

L'évolution des comportements



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —



Fondation
Jean-François et Marie-Laure
de Clermont-Tonnerre

A photograph capturing a dramatic moment in a savanna. A large, dark grey buffalo is running to the left, pursued by a pack of four lions. One lion is leaping towards the buffalo's back, while another is running alongside it. The scene is filled with dust kicked up by the animals' hooves, and the background shows a dry, hilly landscape under a clear sky. The text 'L'évolution des comportements : Evolution de l'altruisme ?' is overlaid on the right side of the image.

**L'évolution des comportements :
Evolution de l'altruisme ?**

L'évolution des comportements :
Evolution de l'altruisme ?





Abeilles qui mangent les œufs des autres ouvrières de la même colonie



Infanticides chez les lions

Monogamie



Polygamie



A peacock stands on a paved path, its tail feathers fanned out in a large, symmetrical display. The feathers are a mix of brown, green, and blue, with many 'eyes' visible. The peacock's body is a vibrant blue. In the background, there is a building with a white wall and a window with a blue and white lattice pattern. A green hedge runs along the path. The text 'Ornements handicapants' is overlaid in the center of the image.

Ornements handicapants

Comment expliquer un comportement?



Causes proximales

- L'air traverse le syrinx
- Hormones au printemps
- Apprentissage



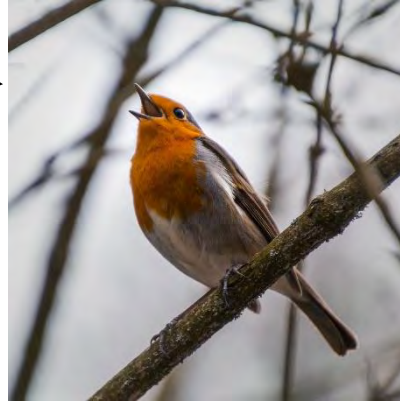
Causes évolutives

Effets passés de la sélection naturelle

Reproduction



Prédation



Compétition intraspécifique



Compétition interspécifique



Rien n'a de sens en
biologie si ce n'est à la
lumière de l'évolution

Theodosius Dobzhansky



A male lion with a large, dark brown mane stands on the left side of a large, dark, weathered log. He is looking towards the right. In the background, a lion cub is walking across the log, facing left. The background is a savanna landscape with tall, dry grasses and some trees in the distance. The lighting is natural, suggesting daytime.

Les comportements ont évolué “pour perpétuer l’espèce” ?

Infanticides pour réguler la population au niveau de ressources disponibles?

Les comportements ont évolué “pour perpétuer l'espèce” ?

Les parents nourrissent les jeunes pour perpétuer l'espèce?

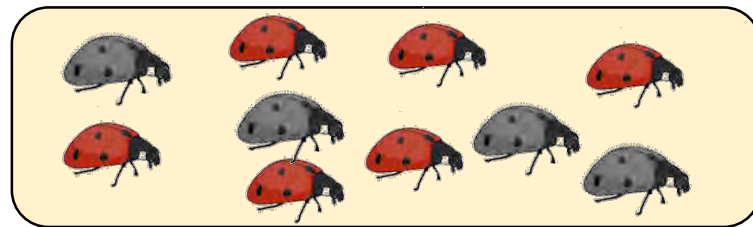


« Tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes »
répète Pangloss,
précepteur de Candide

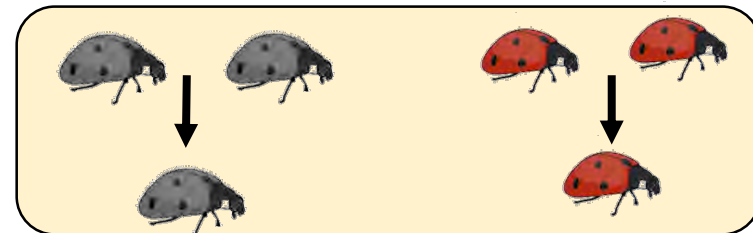


La sélection naturelle ne fonctionne pas "pour perpétuer l'espèce"

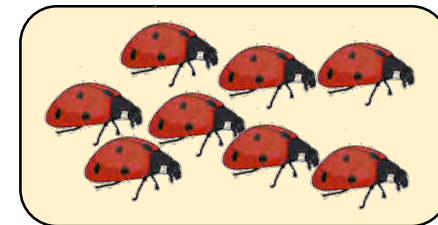
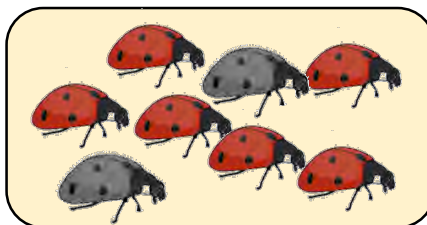
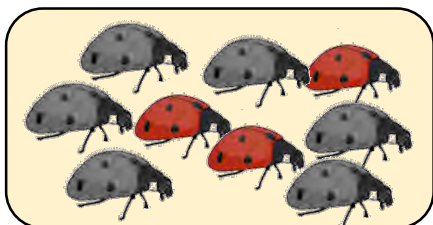
Variation



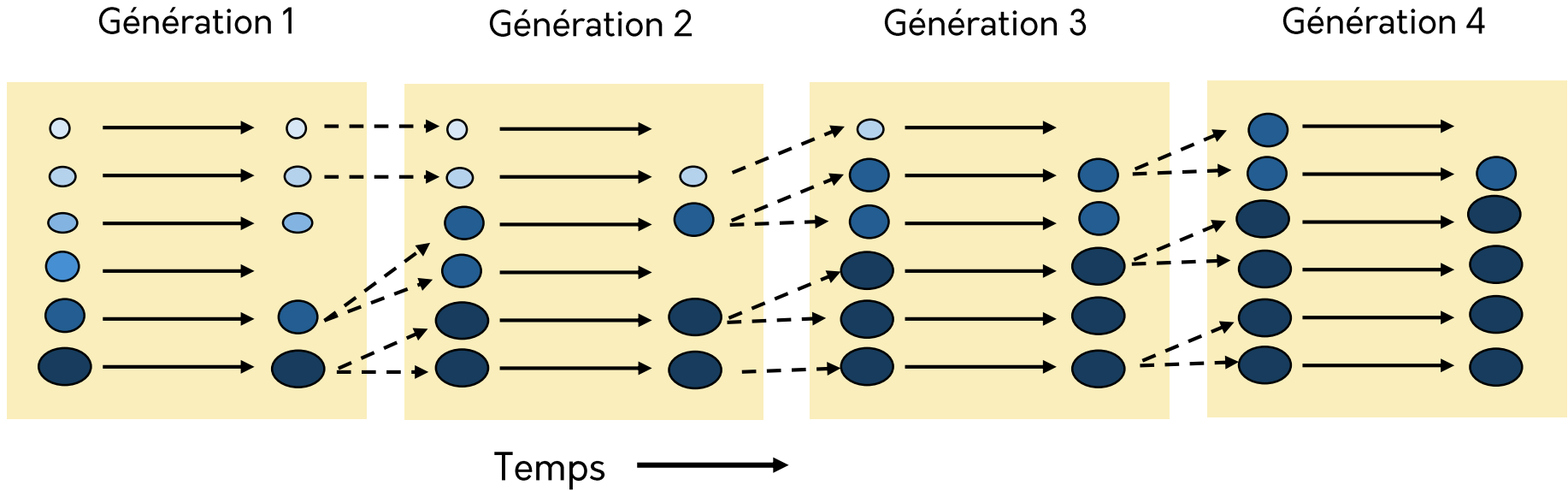
Héritabilité



Différences de survie ou succès reproducteur



La sélection naturelle ne fonctionne pas “pour perpétuer l’espèce”



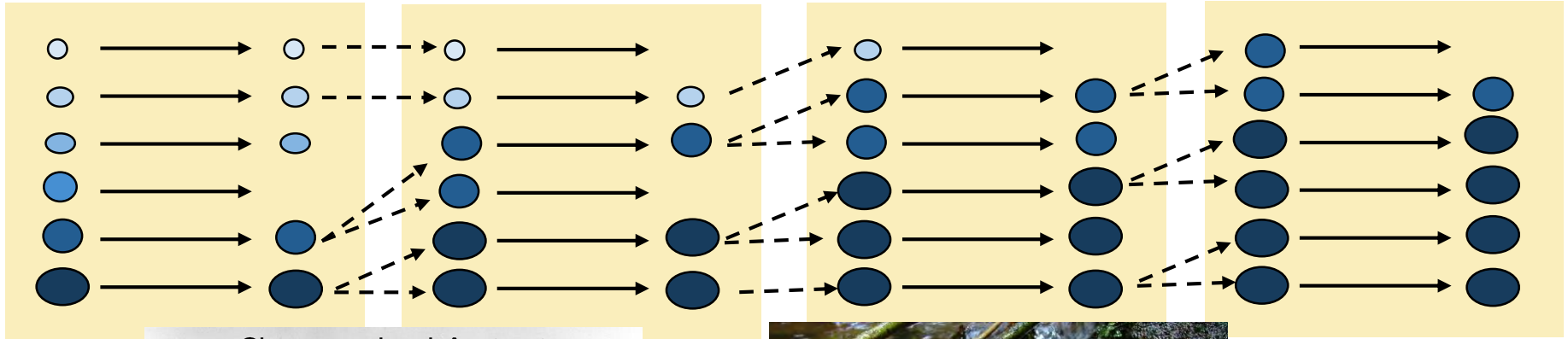
La sélection naturelle ne fonctionne pas “pour perpétuer l'espèce”

Génération 1

Génération 2

Génération 3

Génération 4



Chancre du châtaignier



Chytridiomycose



Toutes les femelles sont fécondables en même temps dans la troupe,
mais pas entre troupes



Cause proximale : phéromones

Toutes les femelles sont fécondables en même temps dans la troupe,
mais pas entre troupes



Causes évolutives: meilleure survie des jeunes par l'allaitement en commun



Quand un nouveau lion conquiert
une troupe, il tue tous les lionceaux

Cause proximale : odeur
inconnue des lionceaux



Quand un nouveau lion conquiert
une troupe, il tue tous les lionceaux

Cause évolutive:
lionnes fécondables au bout de
9 mois au lieu de 25 mois

Soins aux jeunes

Cause proximale :
attachement parental



Soins aux jeunes




Cause évolutive:
meilleure survie des jeunes



Soins aux jeunes par les mères seules

Cause proximale:
Mamelles et
instinct maternel





Soins aux
jeunes par
les mères
seules

Cause évolutive:
anisogamie



Nourrissage des jeunes par les deux parents

Cause proximale:
instincts maternel
et paternel



Nourrissage des jeunes par les deux parents

Cause évolutive:
probabilité de survie d'un
jeune élevé par un parent
seul trop faible

Monogamie

Cause évolutive:
probabilité de survie
d'un jeune élevé par un
parent seul trop faible





Polygamie

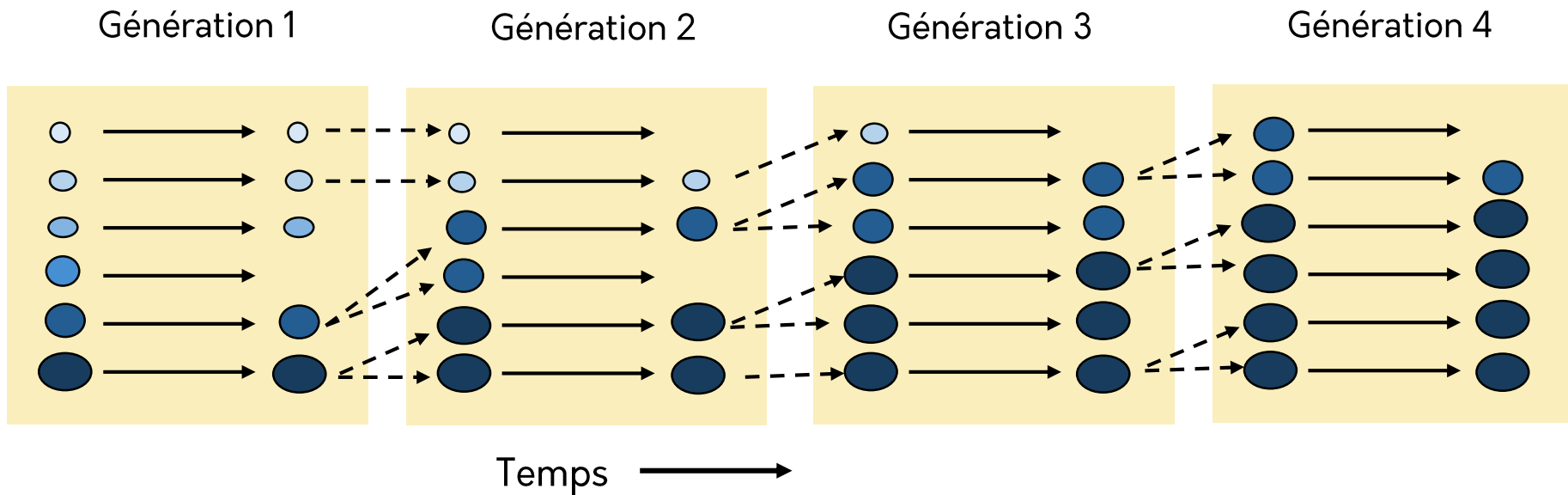
Haute probabilité de survie d'un jeune élevé par un parent seul



Polygamie

Compétition entre mâles
pour l'accès aux femelles

Sélection



Forte compétition entre mâles dans
les espèces non monogames



Forte compétition entre mâles dans
les espèces non monogames



Forte compétition entre mâles dans
les espèces non monogames



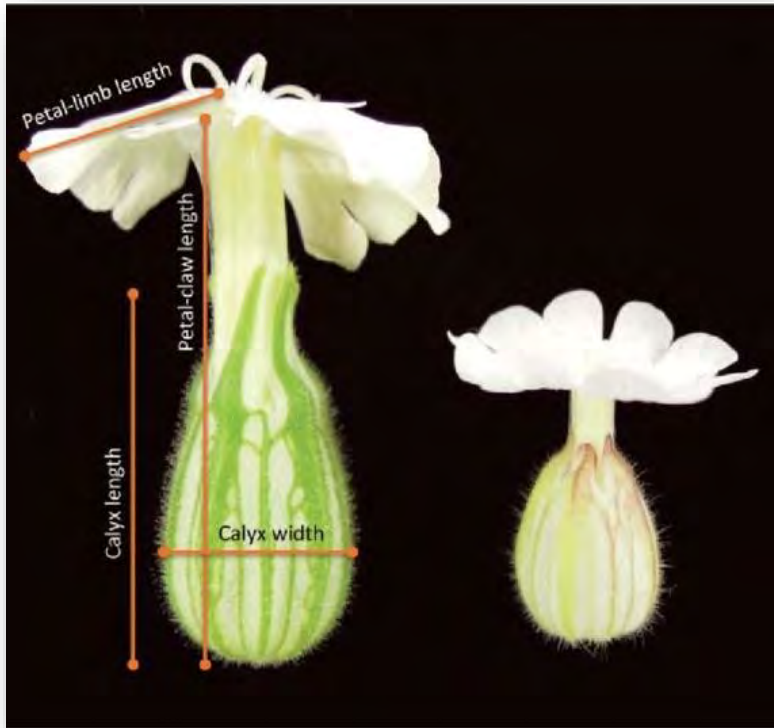
Forte compétition entre
mâles dans les espèces
non monogames



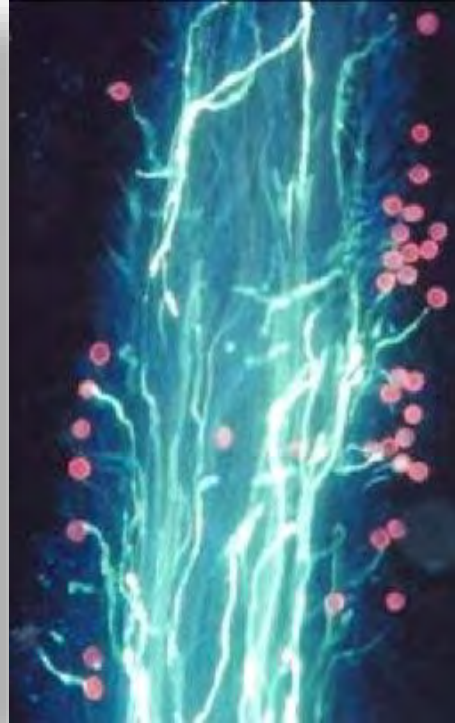


Forte compétition entre mâles dans les espèces non monogames

Compétition entre mâles



Brothers et al 2016 Evolutionary Ecology Research

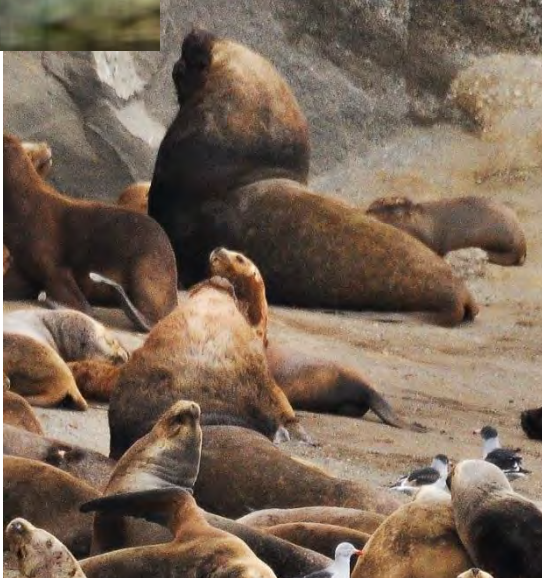
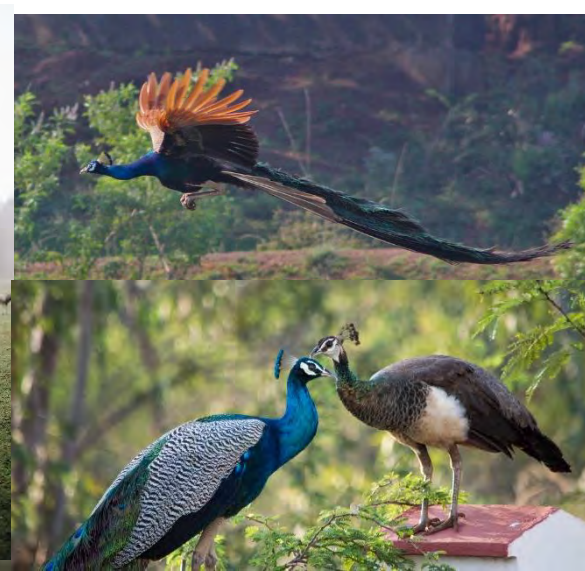


Mandal et al 2010
<https://doi.org/10.2478/s11756-009-0212-6>



Ömer İltaş and Clement Lafon Placette

Forte variance du succès reproducteur chez les mâles: sélection sexuelle (choix par les femelles)



Steve

Didier Descouens

Francis C. Franklin

Sélection sexuelle

Compétition entre individus pour l'accès aux partenaires sexuels
Choix par les femelles



Charles Darwin

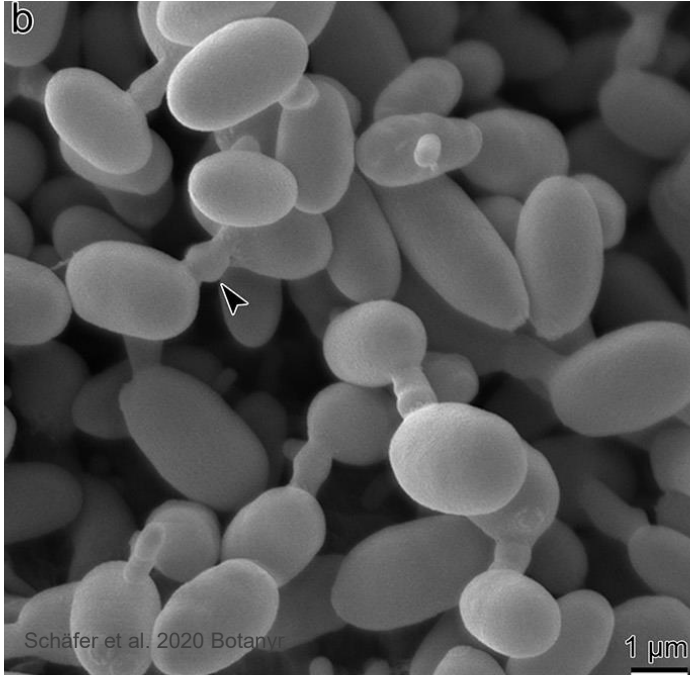


Ronald Fisher
(génétique des populations)

Sélection sexuelle

- Compétition entre mâles: choix par les femelles
- Pourquoi ce sont les femelles qui choisissent?
- Pourquoi les femelles préfèrent-elles les mâles avec des ornements extrêmes?

Différences de tailles de gamètes Asymétrie



Isogamie



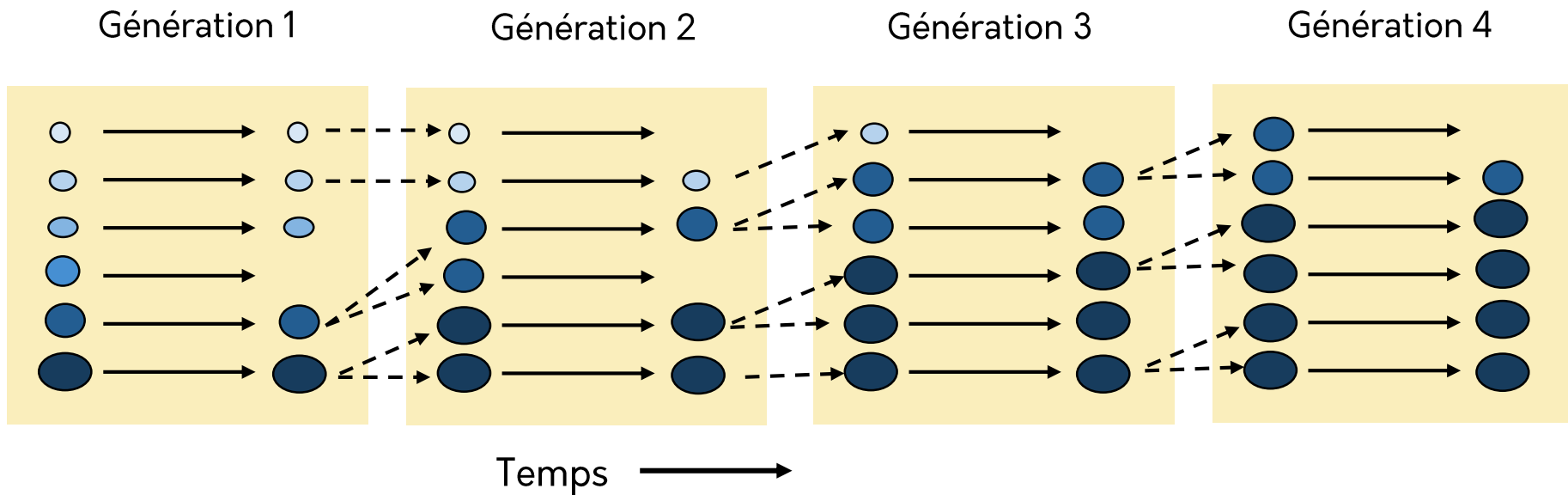
Anisogamie

Sélection sexuelle



Quels critères de choix pour les femelles?

Sélection



Sélection sexuelle

- Pourquoi choisir? Comment maximiser son nombre de descendants?
- Avantages directs: soins parentaux et ressources



Sélection sexuelle

Offrande nuptiale



Sélection sexuelle

- Pourquoi choisir? Comment maximiser son nombre de descendants?
- Evitement des parasites : directement pour la femelle ou système immunitaire des descendants



Sélection sexuelle

Pourquoi les femelles préfèrent-elles les mâles avec des ornements extrêmes?



Sélection sexuelle

Pourquoi les femelles préfèrent-elles les mâles avec des ornements extrêmes?

➔ Signaux honnêtes de qualité



Sélection sexuelle

Signaux honnêtes de
bonne qualité génétique



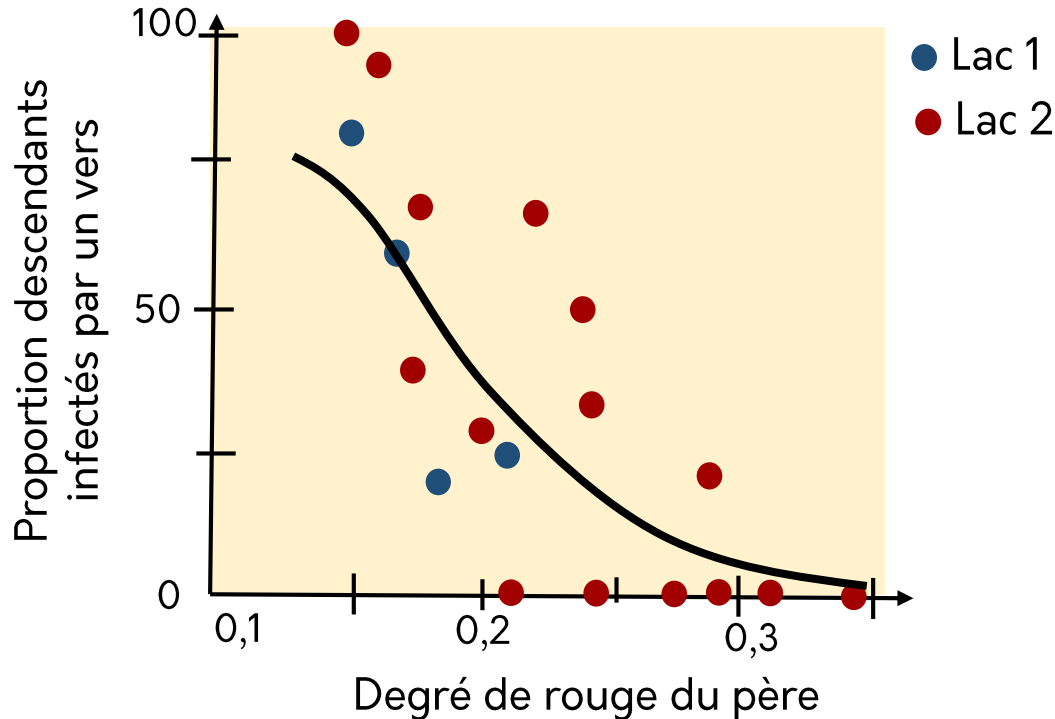
Caroténoïdes: système immunitaire



La gravité du chant chez le
crapaud dépend de sa taille

Sélection sexuelle

Signaux honnêtes de bonne qualité génétique



Sélection sexuelle

Oiseaux jardiniers australiens



Sélection sexuelle

Pourquoi les femelles préfèrent-elles les mâles avec des ornements extrêmes?

➔ Armements puis ornements



Sélection sexuelle

Pourquoi les femelles préfèrent-elles les mâles avec des ornements extrêmes?

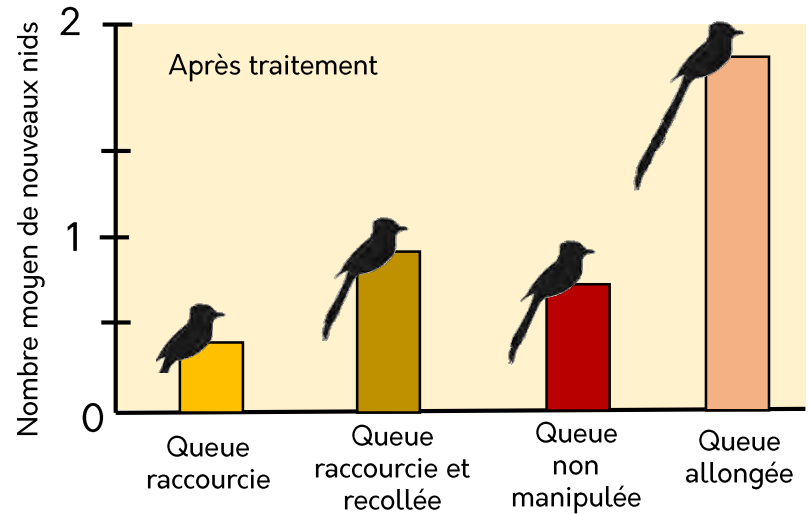
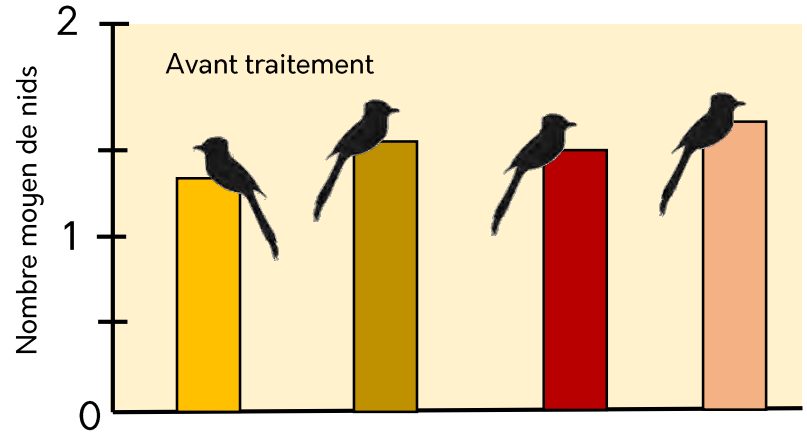
→ processus d'emballlement



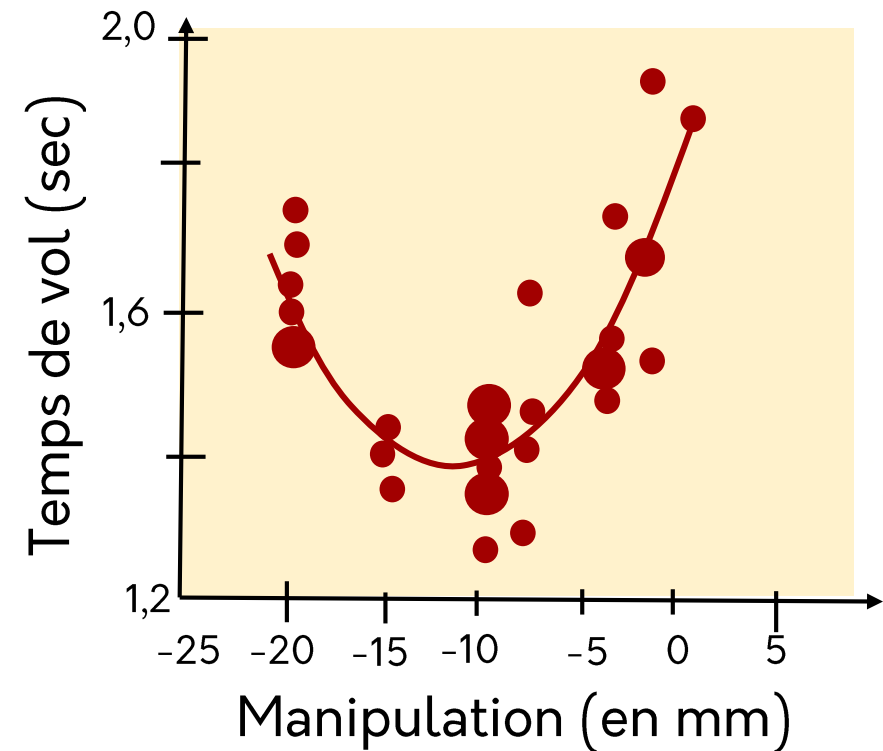
Ronald Fisher



Sélection sexuelle: emballement



Sélection sexuelle: emballement



Sélection sexuelle

Lek



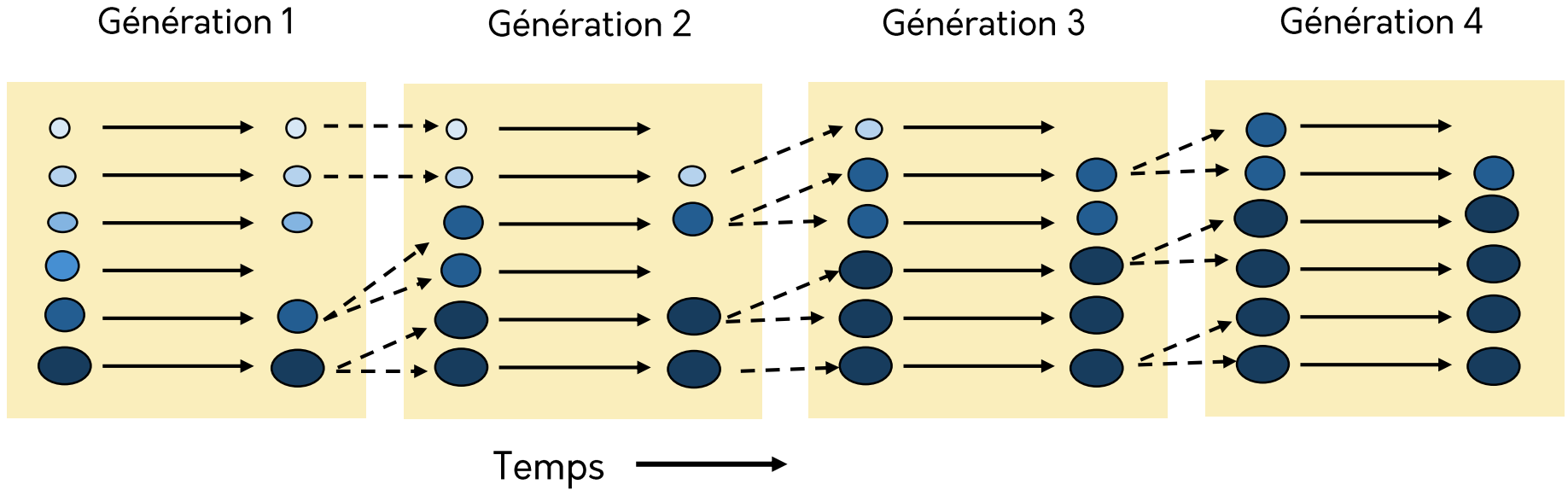
Paradoxe des bons gènes

Ils devraient être rapidement fixés par sélection,
alors pourquoi continuer à choisir?



Paradoxe des bons gènes

Ils devraient être rapidement fixés par sélection,
alors pourquoi continuer à choisir?



Paradoxe des bons gènes

Coévolution avec les parasites:
les meilleurs allèles ne sont pas les mêmes d'une
génération à l'autre car les parasites évoluent



Alex Wild

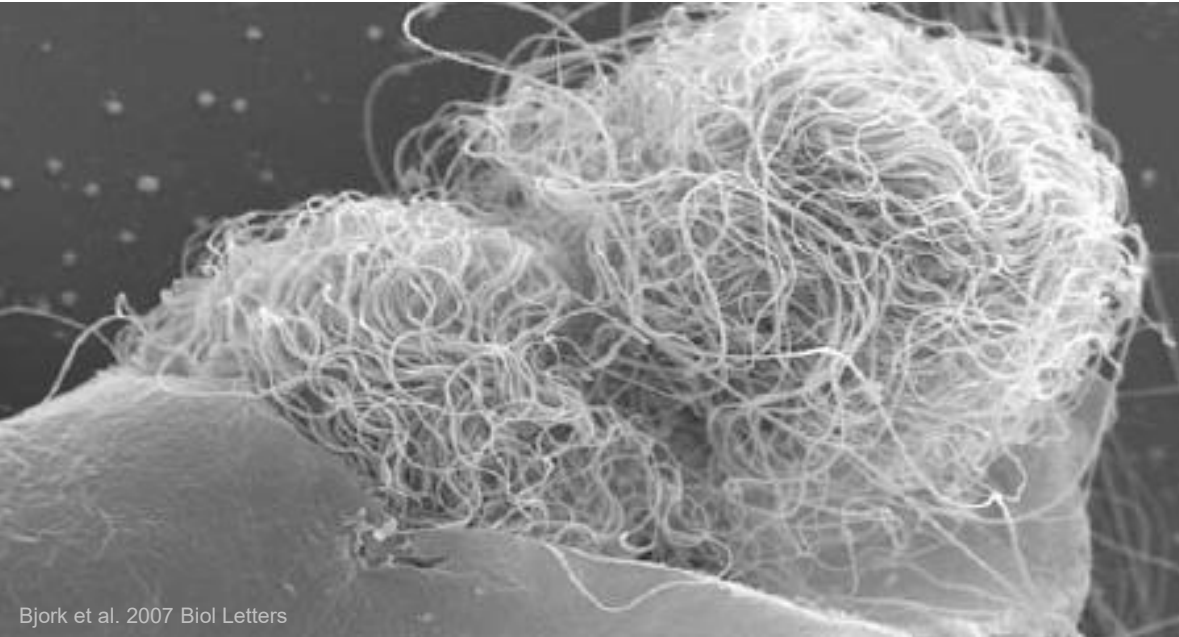


Sélection sexuelle

Quand les mâles incubent les œufs, ce sont eux qui choisissent et les femelles qui sont plus grosses et colorées



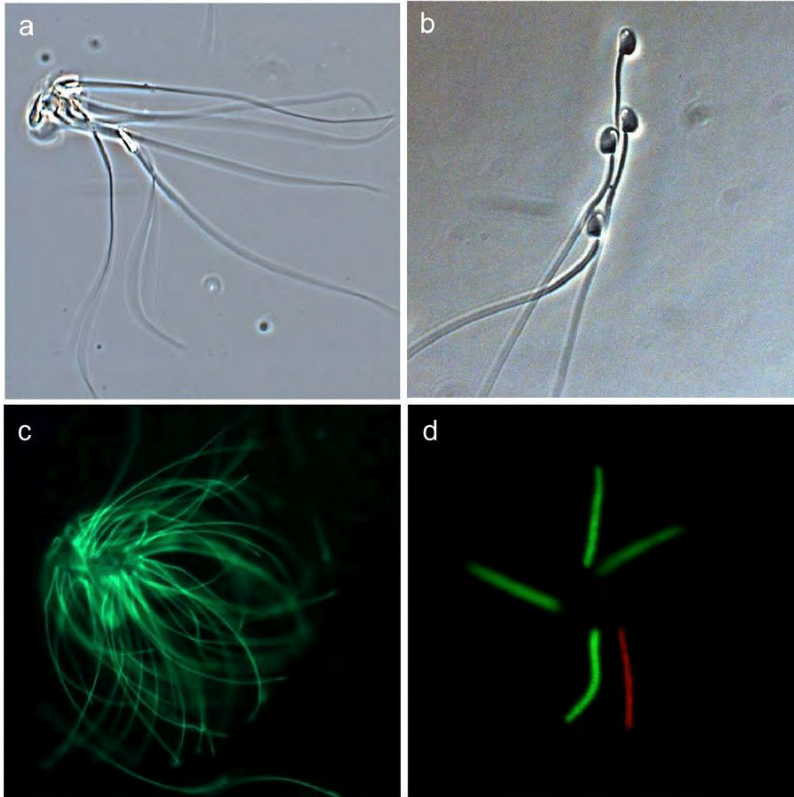
Compétition spermatique



Spermatozoïde géant chez une espèce de drosophile

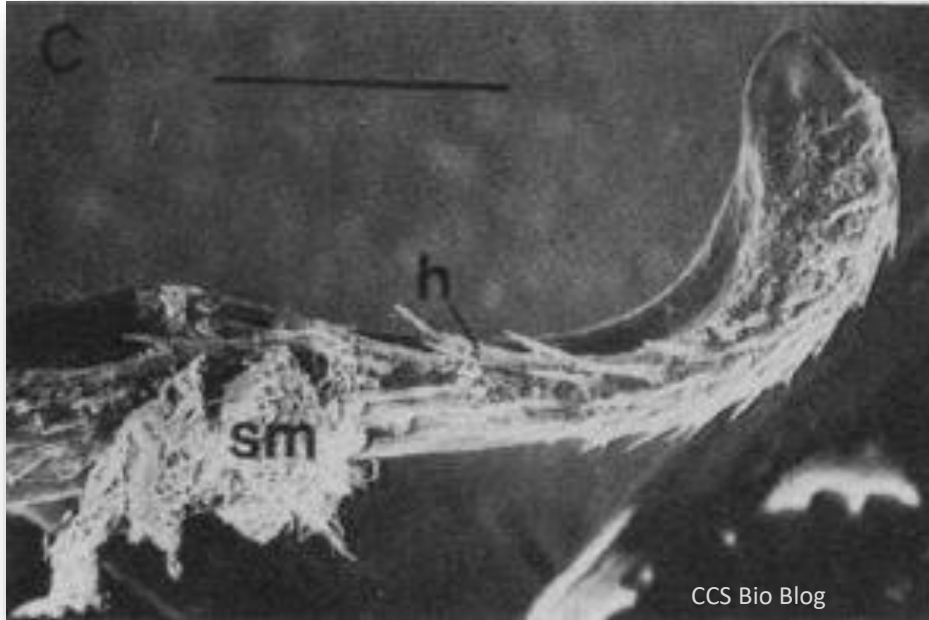
Homme: 180 millions de spermatozoïdes pour 1 ovule...

Compétition spermatique



Agrégation de spermatozoïdes (plus rapide),
uniquement chez les non monogames

Compétition spermatique



Sélection sexuelle



Sélection sexuelle

Gardiennage post-copulatoire
Jusqu'à plusieurs semaines

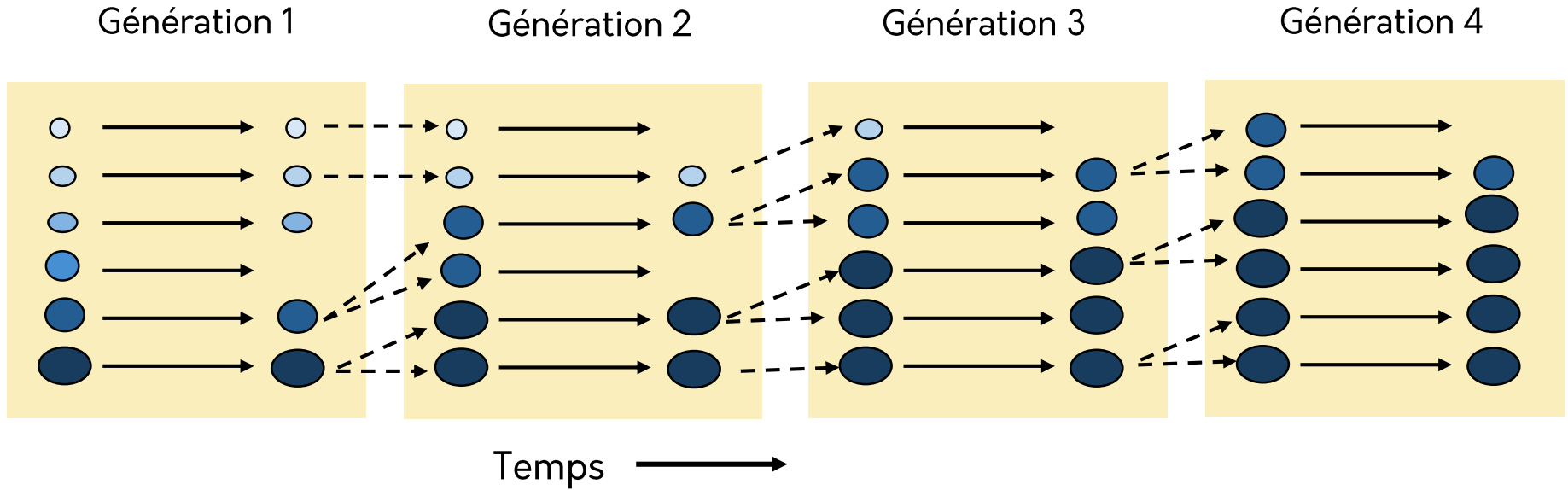


Don' try this at home!

This may reduce your lifespan
expectancy



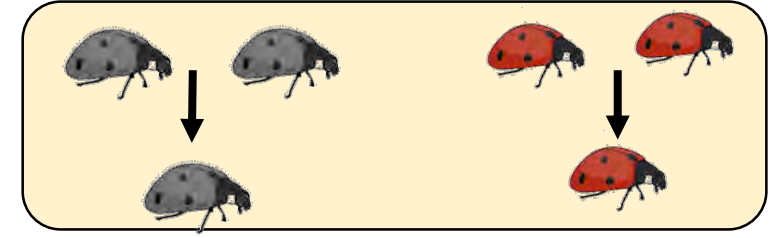
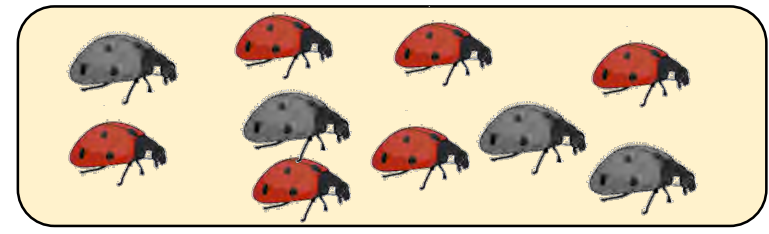
Sélection: suppose variation génétique



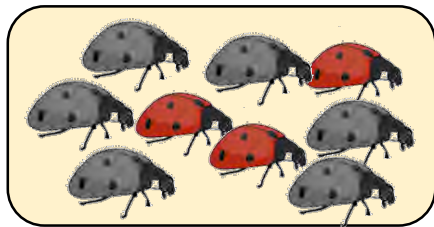
Sélection: suppose variation génétique



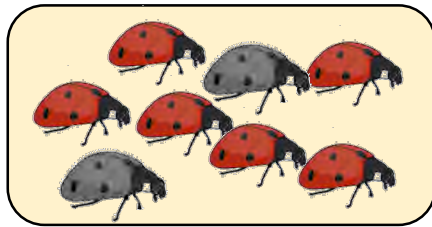
Variation
Héritabilité



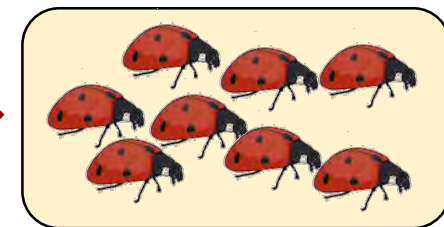
Différences de survie
ou succès reproducteur



Génération



Génération



Base génétique des comportements

Mutagenèse

Parade nuptiale des drosophiles



Comportement
hygiénique chez
l'abeille domestique

Loque américaine :
Bacillus larvae

Croisements:
deux gènes
deux allèles



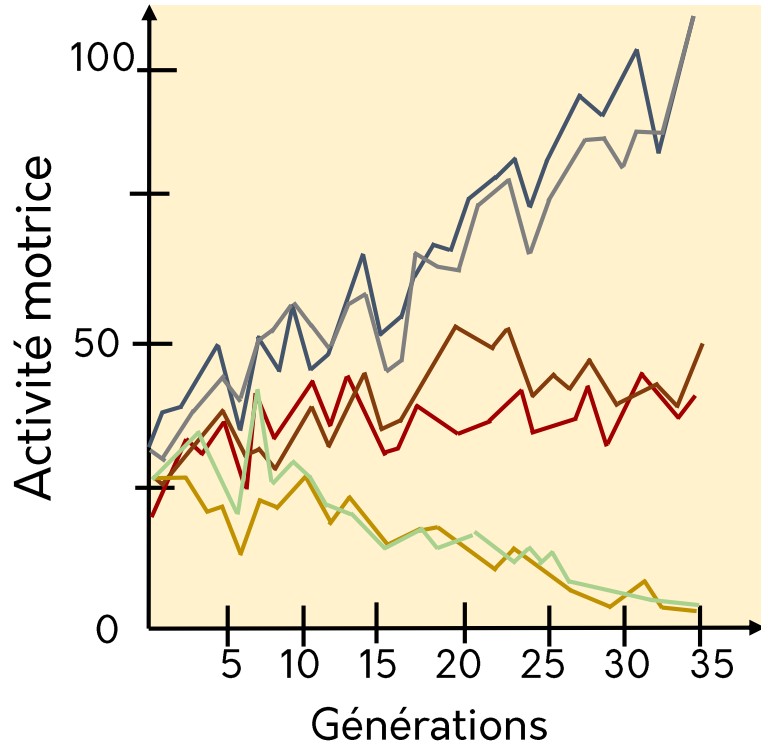
Sélection artificielle

Sélection du comportement de chant



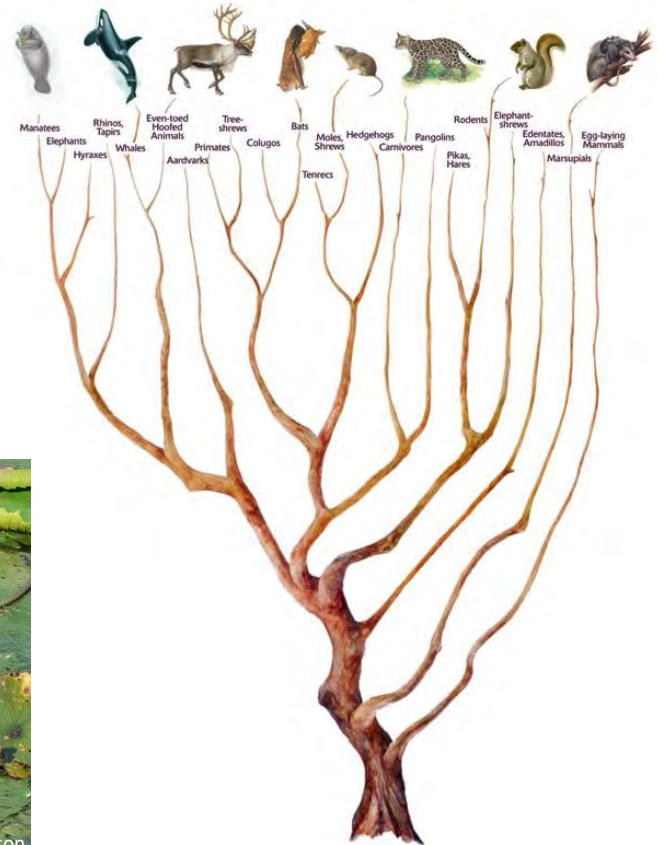
Sélection artificielle

Sélection de lignées de souris plus ou moins actives



Base génétique des comportements

Différences fixées entre espèces



Chris Eason

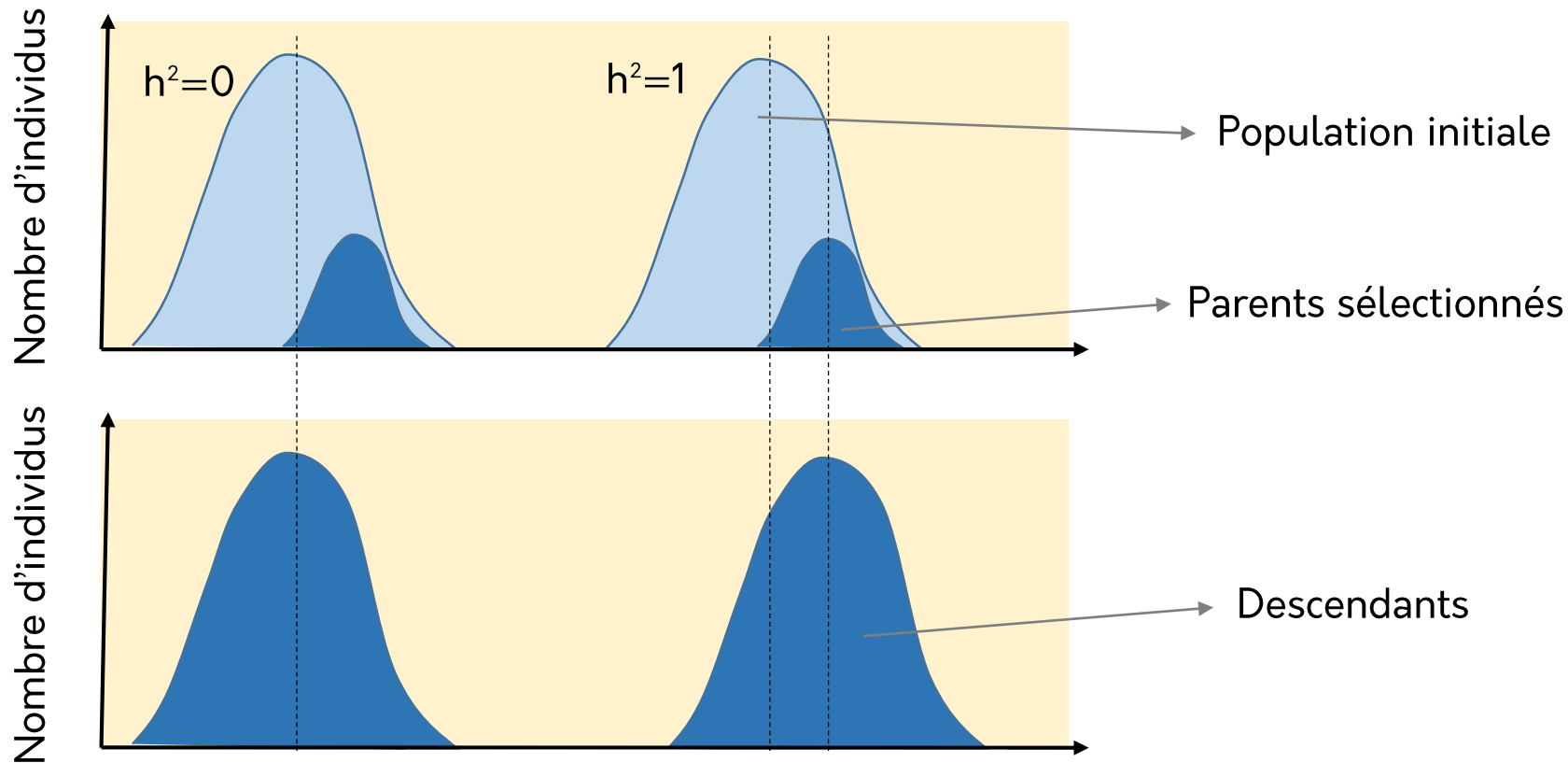
Composante génétique dans la variation inter-individuelle?

Héritabilité $h^2 = \text{Variance}_{\text{Génétique}} / \text{Variance}_{\text{Phénotypique}}$



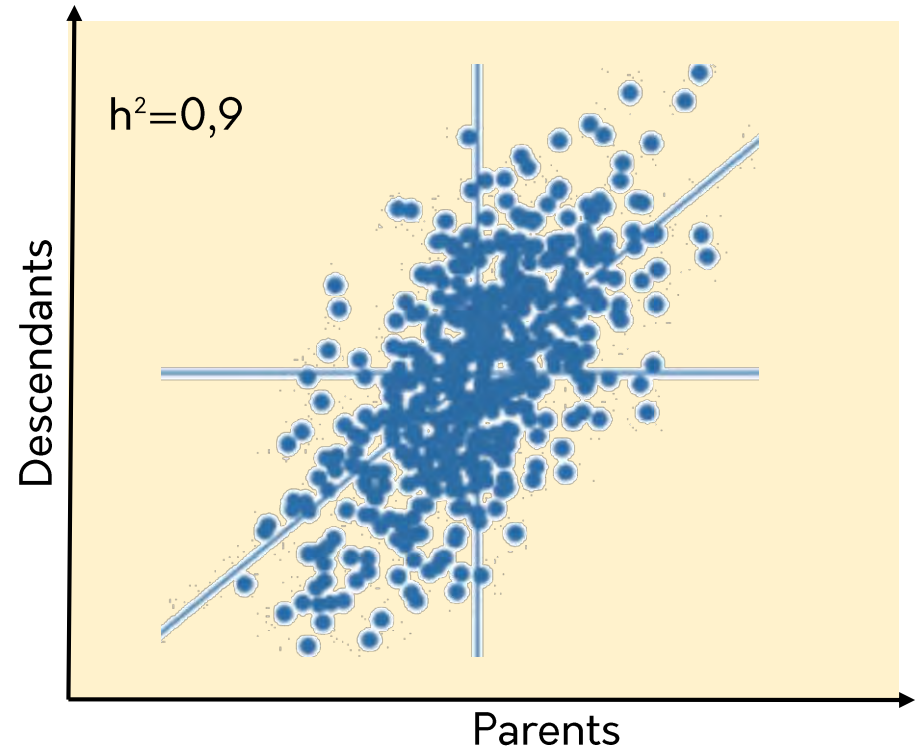
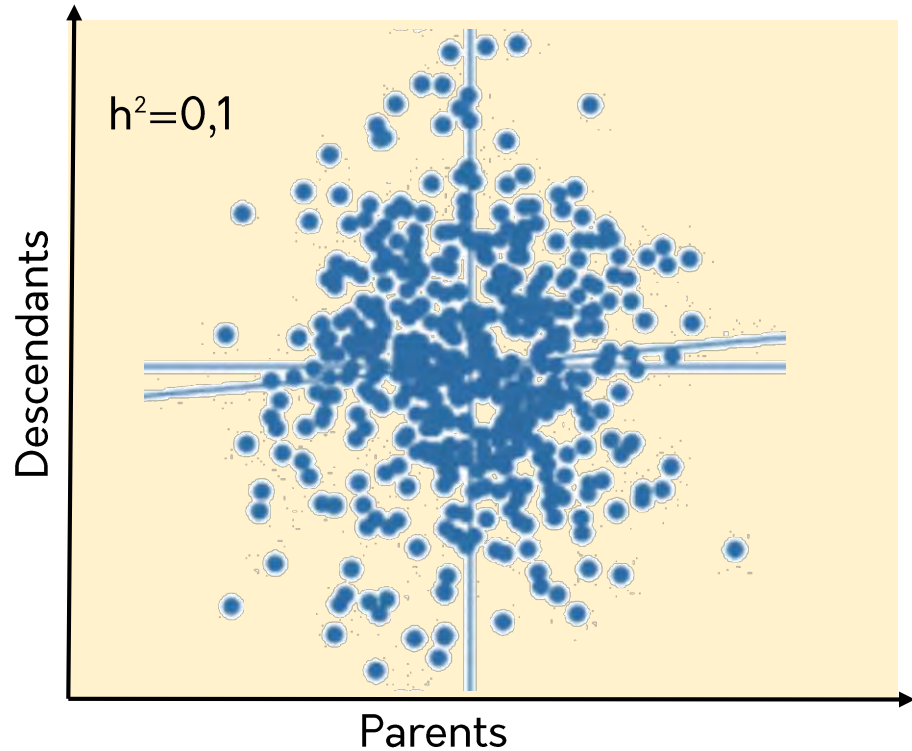
Composante génétique dans la variation inter-individuelle

$$\text{Héritabilité } h^2 = \frac{\text{Variance}_{\text{Génétique}}}{\text{Variance}_{\text{Phénotypique}}}$$



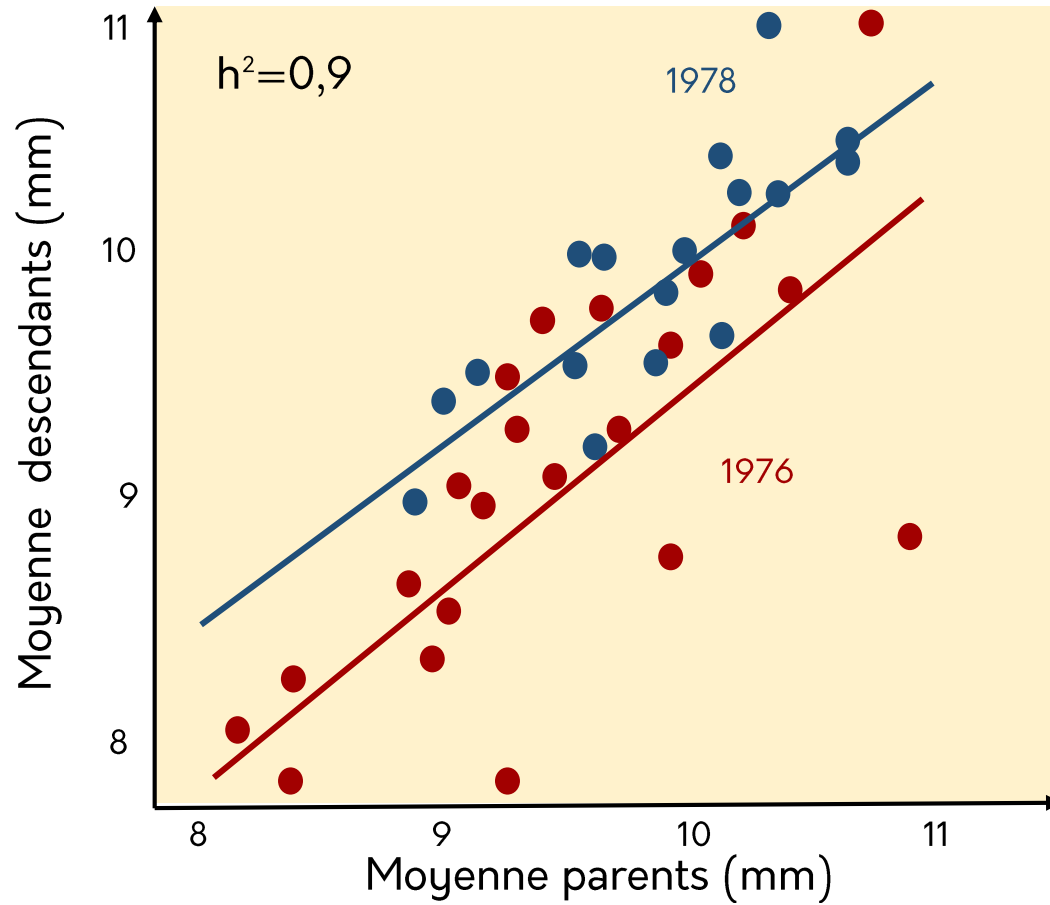
Composante génétique dans la variation inter-individuelle

Héritabilité $h^2 = \text{Variance}_{\text{Génétique}} / \text{Variance}_{\text{Phénotypique}}$

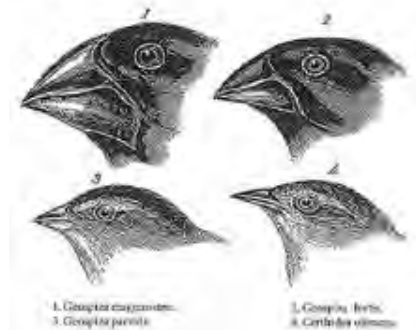


Composante génétique dans la variation inter-individuelle

$$\text{Héritabilité } h^2 = \text{Variance Génétique} / \text{Variance Phénotypique}$$



Taille du bec
Géospize à bec moyen



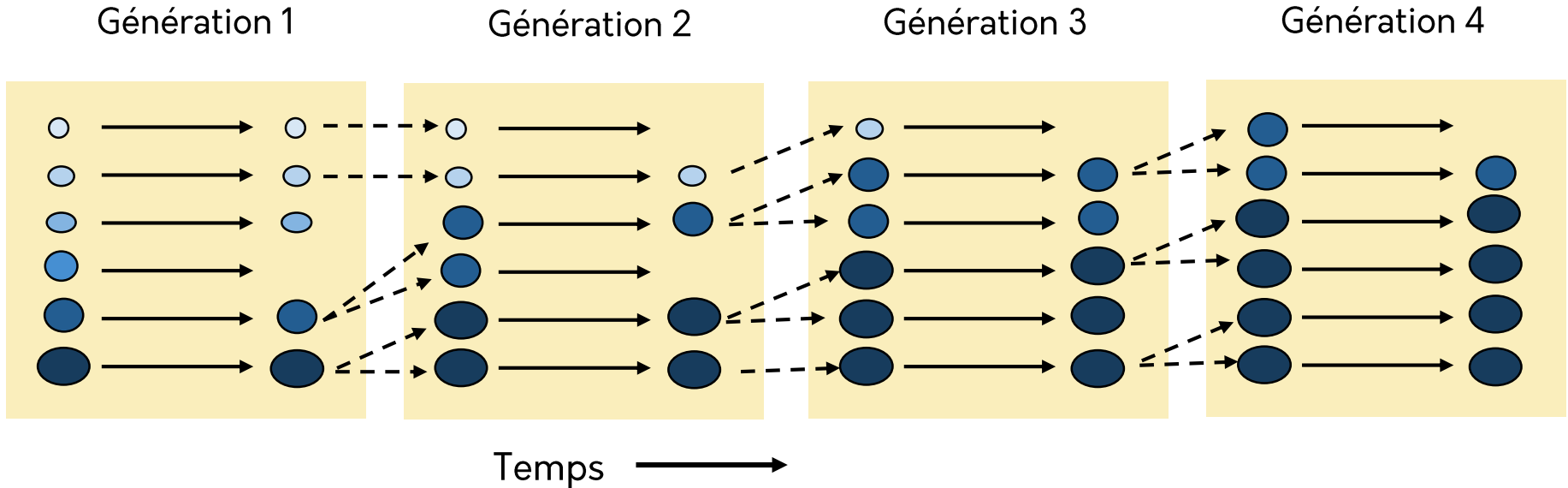
Evolution de la cooperation

Pourquoi les lionnes
chassent-elles en groupe?



La sélection naturelle ne fonctionne pas “pour perpétuer l’espèce”

La sélection ne devrait jamais mener à la coopération ni à l’altruisme?



Pourquoi les lionnes chassent-elles en groupe?



Pourquoi les lionnes chassent-elles en groupe?

Un groupe a une probabilité plus grande de capturer une grosse proie

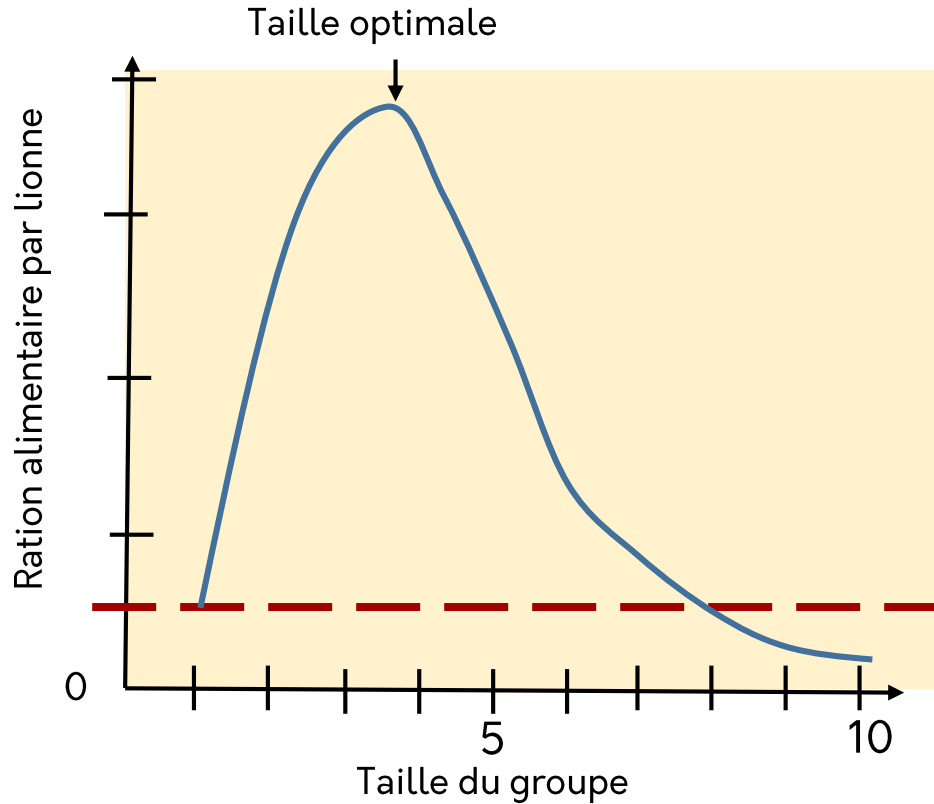


Pourquoi les lionnes chassent-elles en groupe?

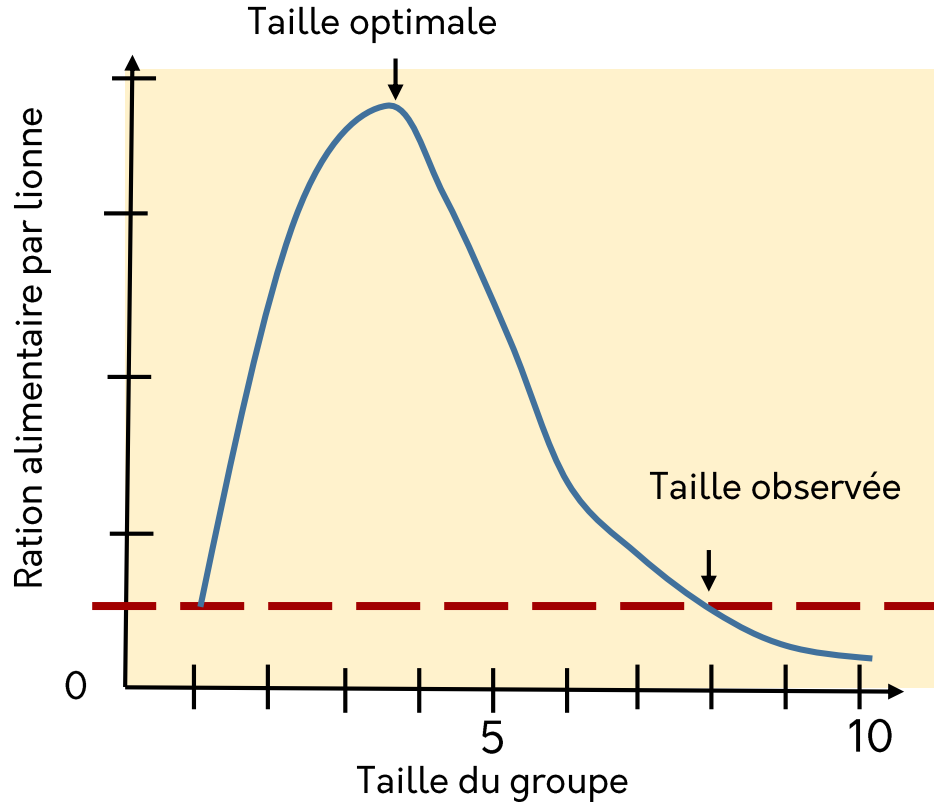
Mais plus le groupe est grand plus il y a d'individus avec qui partager la proie



Il y a donc une taille de groupe optimale



Il y a donc une taille de groupe optimale



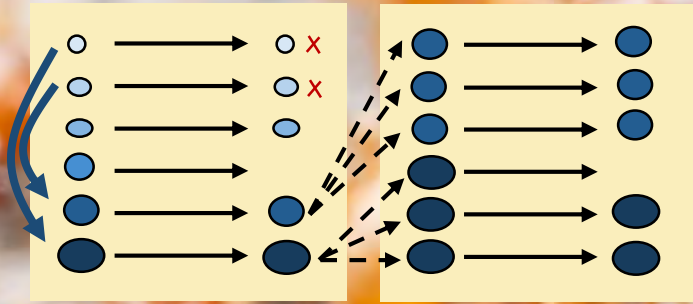
Pourtant les groupes sont de tailles telles que chaque lionne n'a pas plus à manger que si elle chassait seule...

Tragédie des biens communs

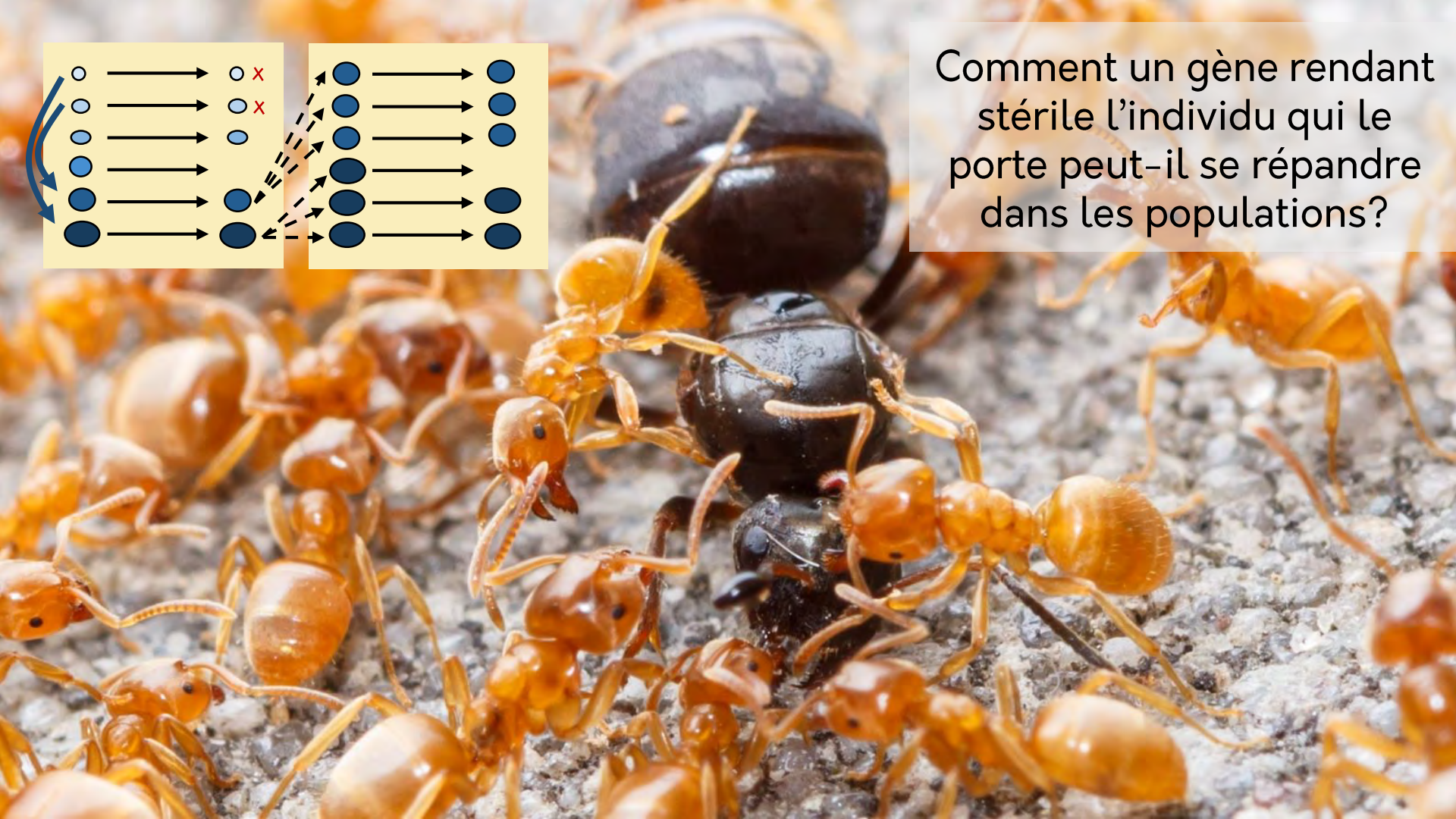



Evolution de l'altruisme?





Comment un gène rendant stérile l'individu qui le porte peut-il se répandre dans les populations?





Les fourmis ouvrières constituent
« une difficulté particulière qui, au premier
abord, me parut insurmontable et réellement
fatale à l'ensemble de ma théorie »

Charles Darwin 1859

Le problème évolutif de l'altruisme



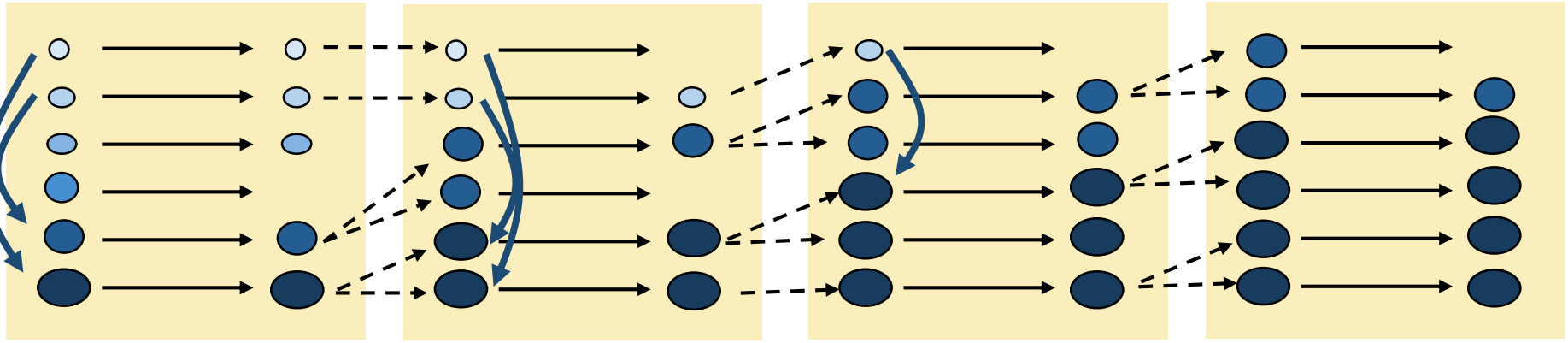
Evolution de l'altruisme?

Génération 1

Génération 2

Génération 3

Génération 4



→
Temps

○ ○ Altruistes
● ● Non-altruistes

Altruisme: aide à d'autres individus pour produire des descendants aux dépens de leurs propres descendants



Pour le bien du groupe ?



Vero Copner
Wynne-Edwards
1986

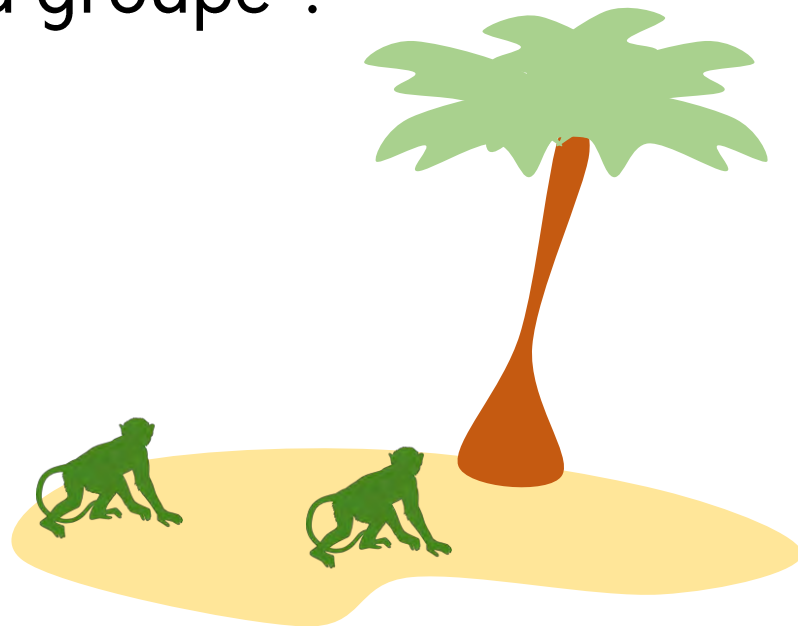
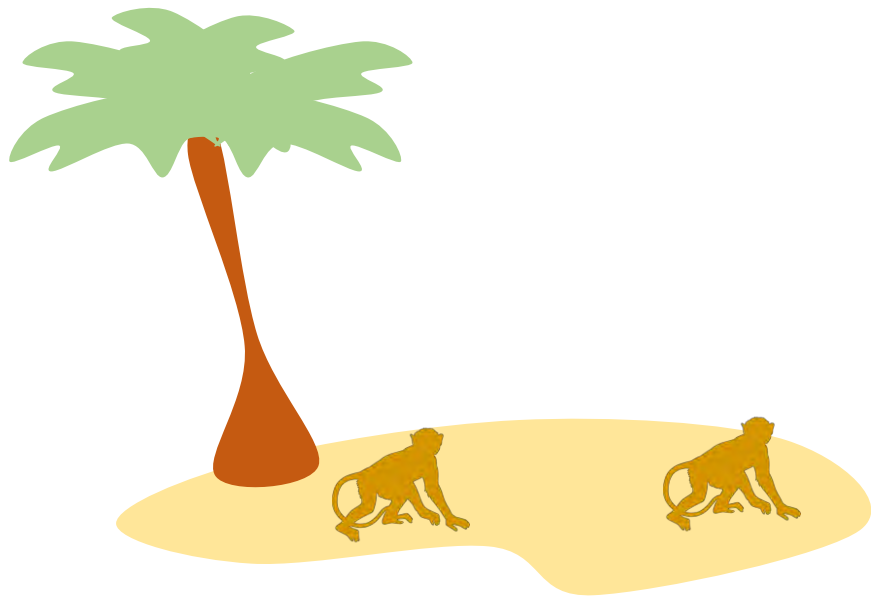


Altruiste



Egoïste

Pour le bien du groupe ?



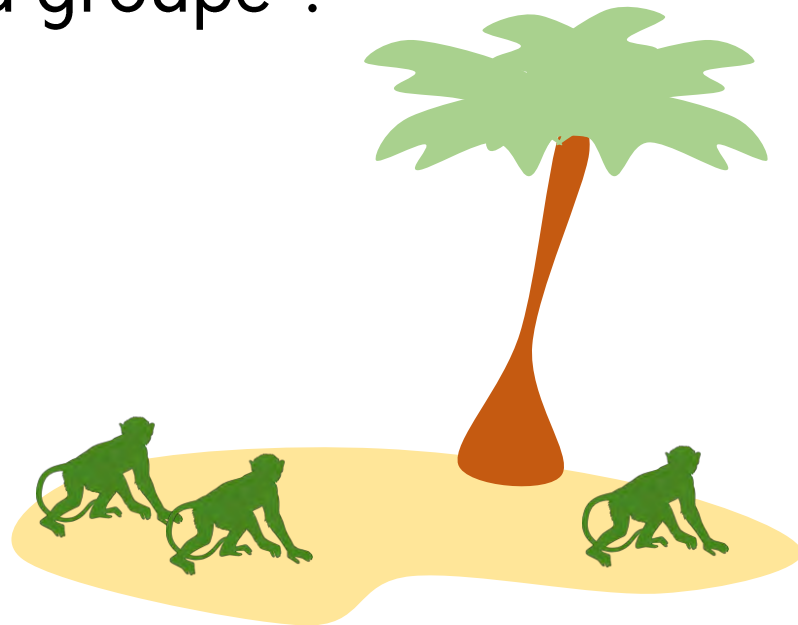


Altruiste



Egoïste

Pour le bien du groupe ?



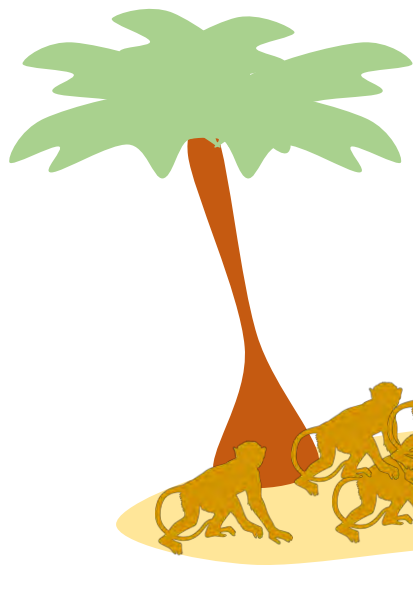


Altruiste

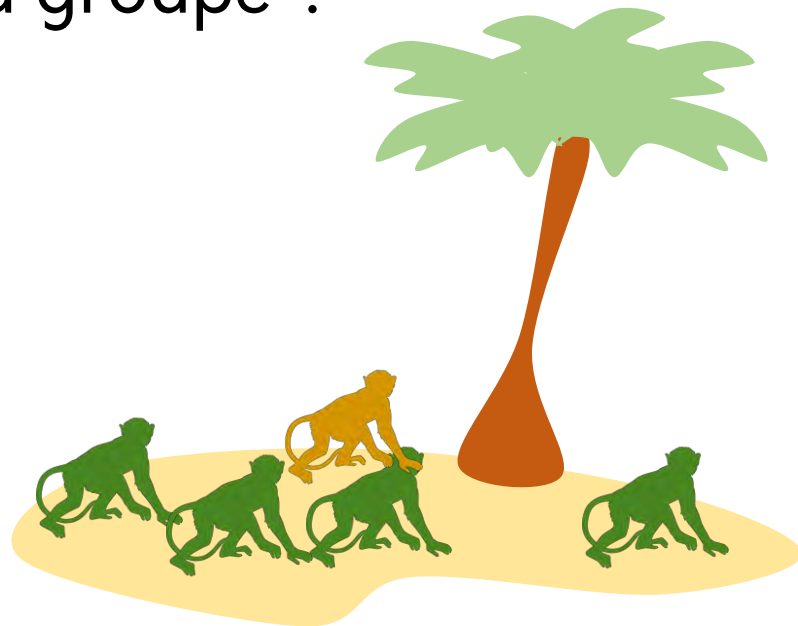


Egoïste

Pour le bien du groupe ?



Migration ou
mutation



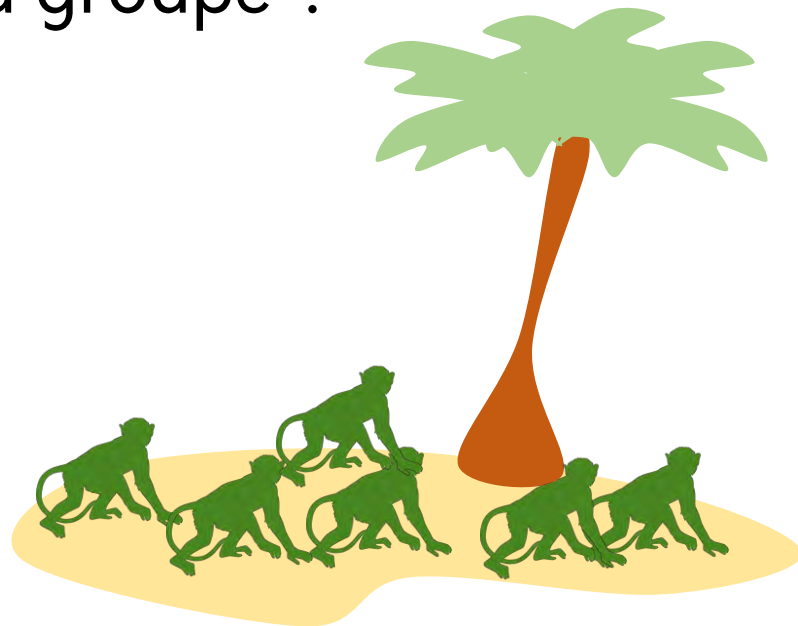


Altruiste



Egoïste

Pour le bien du groupe ?



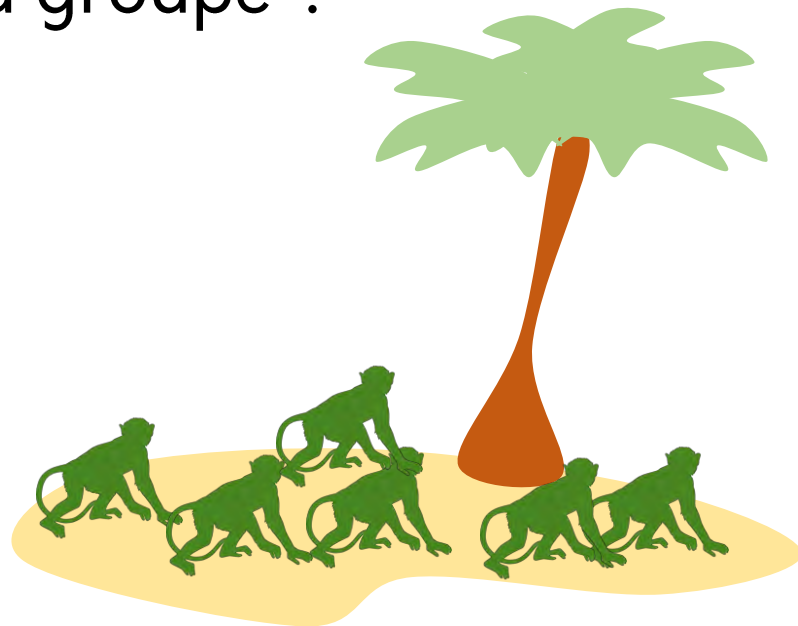
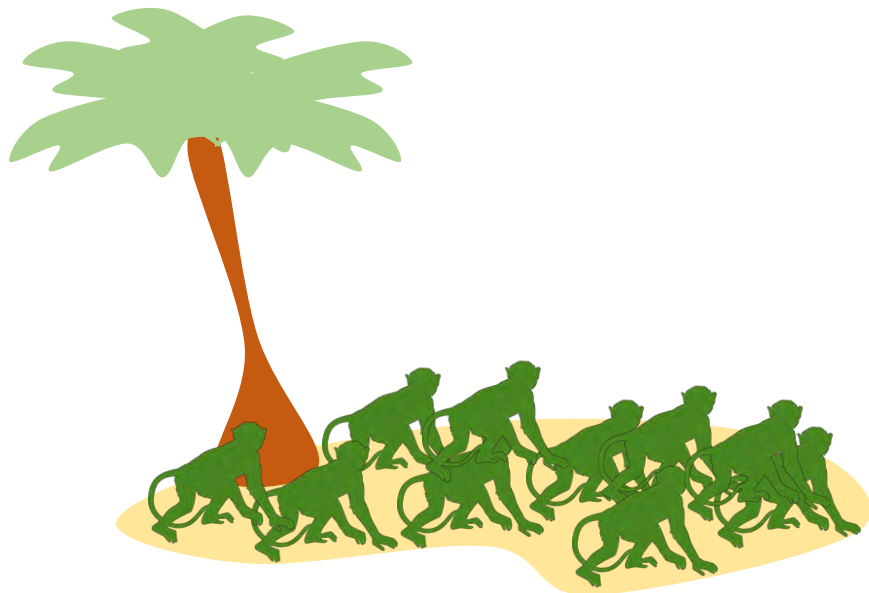


Altruiste

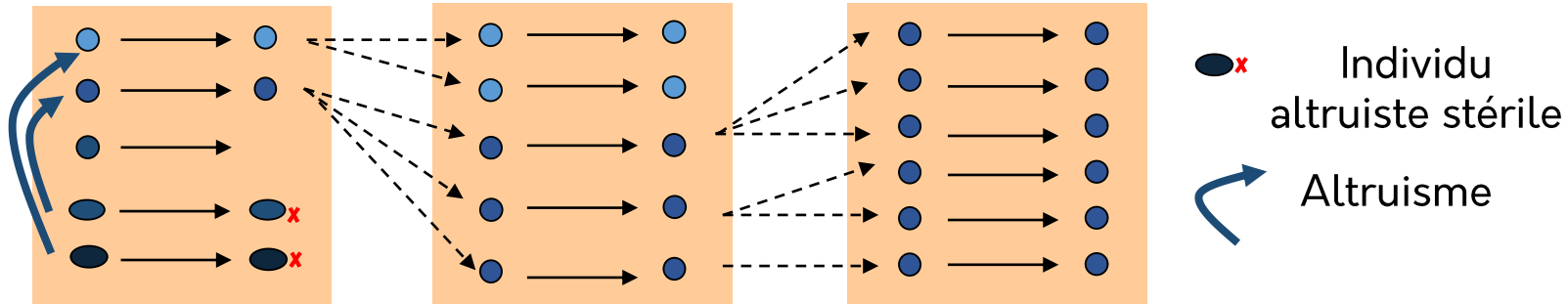


Egoïste

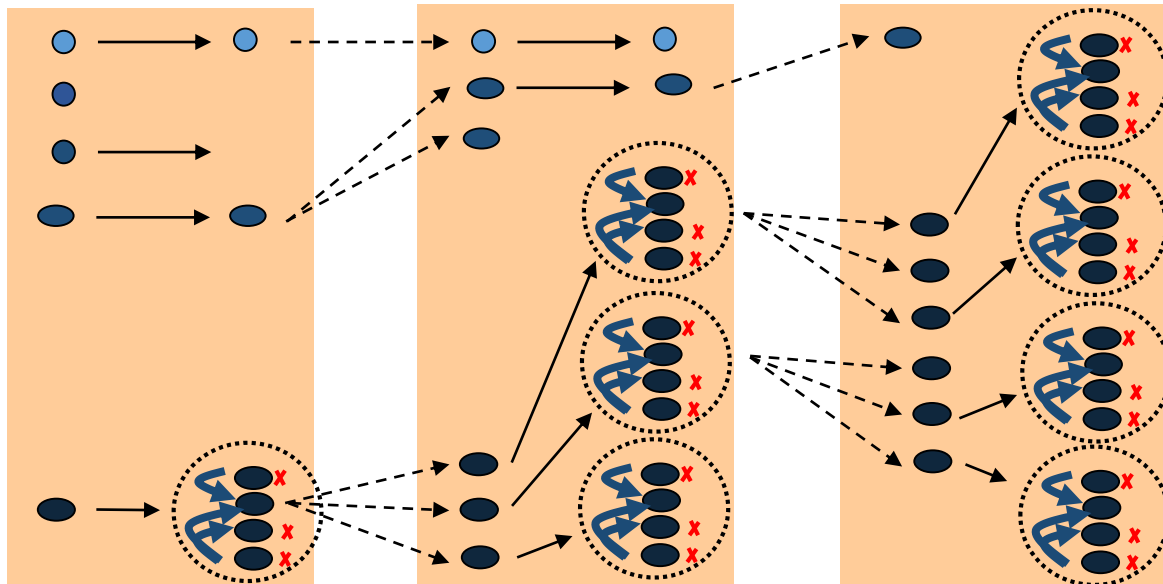
Pour le bien du groupe ?



La stérilité des ouvrières fourmis: un coup fatal à la théorie de Darwin?



Evolution de l'altruisme par sélection de parentèle



William Hamilton
1963, 1964



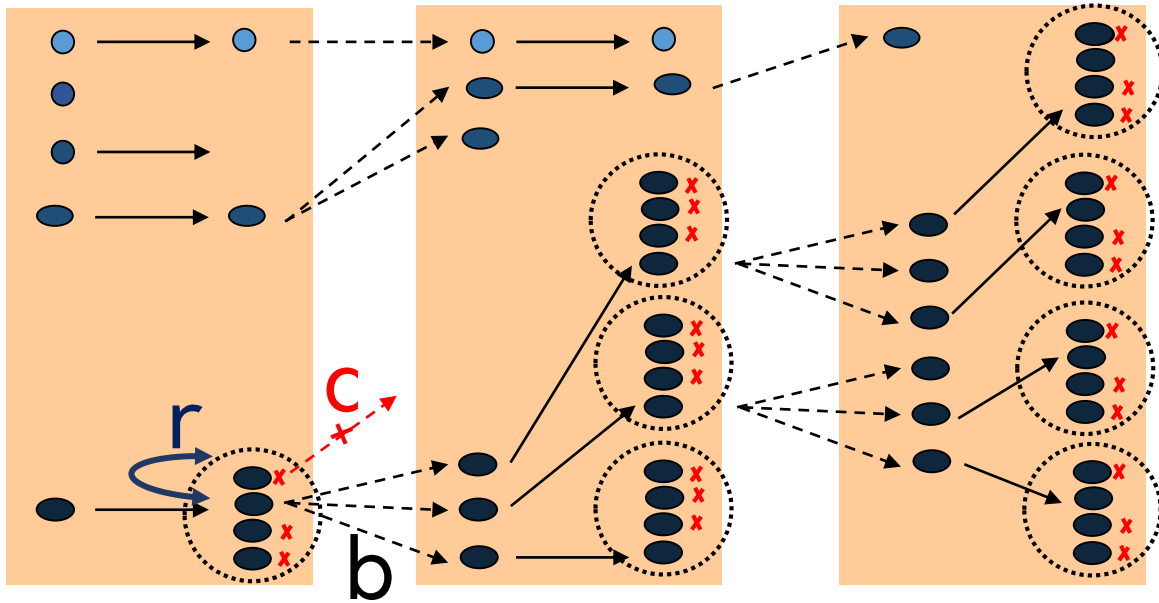


$$b \times r > c$$

b : bénéfice en termes de descendants pour l'apparenté

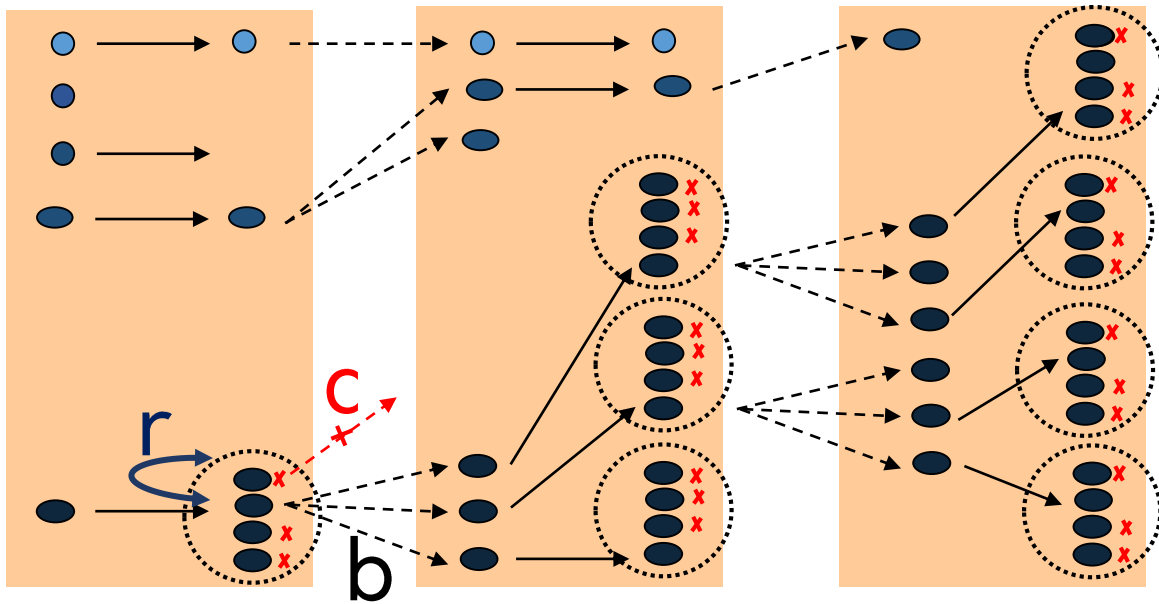
r : degré d'apparentement = probabilité de retrouver un allèle donné de l'altruiste dans l'individu apparenté

c : coût pour l'altruiste en termes de descendants



$$b \times r > c$$

L'allèle d'altruisme aide des copies de lui-même à se transmettre

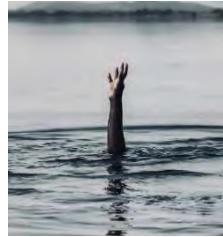
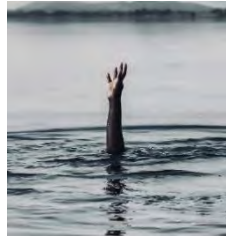
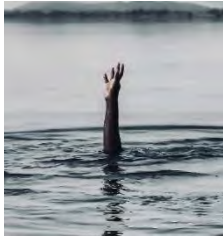
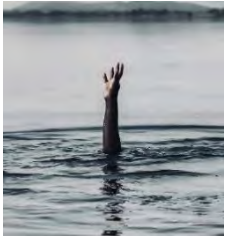


Evolution de l'altruisme par sélection de parentèle



William Hamilton
1964

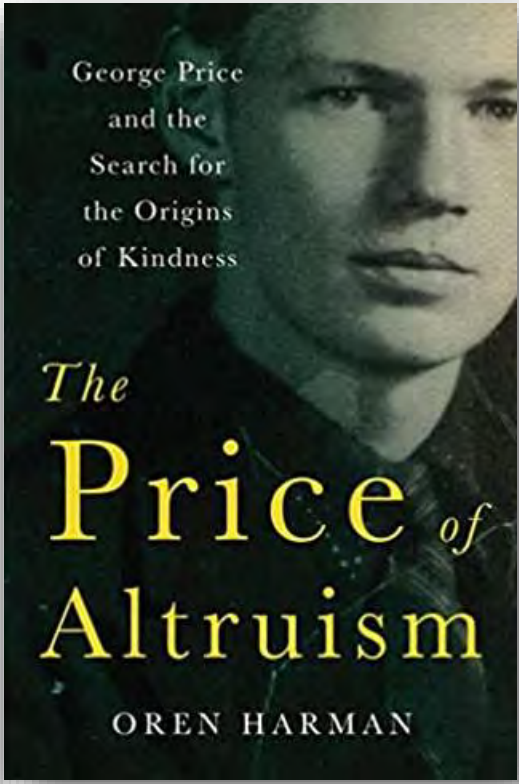
Evolution de l'altruisme par sélection de parentèle



© Sarah Blaffer Hrdy

William Hamilton
1964

L'altruisme peut être une bonne façon de transmettre ses gènes



Evolution de l'altruisme par sélection de parentèle



Coalitions de mâles chez les lions

Partage de la reproduction
équitable quand non apparentés

Biais dans la reproduction
quand ce sont des frères

$R = 0,5$

Evolution de l'altruisme par sélection de parentèle

Troupes de lionnes apparentées



Evolution de l'altruisme par sélection de parentèle

Insectes sociaux

$$b \times r > c$$



Evolution de l'altruisme par sélection de parentèle

Termites, rats taupes

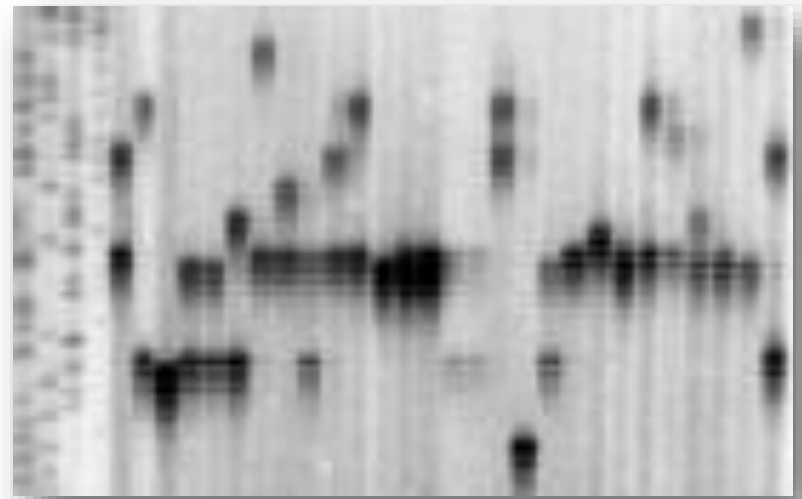
$$b \times r > c$$



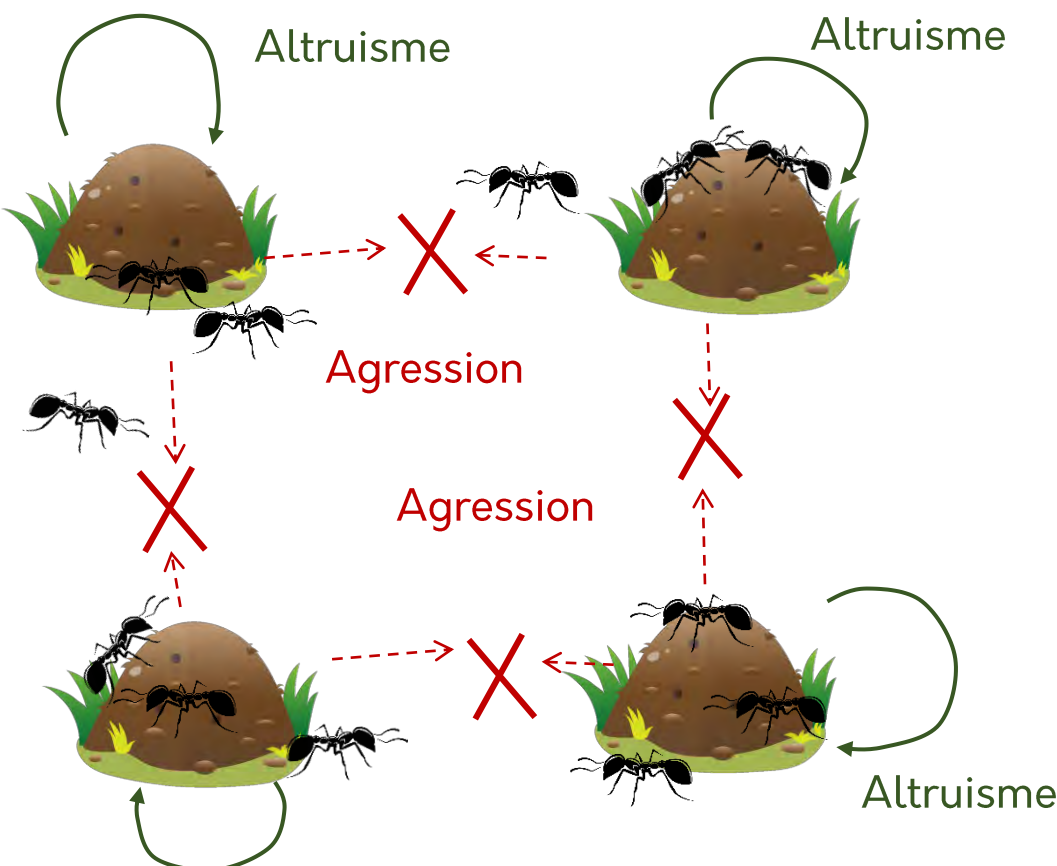
Preuves de la sélection de parentèle

Marqueurs génétiques

Discrimination des apparentés

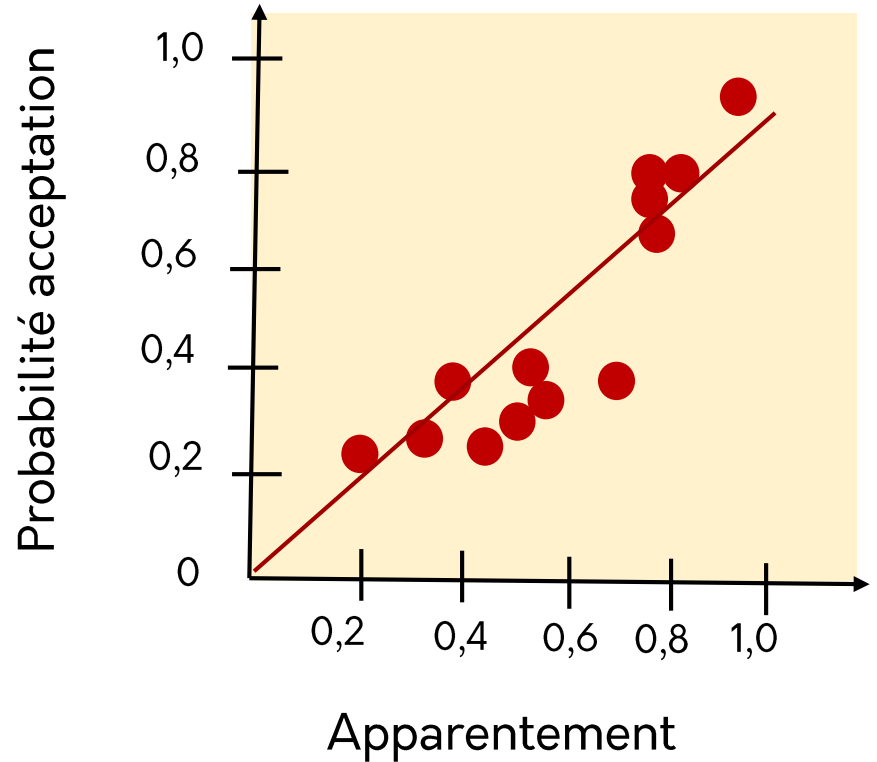


Evolution de l'altruisme par sélection de parentèle



Preuves de la sélection de parentèle

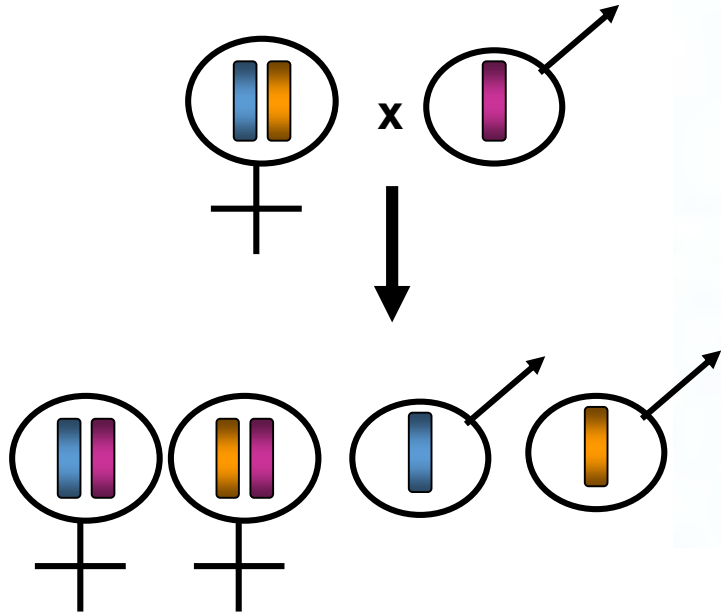
Discrimination des apparentés





Preuves de la sélection de parentèle
Conflits dans les colonies d'insectes sociaux

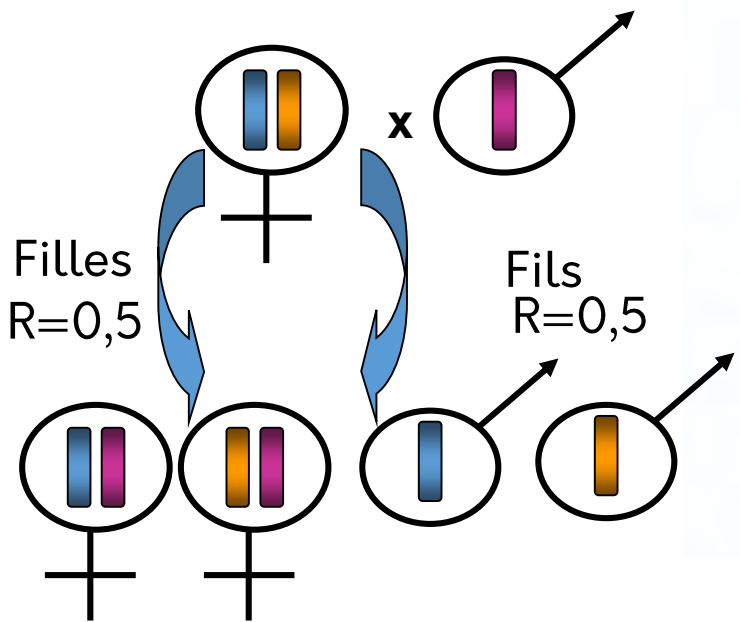
Conflits dans les colonies d'insectes sociaux



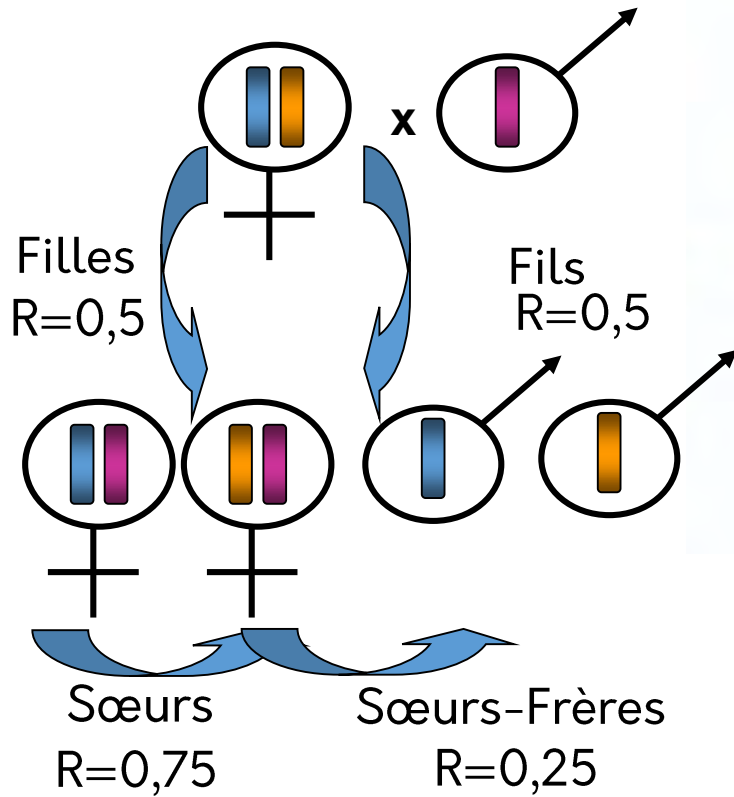
© Alex Wild
alexanderwild.com

Système de déterminisme du sexe haplo-diploïde

Conflits dans les colonies d'insectes sociaux



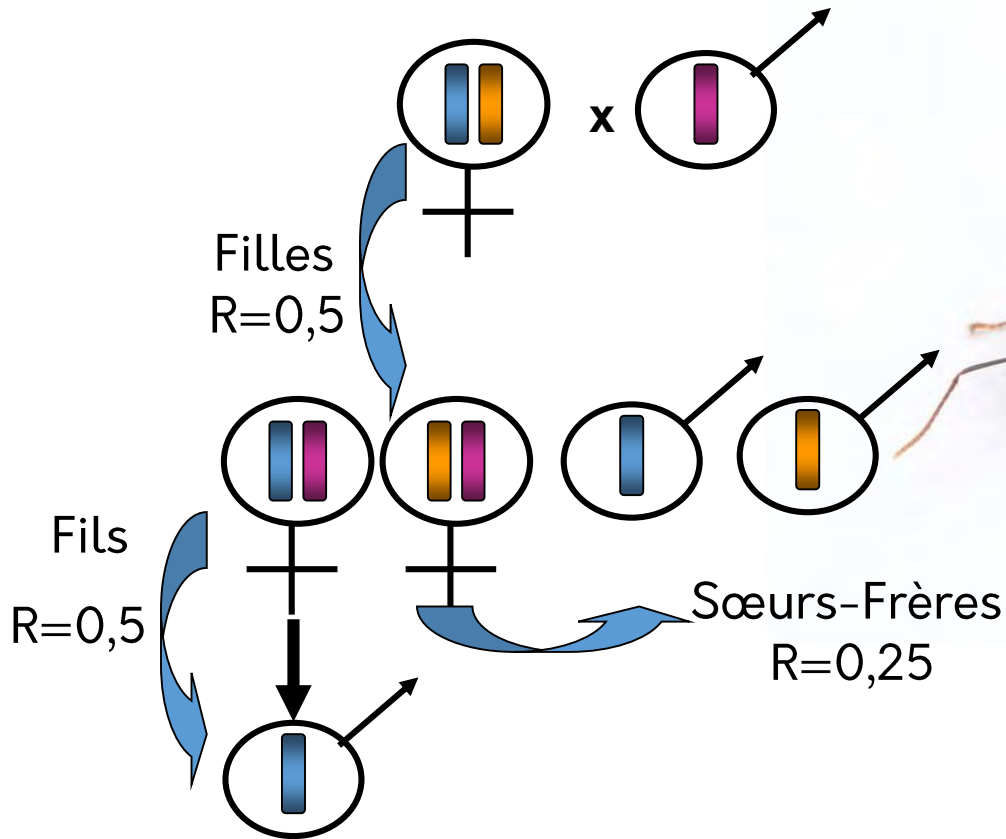
Conflits dans les colonies d'insectes sociaux



© Alex Wild
alexanderwild.com

Conflits pour le sex-ratio
entre reines et ouvrières

Conflits dans les colonies d'insectes sociaux

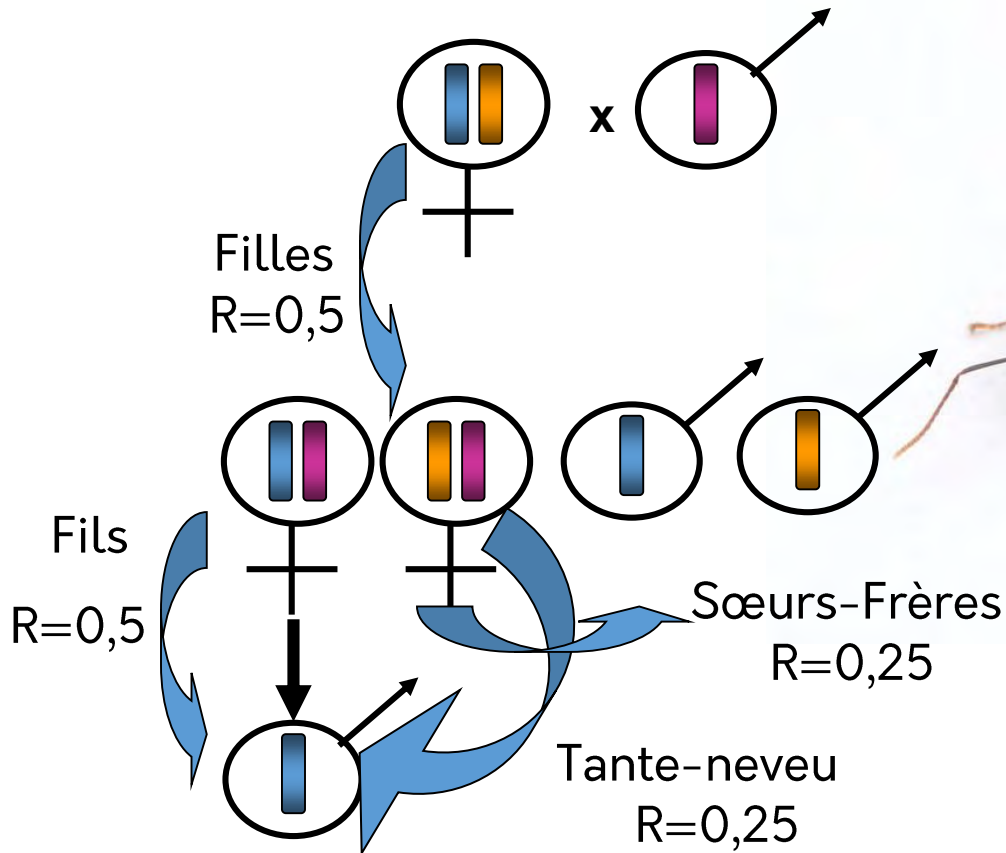


© Alex Wild
alexanderwild.com

Conflits pour le sex-ratio
entre reines et ouvrières...

...et entre ouvrières

Conflits dans les colonies d'insectes sociaux

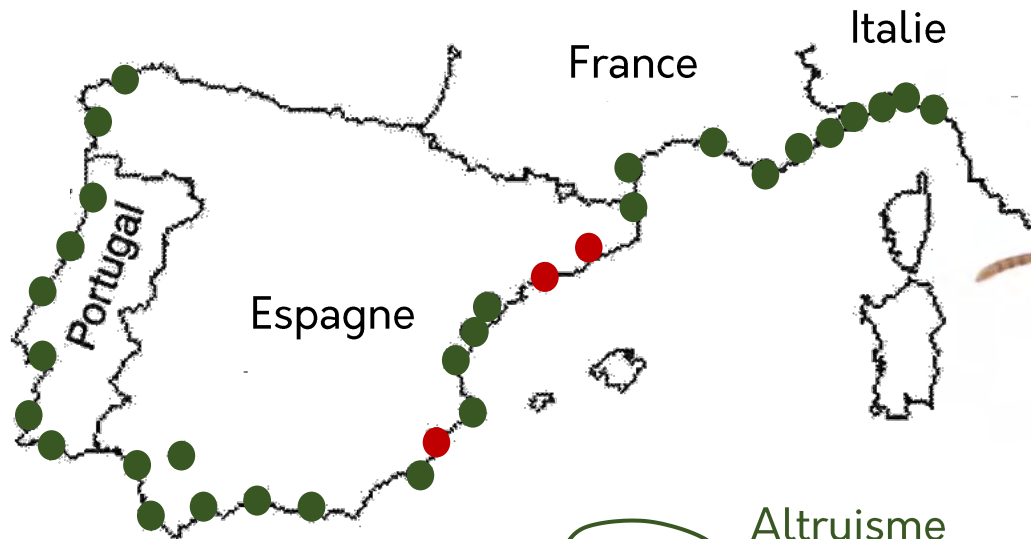


© Alex Wild
alexanderwild.com

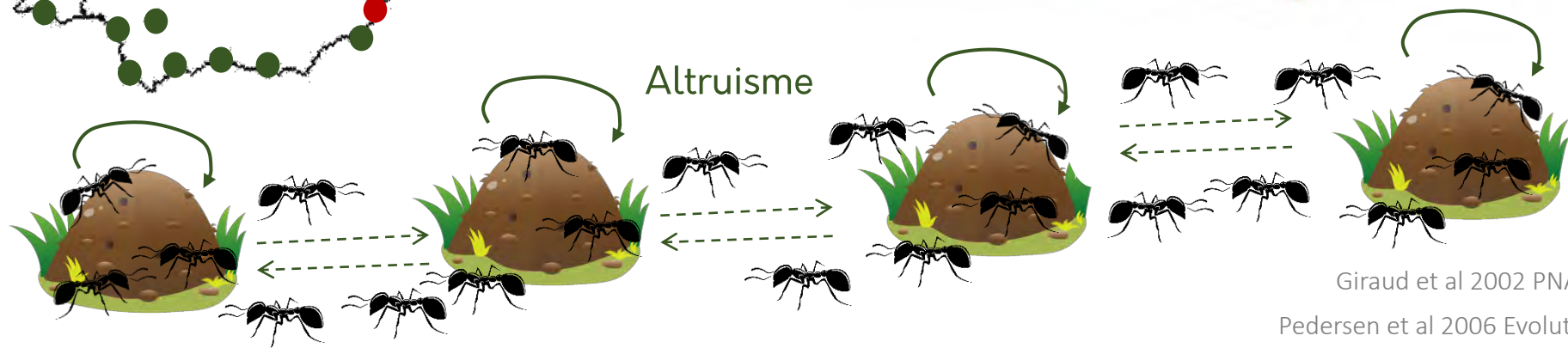
Conflits pour le sex-ratio
entre reines et ouvrières...

...et entre ouvrières

Supercolonies de fourmis envahissantes



Alex Wild



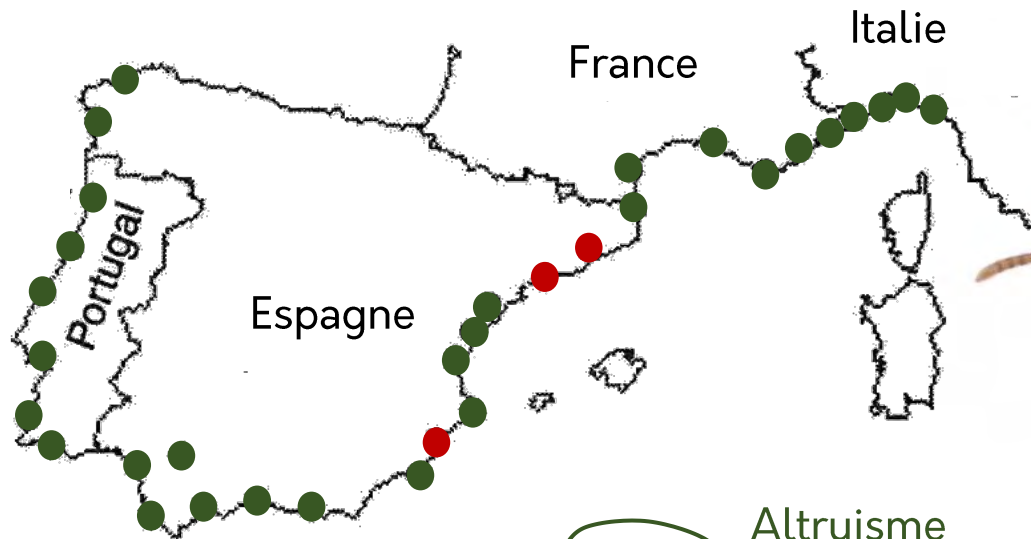
Giraud et al 2002 PNAS

Pedersen et al 2006 Evolution

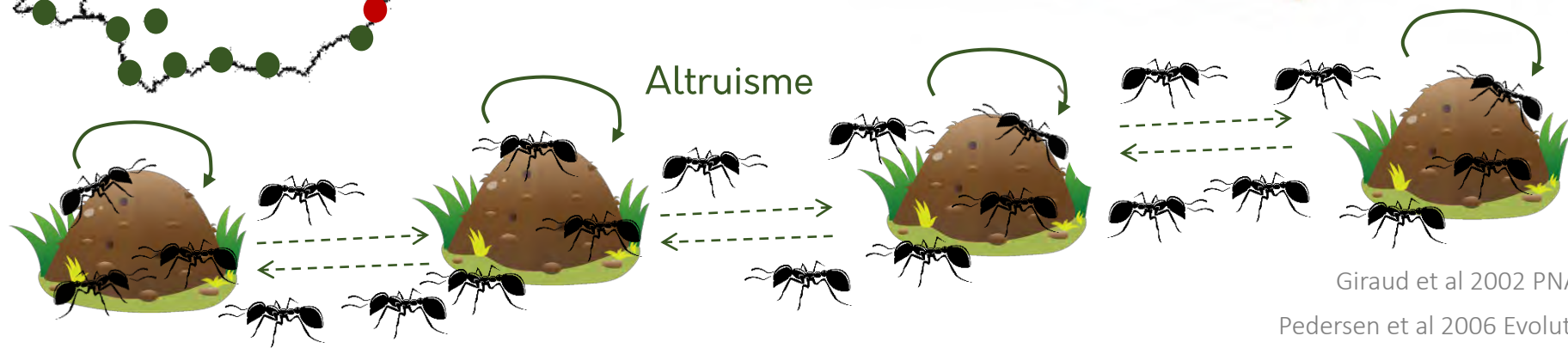




Supercolonies de fourmis envahissantes



Alex Wild



Giraud et al 2002 PNAS

Pedersen et al 2006 Evolution

Richard Dawkins Le Gène égoïste



Odile
Jacob
poches

sciences



Le gène égoïste ultime: éléments transposables

- 40% du génome humain
- 70% du génome du maïs



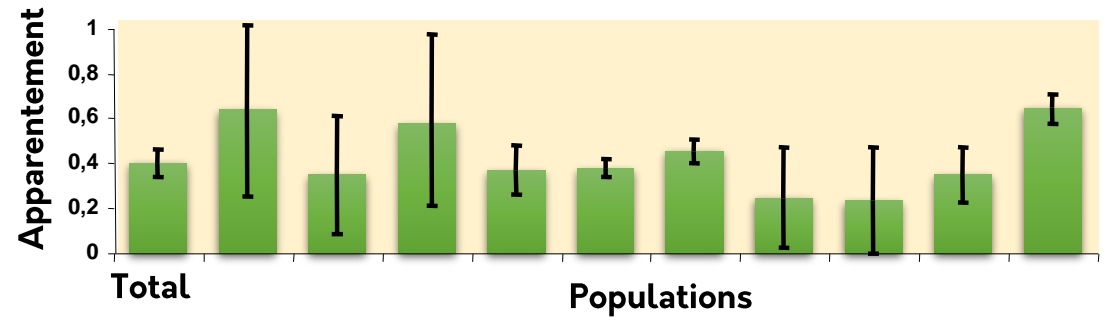
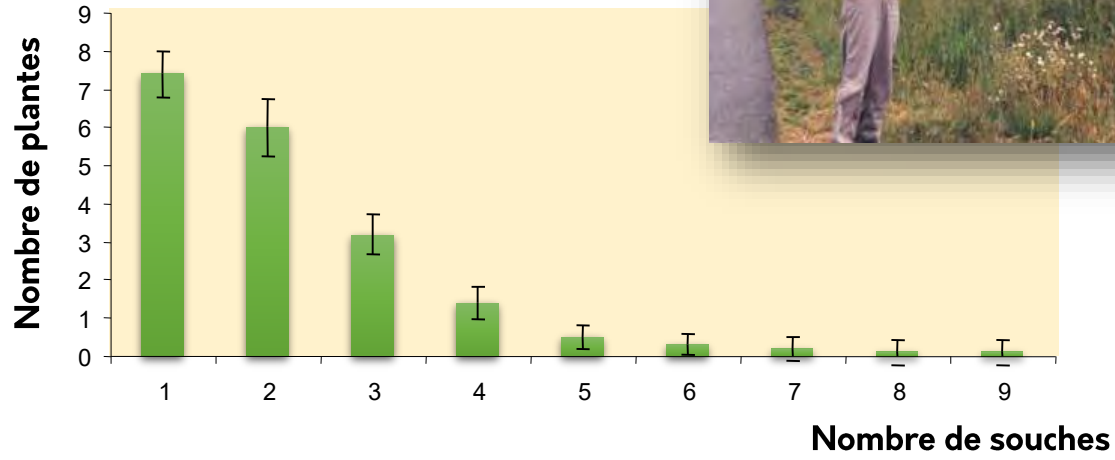
Barbara McClintock (1902-1992)



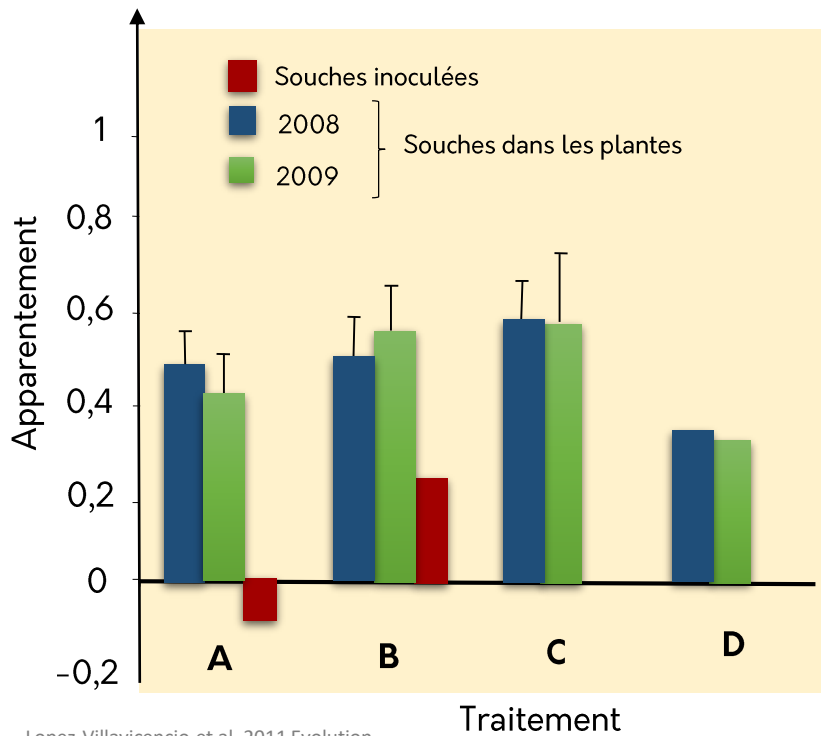


Evolution de l'altruisme
entre apparentés aussi
chez les champignons

Infections multiples : souches apparentées populations naturelles



Infections multiples : Exclusion des souches non apparentées



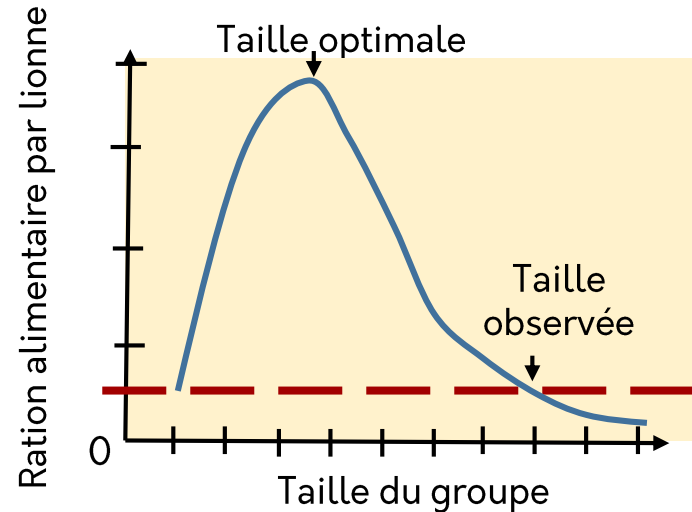
Evolution de l'altruisme sans apparentement?



Evolution de l'altruisme sans apparentement?

Théorie des jeux

- Les comportements sont des stratégies d'un jeu
- Stratégie optimale ? Stratégie stable?



Théorie des jeux - 1940



John Von Neumann



Oskar Morgenstern



John Forbes Nash

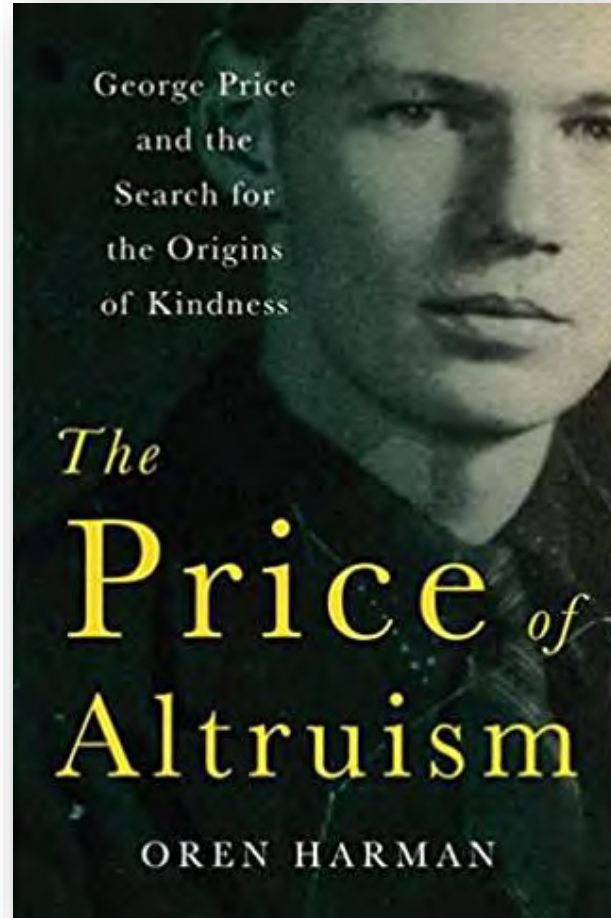
Analyse des conflits d'intérêt des agents économiques dans une économie de marché

La stratégie optimale est-elle la solution la plus rentable individuellement?

Théorie des jeux en biologie évolutive- 1973



John Maynard-Smith



Théorie des jeux

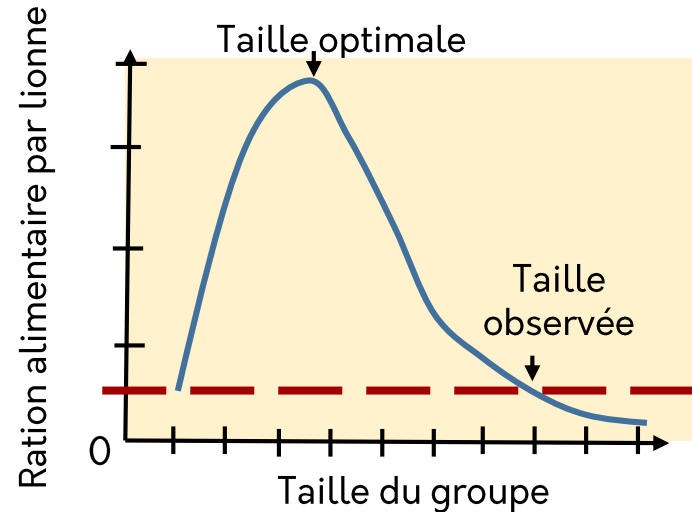
Jeux à somme nulle



Jeu à somme non nulle

Théorie des jeux

On recherche la stratégie évolutivement stable:
contre laquelle toute autre stratégie perd





Dilemme du prisonnier

Dilemme du prisonnier

Coopère

Trahit

Coopère

G = 3

Coopération mutuelle

G = 0

Salaire de dupe

Trahit

G = 5

Récompense à la trahison

G = 1

Punition pour trahison mutuelle



Dilemme du prisonnier



	Coopère	Trahit
Coopère	G = 3 Coopération mutuelle	G = 0 Salaire de dupe
Trahit	G = 5 Récompense à la trahison	G = 1 Punition pour trahison mutuelle

Optimum de Pareto

Dilemme du prisonnier



	Coopère	Trahit
Coopère	G = 3 Coopération mutuelle	G = 0 Salaire de dupe
Trahit	G = 5 Récompense à la trahison	G = 1 Punition pour trahison mutuelle

Optimum de Pareto

Mais l'intérêt individuel est toujours de trahir!

Dilemme du prisonnier



	Coopère	Trahit
Coopère	G = 3 Coopération mutuelle	G = 0 Salaire de dupe
Trahit	G = 5 Récompense à la trahison	G = 1 Punition pour trahison mutuelle

Equilibre de Nash

Tragédie des biens communs

A silhouette of a person's head and shoulders is centered in the frame, looking out of a window. The window is divided into four panes by a white frame. The light from the window is bright, creating a strong contrast with the dark interior. The person's hair is short and dark. The overall mood is contemplative and somewhat somber.

Ne peut-on vraiment pas faire
évoluer la coopération dans de
tels systèmes?

Dilemme du prisonnier itéré

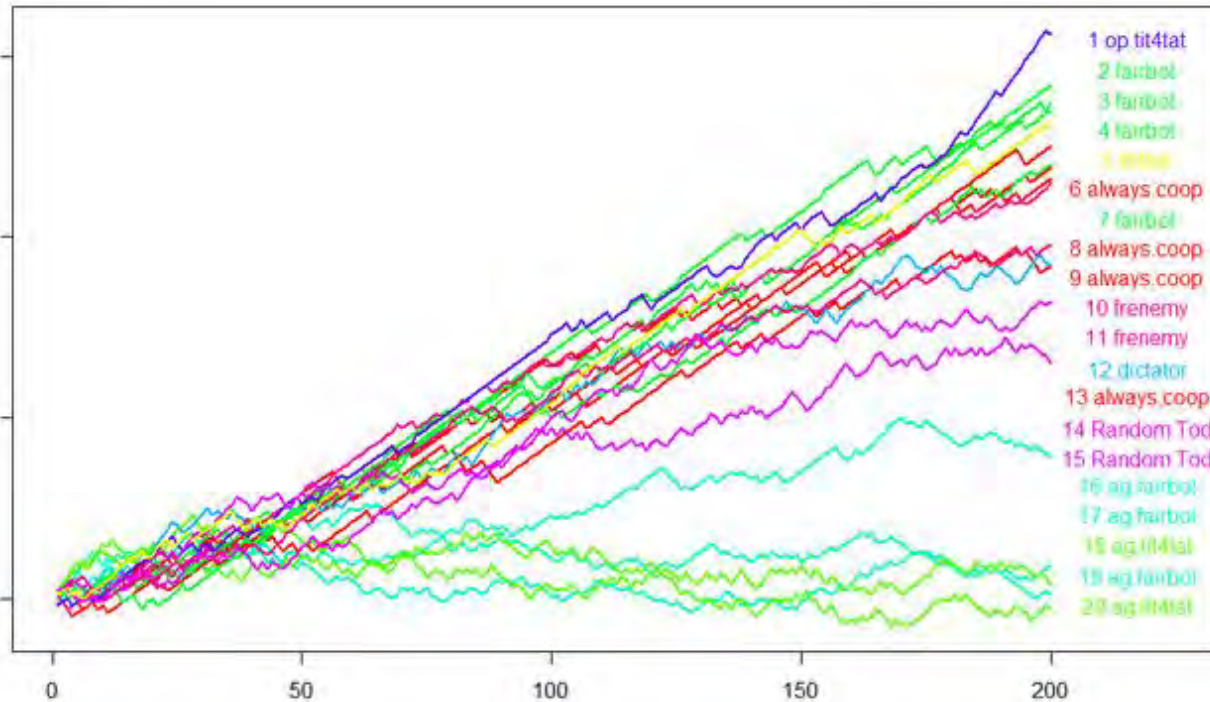
- 12 stratégies
 - Gentille
 - Méchante
 - Lunatique
 - Rancunière
 - Périodique gentille (méchante)
 - Méfiante...



Robert Axelrod



Stratégie gagnante dans un affrontement *in silico* de stratégies (programmes): donnant-donnant



Evolution de l'altruisme sans apparentement

Evolution de l'altruisme si:

- interactions répétées
- moment de fin aléatoire
- reconnaissance des partenaires



Evolution de l'altruisme sans apparentement

2^{ème} round de compétition
de stratégies:

Tit for 2 tat gagnant:
capable de « pardonner »



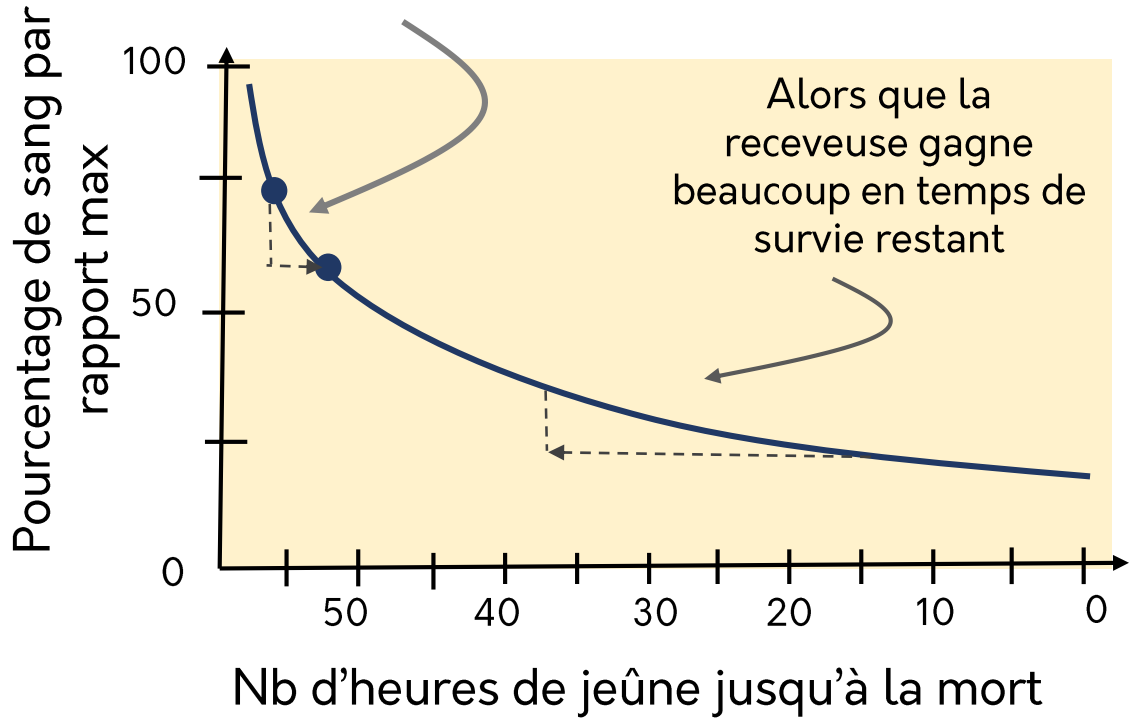
Coopération chez la chauve-souris vampire

- Repas sanguin d'oiseaux ou mammifères
- Pas de repas sanguin dans 33% des nuits
- Pas plus de 2 nuits consécutives sans mourir
- Une autre chauve-souris leur régurgite du sang



Dilemme du prisonnier chez la chauve-souris vampire

Une donneuse perd
relativement peu en
temps de survie restant

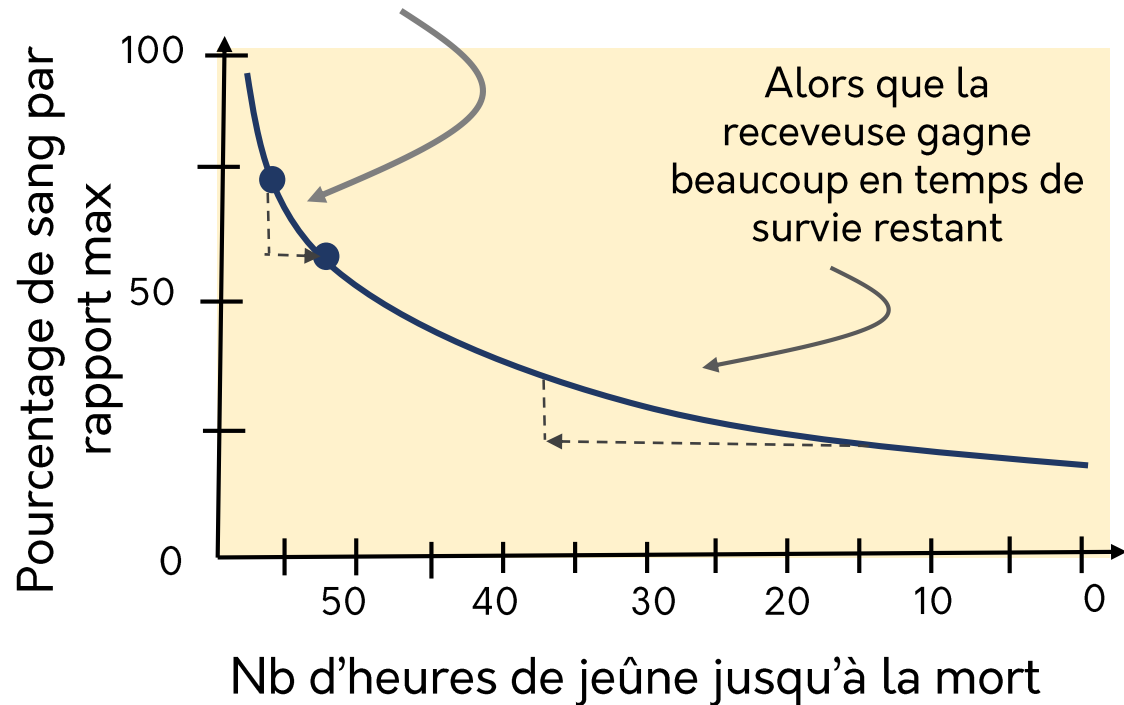


Jeu à somme
non nulle



Dilemme du prisonnier chez la chauve-souris vampire

Une donneuse perd
relativement peu en
temps de survie restant



- Elles vivent plus de 10 ans
- Forment des colonies durables
- Elles ont besoin d'un repas regurgité assez souvent
- Elles se reconnaissent

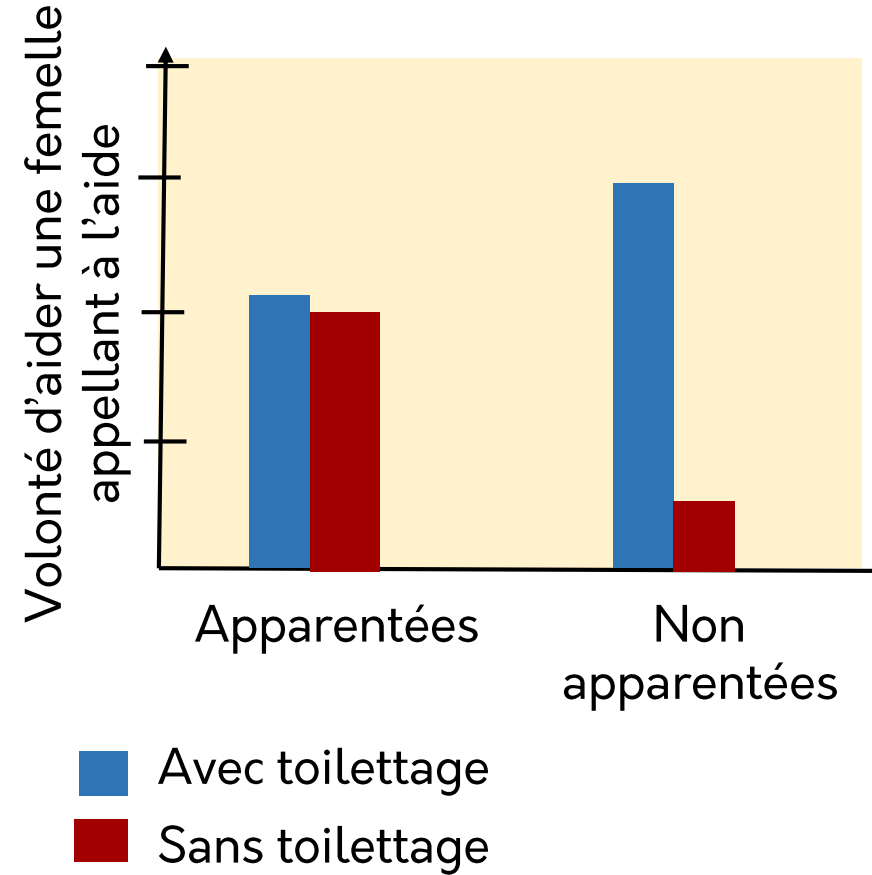


Guerre de tranchée

- Tirs sur cibles toujours identiques
- Tirs à des moments prédictibles
- Coopération mise en place sans communication

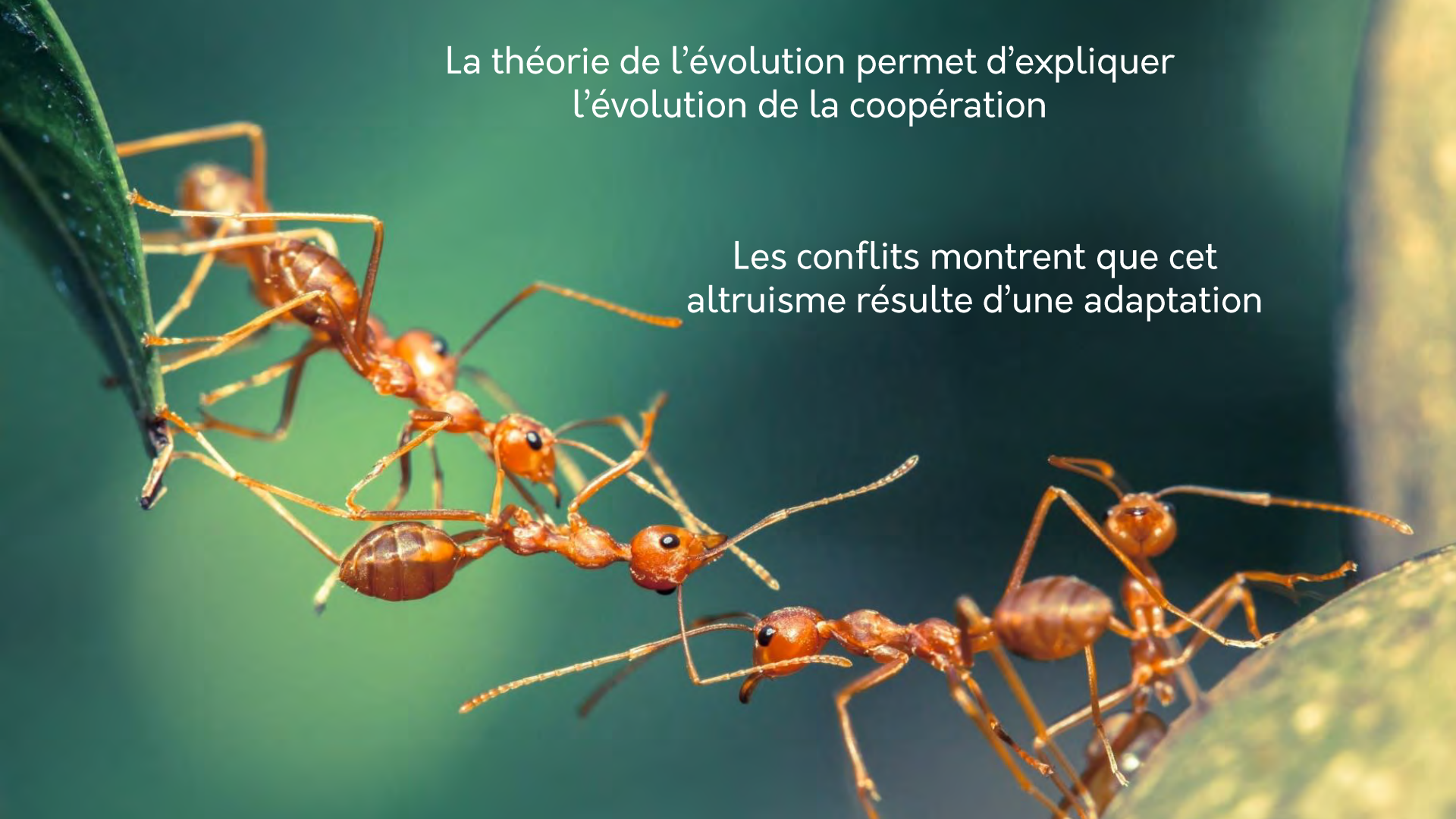


Coopération



La théorie de l'évolution permet d'expliquer
l'évolution de la coopération

Les conflits montrent que cet
altruisme résulte d'une adaptation

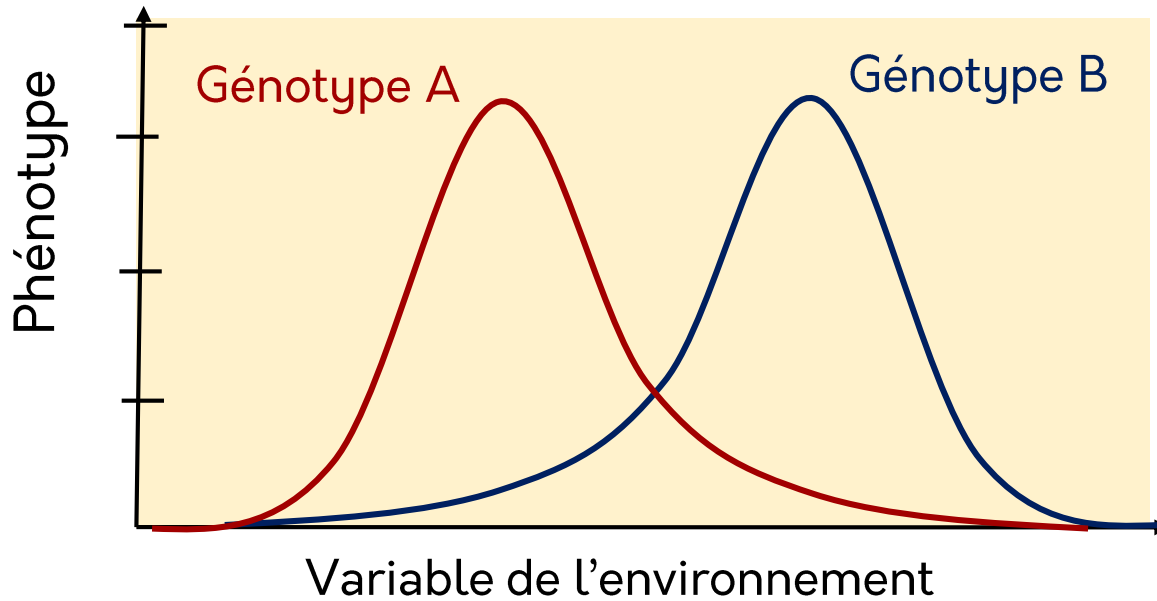




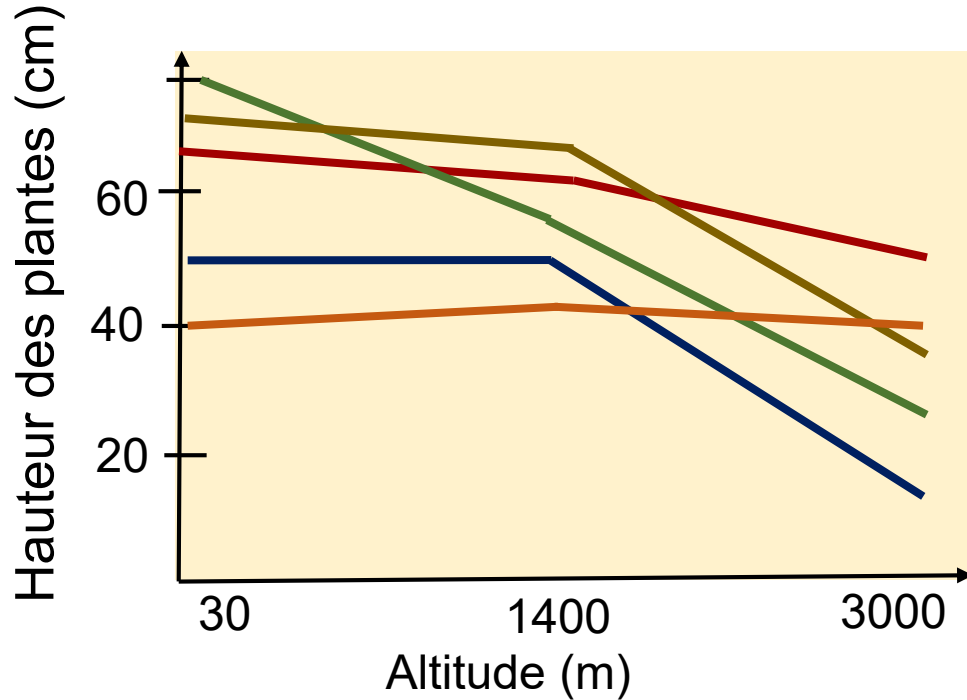
Mauvaises interpretations possibles

“Tout comportement est génétiquement déterminé et il n’y a pas de place à l’acquis ou au libre arbitre”

On ne peut pas séparer inné et acquis pour un individu donné :
un caractère n'est qu'une interaction entre le génotype et l'environnement

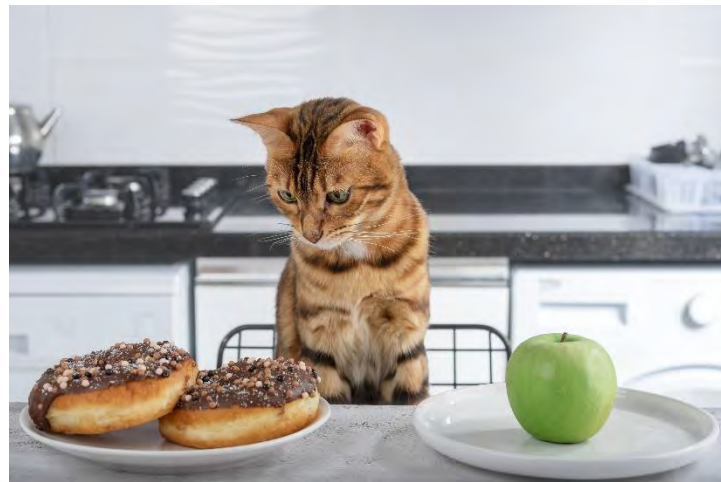
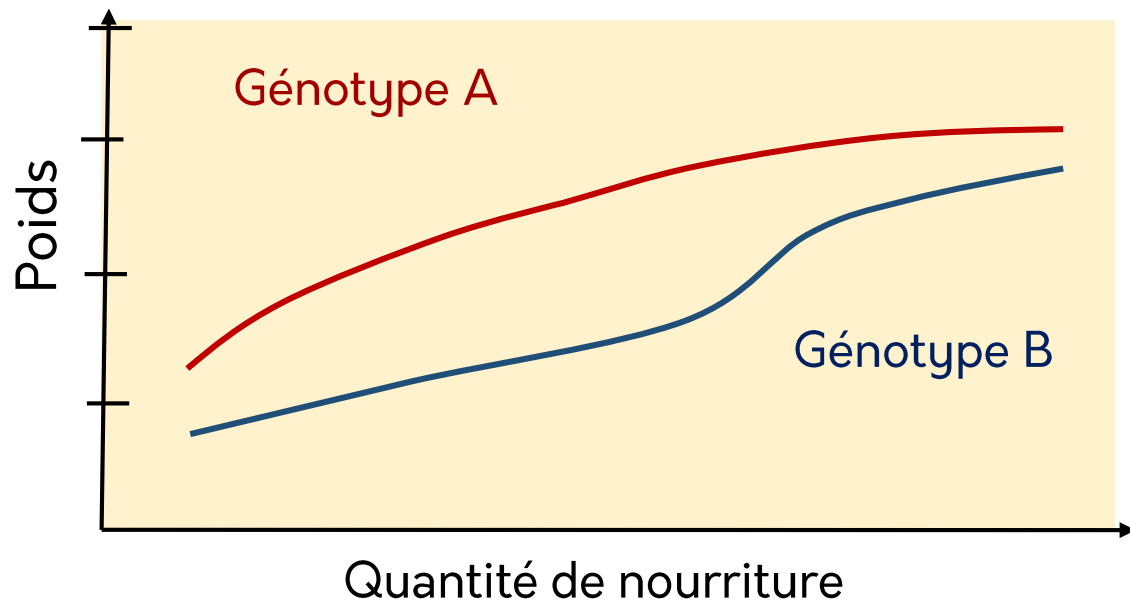


On ne peut pas séparer inné et acquis pour un individu donné :
un caractère n'est qu'une interaction entre le génotype et l'environnement



Mauvaises interpretations

“Tout comportement est génétiquement déterminé et il n’y a pas de place à l’acquis”



Mauvaises interprétations

“Tout comportement est génétiquement déterminé et il n’y a pas de place à l’acquis”

Galactosémie:
anomalie du métabolisme
du galactose

- 1 seul gène 2 allèles
- Tout génétique... ?



Galactosémie: anomalies du métabolisme du galactose

- Tout génétique... ?
- Mais il suffit de ne plus boire de lait pour ne plus être malade...
- Interaction génotype x phénotype

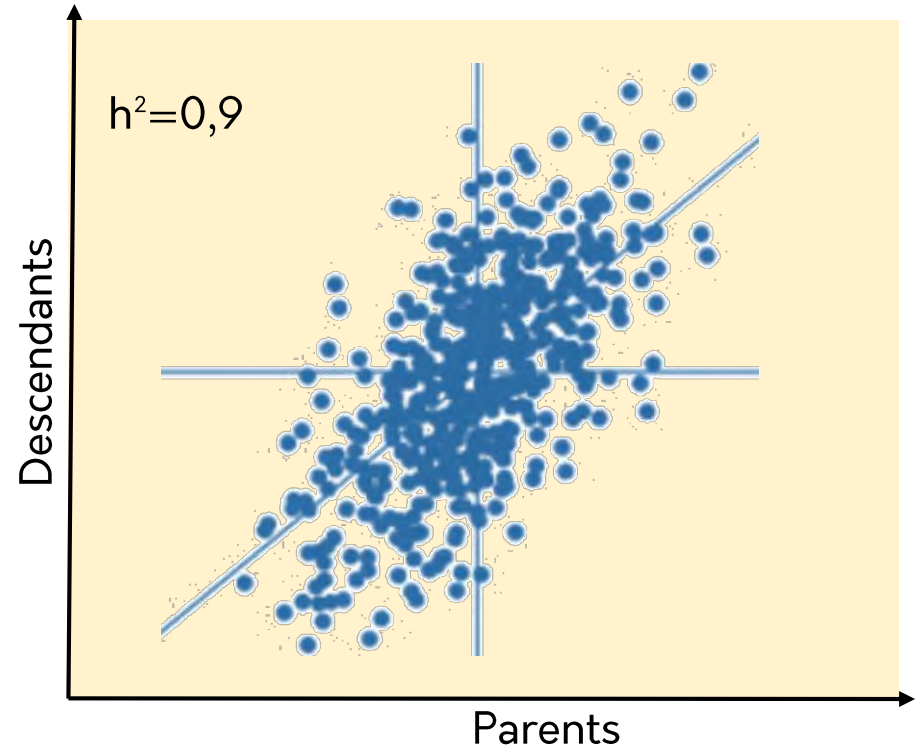
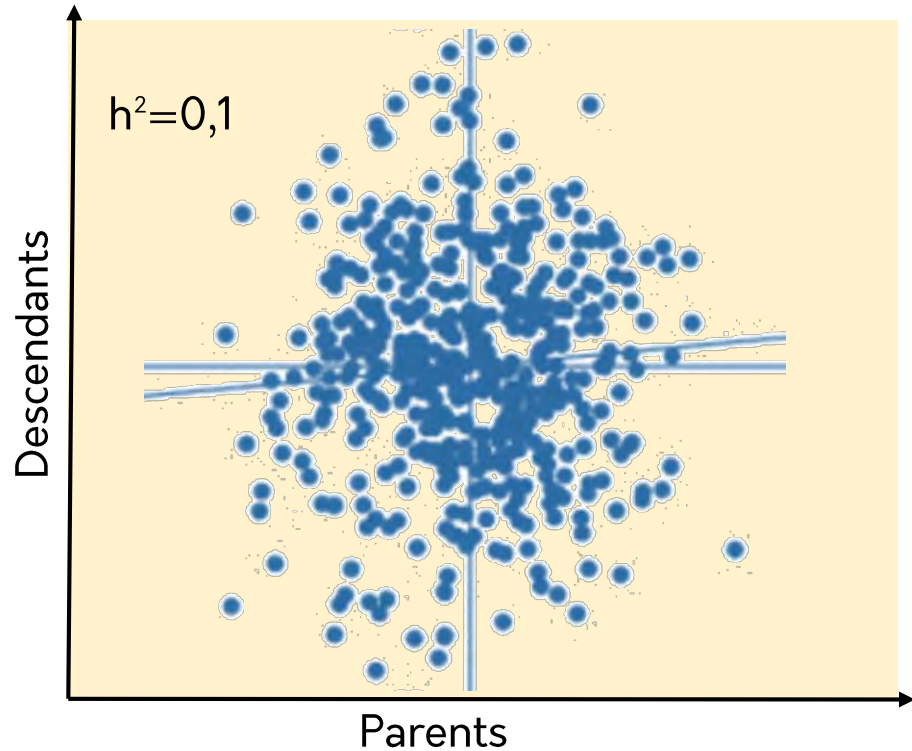




Mauvaises interprétations
“Tout comportement est
génétiquement déterminé
et il n’y a pas de place à
l’acquis”

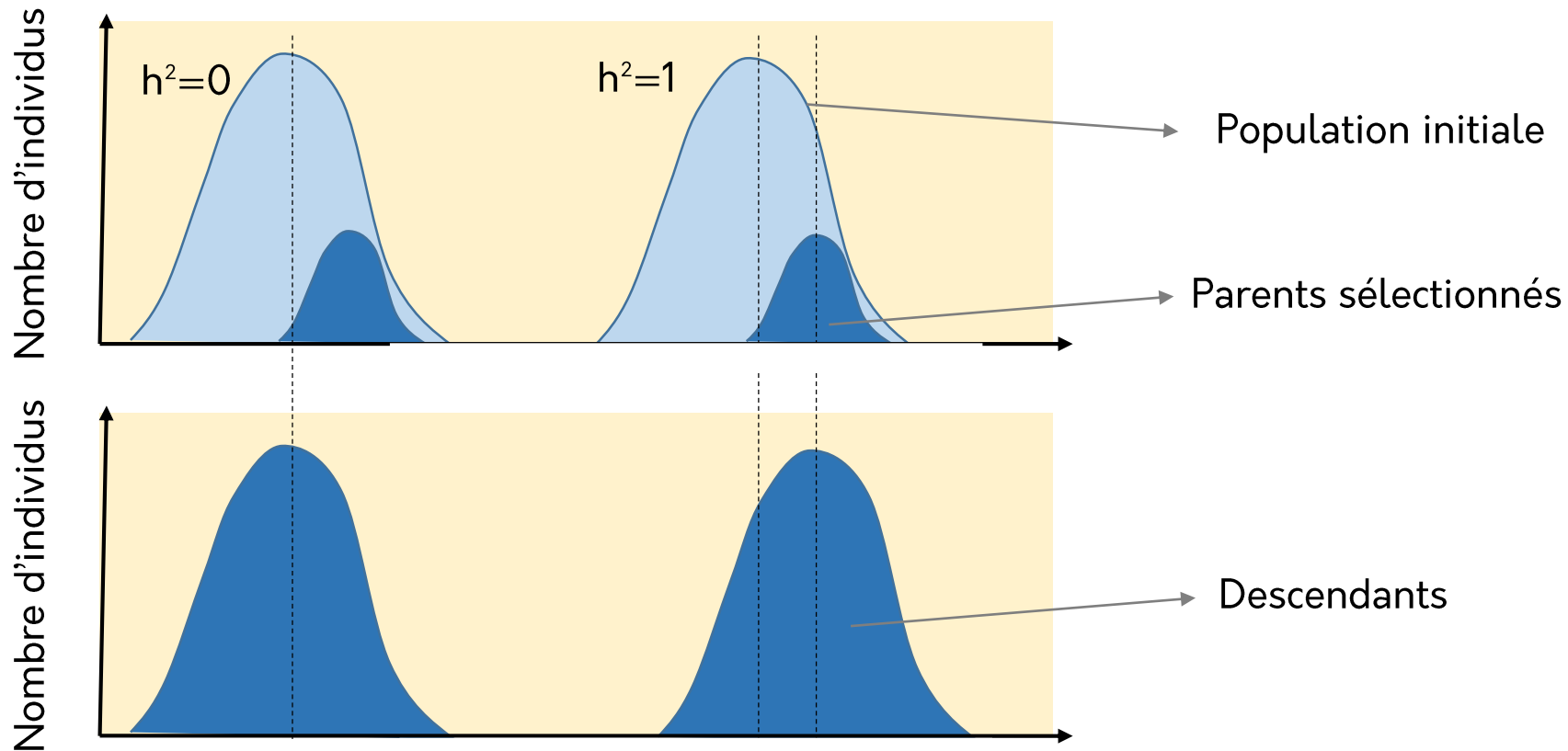
Composante génétique dans la variation inter-individuelle

Héritabilité $h^2 = \text{Variance}_{\text{Génétique}} / \text{Variance}_{\text{Phénotypique}}$



Composante génétique dans la variation inter-individuelle

$$\text{Héritabilité } h^2 = \frac{\text{Variance}_{\text{Génétique}}}{\text{Variance}_{\text{Phénotypique}}}$$



Héritabilité de la production de lait dans un troupeau de vaches Holstein dont la moitié est bien nourrie et l'autre moitié nourrie au minimum?



Héritabilité de la production de lait dans un troupeau de vaches Holstein
dont la moitié est bien nourrie et l'autre moitié nourrie au minimum?
 $h^2=0$ Toutes les différences inter-individus sont environnementales!



Héritabilité de la production de lait dans un troupeau de vaches bien nourries dont la moitié est Holstein et l'autre moitié des charolaises?



Héritabilité de la production de lait dans un troupeau de vaches bien nourries dont la moitié est Holstein et l'autre moitié des charolaises?

$h^2=1$ Toutes les différences inter-individus sont génétiques!





Héritabilité du
nombre de jambes?



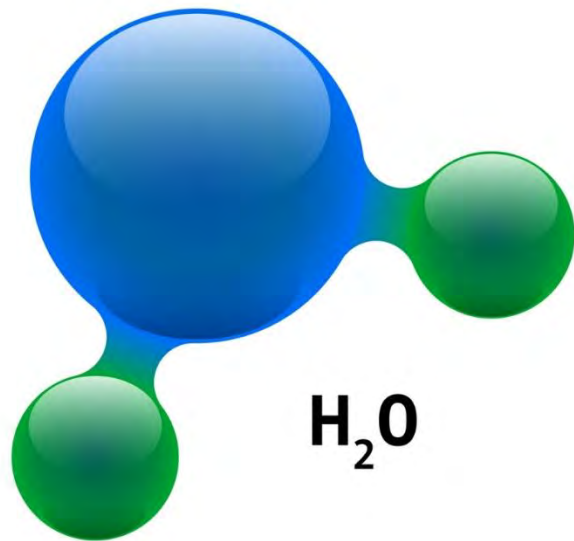
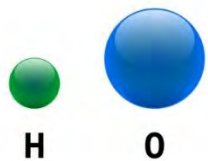
Héritabilité du nombre de
jambes?
 $h^2=0$

Héritabilité \neq
génétiquement déterminé

Doit-on avoir peur d'une
héritabilité du QI de 20%?



Propriétés émergentes



Mauvaises interprétations

“La sélection peut faire évoluer n’importe quel comportement”



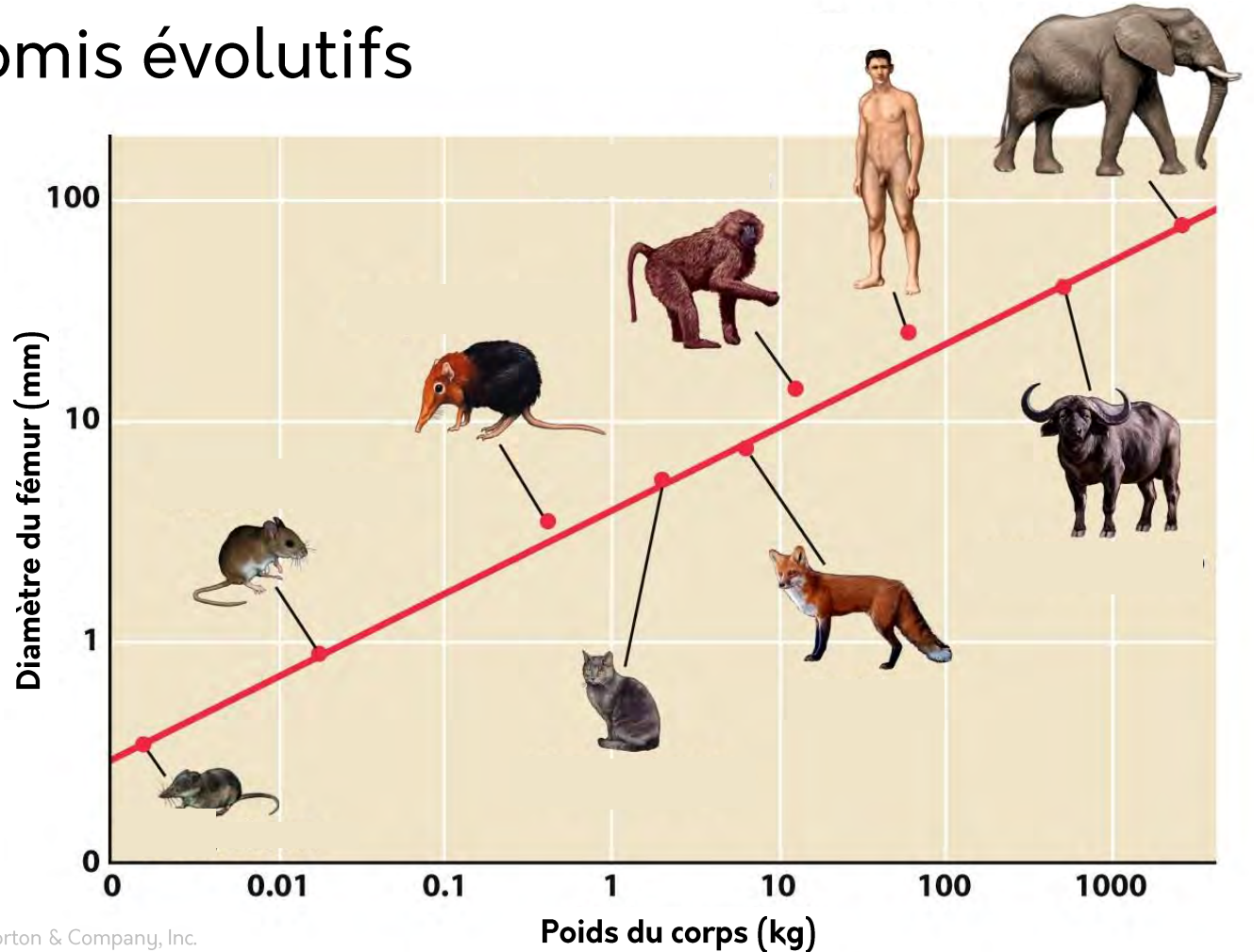
“Evolution” Bergstrom and Dugatkin, WW Norton & Company, Inc.

Compromis évolutifs

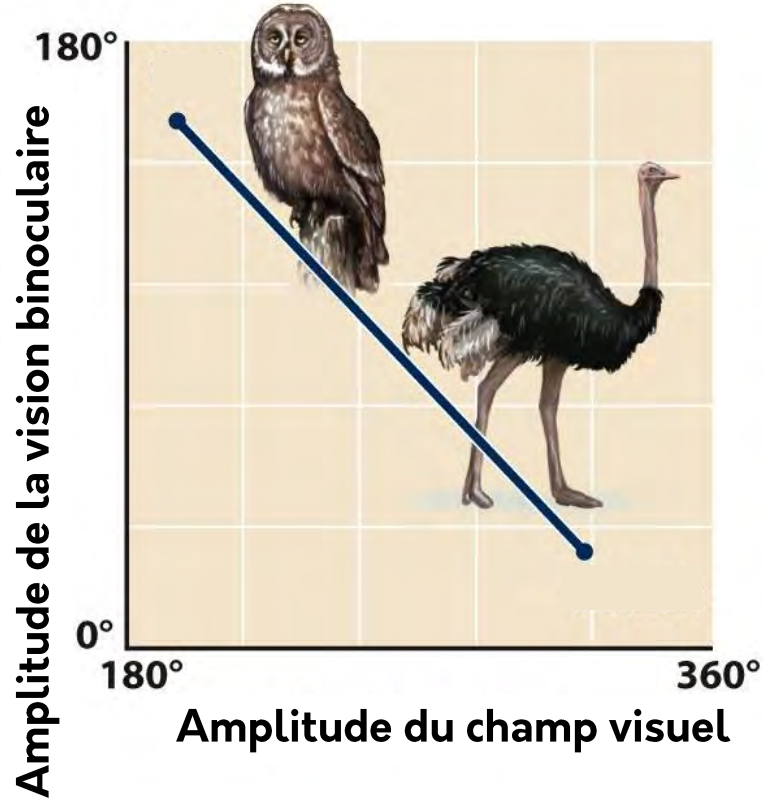


"Evolution" Bergstrom and Dugatkin, WW Norton & Company, Inc.

Compromis évolutifs



Compromis évolutifs



Hibou

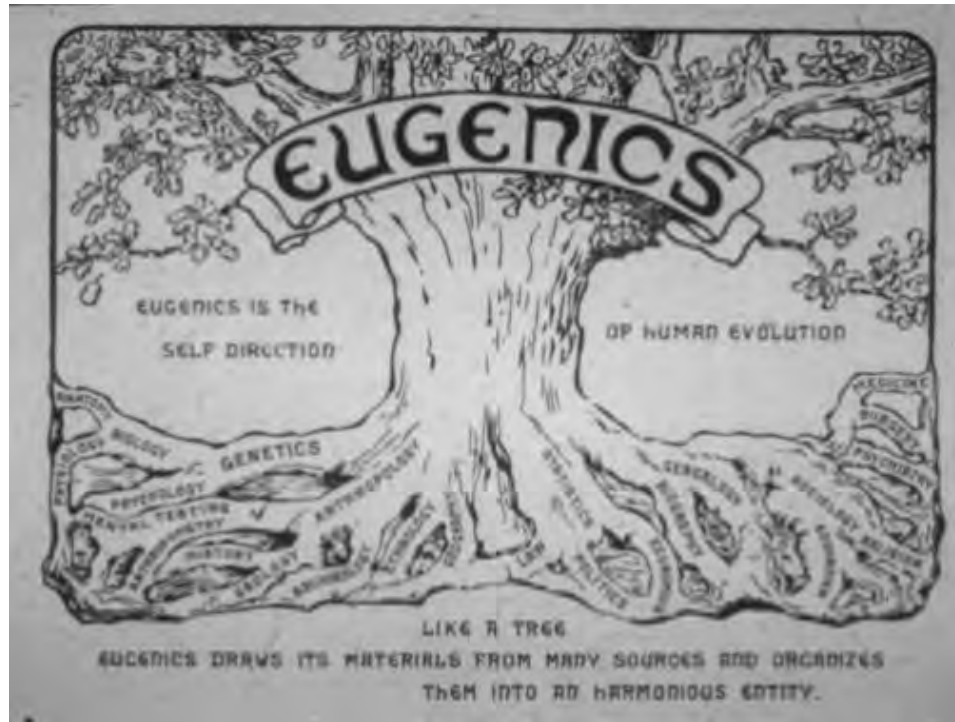


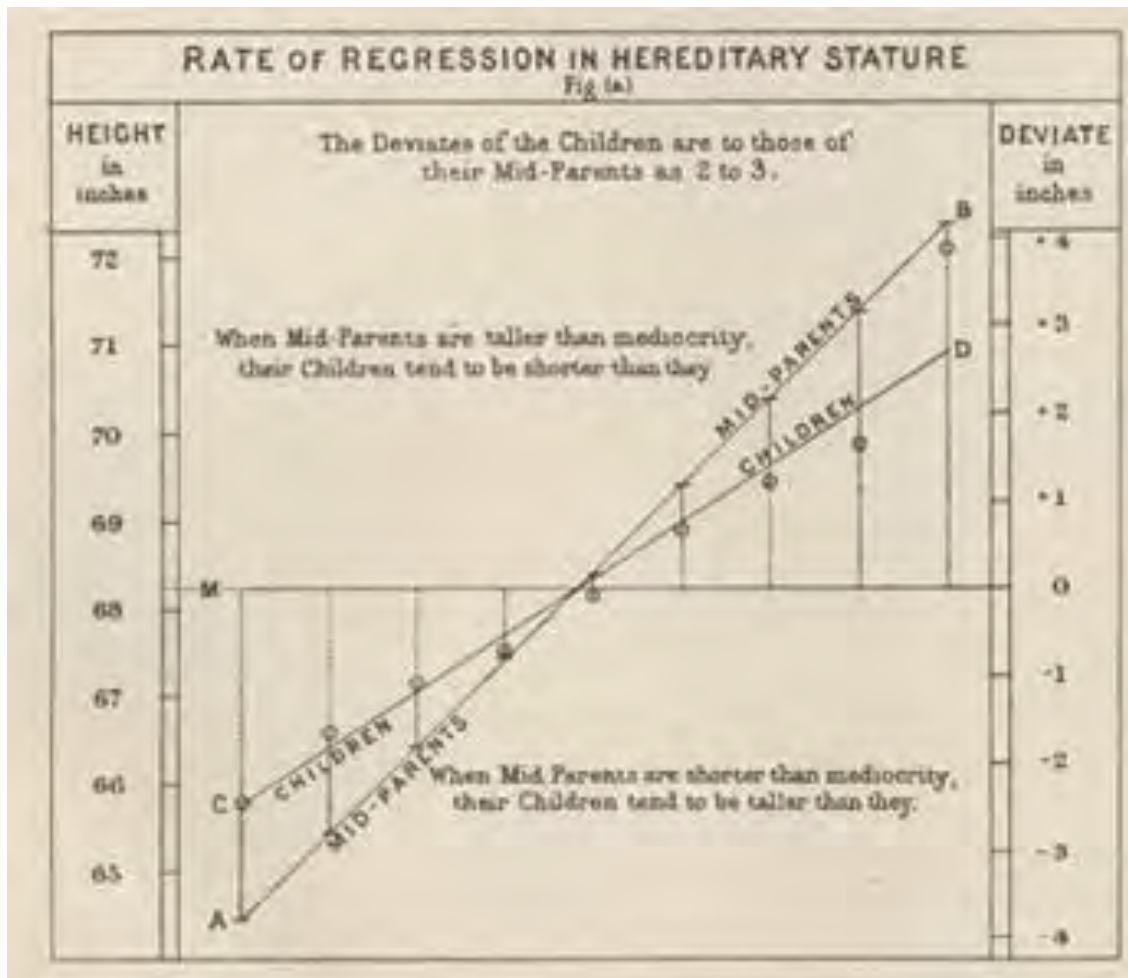
Autruche



Mauvaises interprétations possibles

“La société doit aider/suppléer la sélection naturelle”



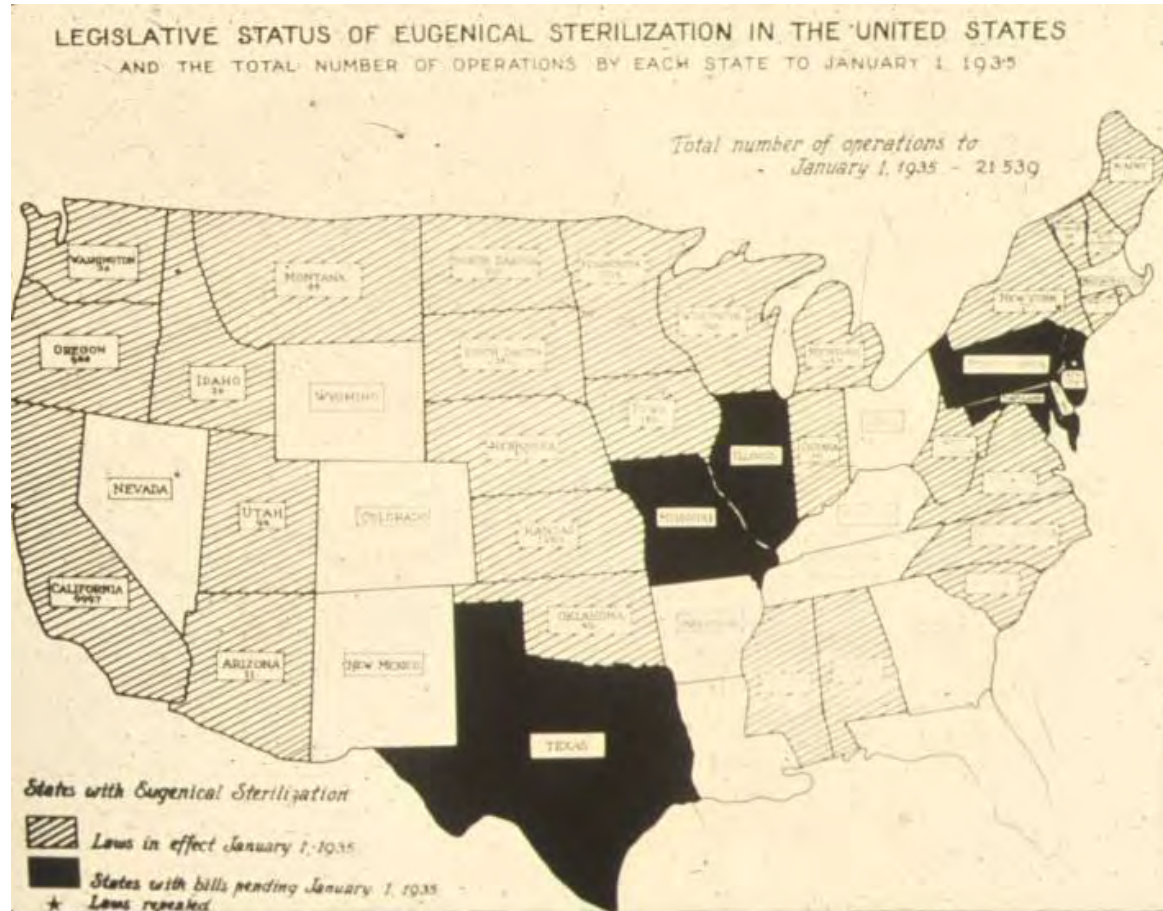


Sir Francis Galton

400 000 stérilisations dans
l'Allemagne nazie

60 000 aux Etats-Unis

Encore plus en proportion dans
les pays du nord de l'Europe



Procès de Nuremberg



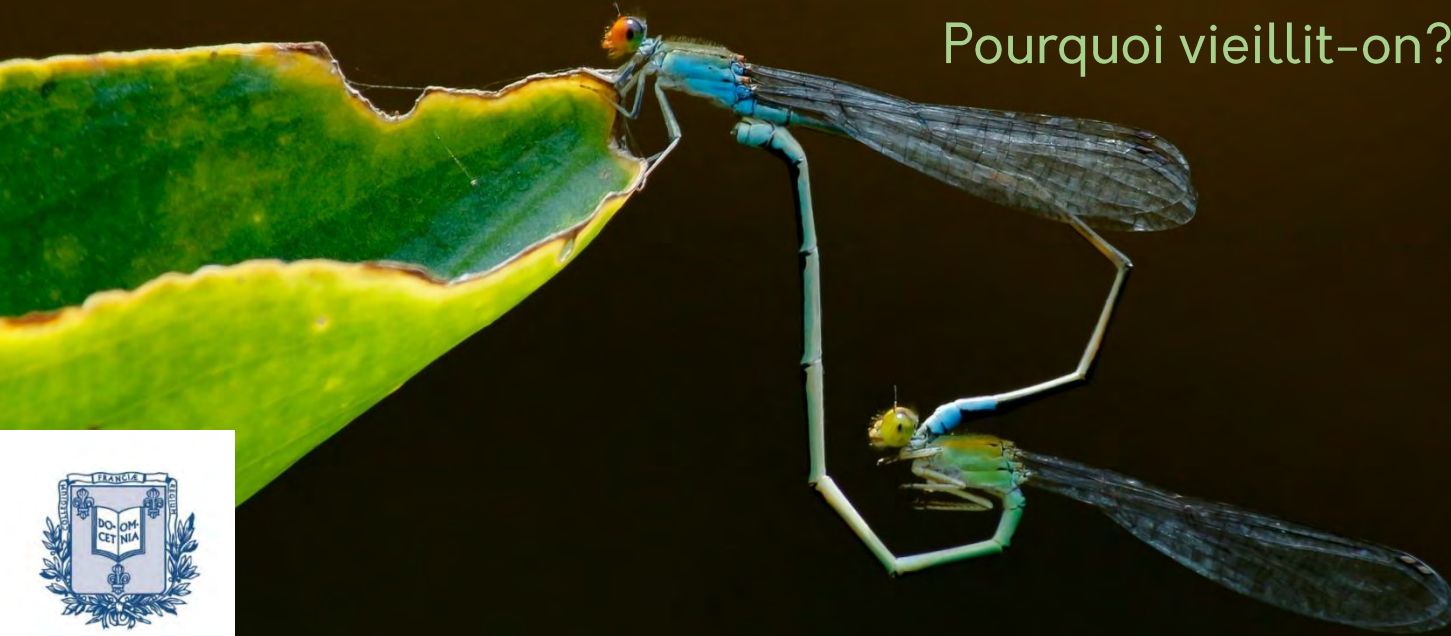
Evolution des comportements

Pourquoi la reproduction sexuée?

Pourquoi des mâles et des femelles?

Pourquoi autant de mâles que de femelles?

Pourquoi vieillit-on?



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —



Fondation
Jean-François et Marie-Laure
de Clermont-Tonnerre



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —



Fondation
Jean-François et Marie-Laure
de Clermont-Tonnerre