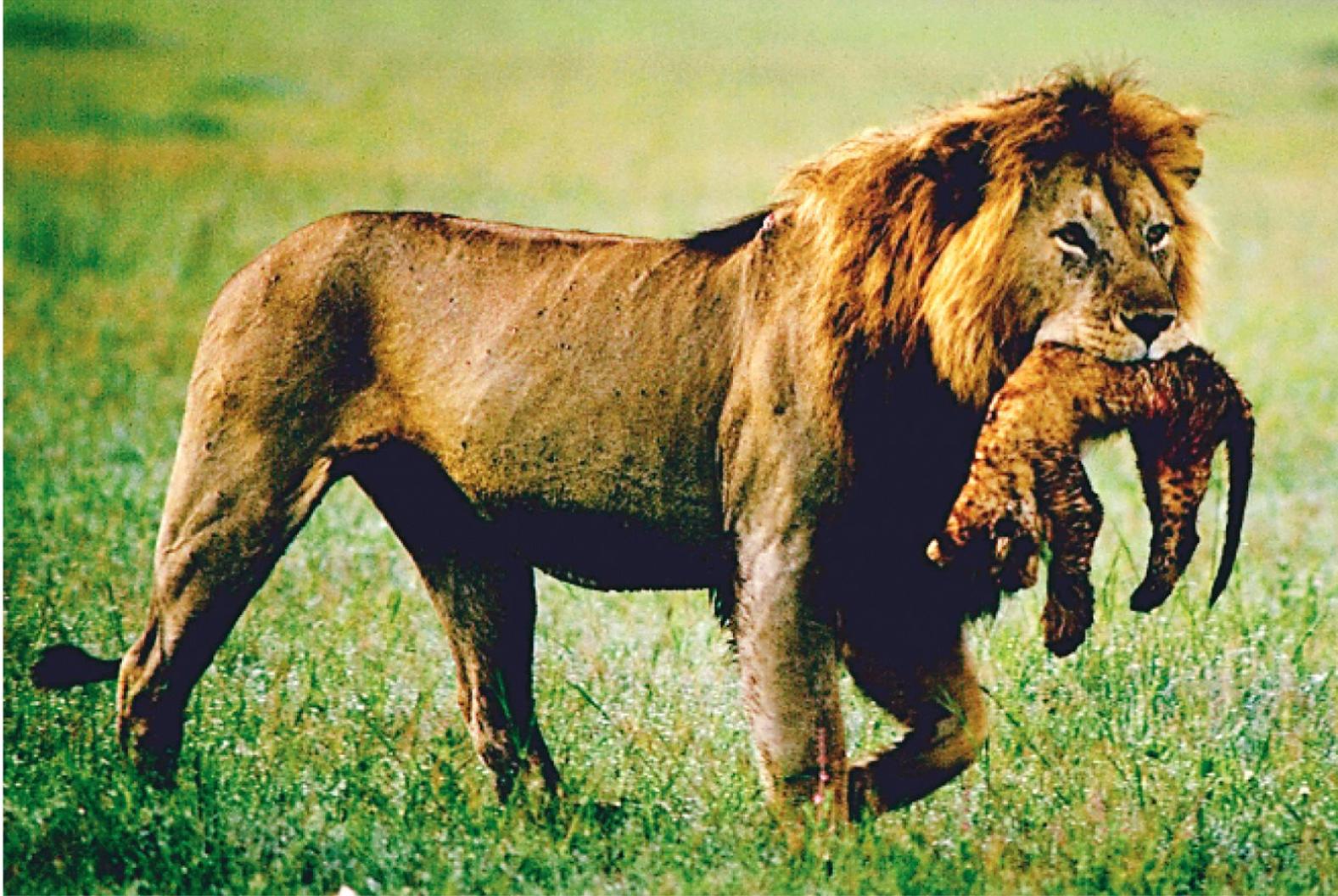


Figure 11-16 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Choix des Femelles

Le succès reproducteur des mâles est limité par l'accès aux femelles mais ils n'ont pas toujours la possibilité de les monopoliser.

=> Les femelles choisissent les mâles qu'elles préfèrent.

=> Évolution de caractères extravagants chez les mâles



Choix des Femelles

Pryke and Andersson (2005)



Euplectes ardens

Hypothèse: Les femelles choisissent les mâles en fonction de la longueur des plumes caudales

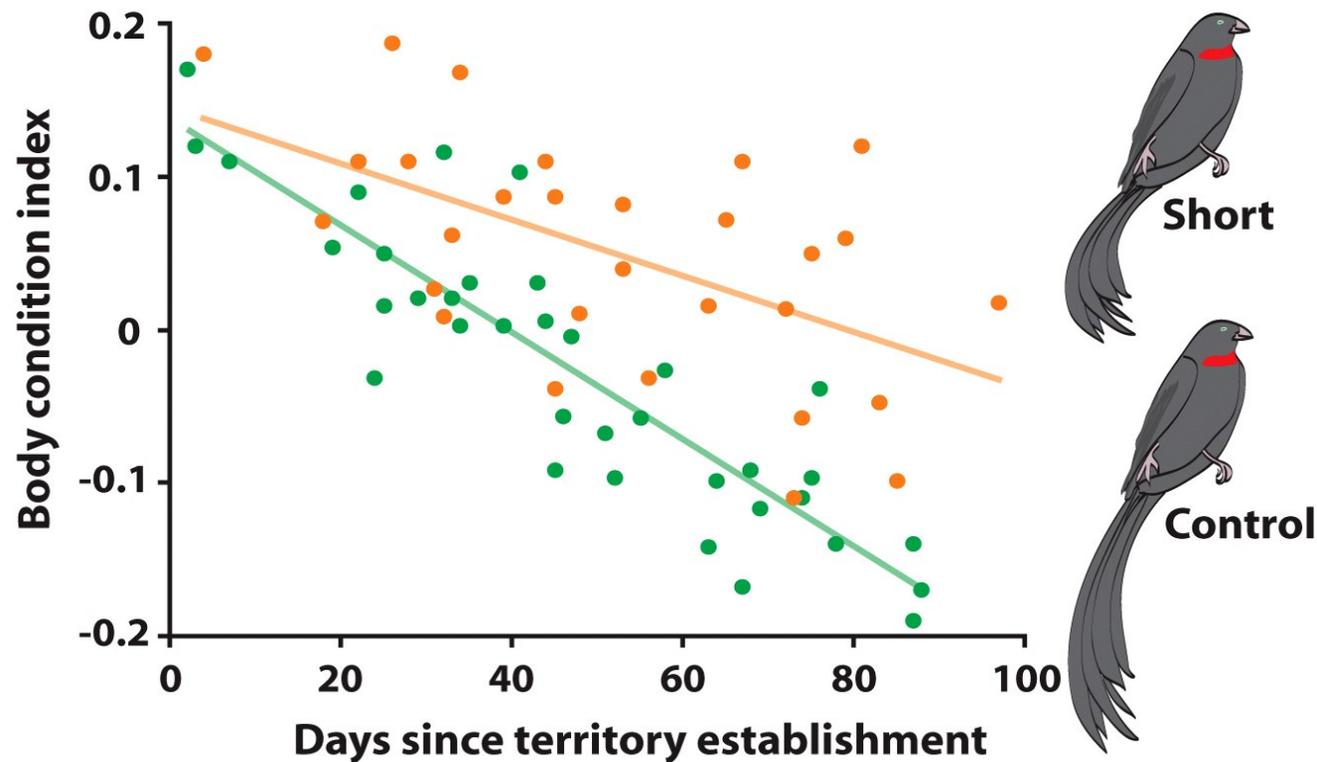
Expérience:

Groupe témoin: longueur maximale 20cm

Groupe expérimental: 12.5 cm

Choix des Femelles

Territoires: même taille et qualité



Plus grande perte de poids des contrôles: Les longues plumes sont un désavantage lors du vol

Choix des Femelles

Plus grand succès reproducteur des contrôles (moins de femelles nichent sur le territoire des mâles expérimentaux).

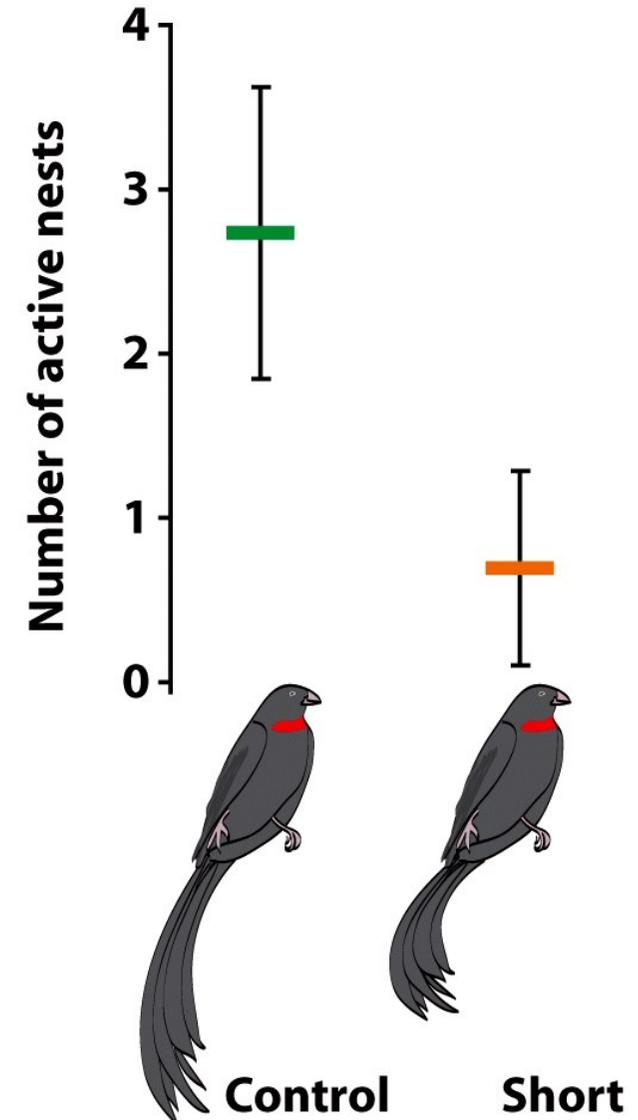


Figure 11-19 Evolutionary Analysis, 4/e
© 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Choix des Femelles

Les femelles choisissent les mâles les plus « sexy »:

Si les mâles « sexy » ont plus d'accouplements, les femelles devraient préférer les mâles plus sexy pour que leur descendance aient plus d'accouplements

Le lien entre le caractère sexy des mâles et le choix des femelles est amplifié par la sélection sexuelle.

Évolution du Sexe Ratio

Pourquoi un sex ratio de 1:1 alors que la plupart des espèces ne sont pas monogames?

Ronald Fisher:

Si un mâle fertilise 4 femelles, le sex-ratio optimal pour une espèce pourrait être la production d'un mâle pour 4 femelles

La sélection n'opère pas pour le bien de l'espèce!

SI un mâle moyen produisait 4 fois plus de descendants qu'une femelle moyenne, il y aurait un avantage sélectif pour:

les mâles

les mères ne produisant que des mâles

DONC, une femelle mutante produisant uniquement des mâles serait immédiatement favorisée. **Sélection fréquence dépendante**

=> Équilibre possible: 50:50 – Stratégie Évolutivement Stable

4. Sélection de Parentelle

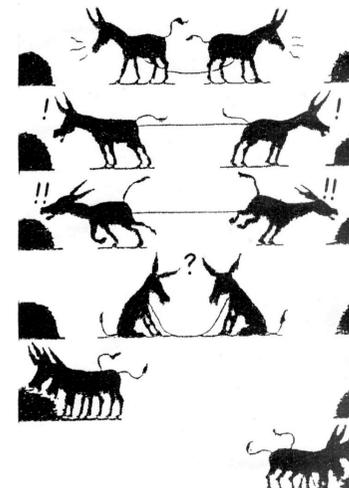
Donneur d'un acte

		positif	négatif
Receveur d'un acte	positif	coopération	altruisme
	négatif	égoïsme	malveillance

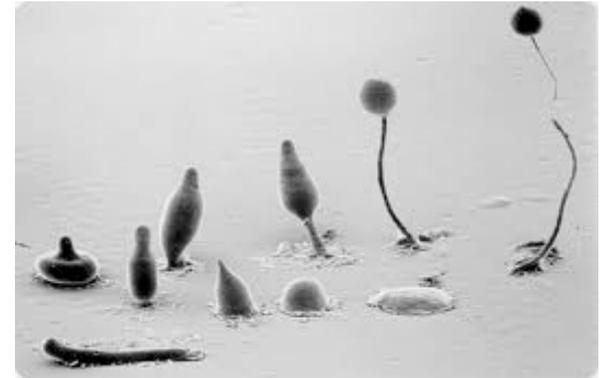
Égoïsme



Coopération



Altruisme



Altruisme



Darwin : « altruisme potentiellement fatal à la théorie de l'évolution par la sélection naturelle »

Pourquoi certains animaux renoncent à leur propre reproduction pour en aider d'autres???

Théorie centrée sur le gène

John Haldane / William Hamilton

INCLUSIVE FITNESS: Ce n'est pas le nombre de descendants qui compte mais le nombre de gènes transmis à la génération suivante.

SOIT une population non sociale et un gène (ou une série de gènes) codant pour l'altruisme. **La population va devenir sociale si et seulement si les allèles codants pour l'altruisme se répandent plus rapidement que les allèles alternatifs.**

Un organisme peut transmettre ses gènes soit de façon directe, soit au travers de ses apparentés qui portent les mêmes allèles.

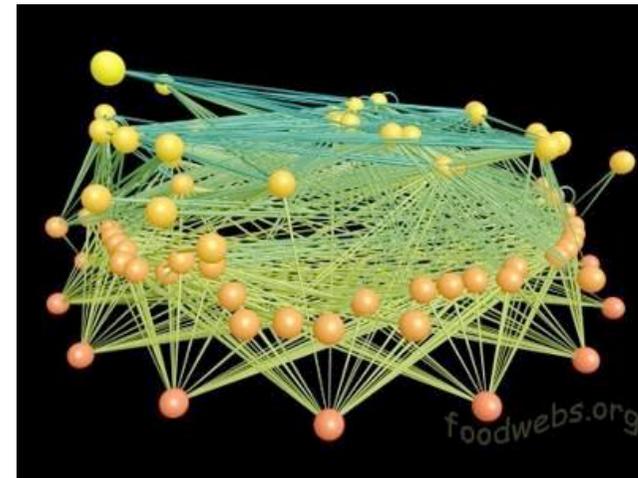
Principal message du Cours

- L'adaptation est un phénomène important résultat de la sélection naturelle.
- Tous les traits ne sont pas adaptatifs.
- La sélection peut agir sur les caractères sexuels qui augmentent le succès reproducteur même s'ils diminuent la survie.
- La sélection peut agir sur des traits qui diminuent la reproduction directe au profit de la reproduction des apparentés \Rightarrow *inclusive fitness*
- La sélection peut agir sur différents niveaux d'organisation, principalement l'individu et le gène.

La Coévolution

Darwin's entangled bank

"It is interesting to contemplate an entangled bank, clothed with many plants of many kinds, with birds singing on the bushes, with various insects flitting about and with worms crawling through the damp earth, and to reflect that these elaborately constructed forms, so different from each other, and dependent on each other in so complex a manner, have all been produced by laws acting around us."

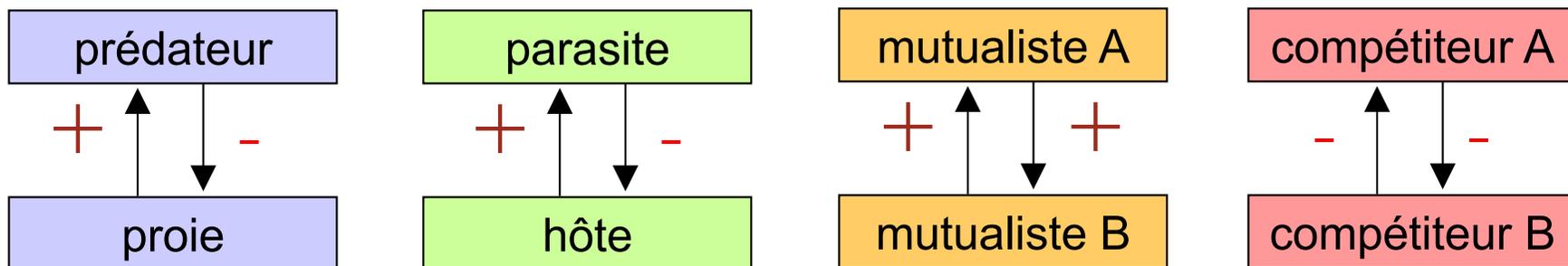


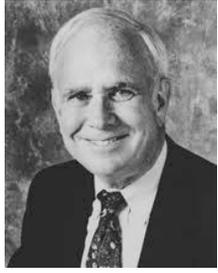
Qu'est ce que la coévolution ?

2 (ou +) espèces interagissent et :

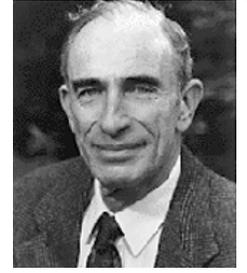
- 1) exercent des pressions sélectives réciproques
- 2) évoluent l'une en réponse à l'autre

Chaque espèce constitue l'environnement sélectif d'une autre espèce. La réciprocité fait que cet environnement change en permanence



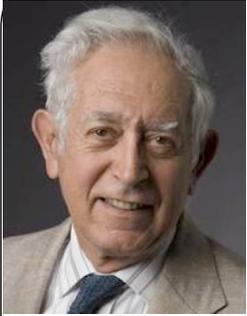


Coévolution proie-prédateur



Ehrlich et Raven (1968)

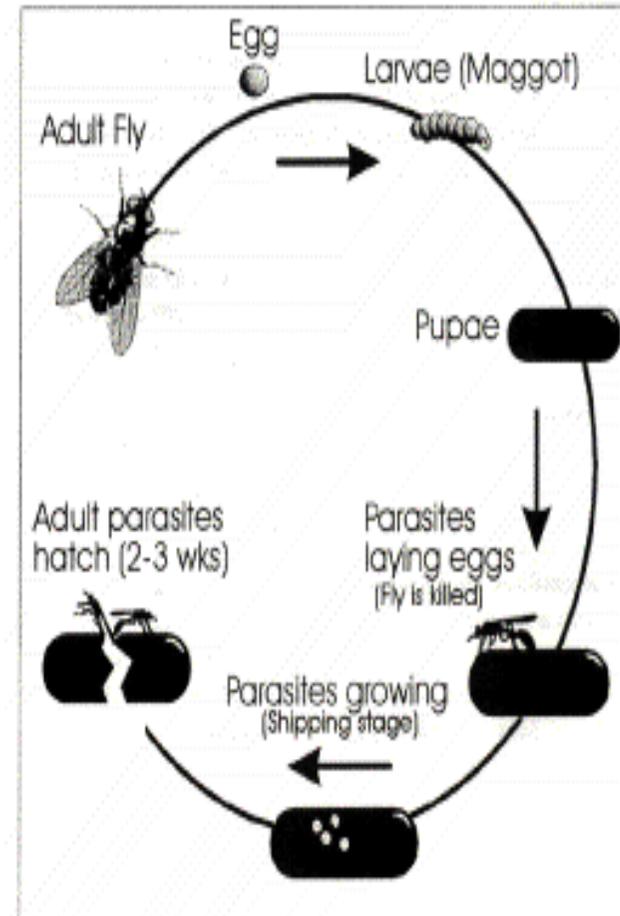




Expérience de David Pimentel

- *Sarcophaga bullata* (diptère): mouche à viande parasitée par la guêpe (hyménoptère) *Nasonia vitripennis*
- Dans les populations d'hôtes jamais exposées au parasitoïde, la mortalité des mouches et le succès reproducteur des guêpes sont très élevés.

Life Cycle of the Fly Parasite



Expérience de David Pimentel

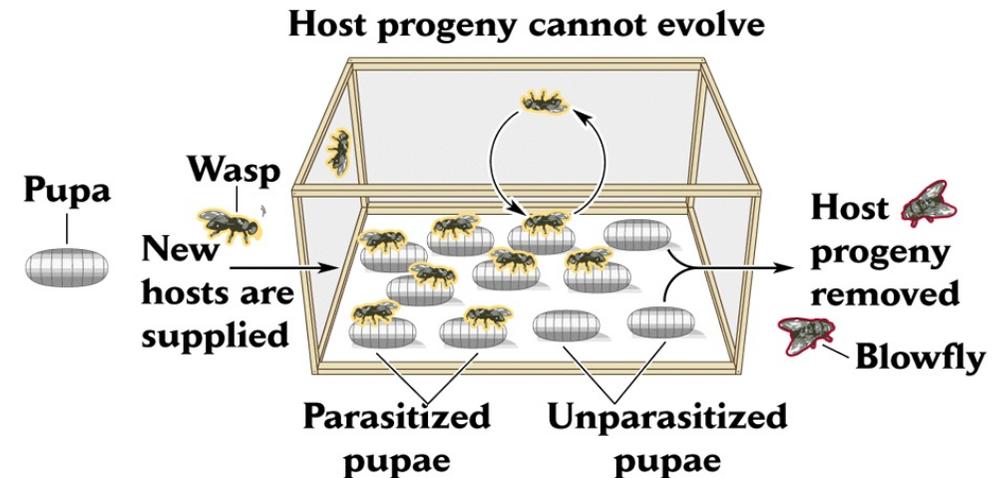
Les mouches “naïves” peuvent elles devenir résistantes face à *Nasonia* ?



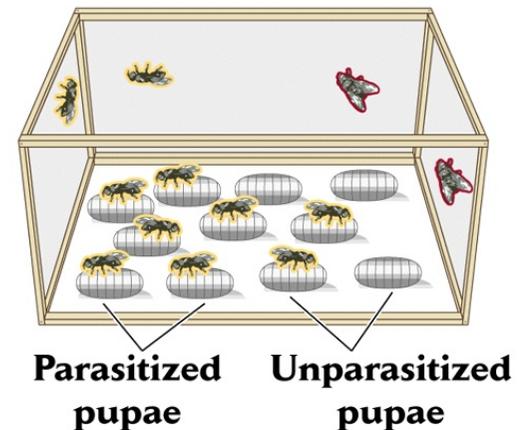
Expérience de David Pimentel

Traitement 1 (contrôle): à chaque génération toutes les mouches survivantes sont remplacées

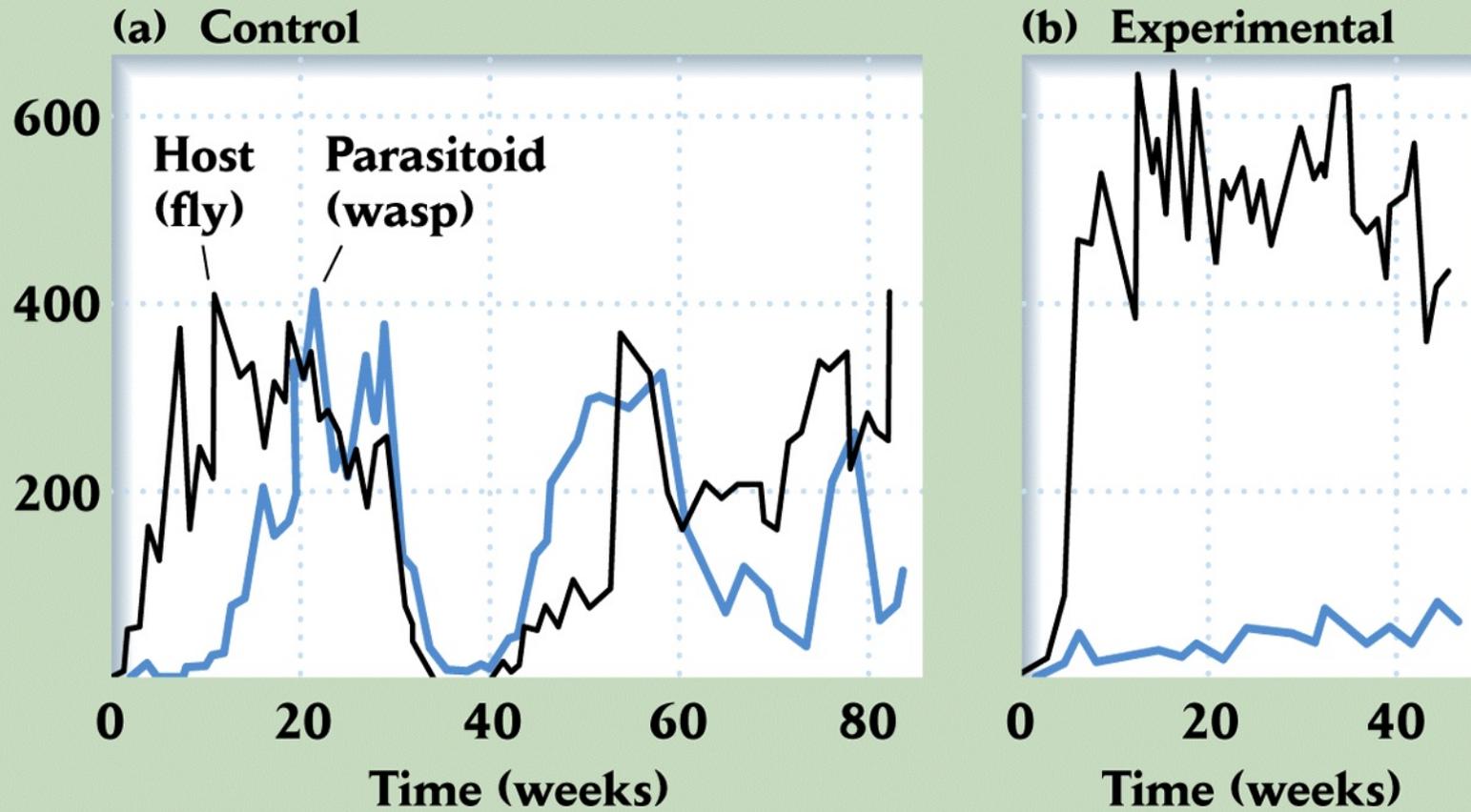
Traitement 2: les mouches survivantes sont maintenues dans la cage et peuvent se reproduire



Host progeny remain in cage; population can respond by evolving



VIRULENCE DU PARASITOÏDE SUR
LES MOUCHES



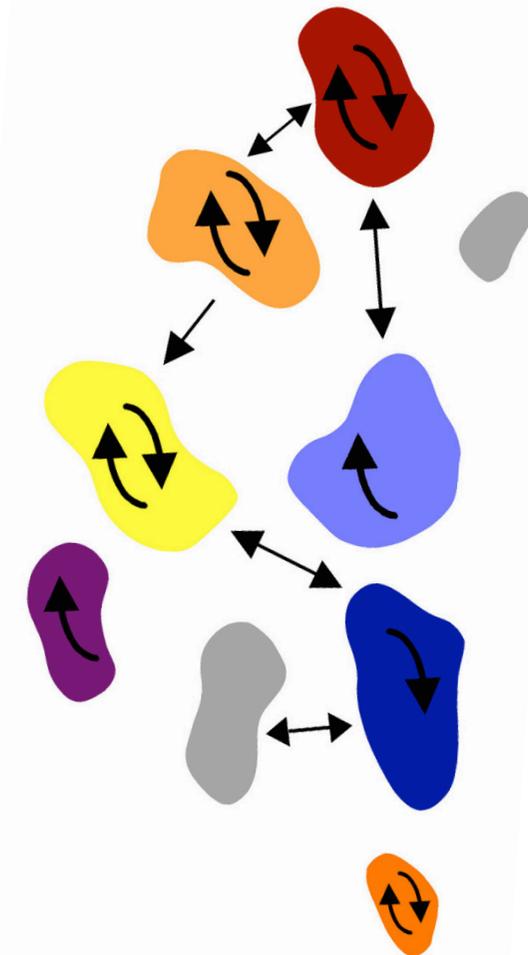
Une espèce peut évoluer en réponse à un parasite ou à un prédateur
La virulence est mesurée par le nombre de larves encapsulées par les asticots

Mosaïque géographique de coévolution

Les interactions sont sujettes à la sélection réciproque uniquement dans certaines communautés (couleurs chaudes). Ces POINTS CHAUDS de coévolution sont entourés d'une matrice de points froids où la sélection réciproque n'a pas lieu (couleurs froides) et/ou certains partenaires manquent (gris).

Les ADAPTATIONS LOCALES peuvent se répandre par les flux géniques entre populations.

La coévolution a une dimension SPATIALE => Fragmentation de l'Habitat



PREDATEUR



Tamnophis sirtalis

PROIE



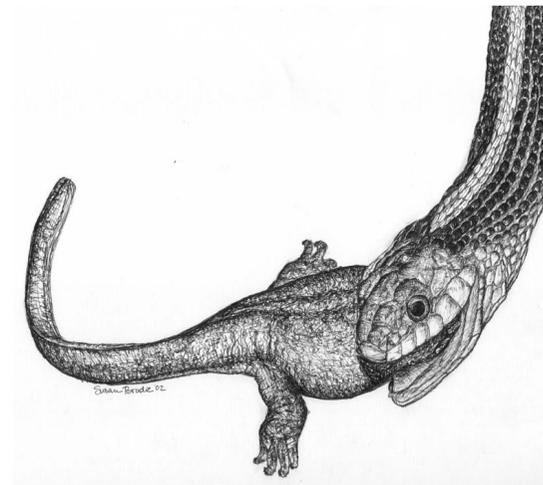
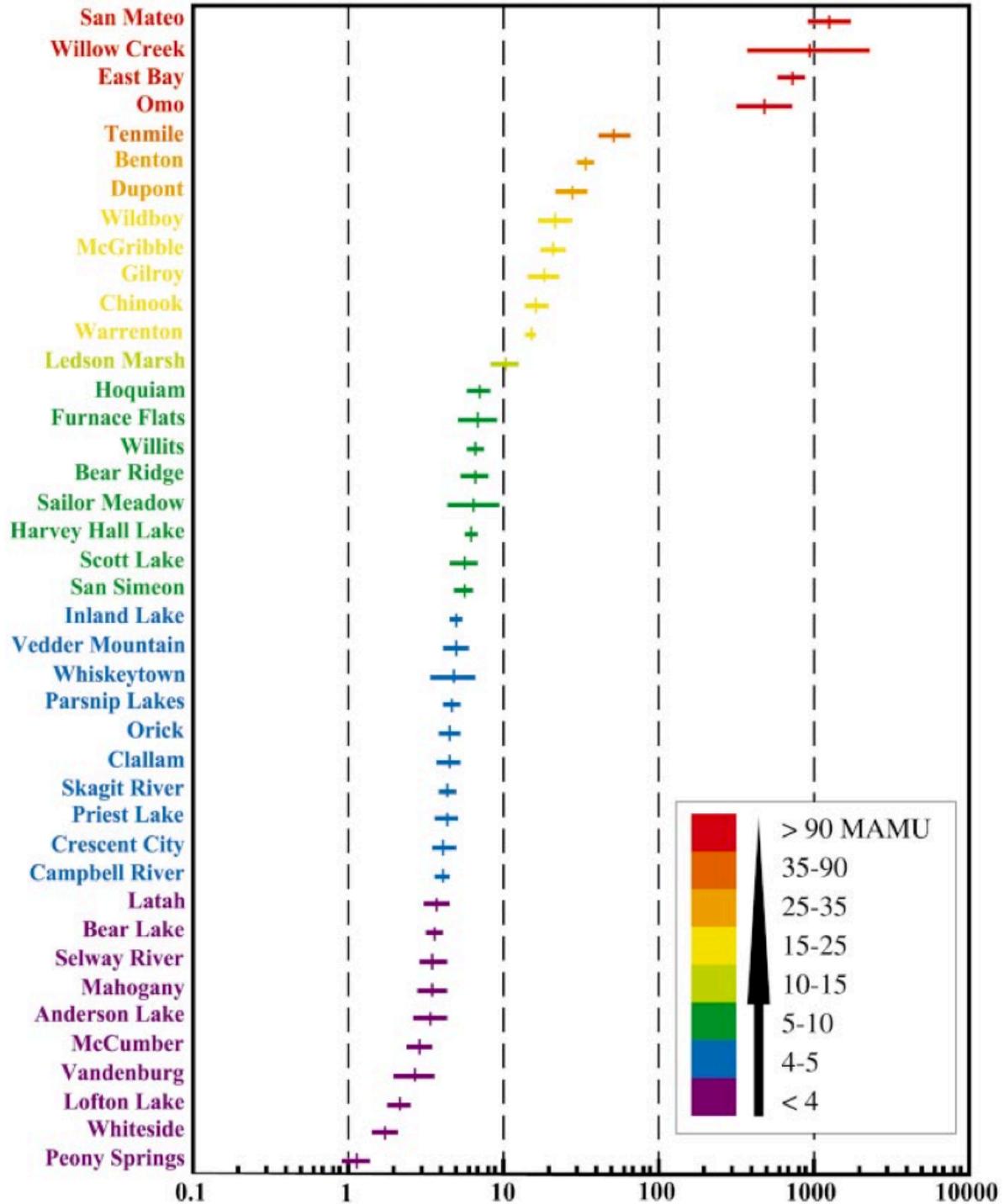
Taricha

RESISTANCE À LA TTX

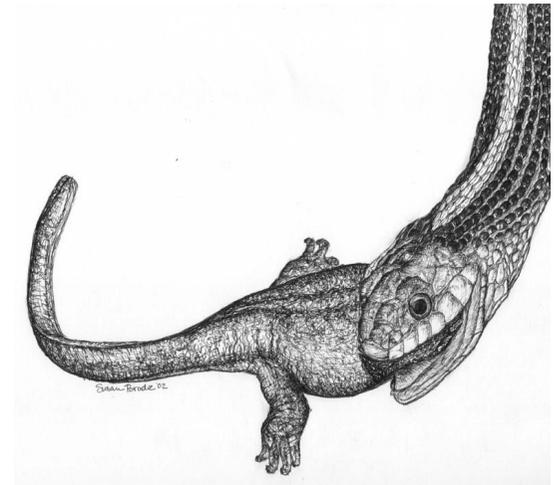
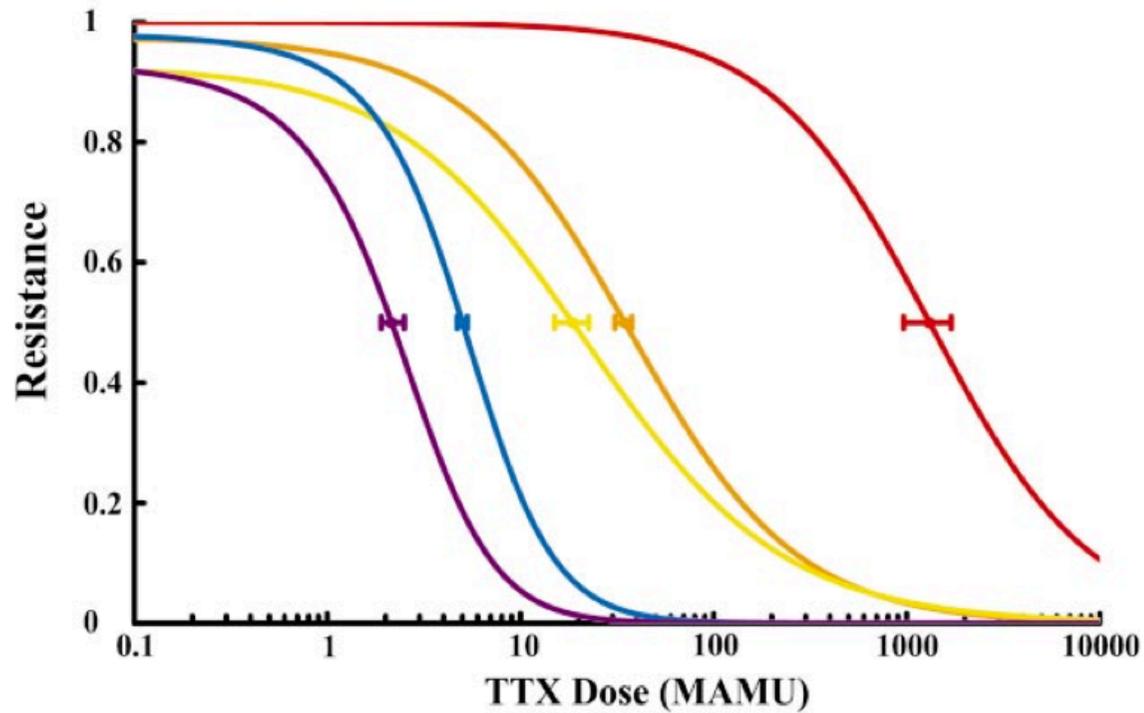


VENIN : TETRODOTOXIN

Brodie et al. (2002) *Evolution*
56:2067-2082

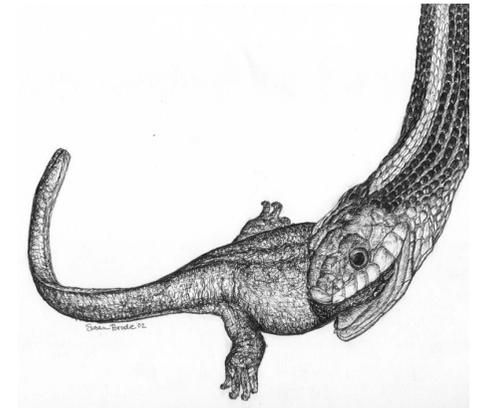
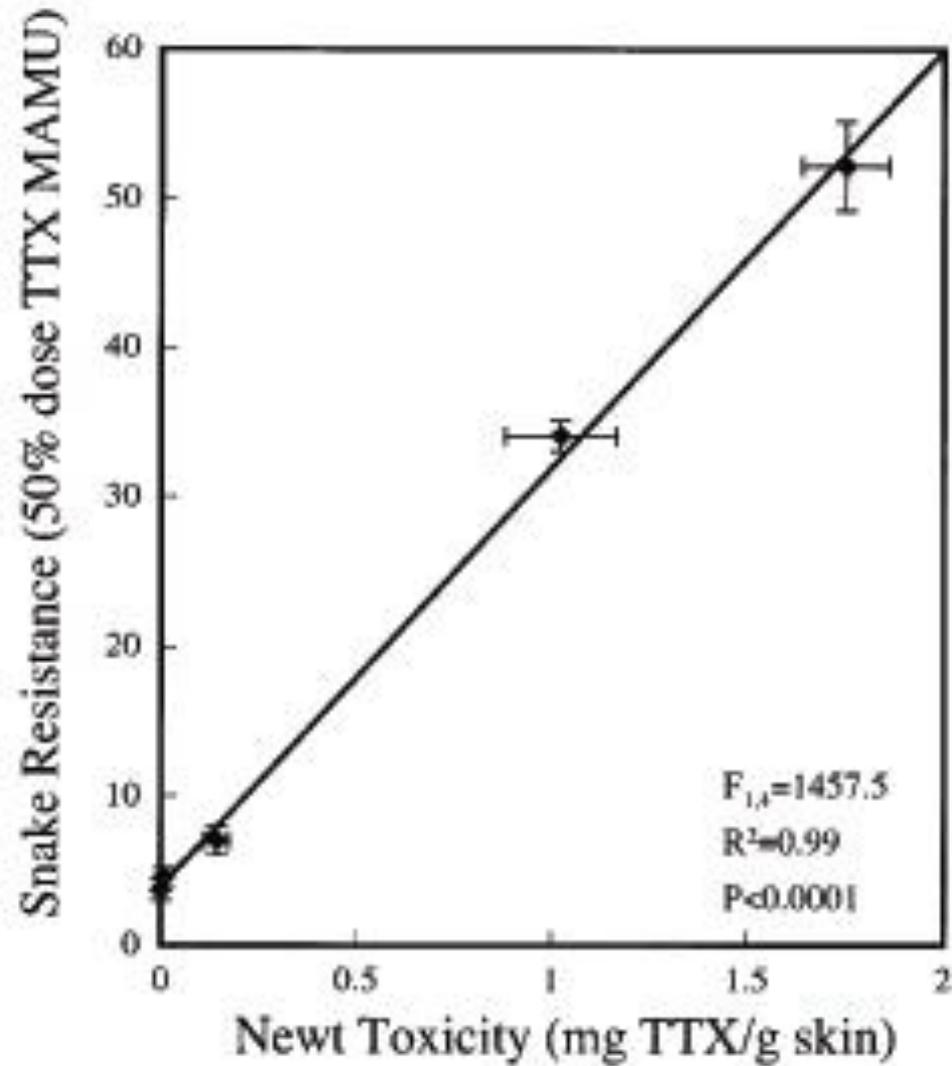


La resistance des serpents à la TTX varie en fonction des populations de serpents de Californie

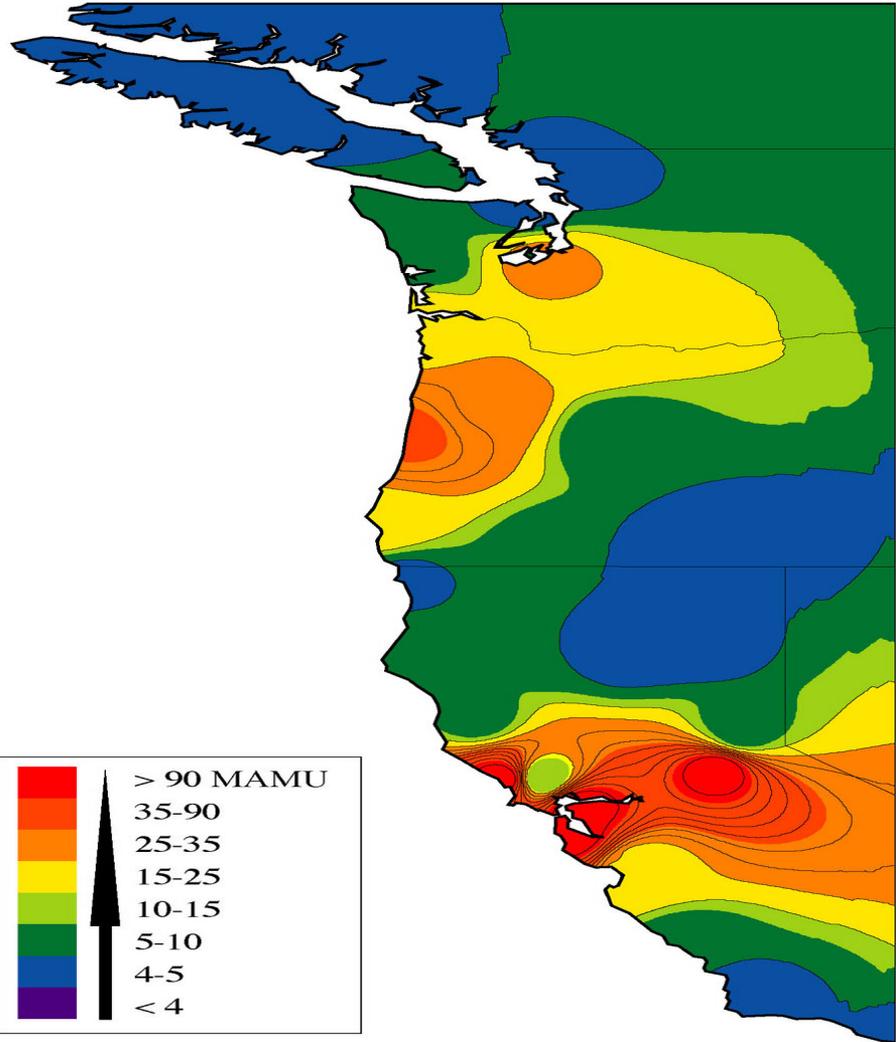
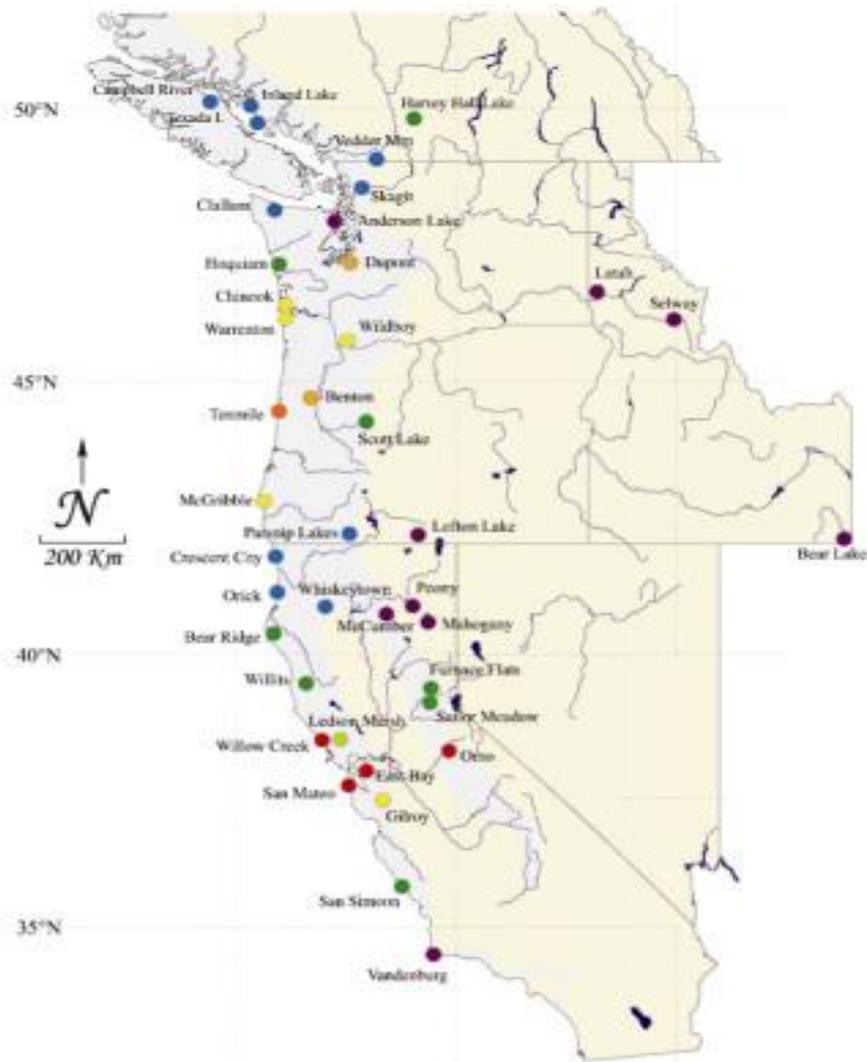


On peut identifier 8 niveaux de resistance

Brodie et al. (2002) *Evolution* 56:2067-2082



La resistance des serpents est prédite par la toxicité des tritons locaux



La zone de distribution des serpents et des tritons n'est pas la même

Il se forme une mosaïque géographique de coévolution avec des points chauds où les serpents sont plus résistants et les tritons plus toxiques

Principal message du Cours

- La coévolution décrit l'évolution par sélection réciproque des organismes.
- Elle inclut des interactions très variées (prédation, mutualismes, parasitisme, compétition) dont certaines (pollinisation, résistance aux infections) sont vitales pour l'homme et l'ensemble de la biodiversité.
- La biodiversité est avant tout une diversité d'interactions entre génotypes. Virtuellement, toutes les interactions qui affectent la fitness des partenaires de façon réciproque peuvent donner lieu à la coévolution.
- La structure géographique de ces interactions est capitale. La répartition géographique de la diversité génétique et phénotypique à l'intérieure d'une espèce est une composante majeure de la biodiversité.

Macroévolution

Spéciation et Phylogénie

Macroévolution

- La formation des espèces
- Les relations historiques entre elles
- Histoire de la vie sur Terre
- La sixième extinction

La Formation des Espèces

- Combien d'espèces y a t'il sur Terre?
- Qu'est ce qu'une espèce?
- La spéciation

Combien y'a t'il d'espèces sur Terre

- Entre 1.2 et 1.8 Millions d'espèces ont été décrites officiellement (possibles redondances et synonymies)
- Les descriptions se font dans des revues scientifiques et doivent répondre à des codes internationaux. C'est la personne qui décrit une espèce qui lui donne un nom.

Combien y'a t'il d'espèces sur Terre

- Projets Encyclopedia of Life (eol.org) ou Tree of Life visent à regrouper les descriptions de toutes les espèces animales, végétales, champignons et bactéries
- Il faudrait le travail d'une vie de 25.000 taxonomistes pour classer toutes les espèces (Ed Wilson)
- En 1993: revue des estimations (Nigel Stork): entre 3 et 100 Millions!

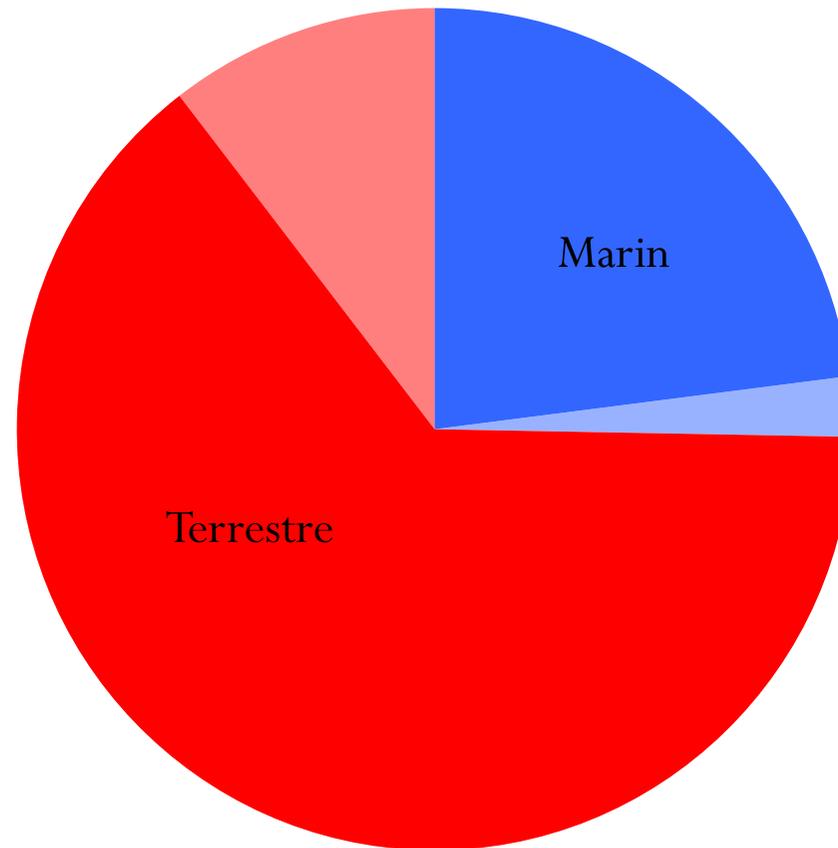
How Many Species Are There on Earth and in the Ocean?

Camilo Mora^{1,2*}, Derek P. Tittensor^{1,3,4}, Sina Adl¹, Alastair G. B. Simpson¹, Boris Worm¹

¹ Department of Biology, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada, ² Department of Geography, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, United States of America, ³ United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, United Kingdom, ⁴ Microsoft Research, Cambridge, United Kingdom

- Estimation totale: 8.7 Millions
(± 1.3) d'espèces eucaryotes
- Espèces marines: 2.2 Millions
– 91% non décrites
- Espèces terrestres: 6.5
Millions – 86% non décrites

Animaux: 7.8 Millions (89.3%)
Plantes: 298.000 (3.4%)
Champignons: 611.000 (7.0%)



Les espèces naissent et meurent

- Durée de vie pour les mammifères et les oiseaux: 1 à 10 Millions d'années

Qu'est-ce qu'une espèce?

- Un problème pour déterminer le nombre d'espèces est l'absence d'une définition unique et universelle.
- Groupe d'organismes capables de se reproduire réellement ou potentiellement
=> limite à l'expansion des allèles
- Pas toujours facile à appliquer

Concept morphologique

- Inconvénients:
 - Certains organismes peuvent sembler différents et appartenir à la même espèce



Concept morphologique



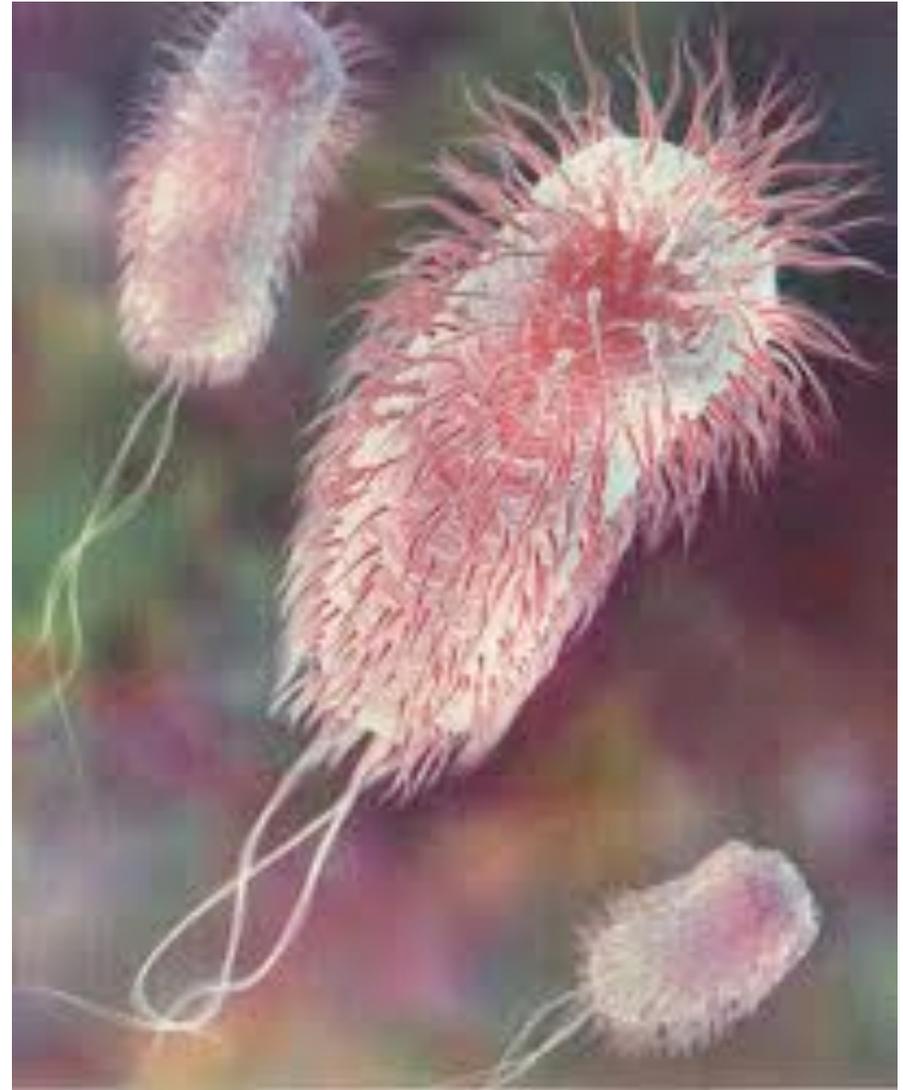
Lymantria dispar

Mystrium sp

Lucanus cervus

Concept morphologique

- Inconvénients:
 - Manque de caractères pour les organismes de petite taille



Echerichia coli

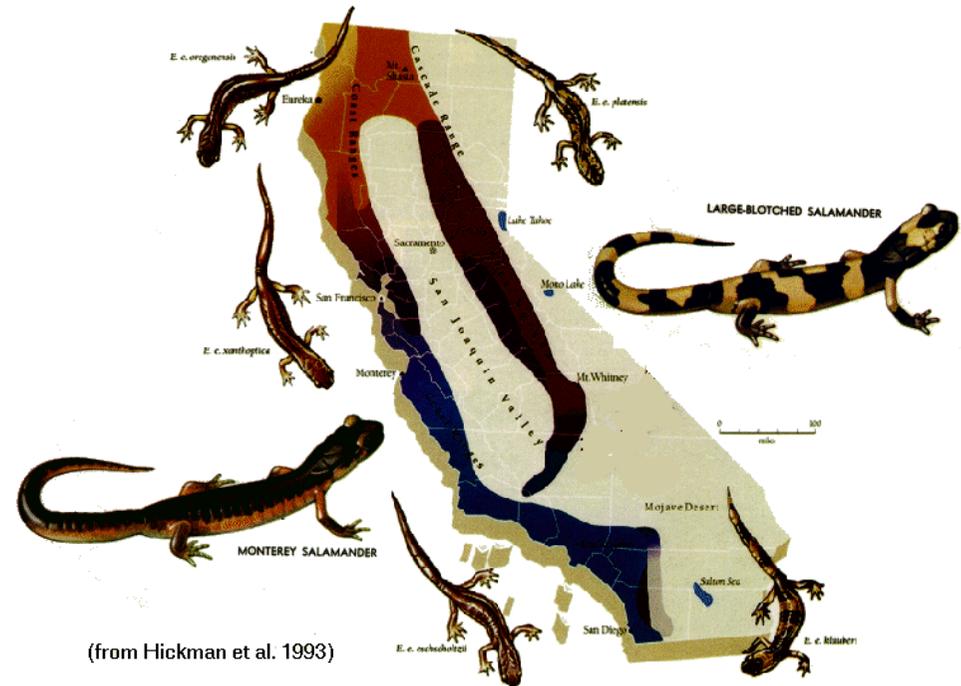
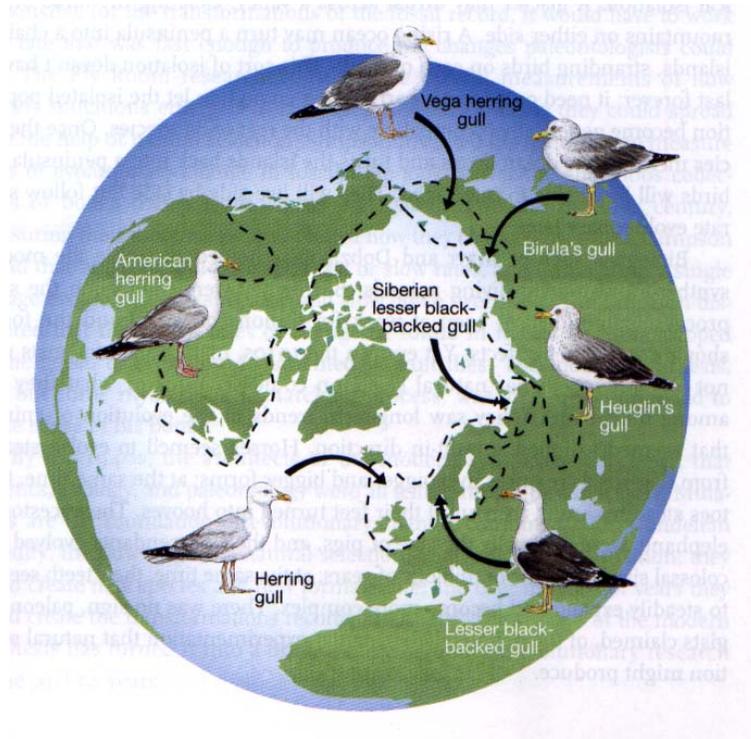
Concept biologique

- Définition: Groupe d'organismes capables de se reproduire réellement ou potentiellement (Ernst Mayr – 1942)
- Définition la plus acceptée et utilisée pour établir la liste des espèces en danger

Concept biologique

- Comment déterminer si deux populations géographiquement séparées seraient potentiellement capables de se reproduire si elles se rejoignaient?

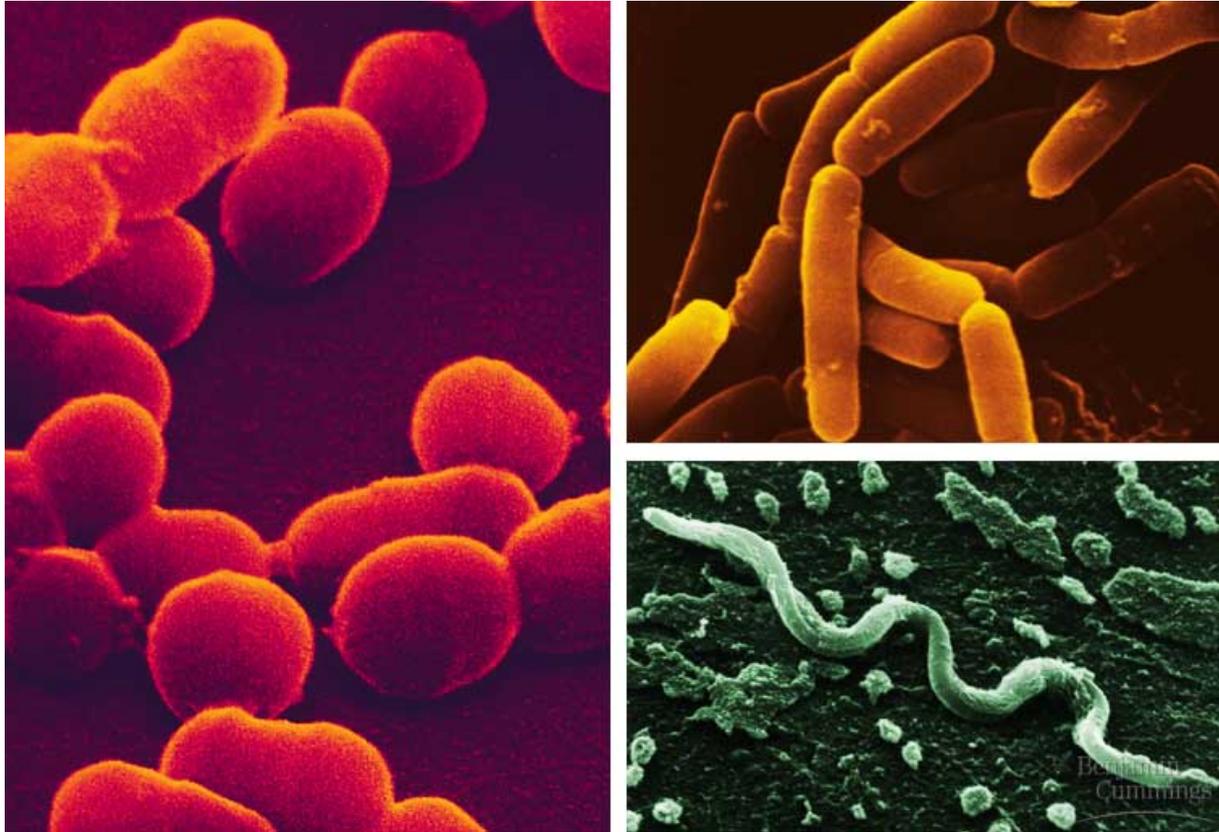
Concept biologique



(from Hickman et al. 1993)

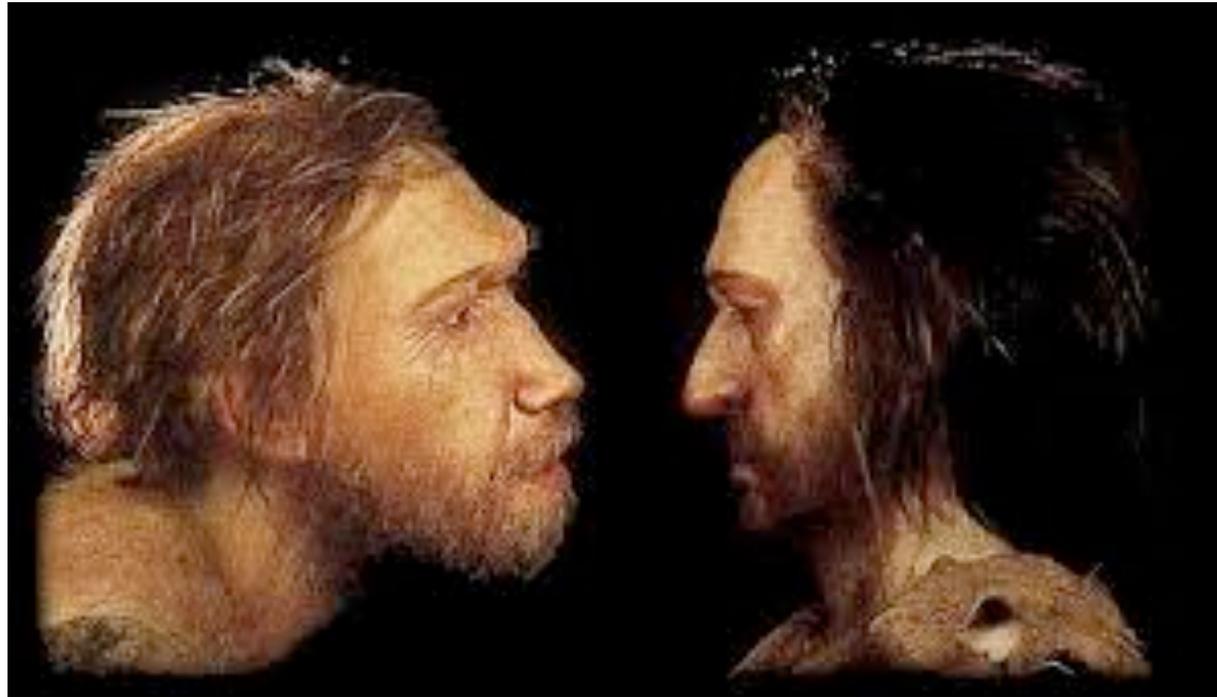
Où placer la limite?

Concept biologique



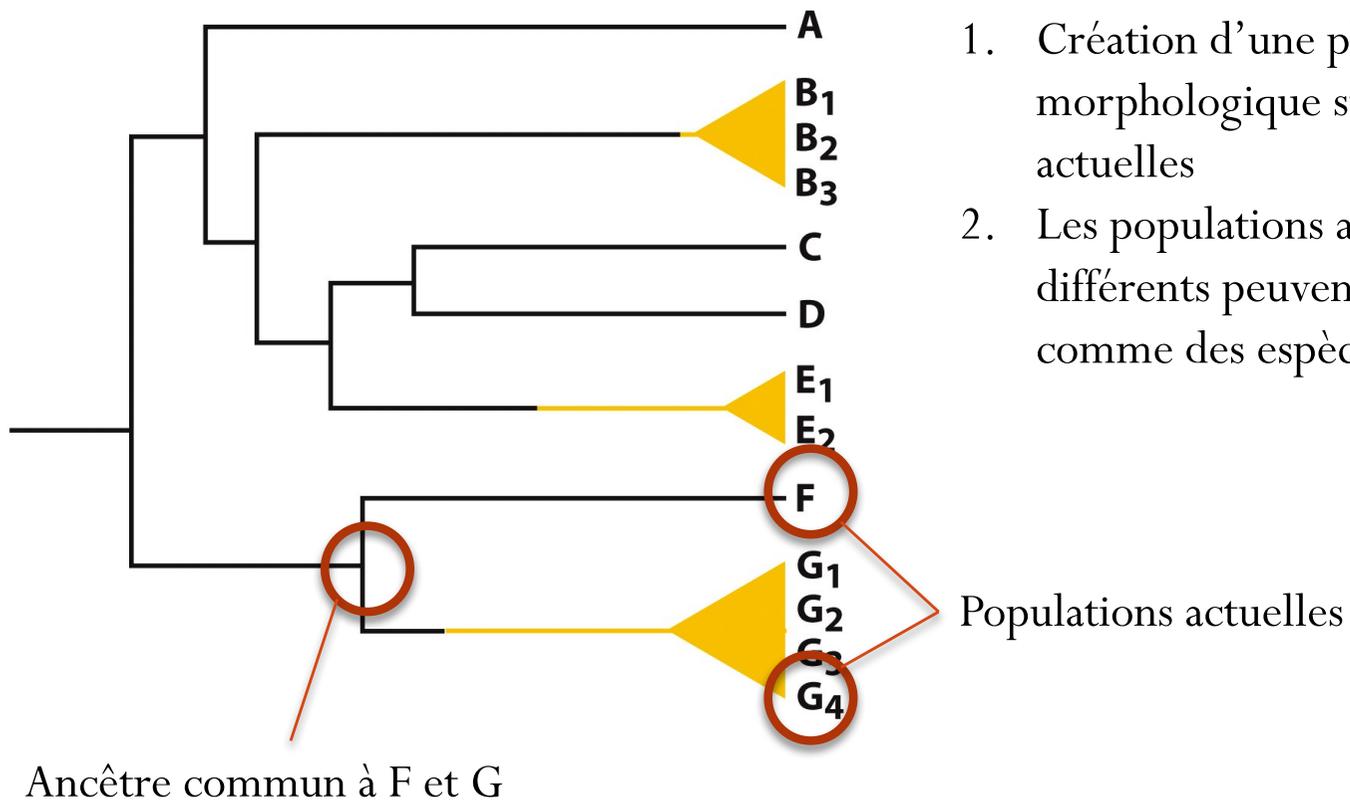
Pas utilisable pour des espèces à reproduction asexuée

Concept biologique



Pas utilisable pour les espèces éteintes

Concept phylogénétique



1. Création d'une phylogénie moléculaire ou morphologique sur des populations actuelles
2. Les populations appartenant à des clusters différents peuvent être considérées comme des espèces distinctes

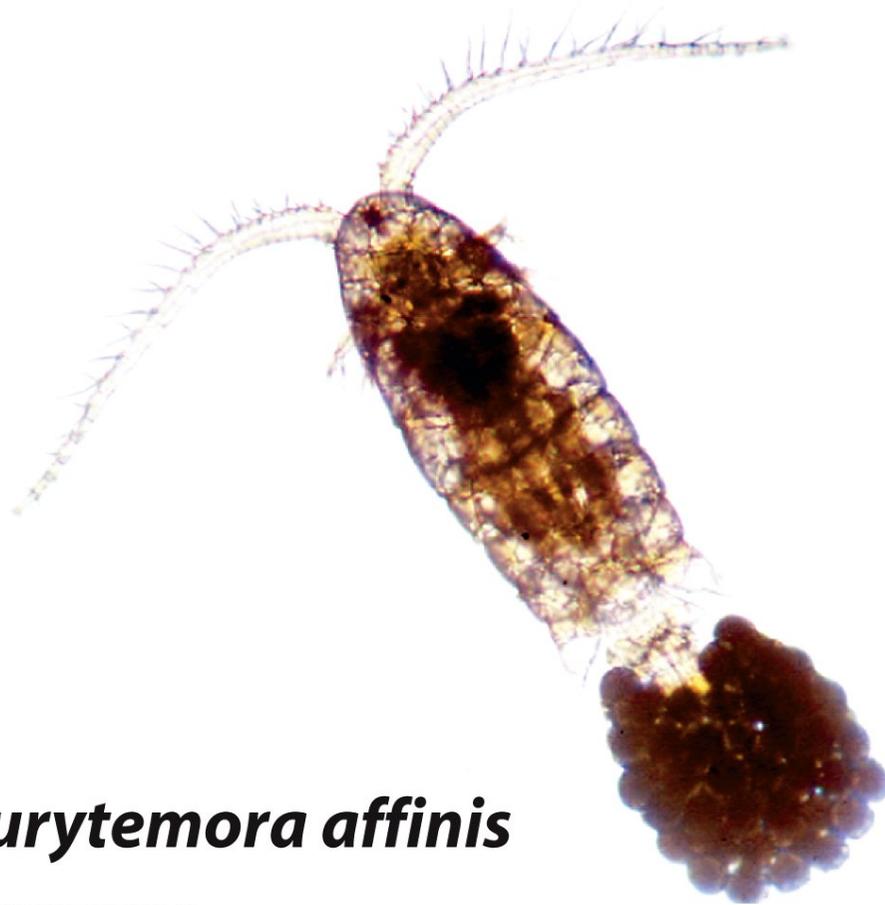
Eurytemora affinis

Copépode (crustacée) composant le plancton. 1-2 mm de long

Herbivore majeur des estuaires autour du monde

Ressource alimentaire essentielle pour de nombreuses espèces de poissons

Décrit en 1864 et toujours maintenu comme une seule espèce jusqu'en 2000

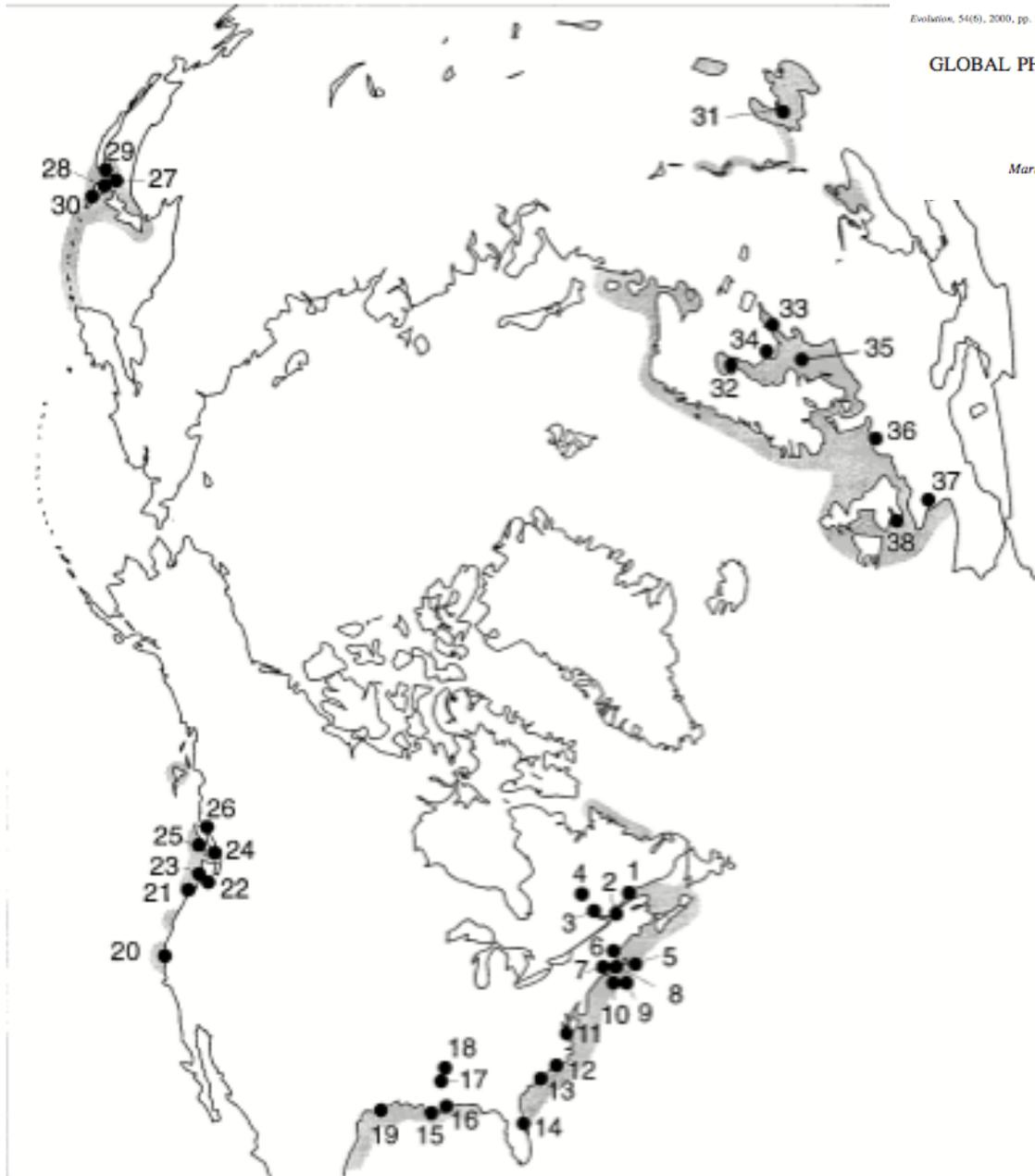


Eurytemora affinis

GLOBAL PHYLOGEOGRAPHY OF A CRYPTIC COPEPOD SPECIES COMPLEX AND REPRODUCTIVE ISOLATION BETWEEN GENETICALLY PROXIMATE "POPULATIONS"

CAROL EUNMI LEE¹

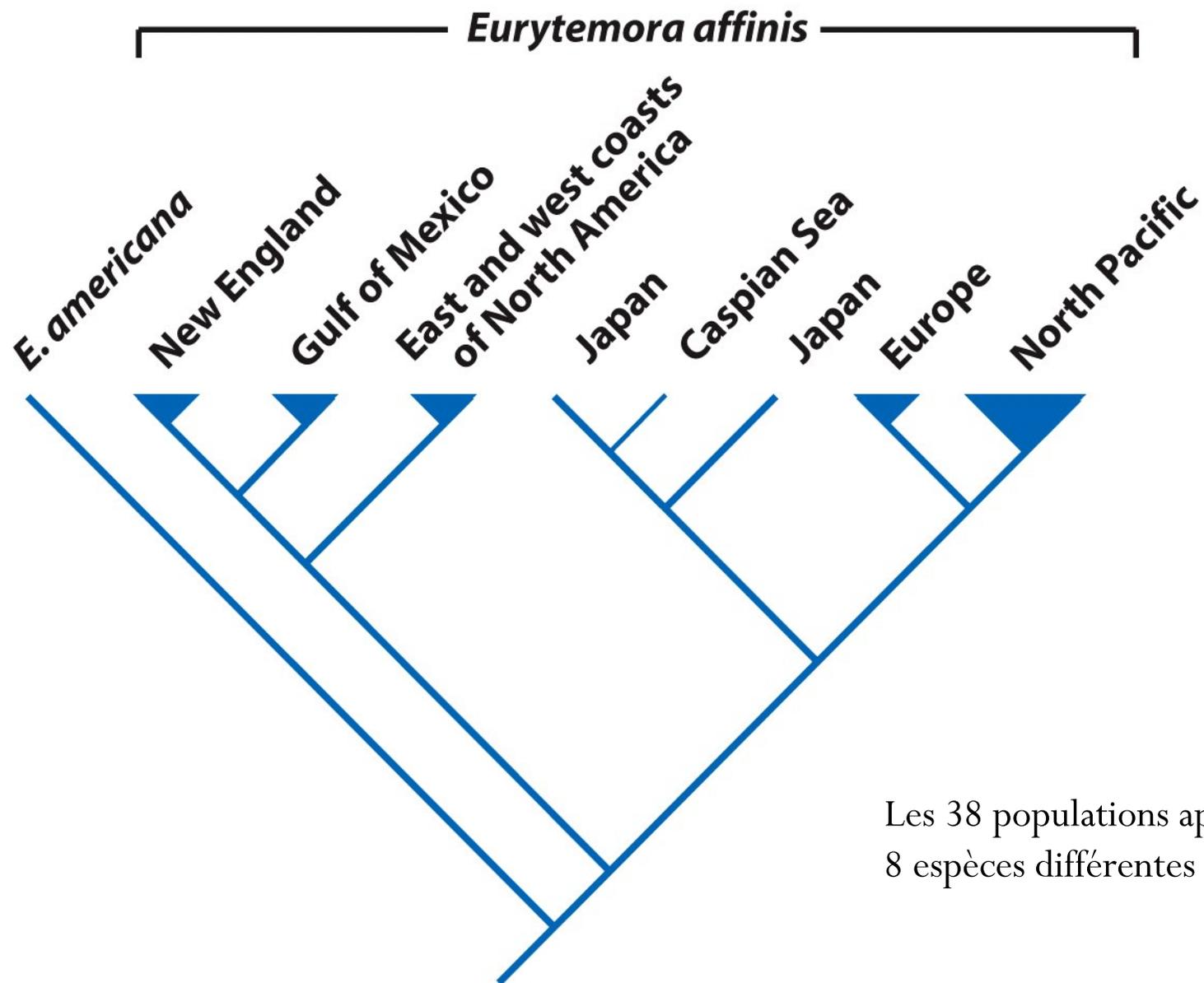
Marine Molecular Biotechnology Laboratory, School of Oceanography, University of Washington, Seattle, Washington 98195-7940



1. Échantillonnage de 38 populations autour du monde

2. Extraction, amplification (PCR), séquençage de 2 gènes non nucléaires:
ribosomal (16S rRNA)
mitochondrial (Cytochrome Oxydase 1 = CO1)

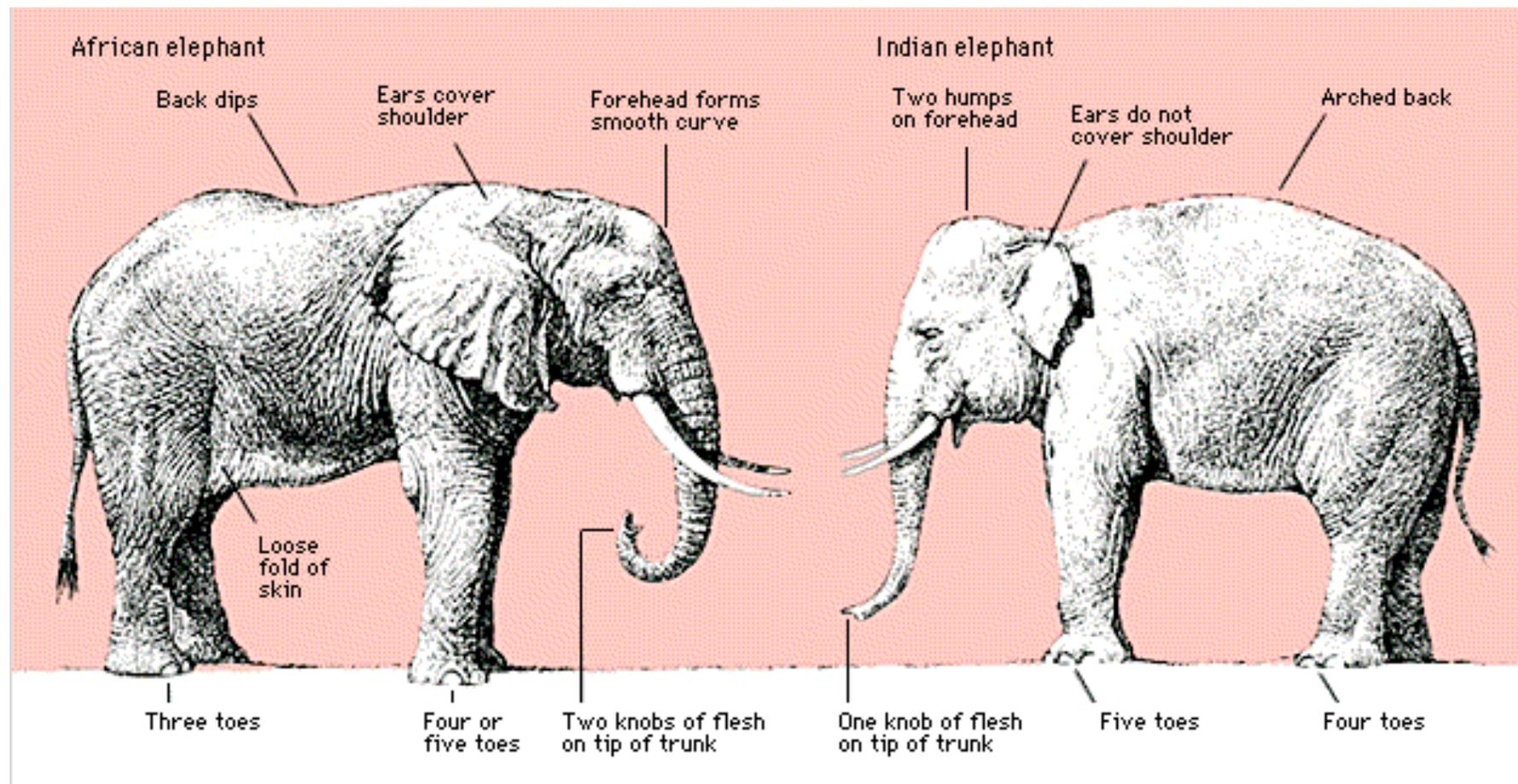
3. Le séquençage permet d'obtenir la séquence linéaire des nucléotides d'une partie du génome ou du génome entier



Les 38 populations appartiennent en fait à 8 espèces différentes

Figure 16-3 Evolutionary Analysis, 4/e
 © 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Importantes différences morphologiques entre éléphants d'Afrique et d'Asie



Genetic Evidence for Two Species of Elephant in Africa

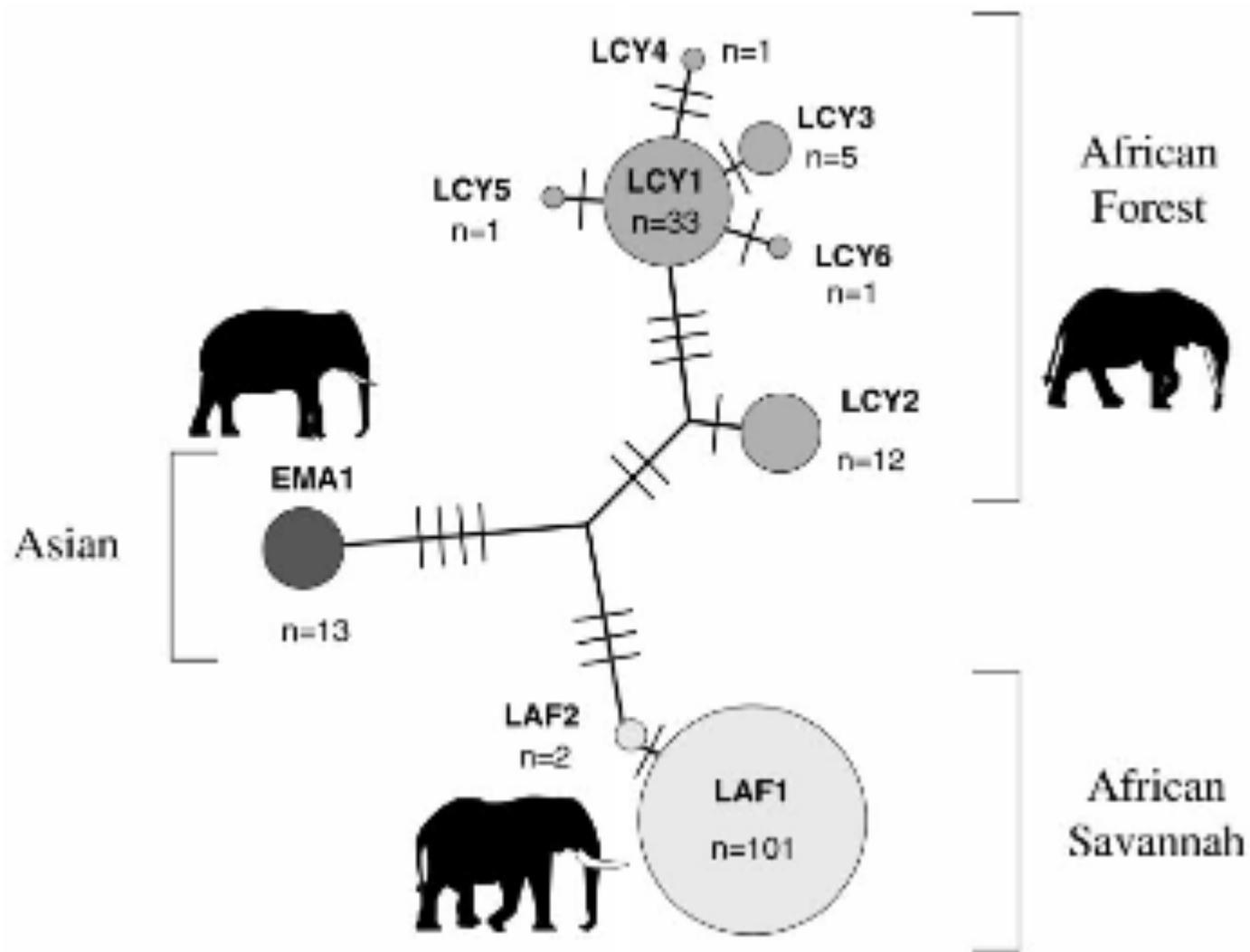
Alfred L. Roca,¹ Nicholas Georgiadis,² Jill Pecon-Slattery,¹
Stephen J. O'Brien^{1*}

www.sciencemag.org SCIENCE VOL 293 24 AUGUST 2001

Échantillonnage de 13 éléphants d'Asie et 195 éléphants d'Afrique provenant de 21 populations

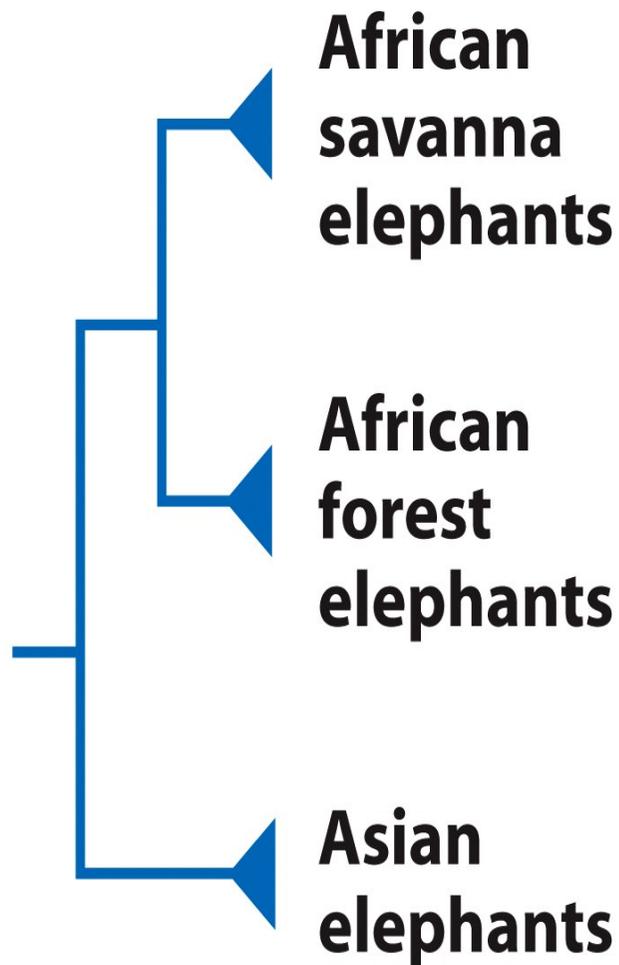
Extraction, amplification, séquençage et comparaison des séquences nucléotidiques de 4 gènes nucléaires

Il y a au moins 2 espèces d'éléphant en Afrique



Neighbour Joining Network

Il y a au moins 2 espèces d'éléphant en Afrique



Loxondata africana



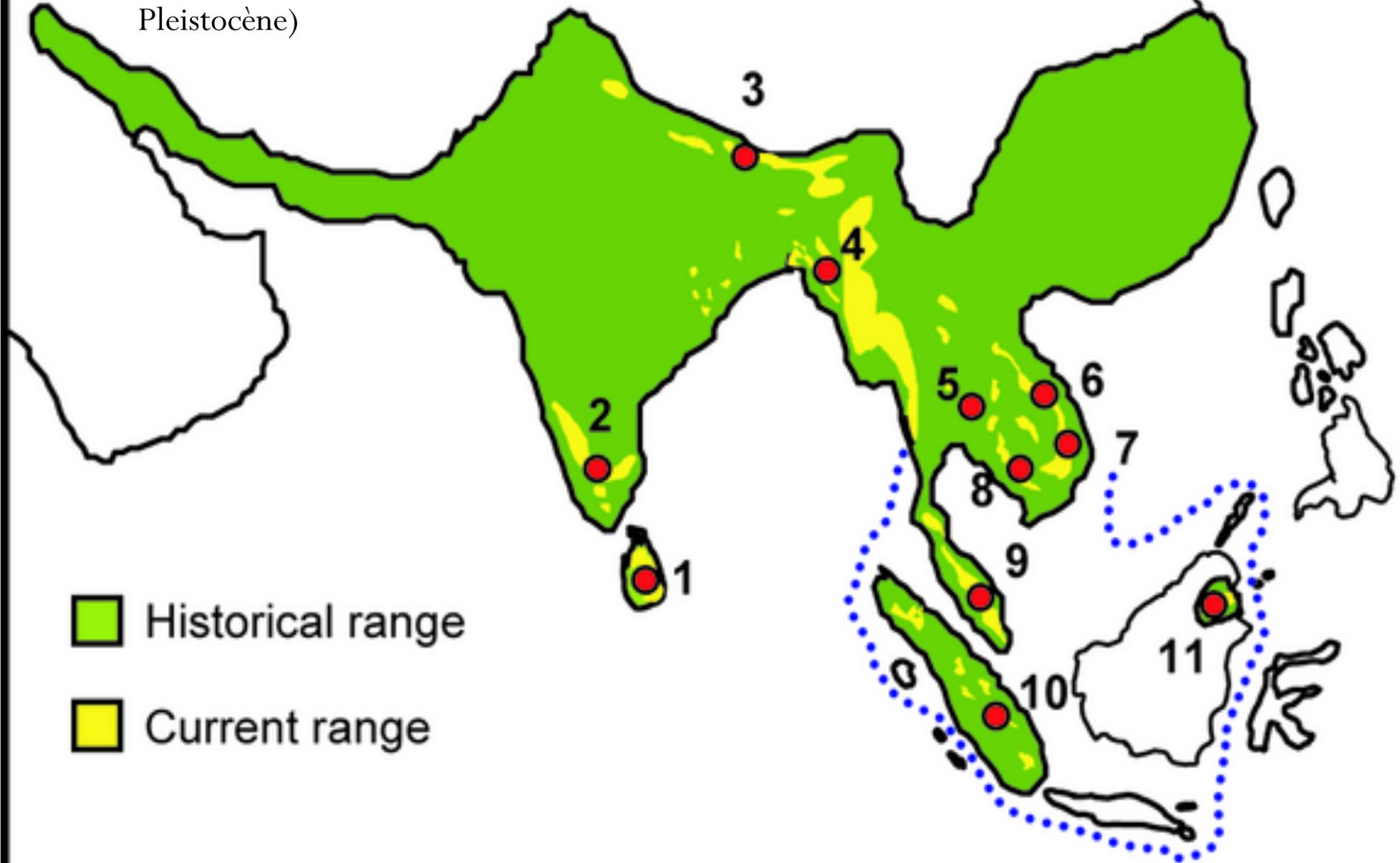
Loxondata cyclotis



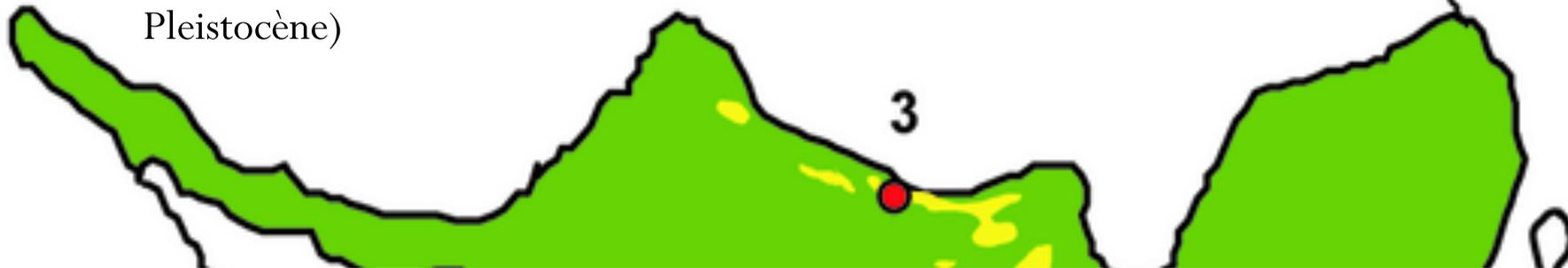
Elephas maximus

Phylogenetic tree

Limite de Sundaland
(dernière connexion avec le
continent il y a 18,000 ans, au
Pleistocène)



Limite de Sundaland
(dernière connexion avec le
continent il y a 18,000 ans, au
Pleistocène)



PLOS BIOLOGY

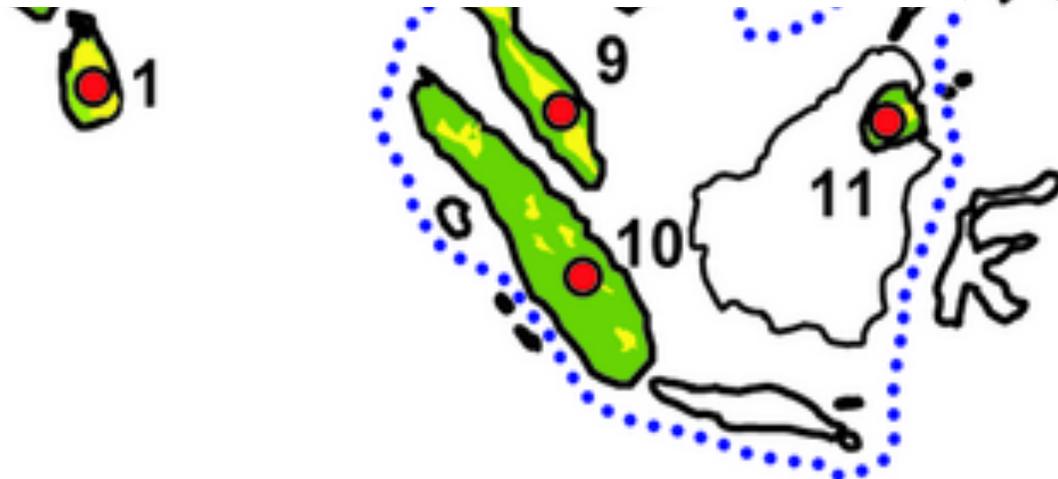
DNA Analysis Indicates That Asian Elephants Are Native to Borneo and Are Therefore a High Priority for Conservation

Prithiviraj Fernando^{1,2*}, T. N. C. Vidya³, John Payne⁴, Michael Stuewe⁵, Geoffrey Davison⁴, Raymond J. Alfred⁴, Patrick Andau⁶, Edwin Bosl⁶, Annelisa Kilbourn^{7,△}, Don J. Melnick^{1,2}

1 Center for Environmental Research and Conservation, Columbia University, New York, New York, United States of America, **2** Department of Ecology, Evolution, and Environmental Biology, Columbia University, New York, New York, United States of America, **3** Center for Ecological Sciences, Indian Institute of Science, Bangalore, India, **4** World Wide Fund for Nature–Malaysia, Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, **5** Asian Rhino and Elephant Action Strategy Programme, World Wildlife Fund, Washington, District of Columbia, United States of America, **6** Sabah Wildlife Department, Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, **7** Field Veterinary Program, Wildlife Conservation Society, Bronx, New York, United States of America

 Historical range

 Current range



Observation 1: L'aire de distribution de l'Éléphant d'Asie s'est réduite énormément en deux siècles

Observation 2: Certaines populations comme Bornéo semblent très isolées.

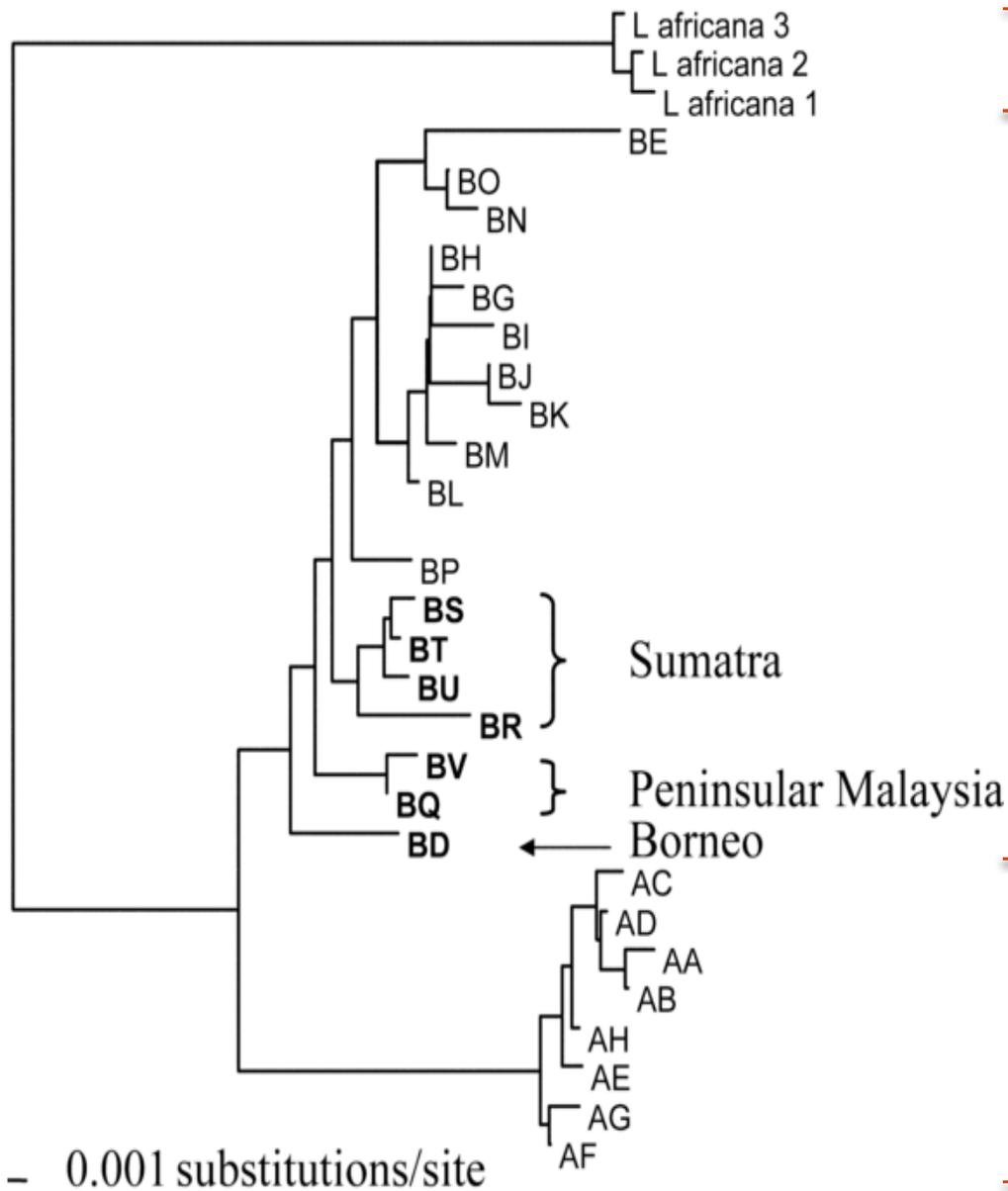
Observation 3: Pas de fossiles d'éléphants sur l'Ile de Bornéo

Hypothèse 1 (Croyance populaire): La population de Bornéo provient d'individus apprivoisés et introduits par les colons Anglais au 18^{ème} siècle => Origine Indienne => pas une priorité pour la conservation

Hypothèse alternative: Il peut s'agir d'une population plus ancienne avec une histoire évolutive propre. Origine au moins 18,000 ans: avant la montée du niveau de la mer et la séparation de Sundaland



Échantillons de mtDNA de plus de 350 éléphants d'Asie + 3 éléphants d'Afrique



Loxodonta africana

Elephas maximus Clade I
Toutes les populations d'Indonésie (Sundaland)
Borneo est bien séparée et la plus ancienne

Elephas maximus Clade II
Toutes les populations du continent (Inde, Vietnam)

Fst Fixation index (Wright 1978)

Indice de différenciation génétique variant entre 0 et 1.

$F_{st} < 0.05$ petite différenciation

$0.05 < F_{st} < 0.15$ différenciation modérée

$0.15 < F_{st} < 0.25$ différenciation importante

$F_{st} > 0.25$ différenciation très importante

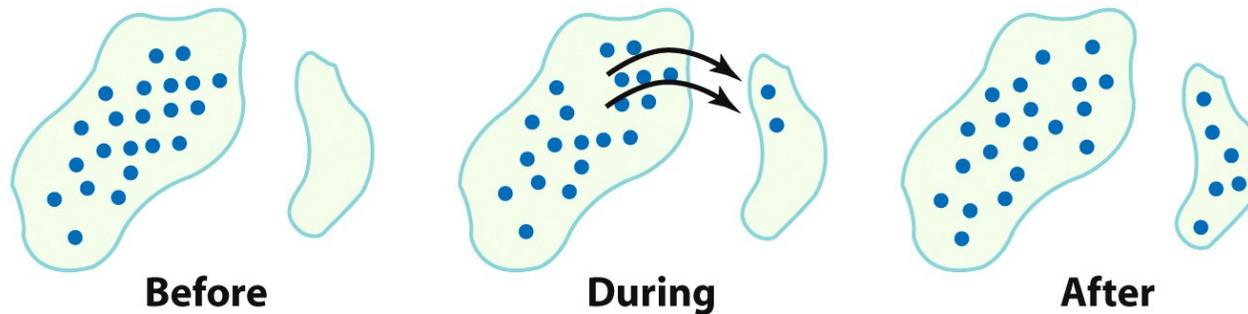
	Sumatra	Malaysia	Cambodia	Laos	Thailand	Bangladesh	India	Sri Lanka
Borneo	0.562	0.331	0.626	0.381	0.394	0.428	0.535	0.322

DOI: 10.1371/journal.pbio.0000006.t003

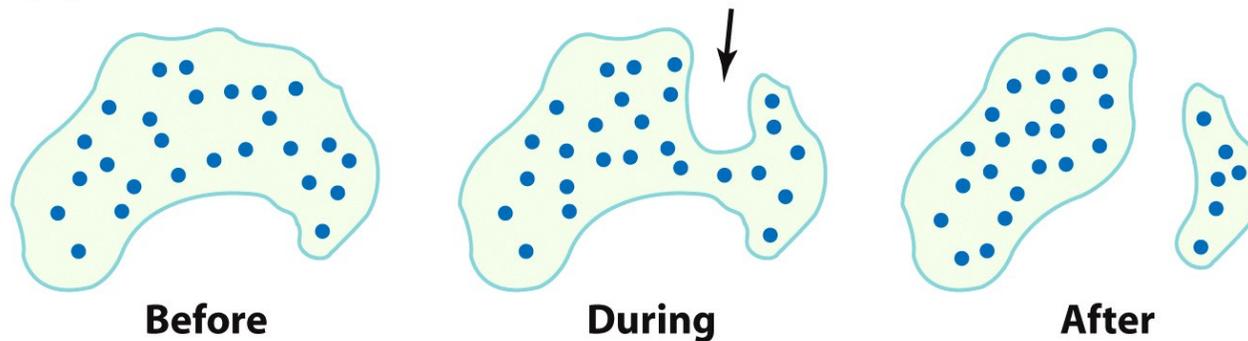
Les mécanismes de la spéciation

SPÉCIATION ALLOPATRIQUE

(a) Dispersal

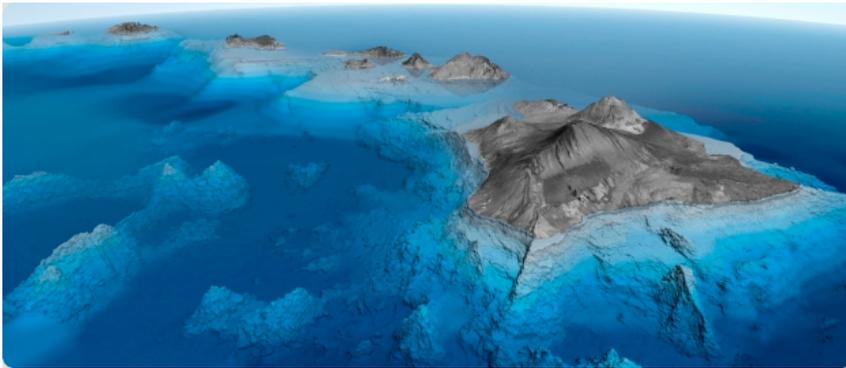


(b) Vicariance



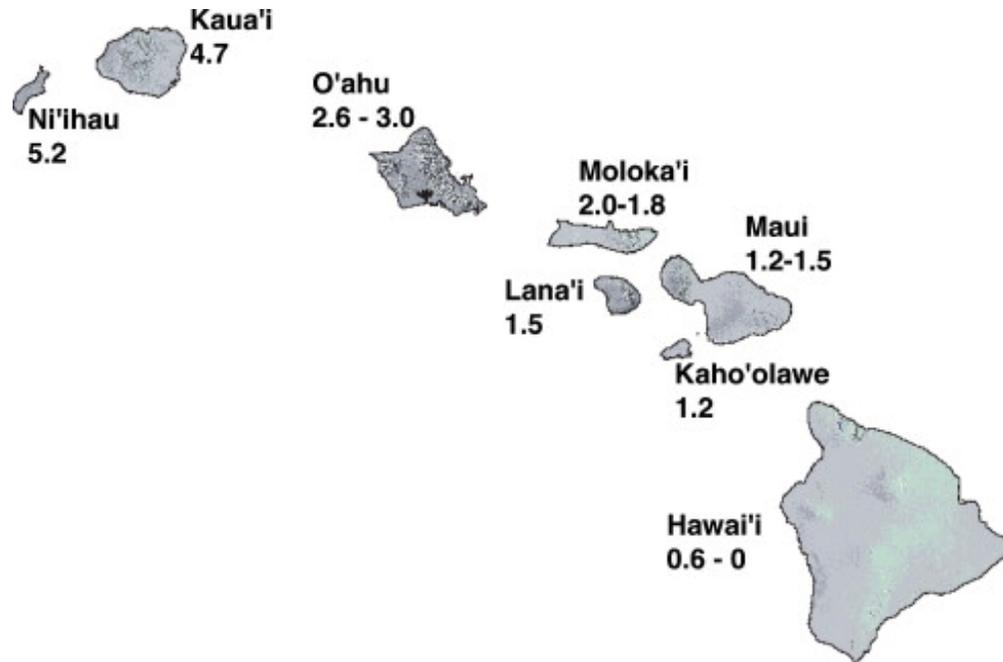
Exemple de spéciation par dispersion et colonisation

Radiation des Mouches de Hawaï



- L'archipel de Hawaï, situé au milieu de l'océan Pacifique, est composé de 8 îles principales
- 1000 espèces de mouches occupent tous les milieux (niches écologiques) – Grande variabilité morphologique et écologique
- Chaque espèce est endémique d'une île

Exemple de spéciation par dispersion et colonisation

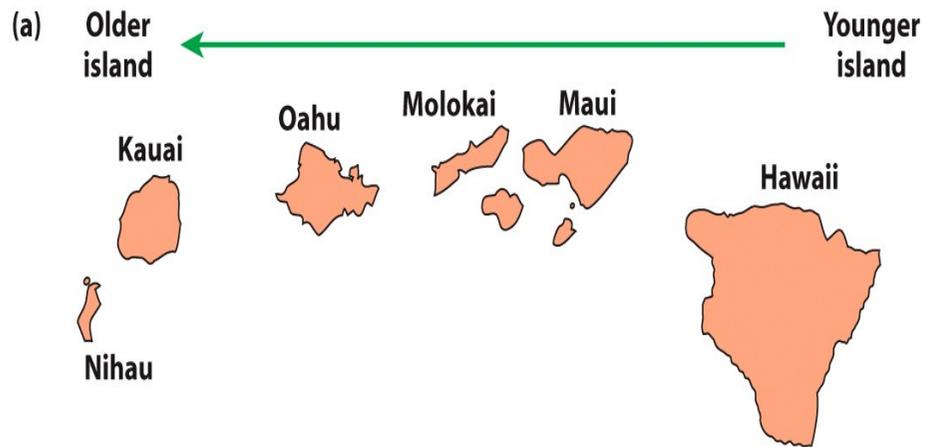


Hawaï est situé sur un point chaud: Activité volcanique intense et régulière. À chaque éruption volcanique se crée une nouvelle île.

Après leur création, les îles se déplacent vers le nord ouest sous l'effet de la tectonique des plaques.

Un phénomène d'érosion simultané provoque une diminution de l'altitude. Les îles se transforment en atolls puis en montagnes sous-marines.

La plus vieille île date du Pliocène (5.2 My), la plus récente (Hawaï) a moins d'un My, (Pleistocène)



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Molecular Phylogenetics and Evolution 37 (2005) 73–82

MOLECULAR
PHYLOGENETICS
AND
EVOLUTION

www.elsevier.com/locate/ympev

Phylogeny and age of diversification of the *planitibia* species group of the Hawaiian *Drosophila*

James Bonacum ^{a,*}, Patrick M. O'Grady ^b, Michael Kambyzellis ^c, Rob DeSalle ^d

1. Les îles adjacentes sont peuplées par des espèces sœurs.
2. Les îles les plus anciennes (Nihau et Kauai) sont peuplées par des espèces ancestrales

Compatible avec un scénario de dispersion et colonisation des îles au fur et à mesure qu'elles apparaissent

Exemple de vicariance

La formation de Panama

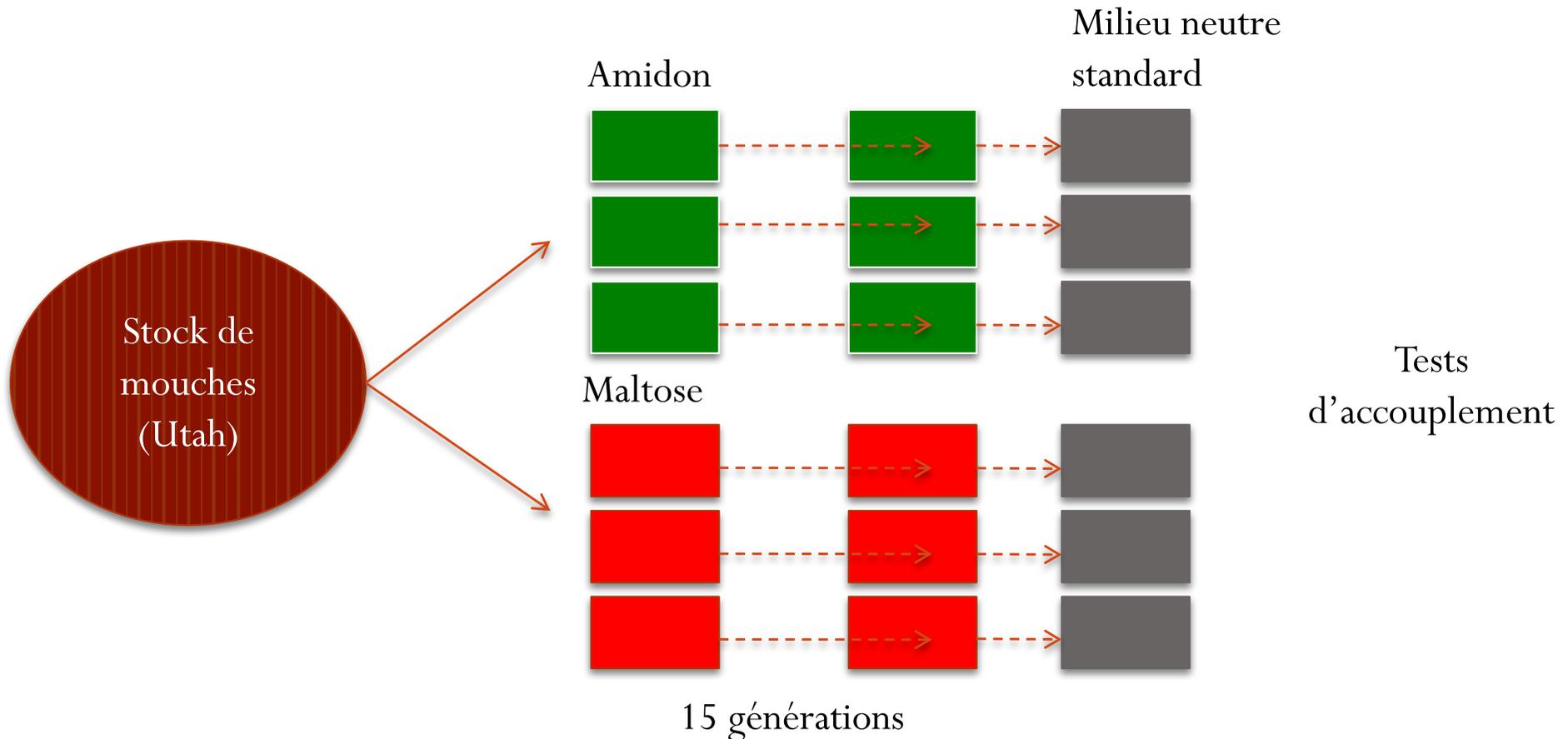


10 My (Milieu du Miocène)



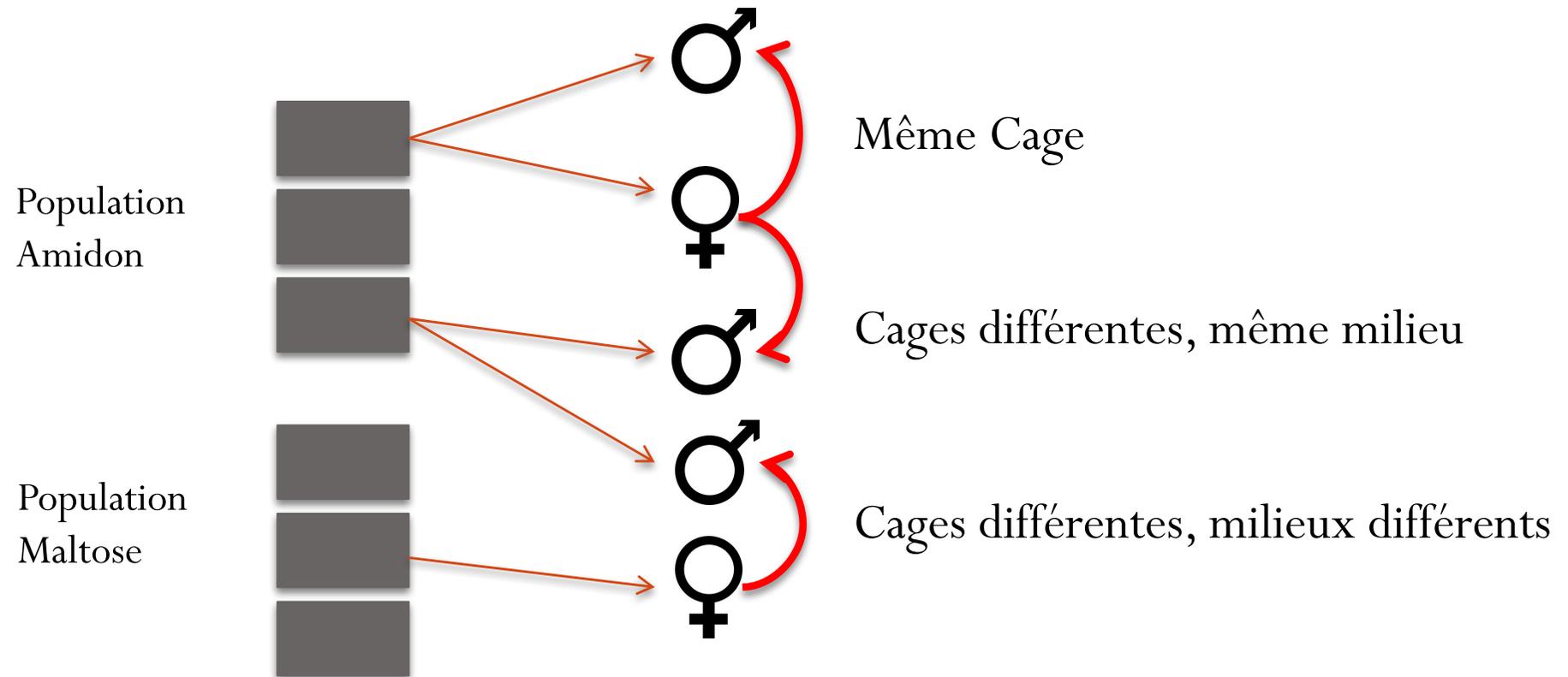
5 My (début du Pliocène)

Comment l'isolement reproducteur provoque t'il la spéciation?



Diane Dodd : Reproductive Isolation as a Consequence of Adaptive Divergence in *Drosophila pseudoobscura* Evolution 43: 1308-1311

Comment l'isolement reproducteur provoque t'il la spéciation?



Diane Dodd :Reproductive Isolation as a Consequence of Adaptive Divergence in *Drosophila pseudoobscura* Evolution 43: 1308-1311

Comment l'isolement reproducteur provoque t'il la spéciation?

Milieux différents

Females		
	•Amidon	•Maltose
Males		
•Amidon	22	9
•Maltose	8	20

Même milieu (contrôle)

Females		
	•Same	•Different
Males		
•Same	18	15
•Different	12	15

1. Les femelles (naïves) provenant d'une population élevée sur un milieu (Amidon ou Maltose) préfèrent des mâles venant d'une population élevée sur le même milieu.
1. Les femelles n'ont pas de préférence pour des mâles élevés dans les mêmes conditions dans leur cage ou dans une autre cage
1. Donc, la sélection naturelle (adaptation à un nouveau milieu) provoque un début d'isolement reproducteur mais pas la dérive génétique seule (séparation sur des milieux identiques)

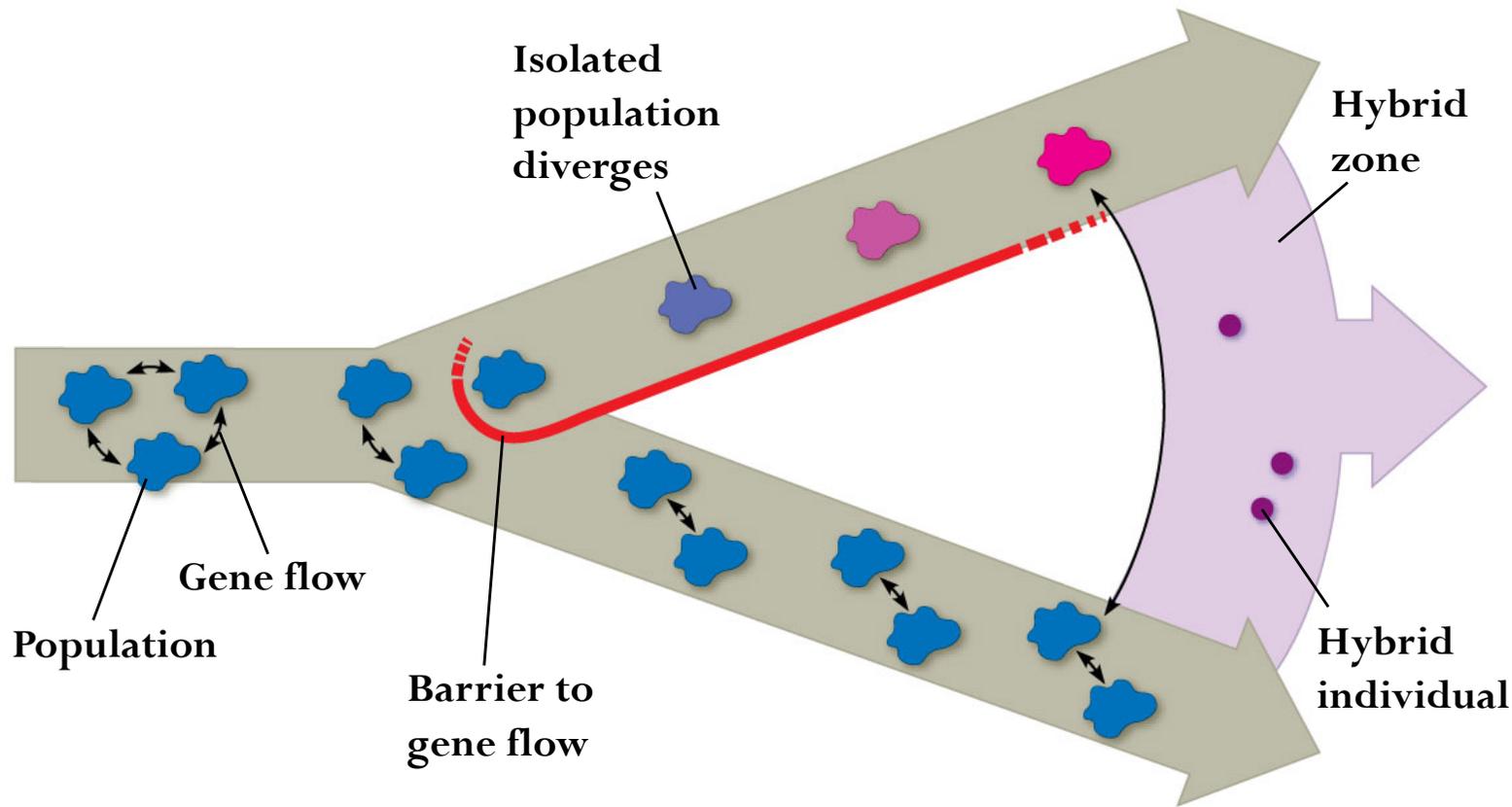
Postzygotic isolation



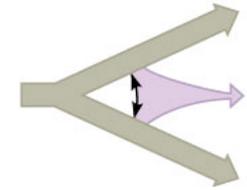
La formation d'une nouvelle espèce peut aussi venir d'un isolement reproducteur postzygotique (hybrides stériles)



Que se passe t'il lorsque les populations se rejoignent?

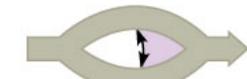


Possible outcomes:



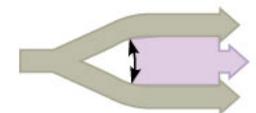
Reinforcement

OR



Fusion

OR



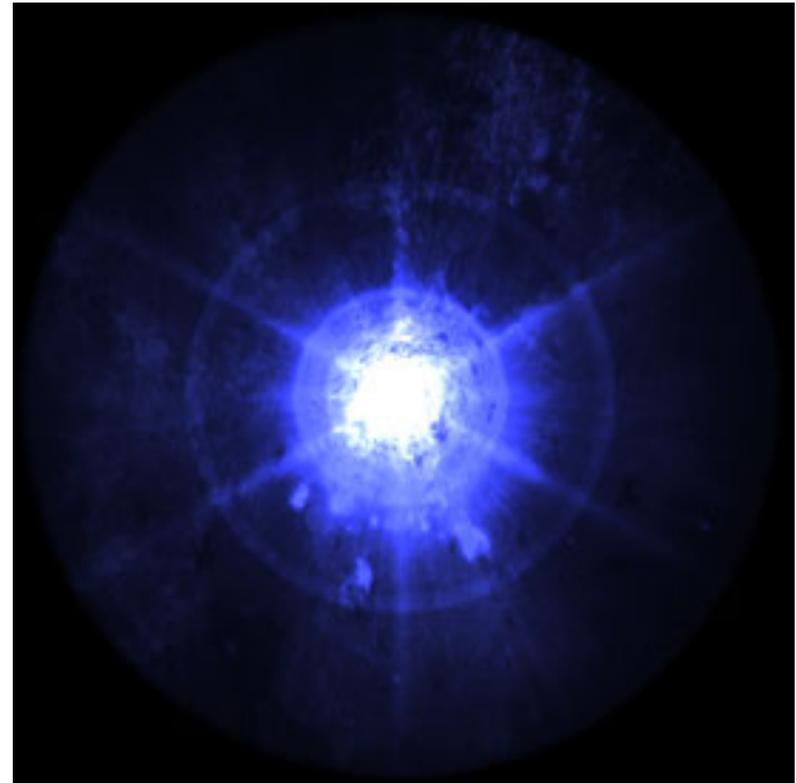
Stability

Évolution de la vie sur Terre

Histoire de la vie

Univers ≈ 15 Milliards
d'années (Ga).

Théorie du *Big Bang*:
Apparition soudaine de la
matière et de l'énergie
(Edwin Hubble, 1929).



Formation du Système Solaire

- 4.6 Ga: Formation d'une nébuleuse composée de poussières et de gaz H et He.



Le nuage s'aplatit et se met à tourner sur lui-même => proto soleil



Les particules périphériques s'attirent sous l'effet de la gravité et forment des objets de plus grande taille.

=> proto-planètes.

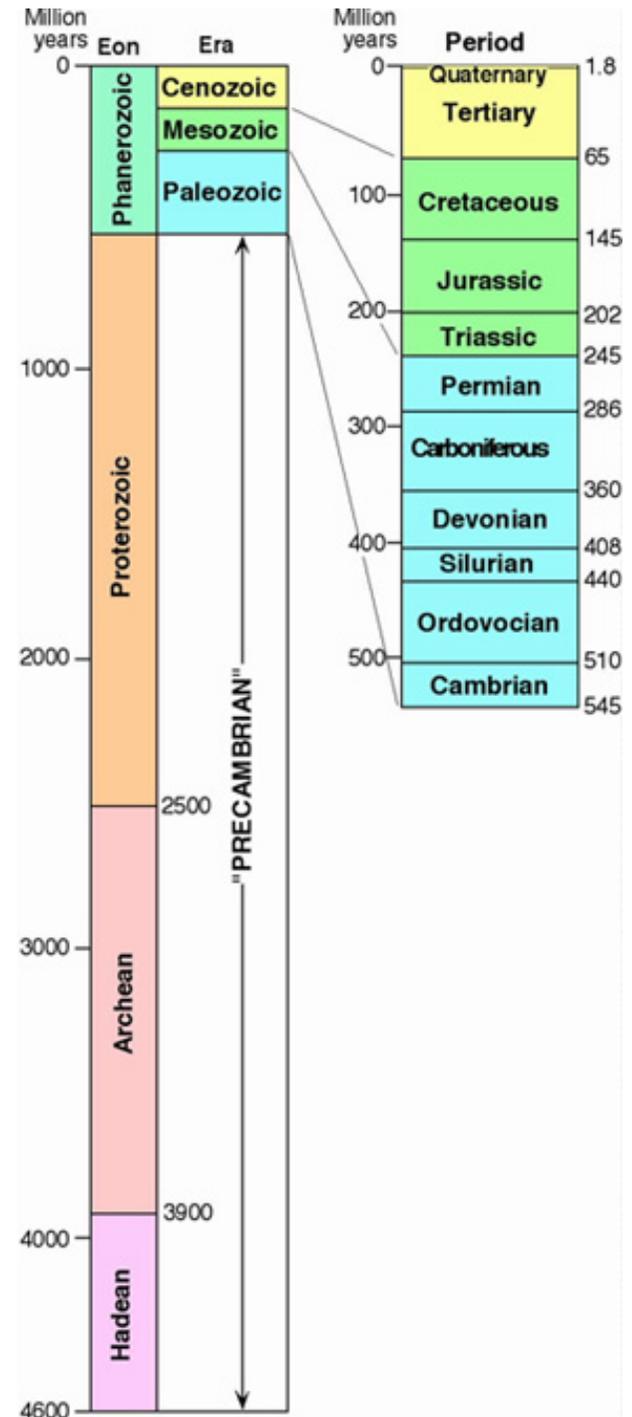


Le Précambrien

Histoire de la Terre divisée en Éons, Ères, Périodes et Époques.

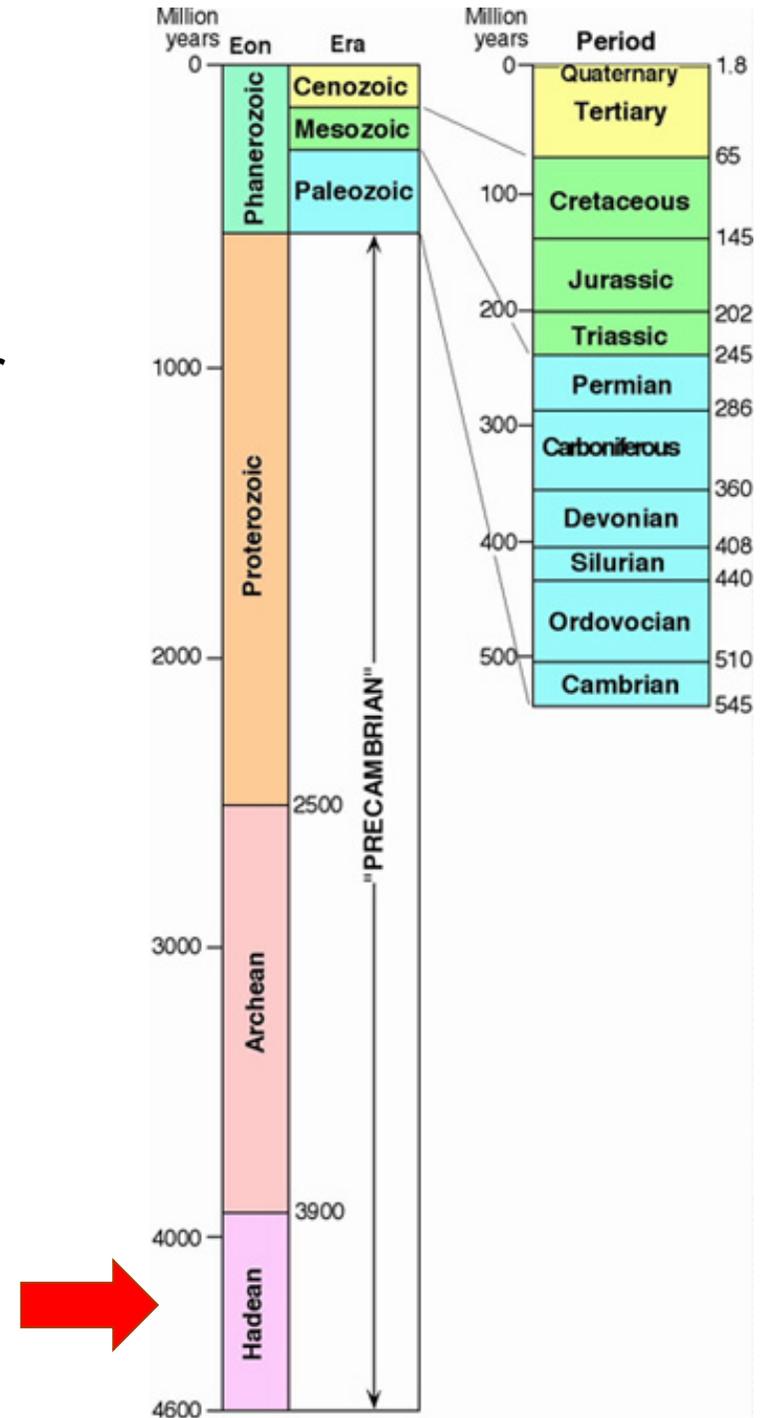
Cambrien = 1^{ère} période du dernier éon => forte radiation du vivant.

Précambrien = Ensemble des 3 1^{er} Éons (86% de l'âge de la Terre)



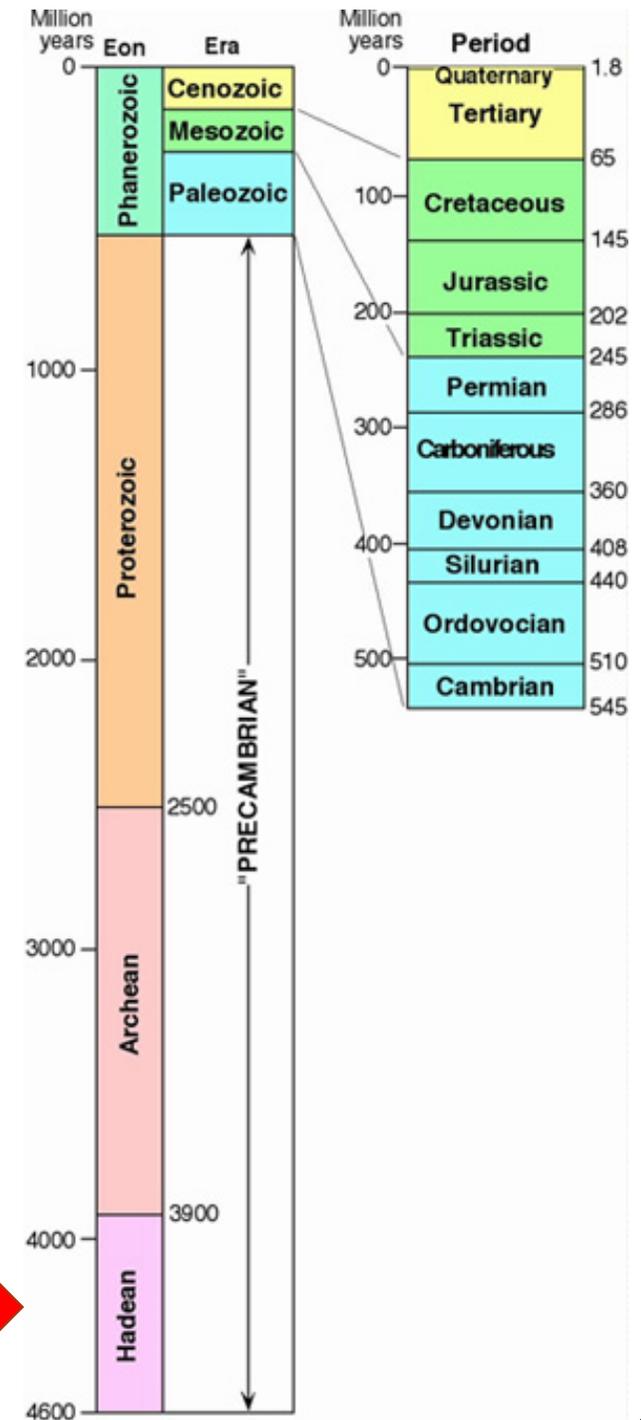
Hadéen (-4.6 à -3.9 Ga)

La Terre = roches en fusion; bombardée par des astéroïdes.



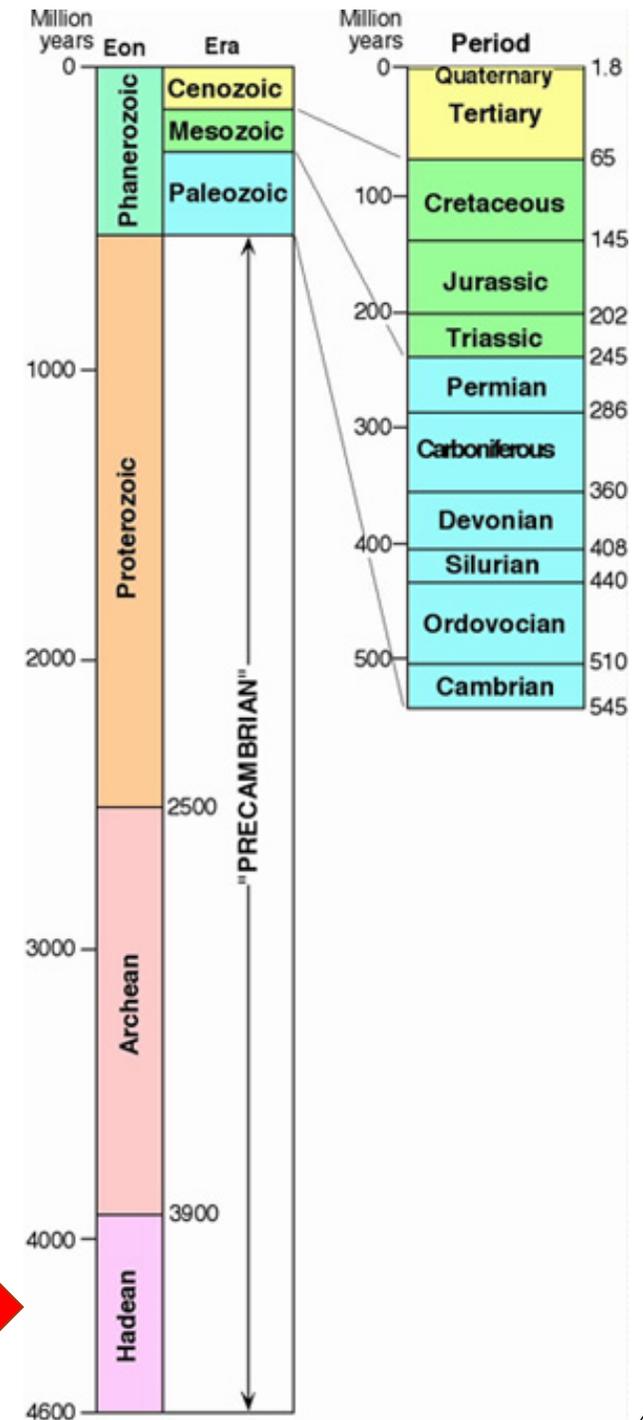
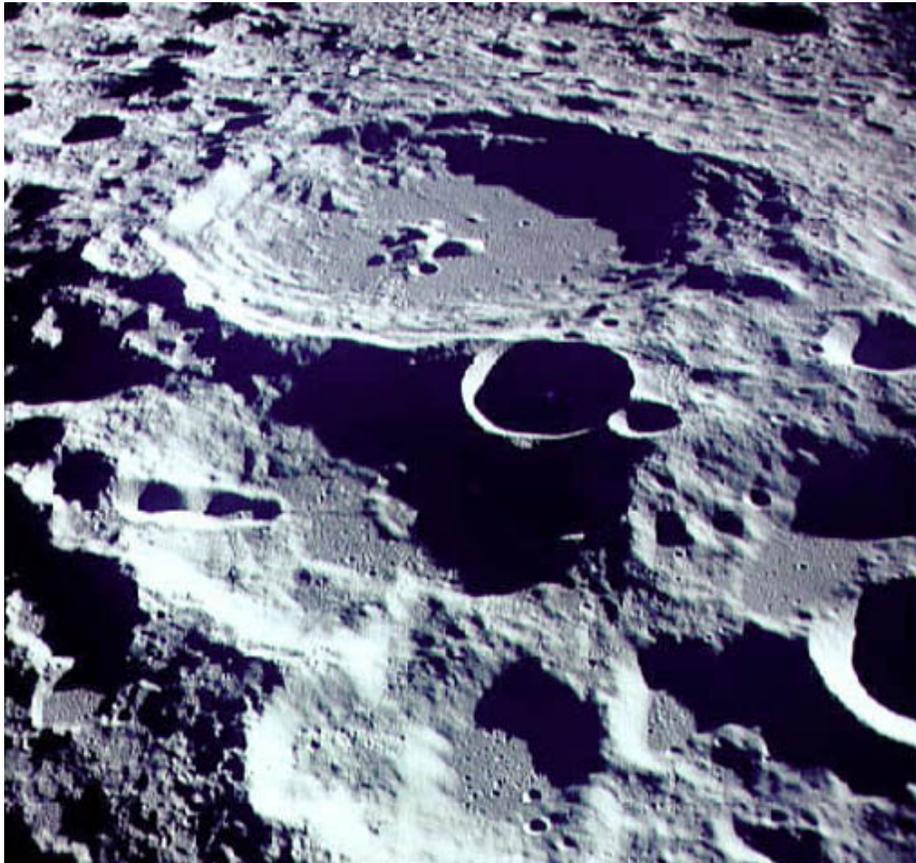
Atmosphère primitive

Activité magmatique => libération
CH₄, CO₂, H₂O et NH₃.



Croûte terrestre

Refroidissement des roches en fusion de la surface

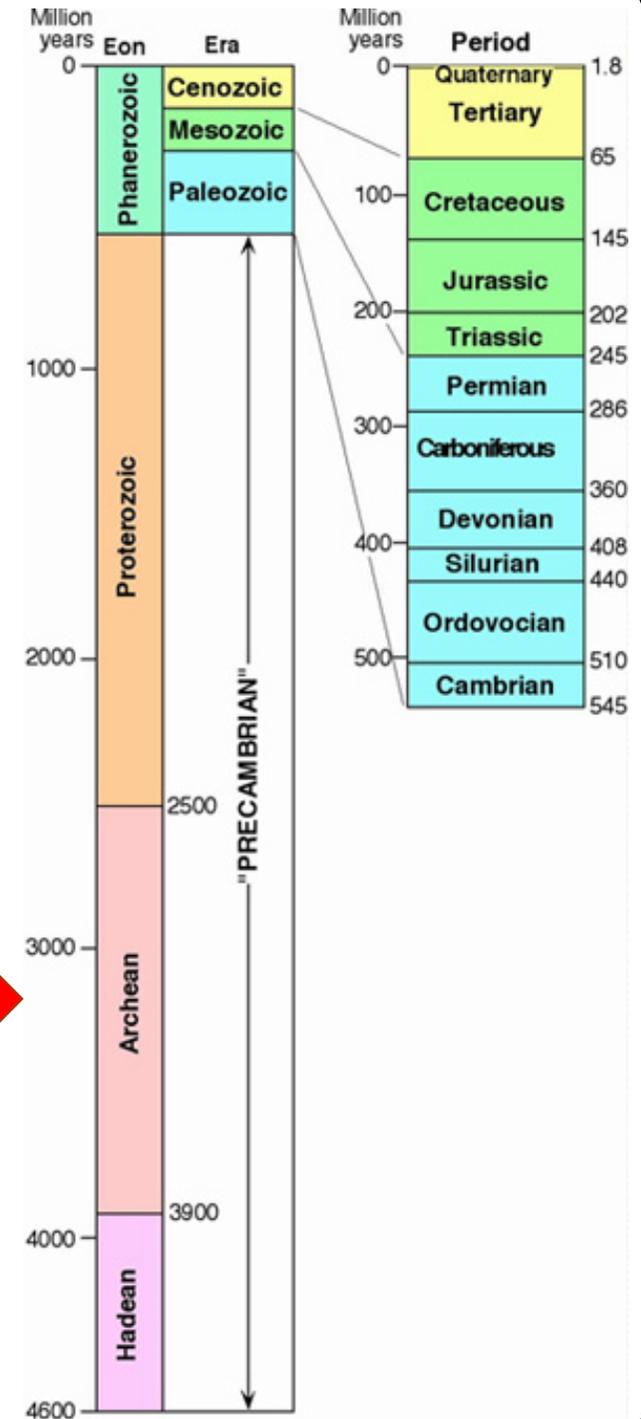


Archaen (-3.9 à -2.5 Ga)

Premier océan

Proto atmosphère => effet de serre

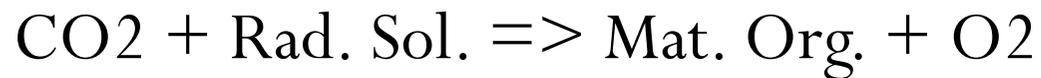
=> ↑ T°C (15 – 20°C) ; condensation H₂O



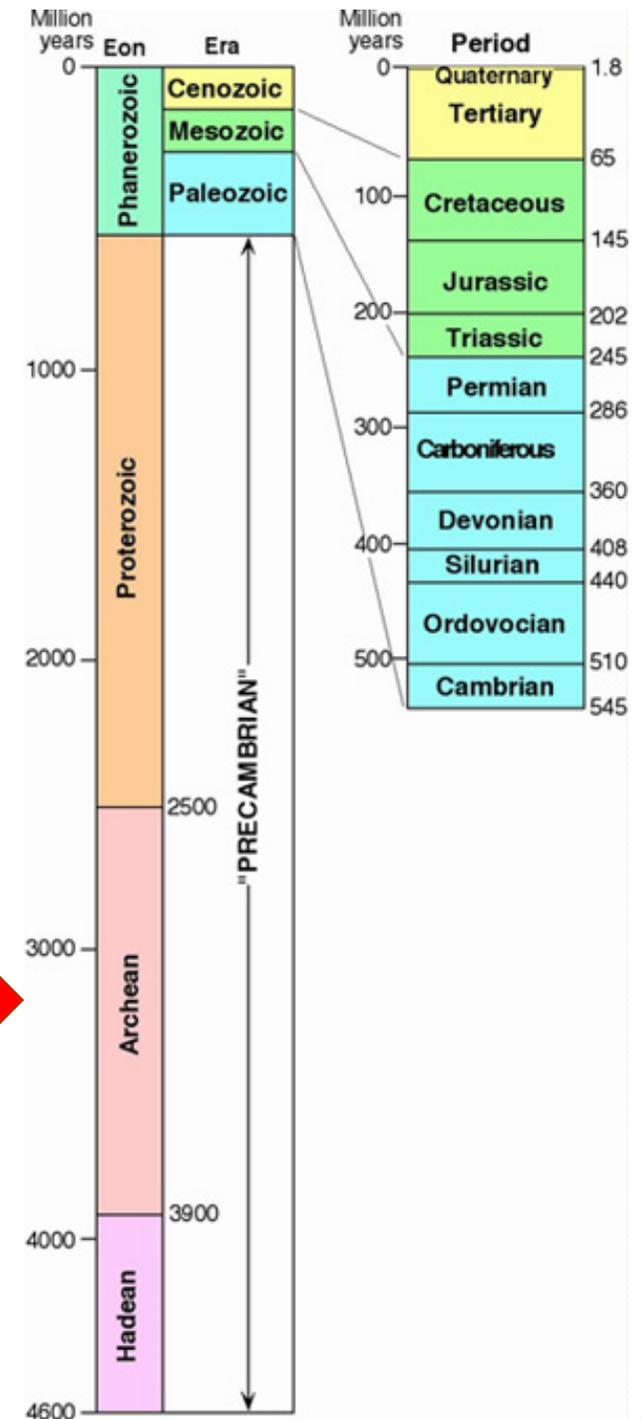
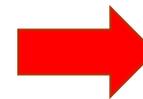
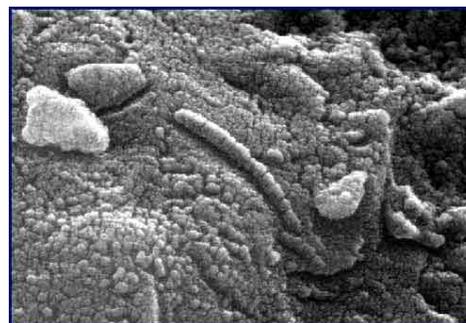
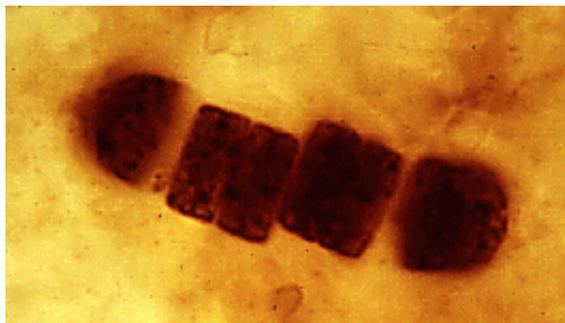
Évolution des Archae et des cyanobactéries



=> Protection contre les UV



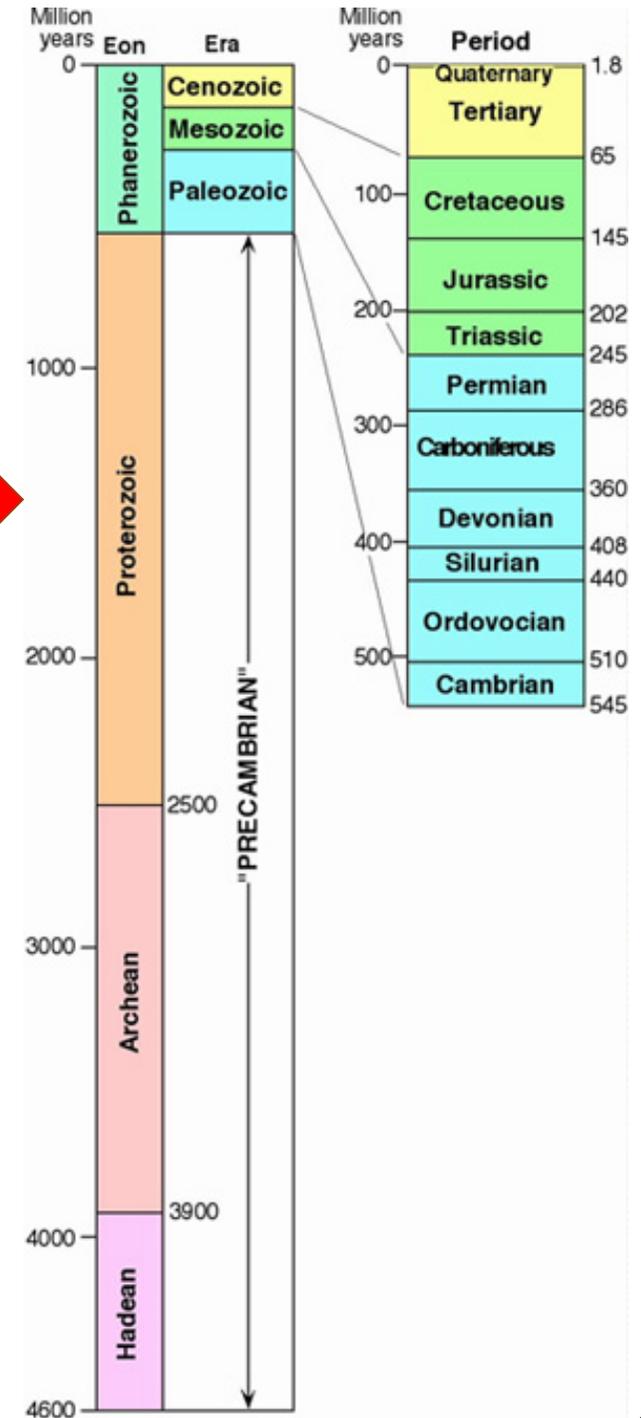
=> 1^{er} puits carbone



Protérozoïque (-2.5 Ga – -542 Ma)

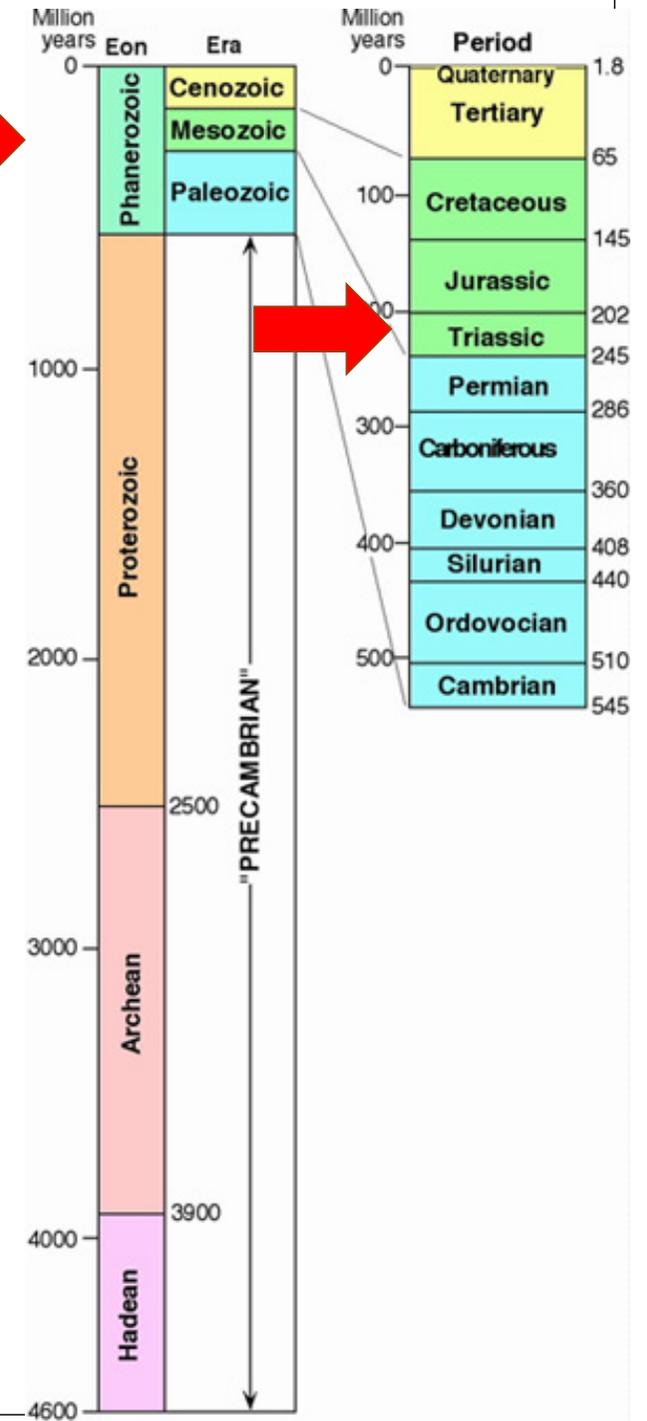
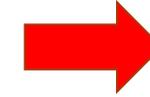
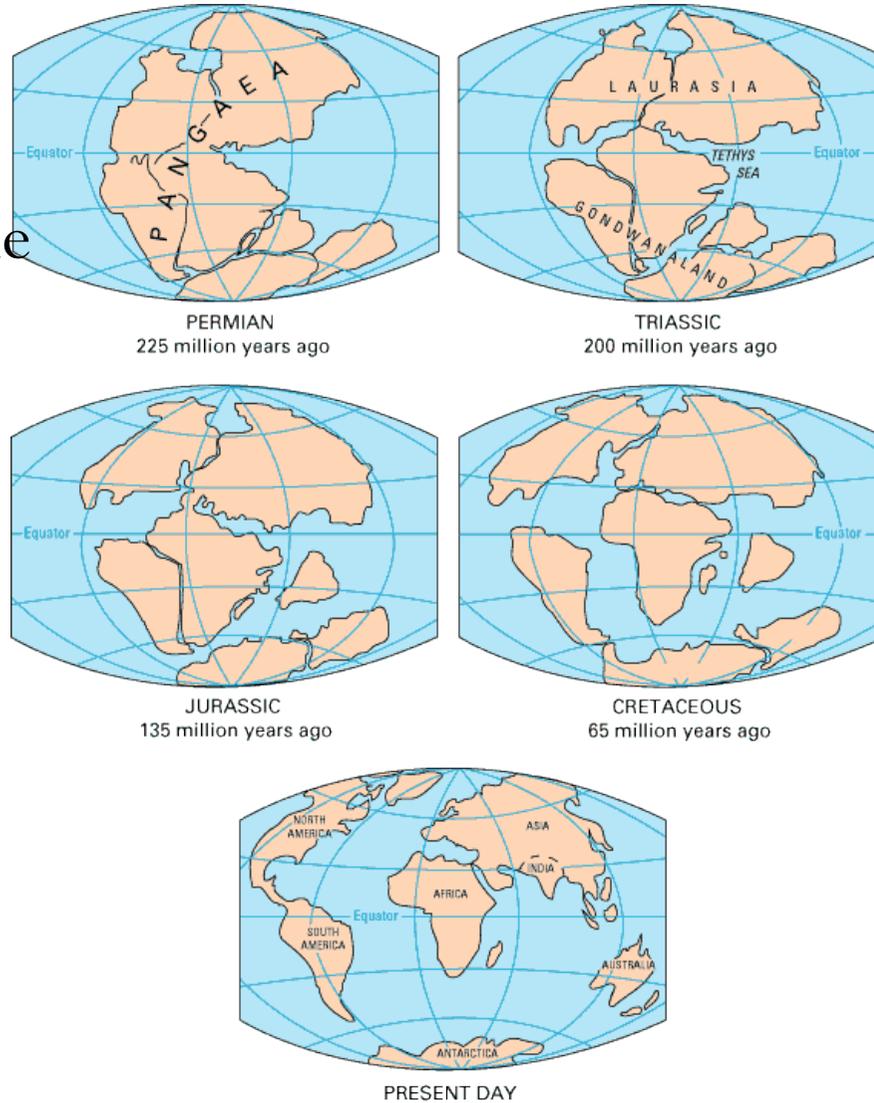
Grande Oxydation:

=> Disparition organismes anaérobiques.

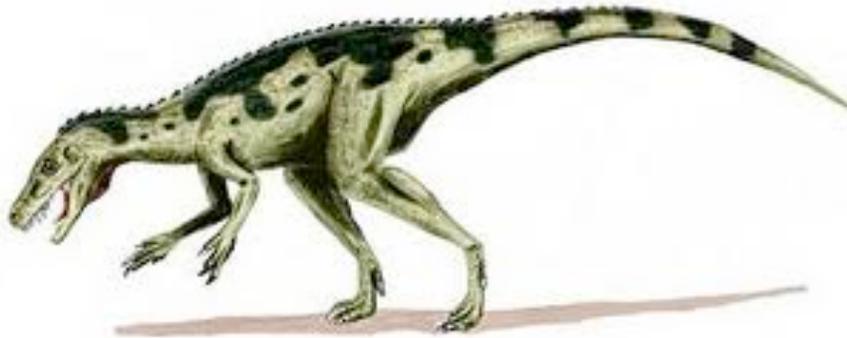


LE MÉSOZOÏQUE

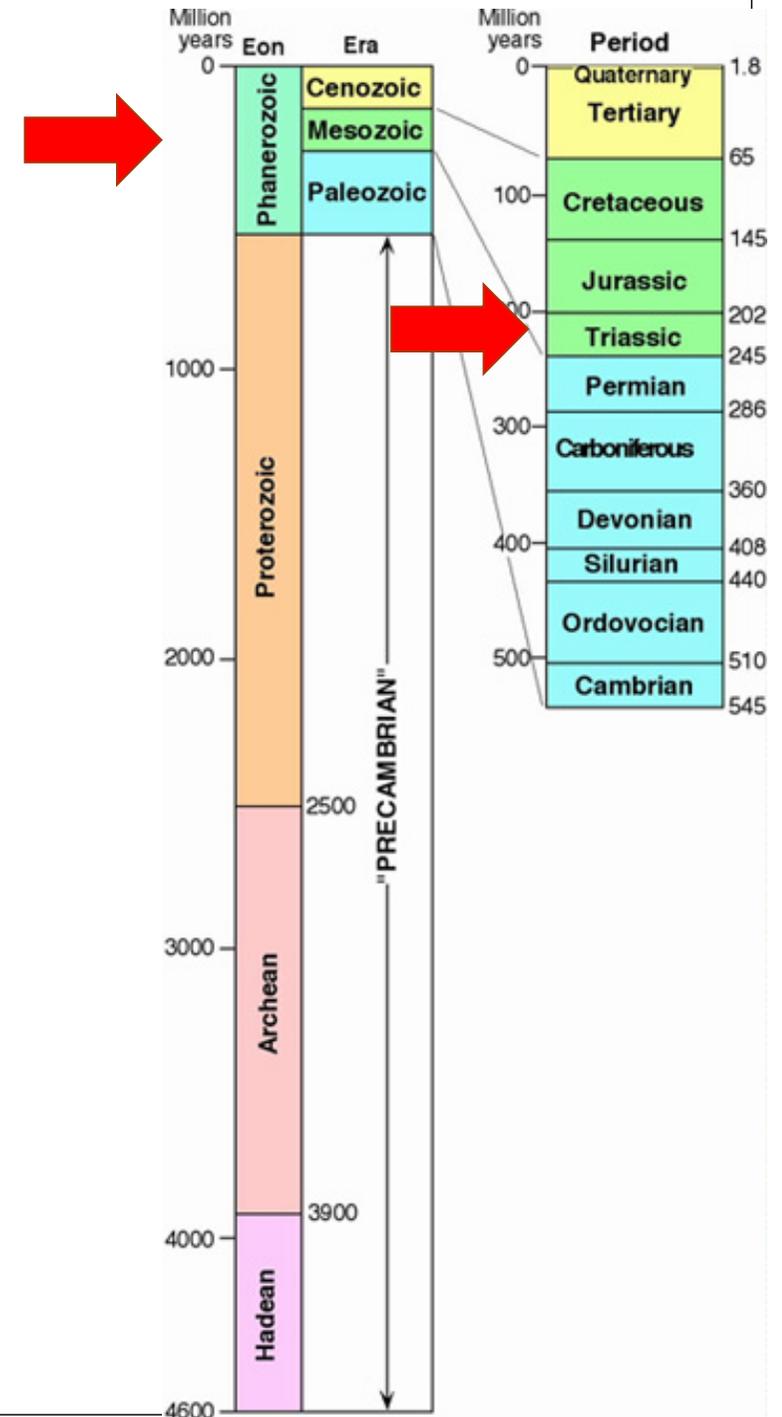
Division de la Pangée => diversification de la vie



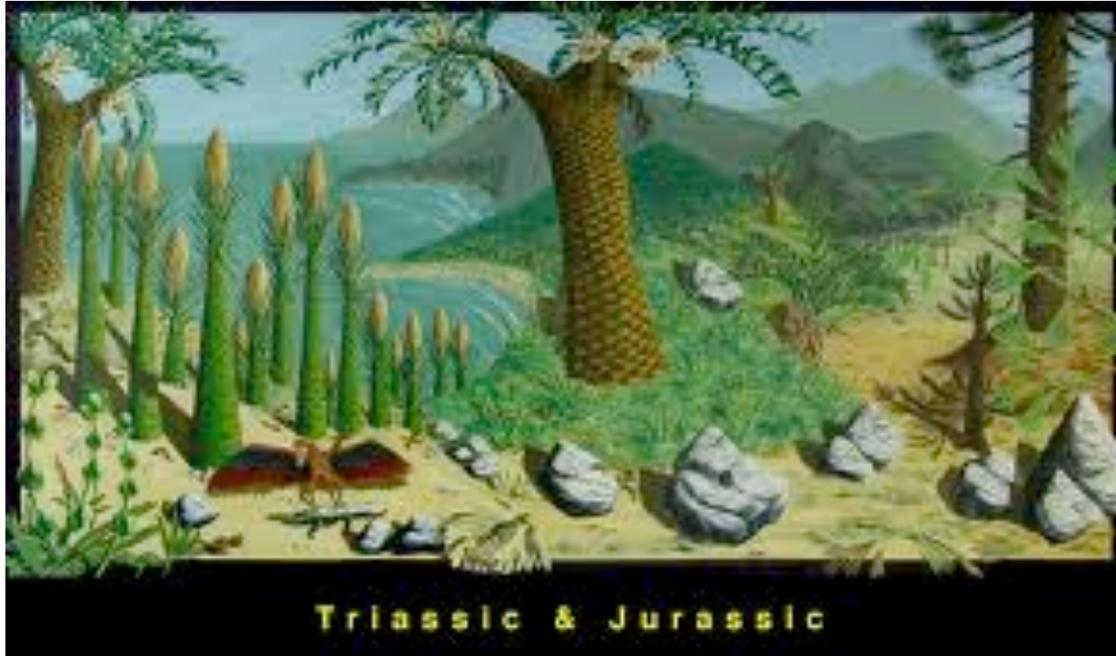
Trias et Jurassique



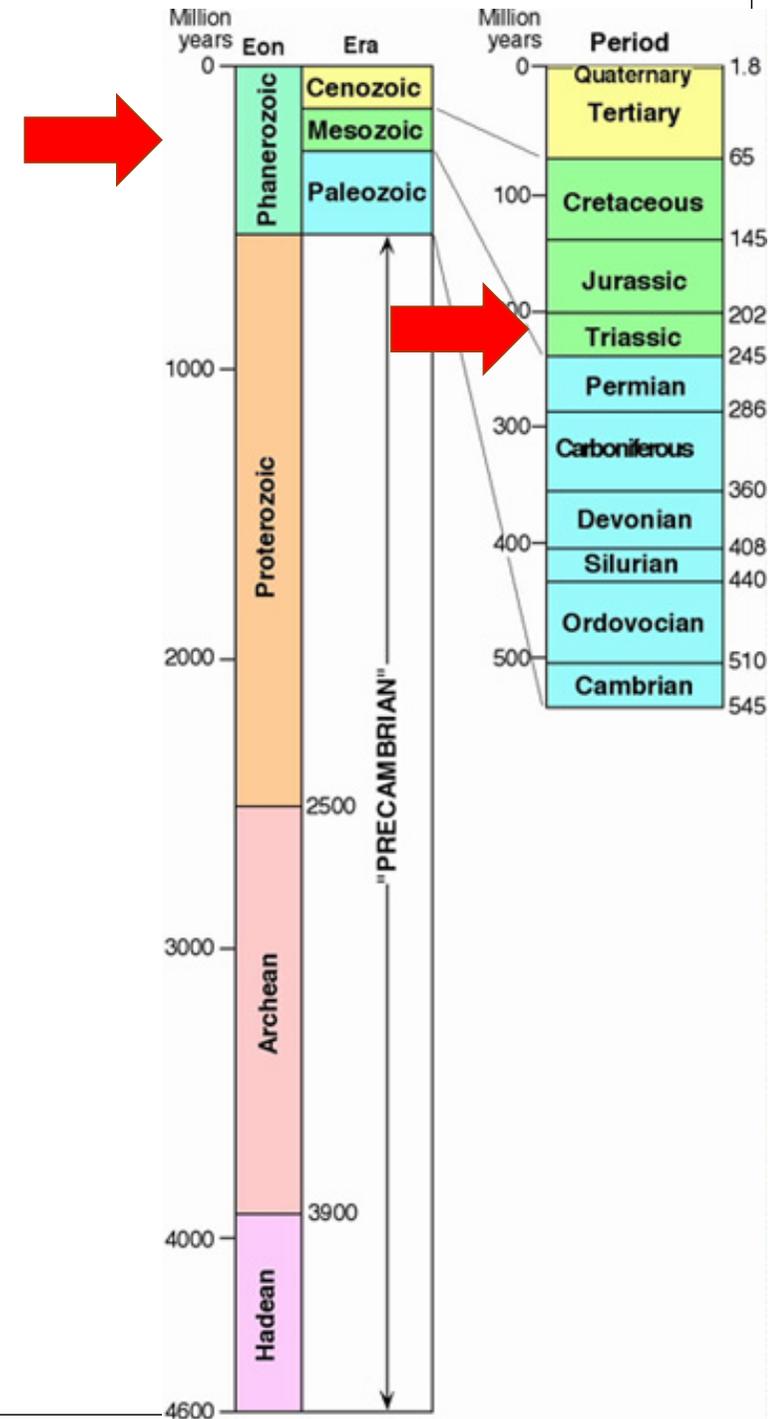
Dinosaures à sang froid et premiers mammifères



Trias et Jurassique



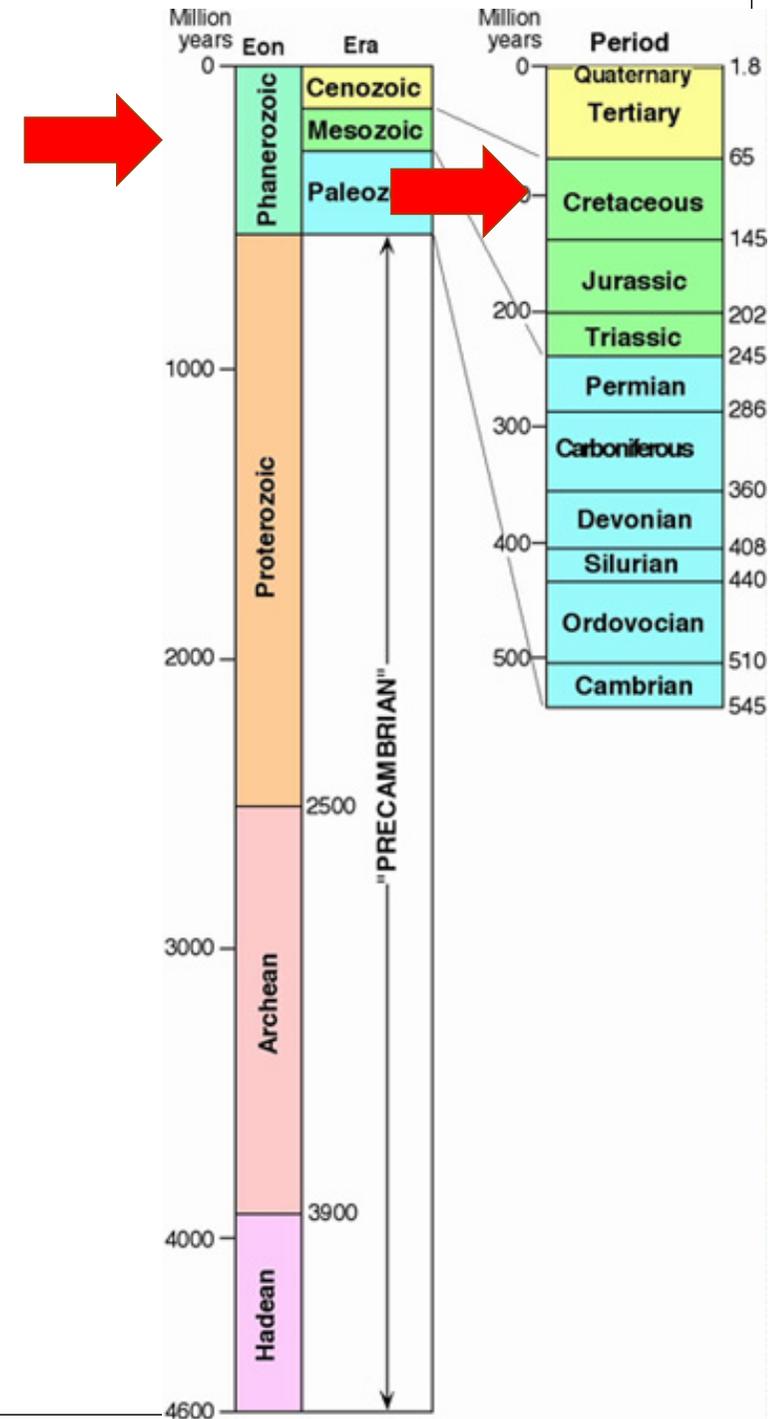
Végétation dominée par les gymnospermes



Cretace



Dinosaures à sang chaud



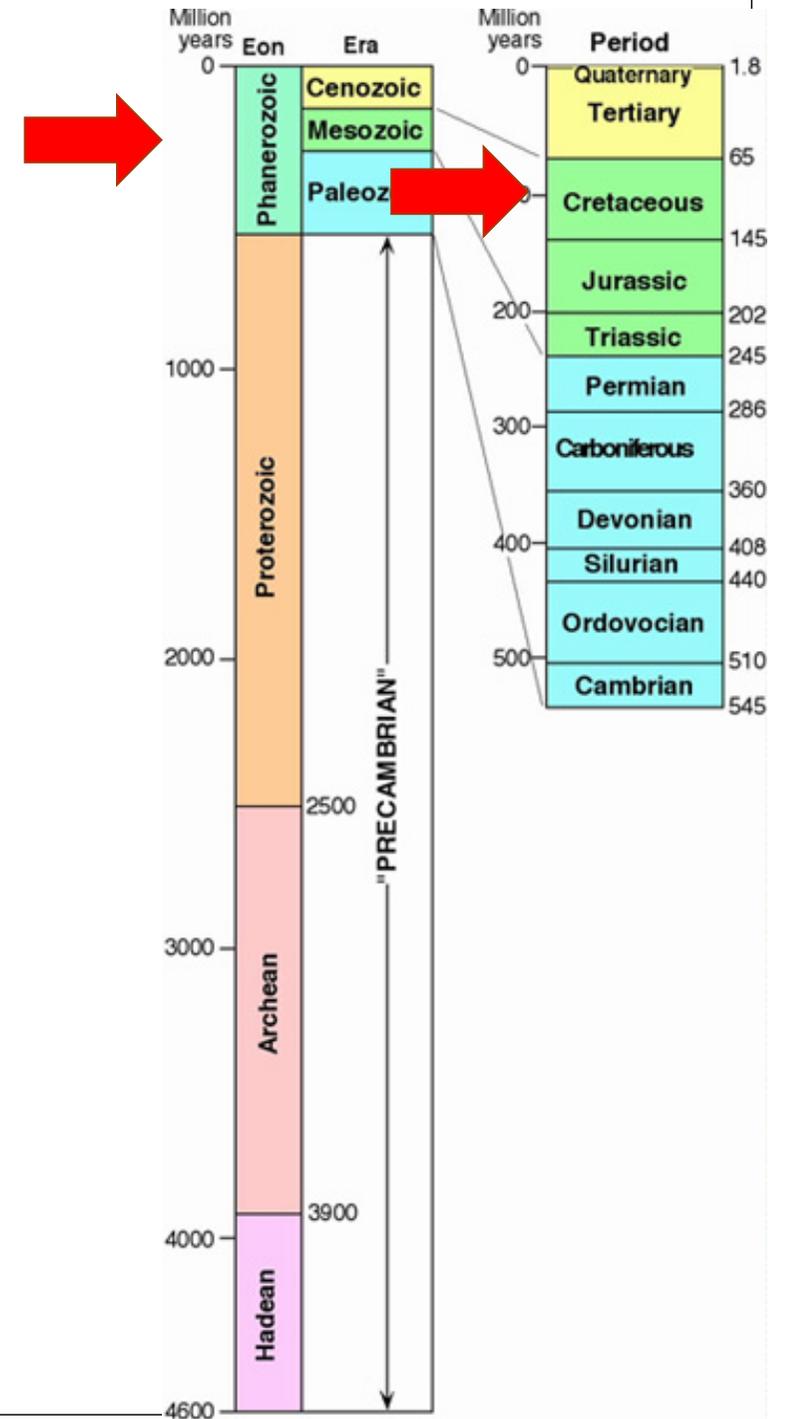
Cretace



Angiospermes

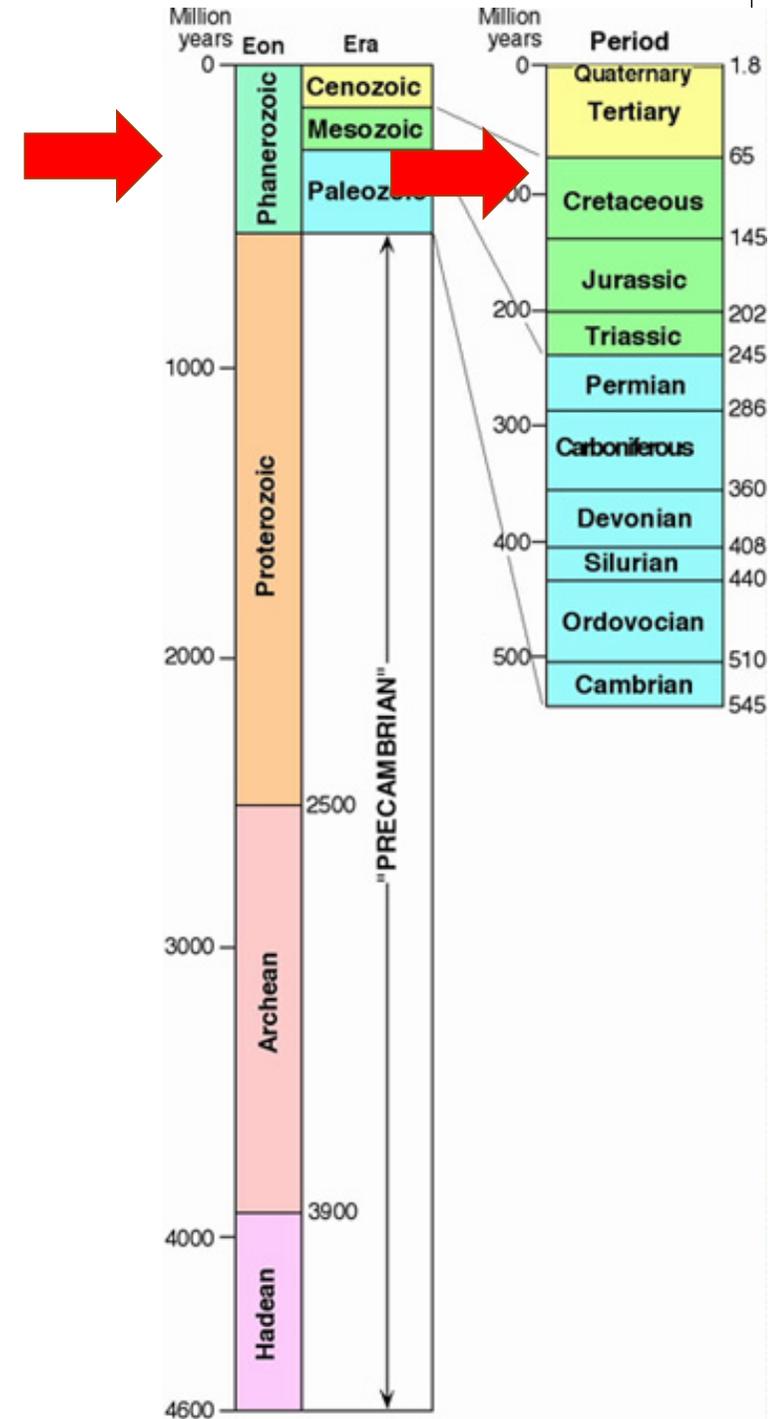
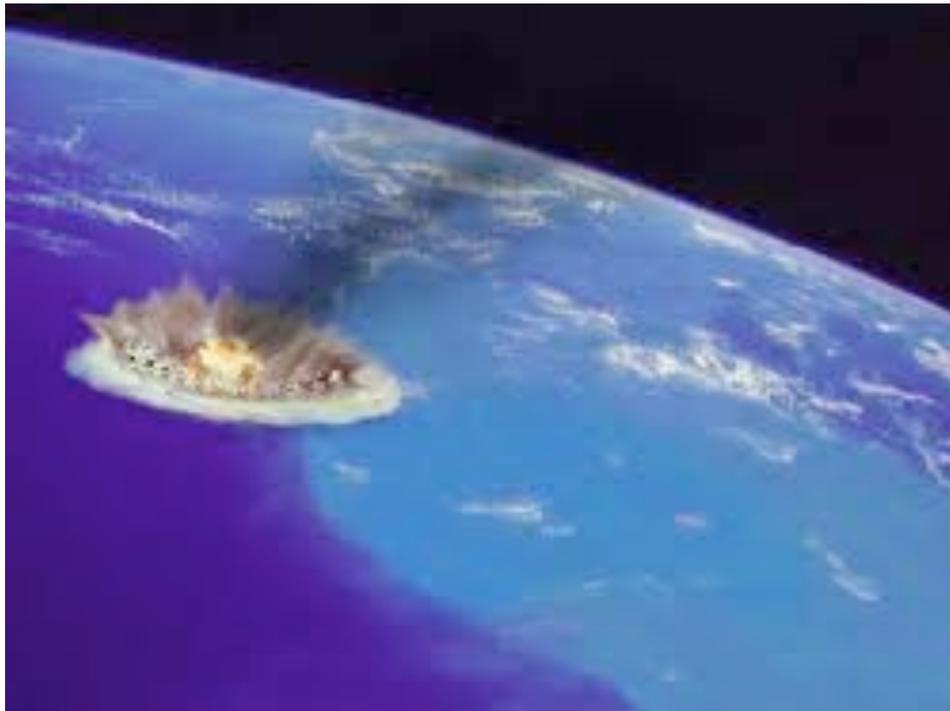


Insectes



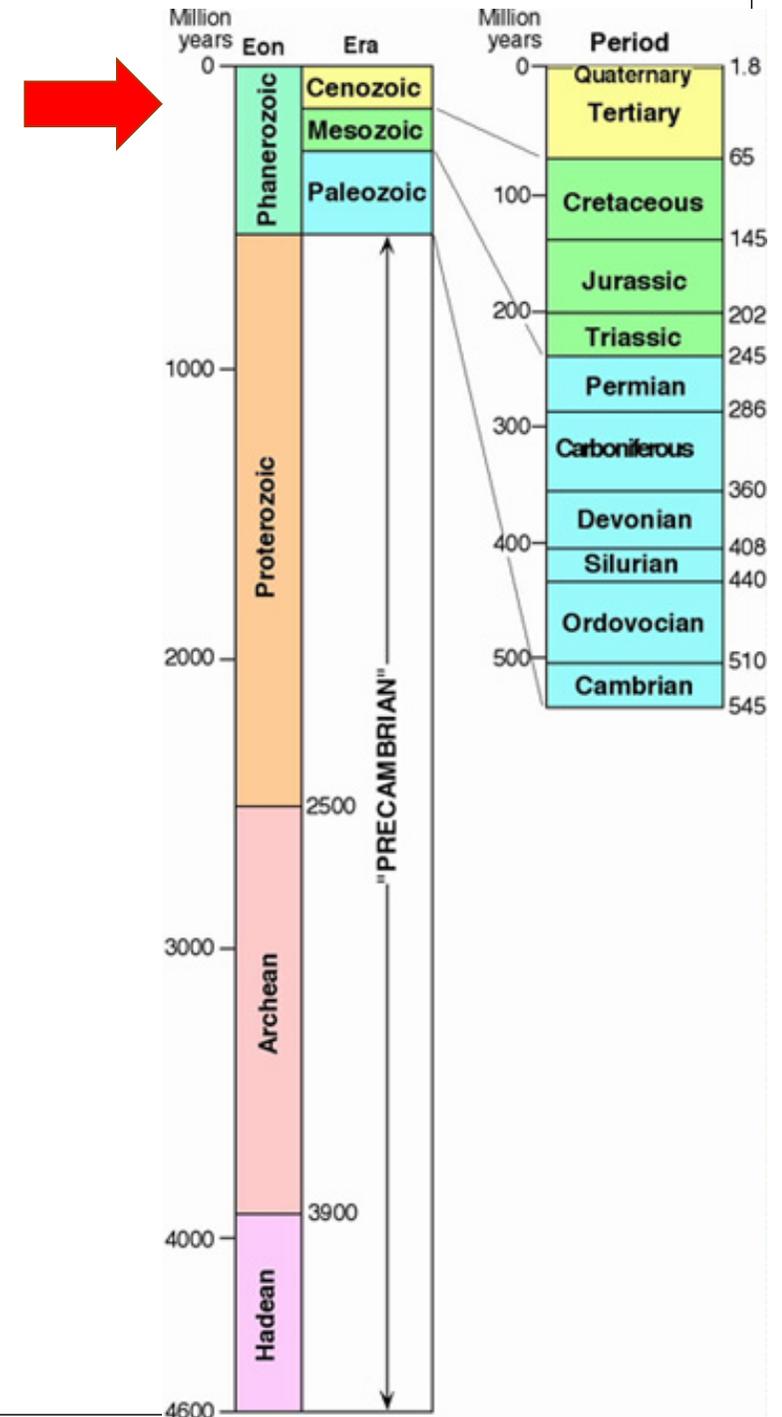
Frontiere K-I

Extinction des dinosaures:
Théorie de la Collision avec une astéroïde:
Luis Alvarez (Berkeley, 1980)

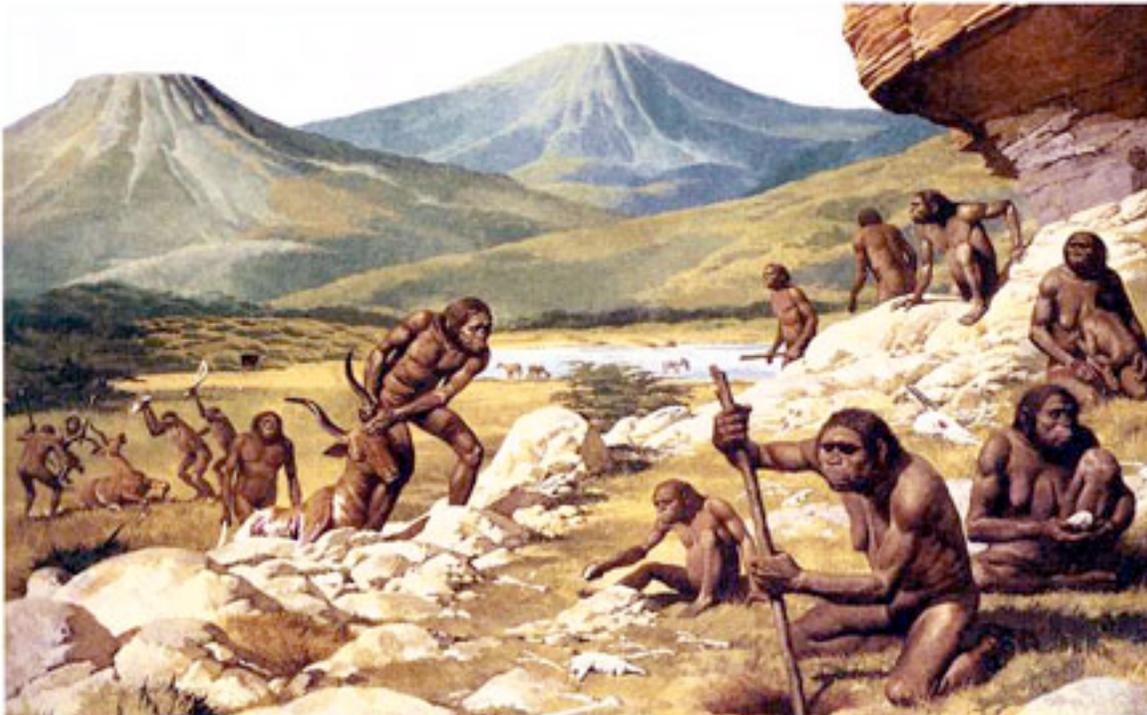


Cénozoïque (à partir de -65 Ma)

1. Faune: Radiation mammifères et oiseaux.
2. Flore: Angiospermes et émergence des herbes.
3. Tectonique: Convergence Afrique-Europe, Amérique du Sud - l'Amérique du Nord, Inde - Asie.



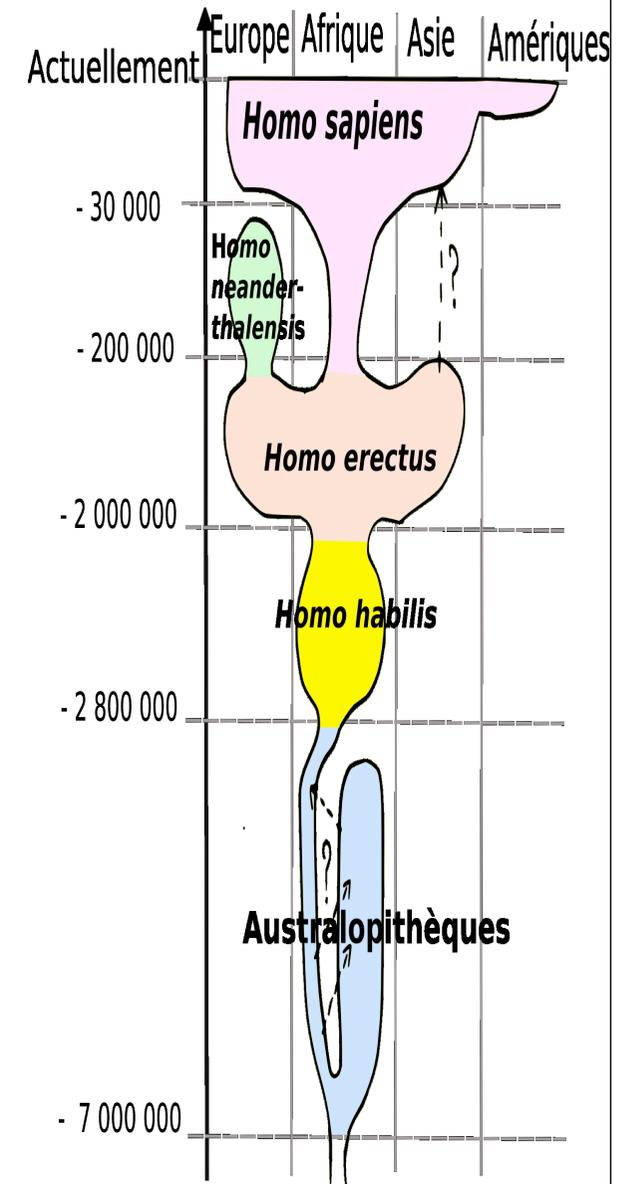
Pliocène (-5.3 _ -1.8Ma)



Préhumains - Australopithecus

Era	Period	Epoch	Time Scale		
CENOZOIC	QUATERNARY	HOLOCENE	Present		
		PLEISTOCENE (ICE AGE)	10,000 years ago		
	TERTIARY	NEOGENE	PLIOCENE	1.8 million years ago	
			MIOCENE	5.3 million years ago	
		PALEOGENE	OLIGOCENE	23.8 million years ago	
			EOCENE	33.7 million years ago	
			PALEOCENE	54.8 million years ago	
				65 million years ago	

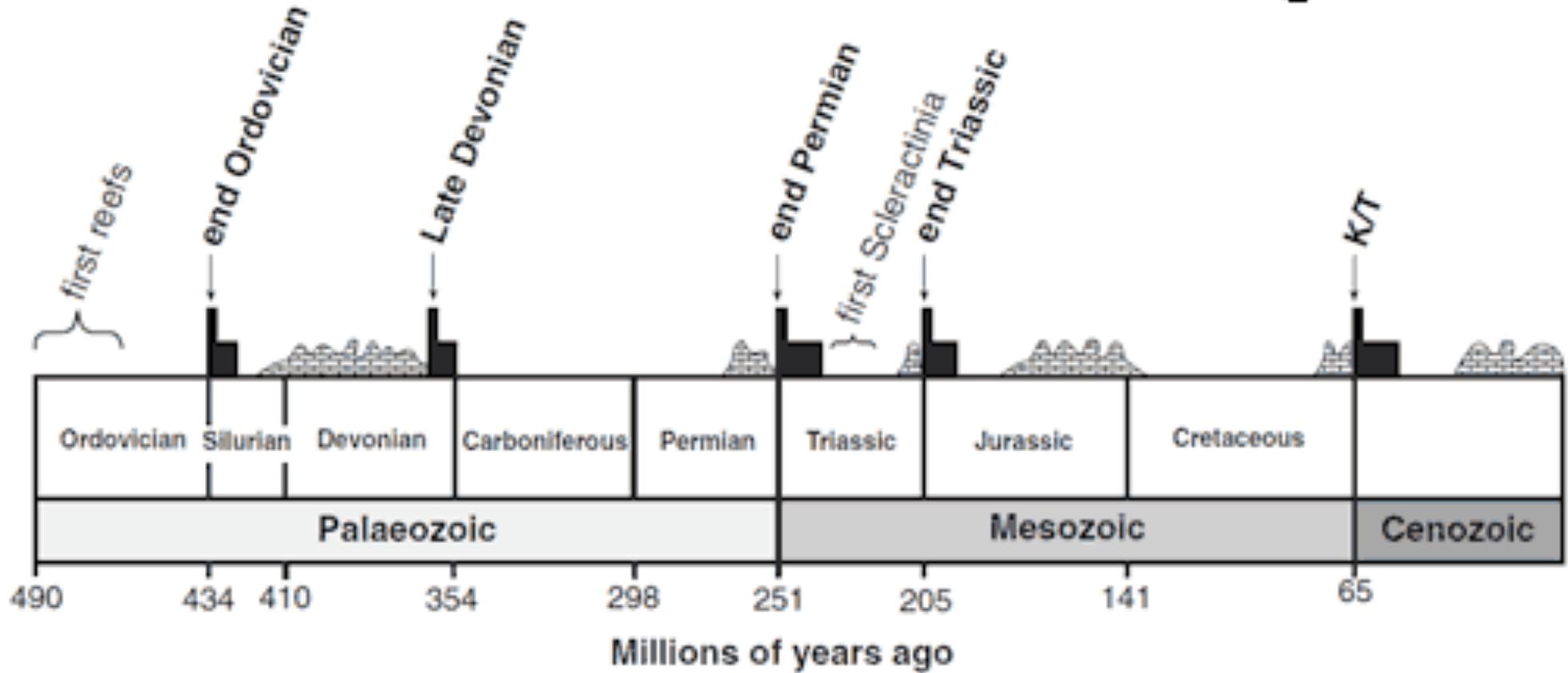
(-10 000 ans)



Anthropocène: La révolution industrielle



Mass Extinction Events and coral reef growth



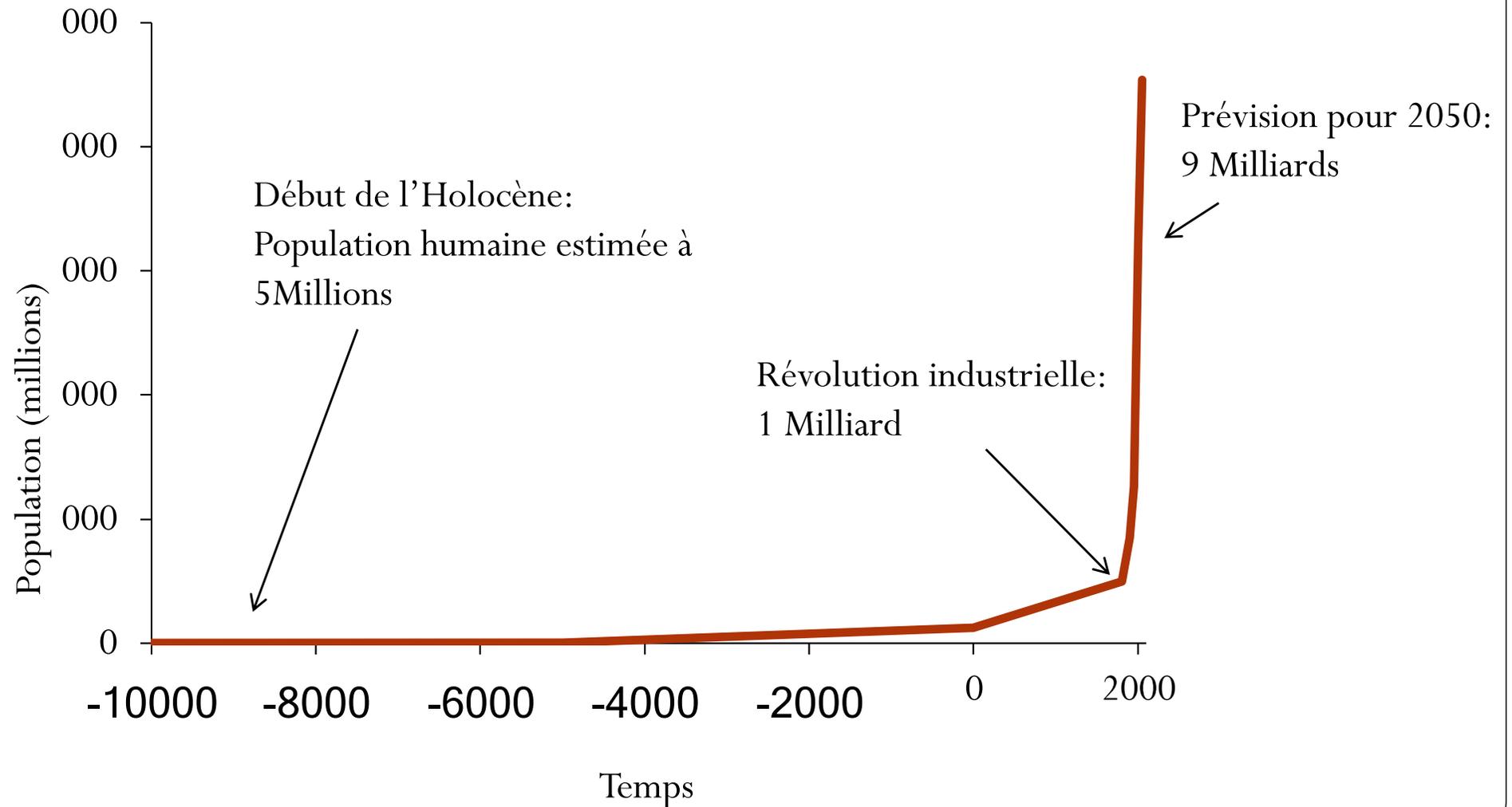
Cause des extinctions

Tectonique des plaques

Variations du niveau de la mer

Les activités anthropiques

Croissance de la population humaine



Effets cascades – Co-extinction

Les ingénieurs
des
écosystèmes
régulent
directement ou
indirectement
les ressources
de nombreuses
autres espèces



2050: 50% des espèces éteintes?

