

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

"Love is the answer.
But while you're waiting for the answer,
sex raises some pretty interesting questions"
Woody Allen



Pourquoi la reproduction sexuée?



Pourquoi la
reproduction sexuée?



Pourquoi la reproduction sexuée?



MedievalRich

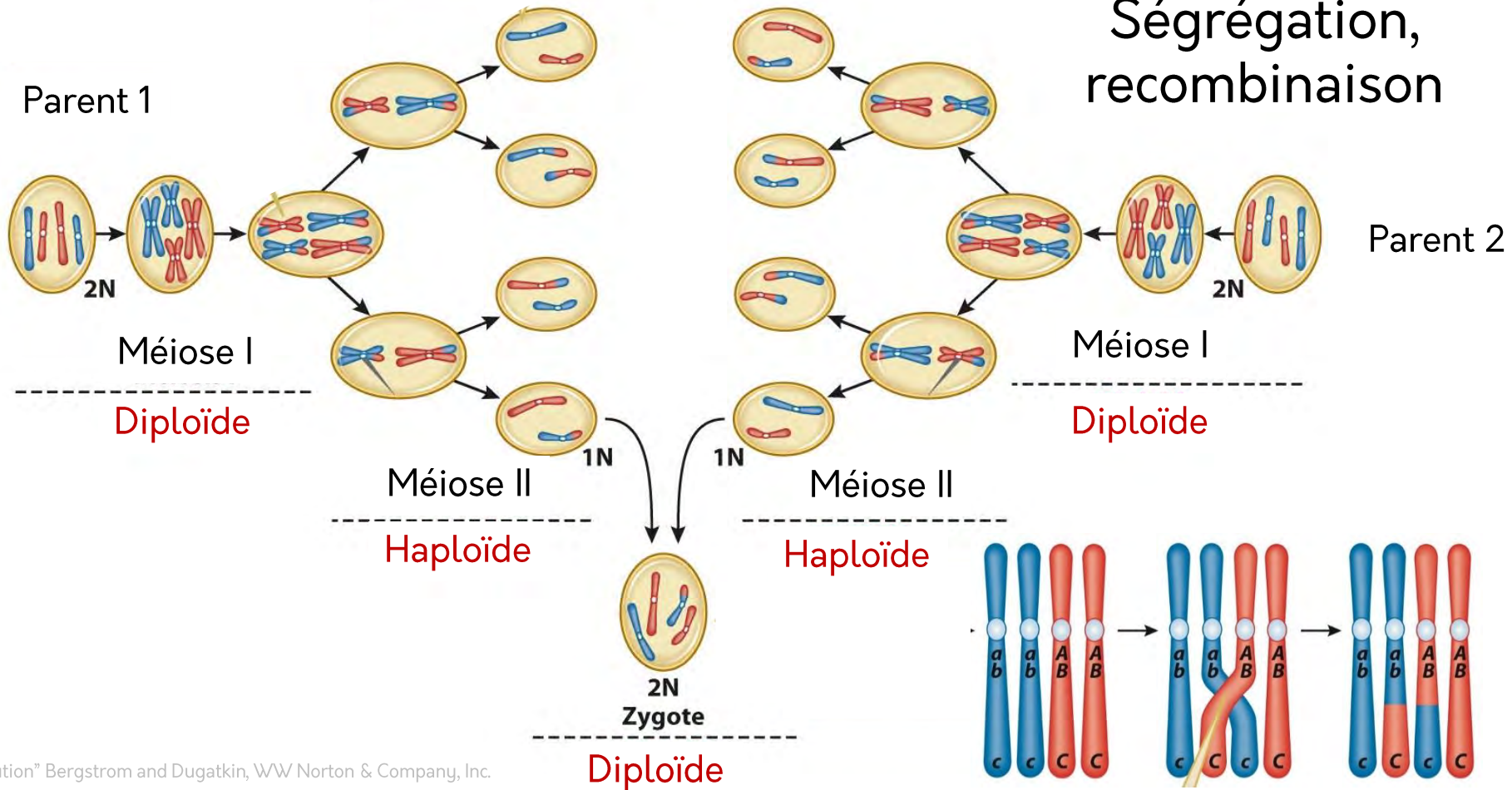


Rkitko

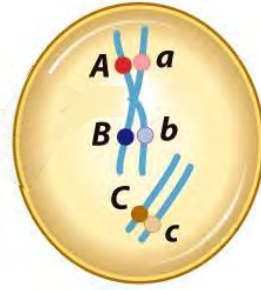


André Karwath

C'est quoi la reproduction sexuée ?

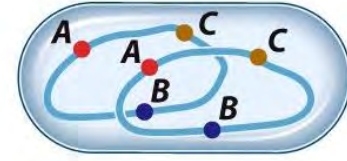
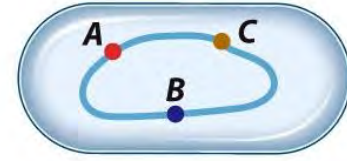


Reproduction
sexuée



la reproduction sexuée
casse les associations
génétiques

Reproduction
clonale



Pourquoi la reproduction sexuée?

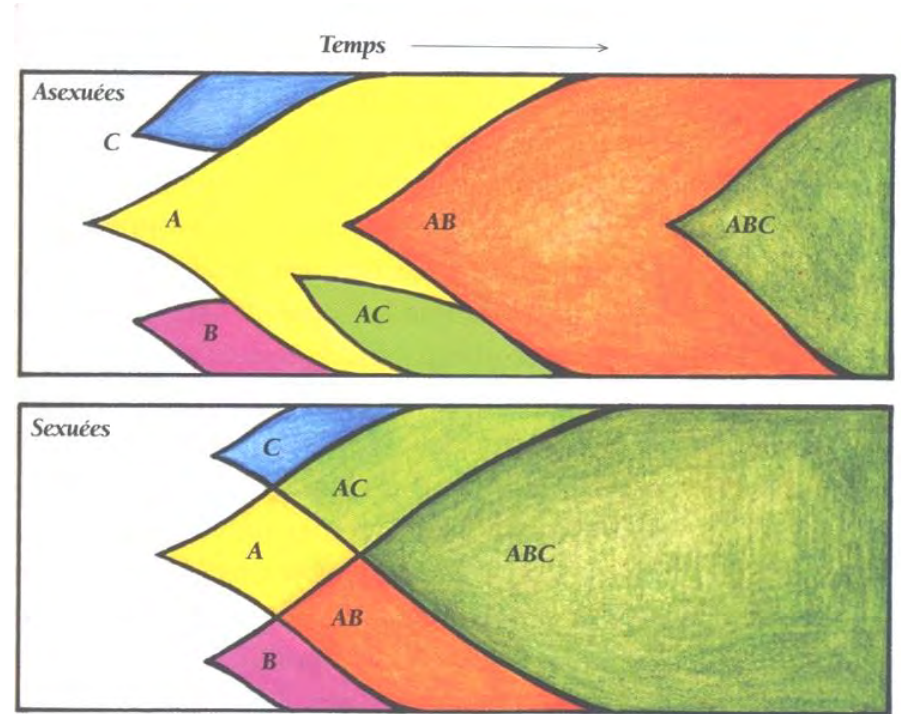
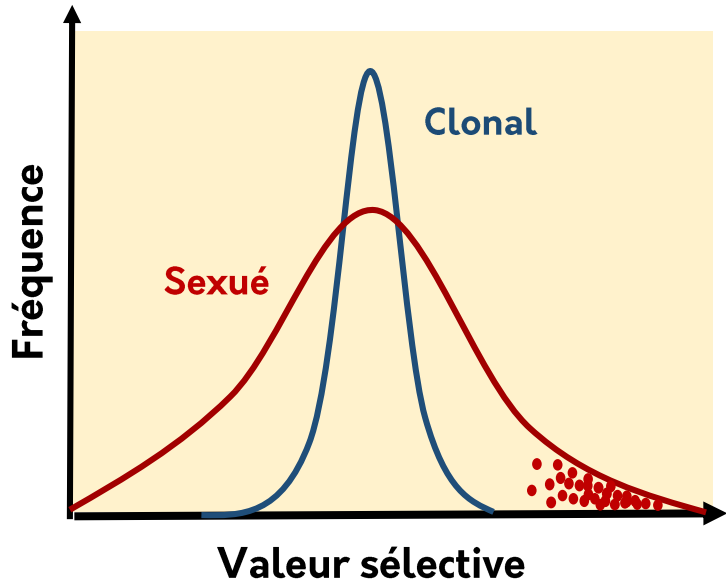
Pour générer de la diversité?

Pour le bien
de l'espèce?



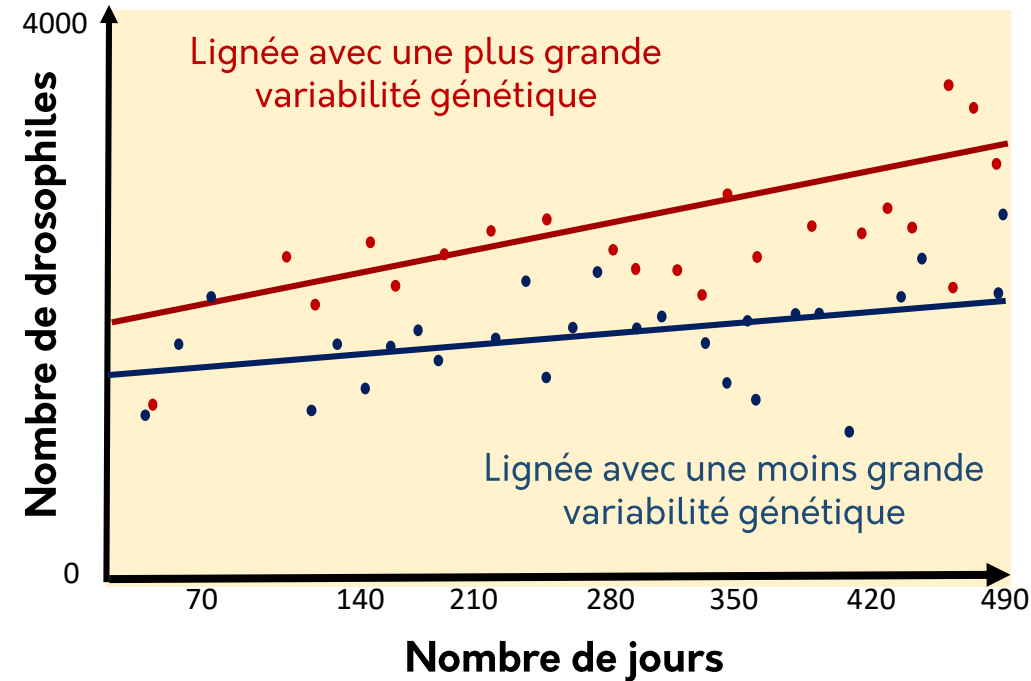
Pourquoi la reproduction sexuée?

Pour générer de la diversité et faciliter l'adaptation?



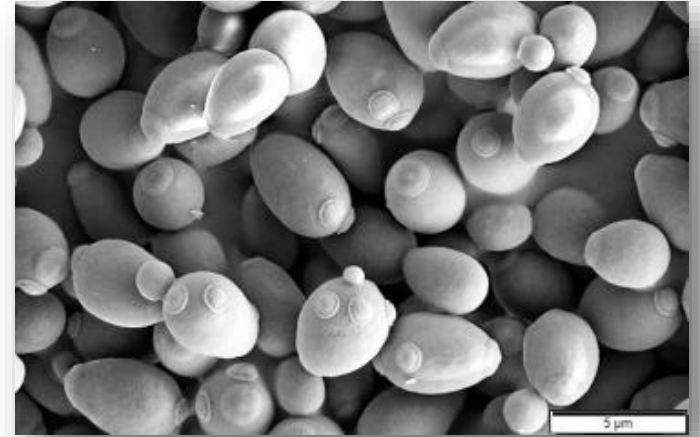
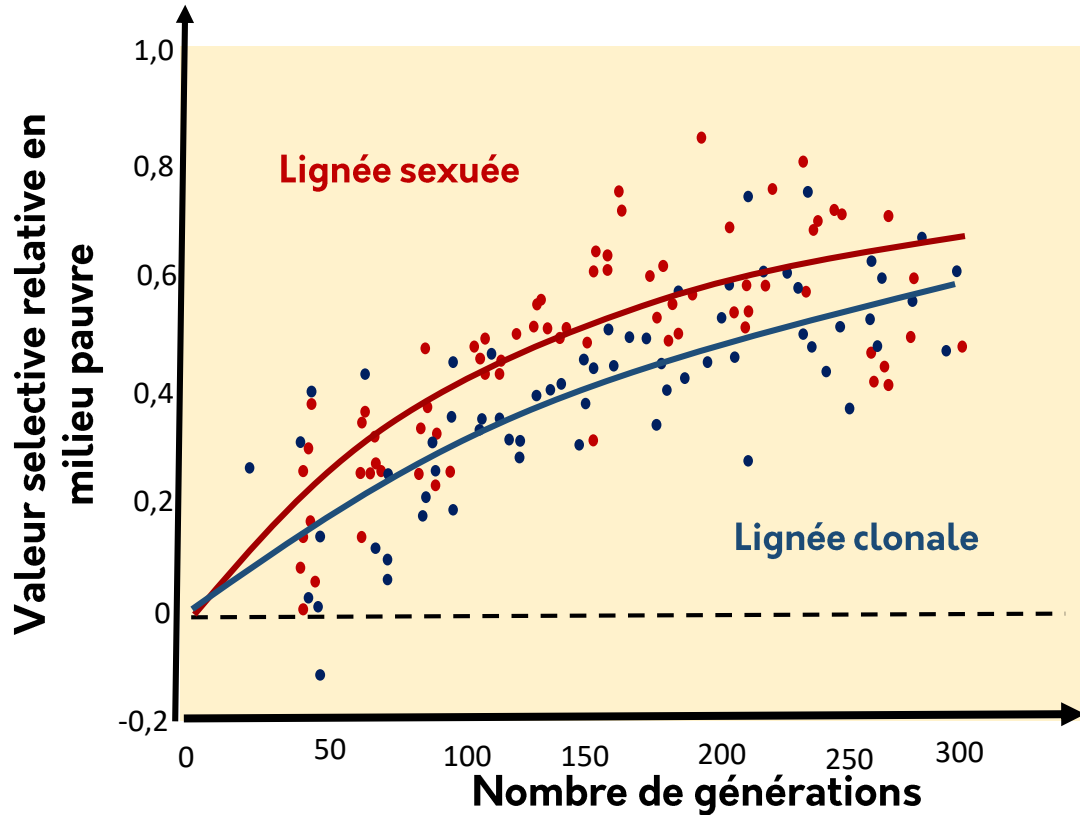
Pourquoi la reproduction sexuée?

Pour générer de la diversité et faciliter l'adaptation?



Pourquoi la reproduction sexuée?

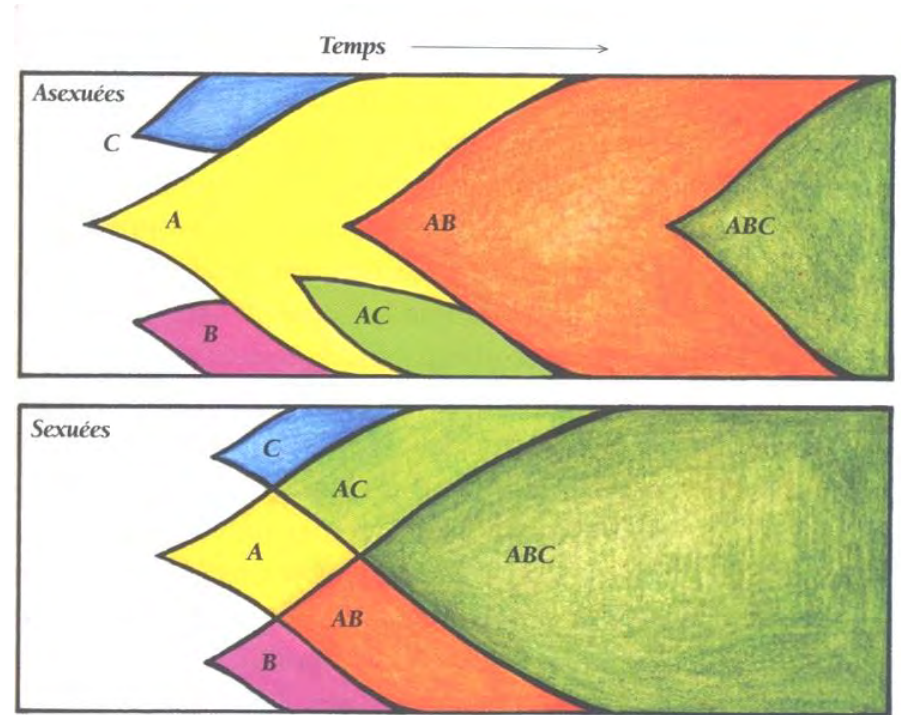
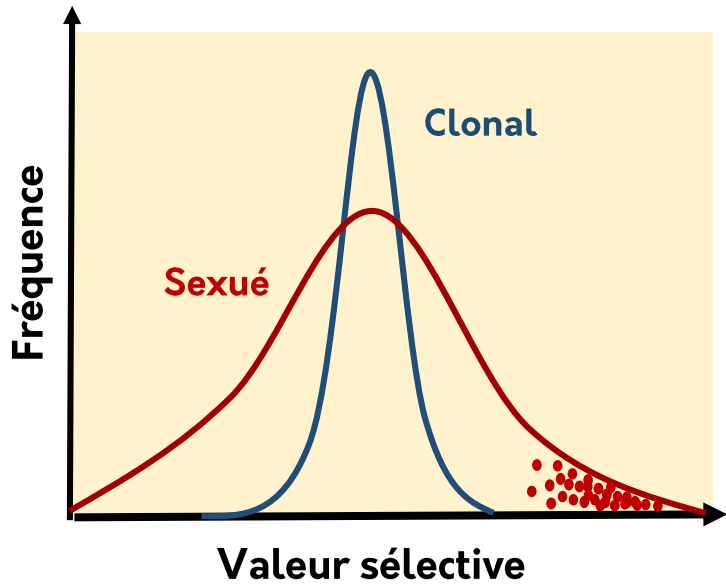
Pour générer de la diversité et faciliter l'adaptation?



Mogana Das Murtey and Patchamuthu Ramasamy

Pourquoi la reproduction sexuée?

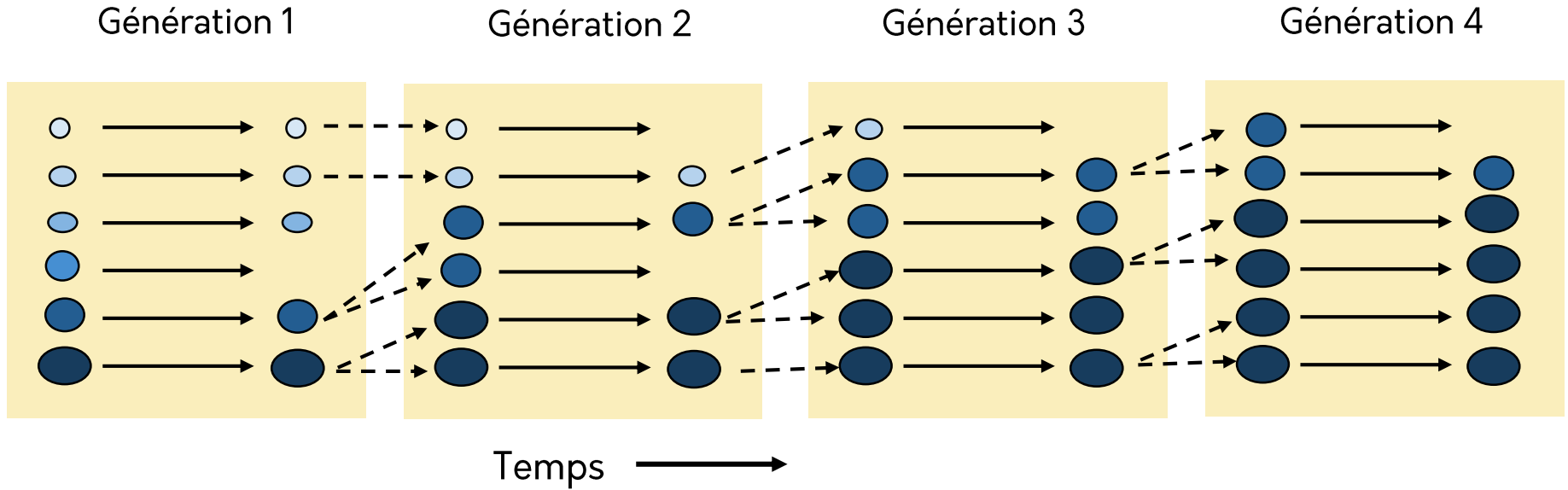
Pour générer de la diversité et faciliter l'adaptation?



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

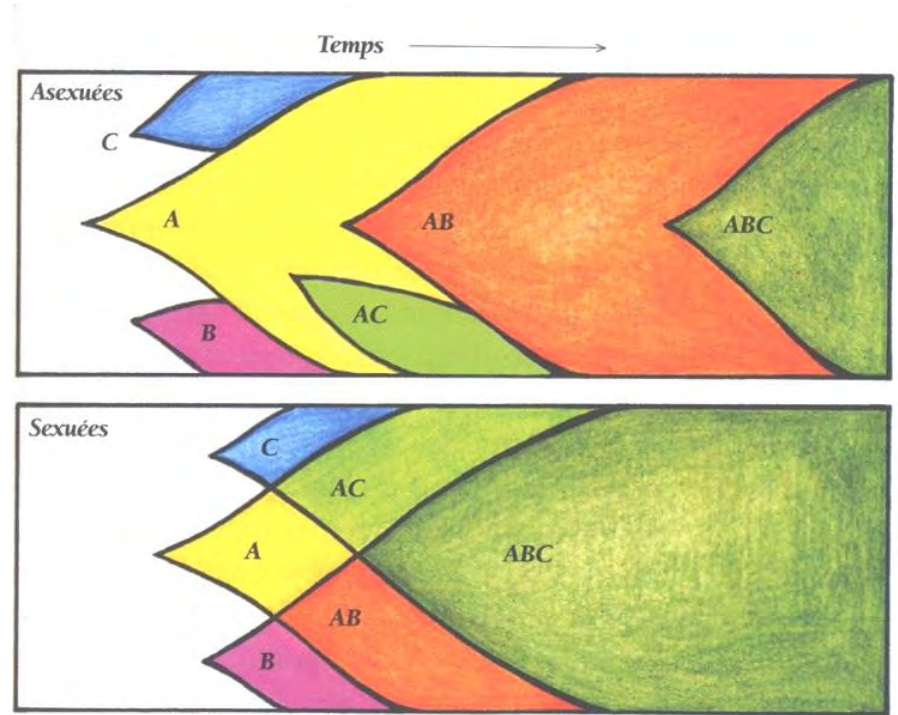
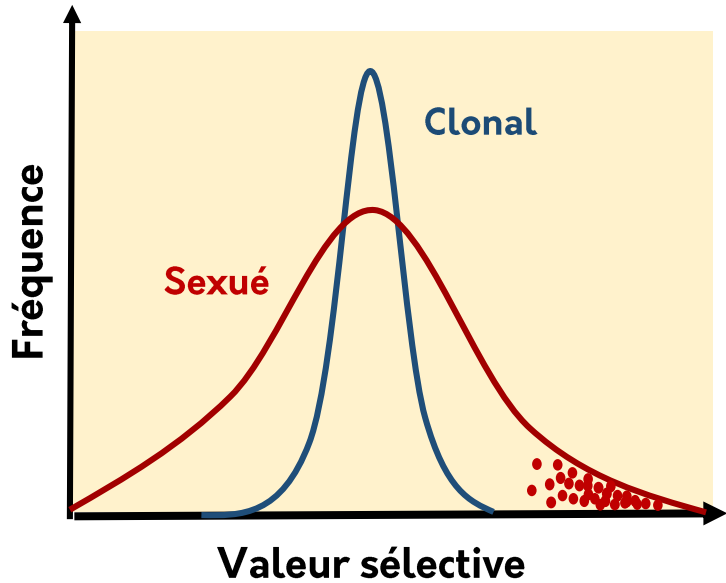


Sélection naturelle



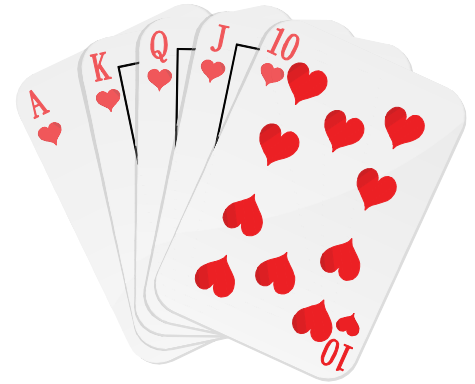
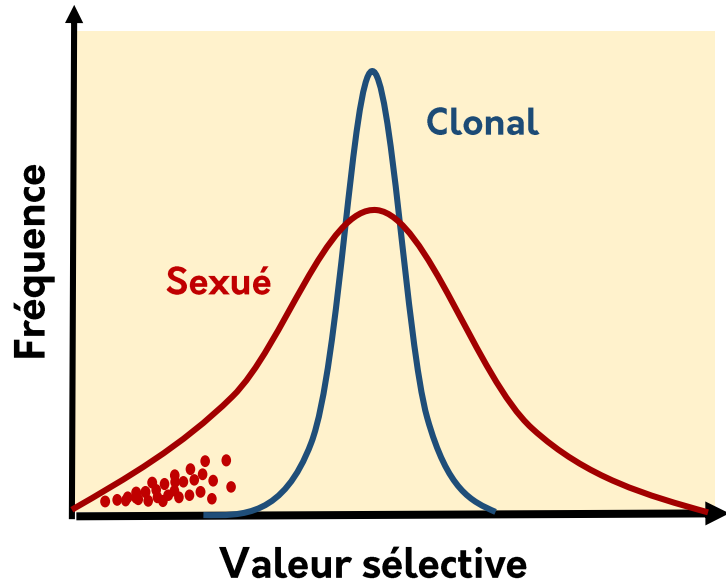
Pourquoi la reproduction sexuée?

Une plus grande variation est créée au cours de la reproduction sexuée, mais est-ce avantageux à court terme?



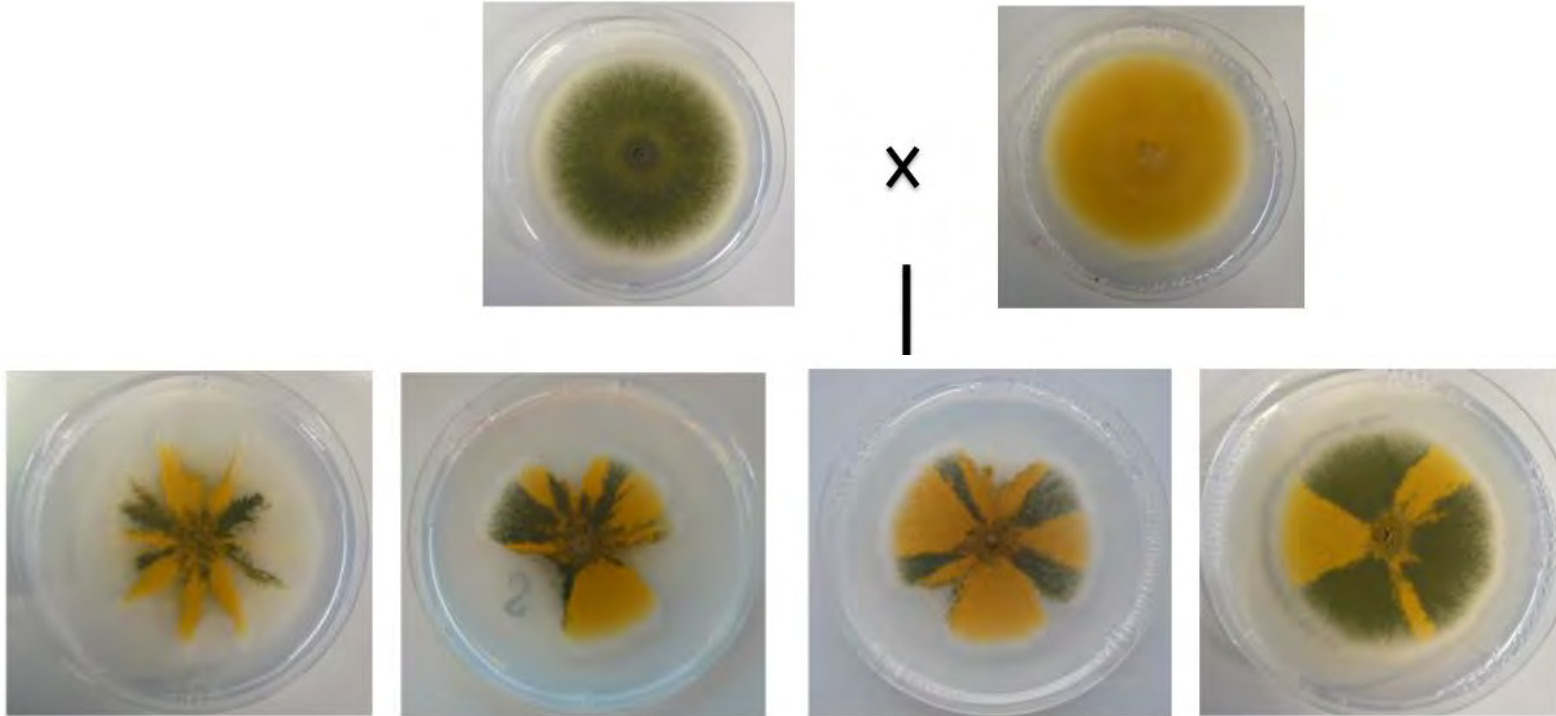
Pourquoi la reproduction sexuée?

Une plus grande variation est créée au cours de la reproduction sexuée, mais est-ce avantageux à court terme?



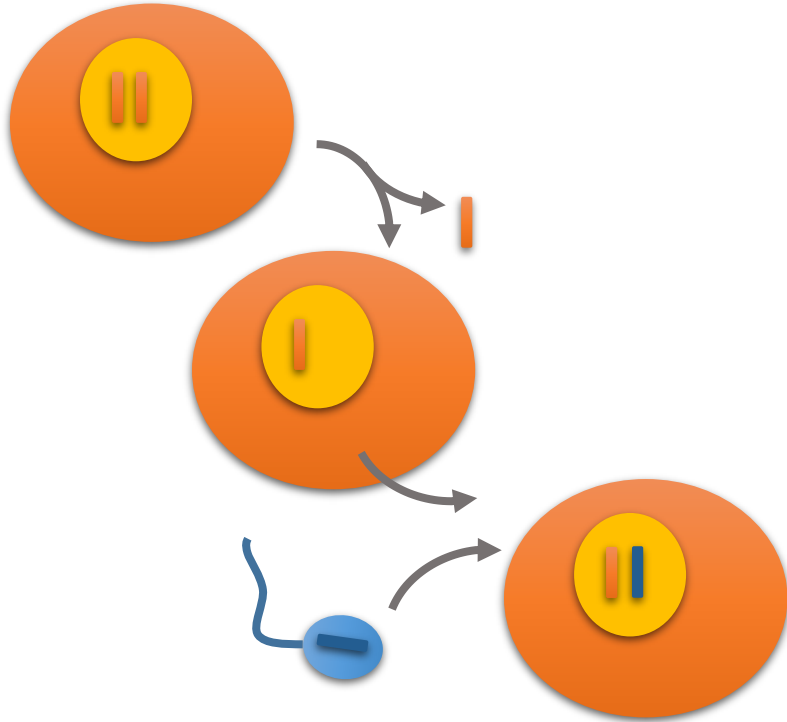
Pourquoi la reproduction sexuée?

Une plus grande variation est créée au cours de la reproduction sexuée,
mais est-ce avantageux à court terme?



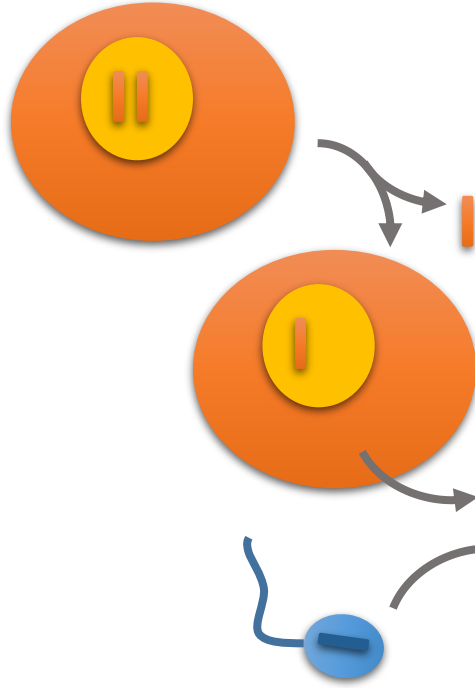
Pourquoi la reproduction sexuée?

Femelle sexuée

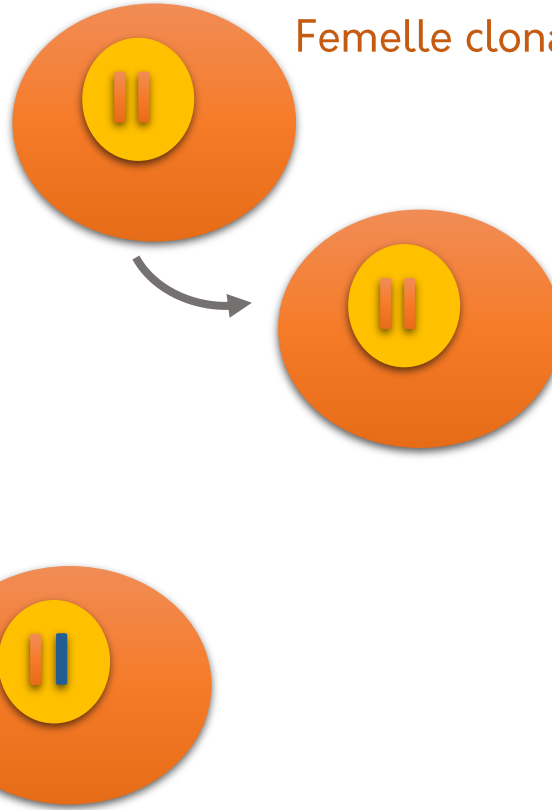


Pourquoi la reproduction sexuée?

Femelle sexuée

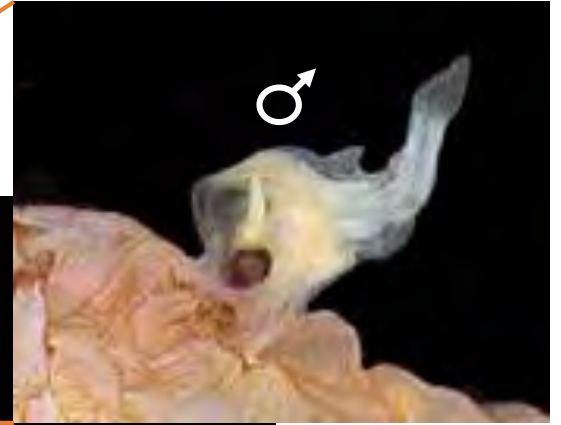
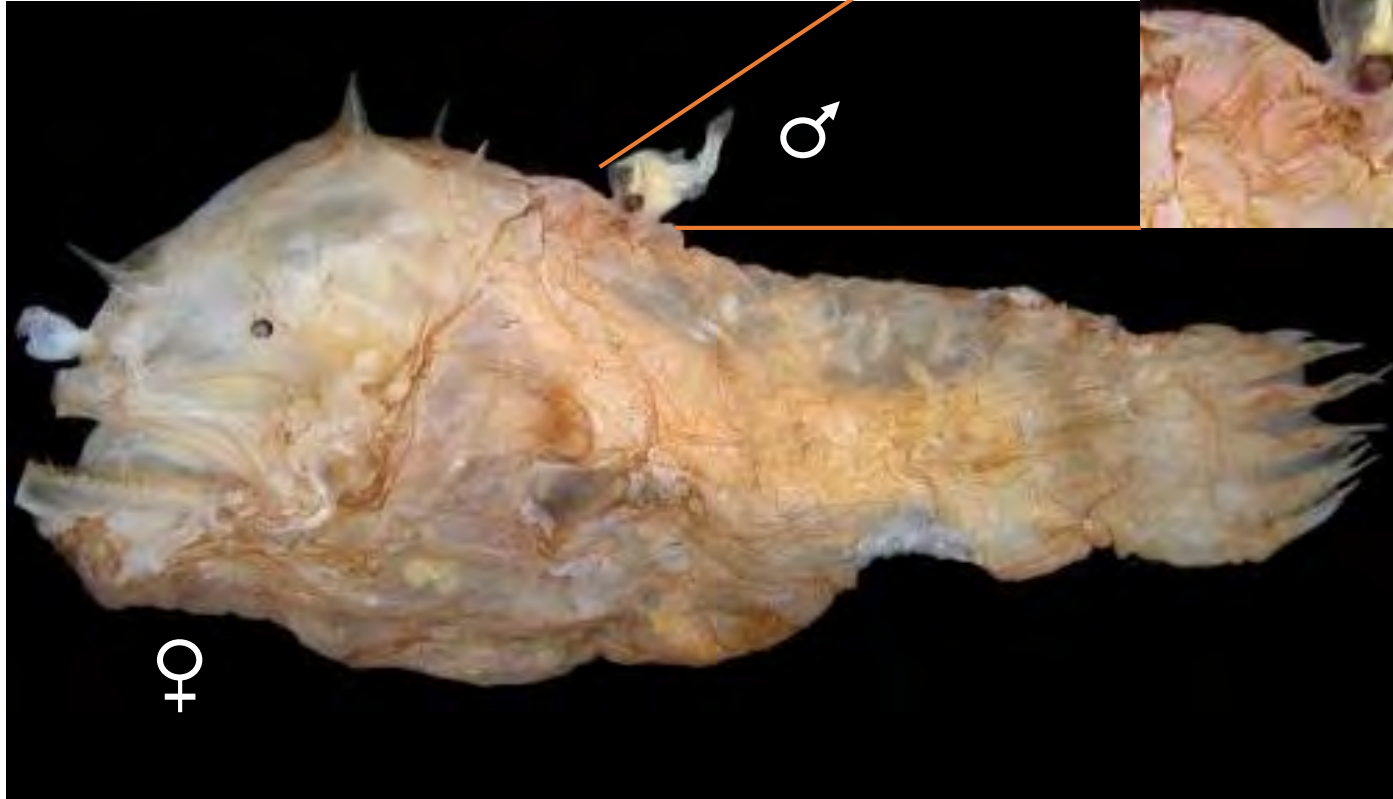


Femelle clonale



Pourquoi la reproduction sexuée?

Le « coût des mâles »

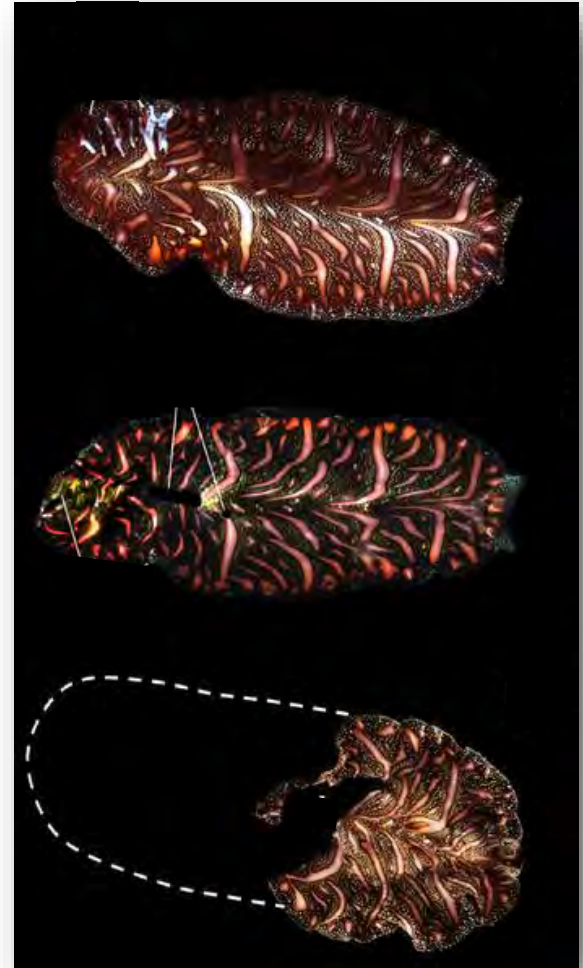


Pourquoi la reproduction sexuée?

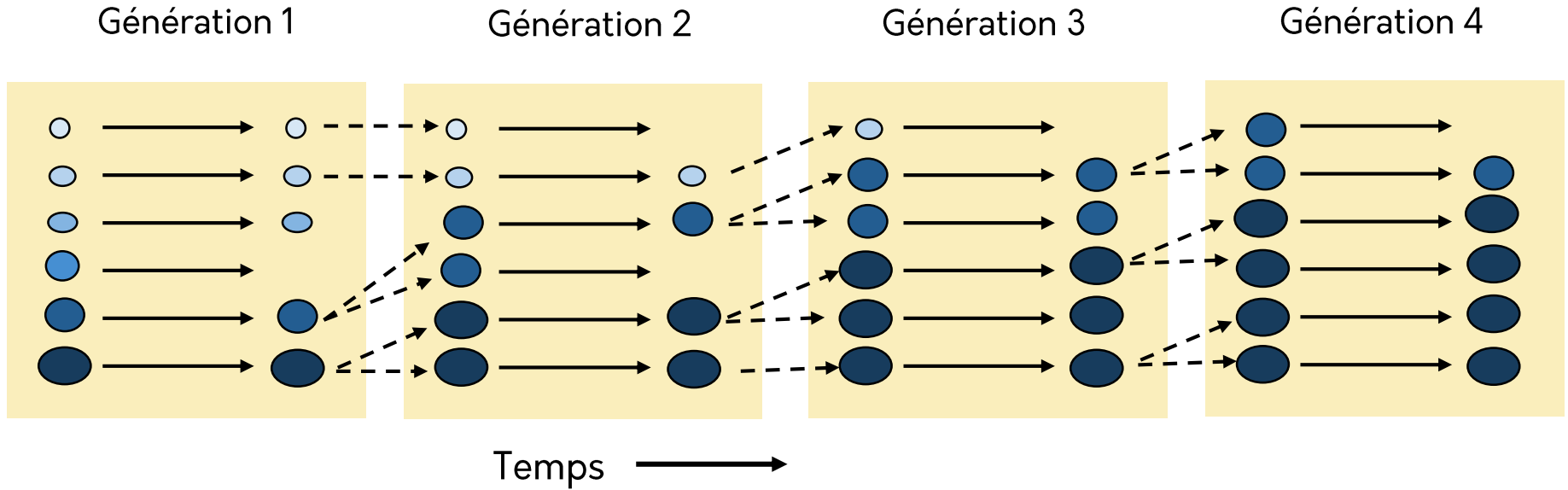
Le « coût des mâles »



Bataille de sperme chez
Pseudobiceros bedfordi
(vers plats hermaphrodites)

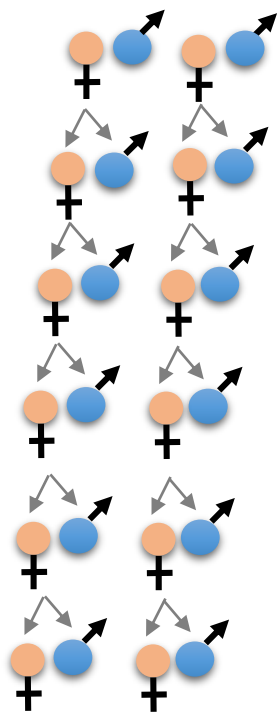


Sélection naturelle

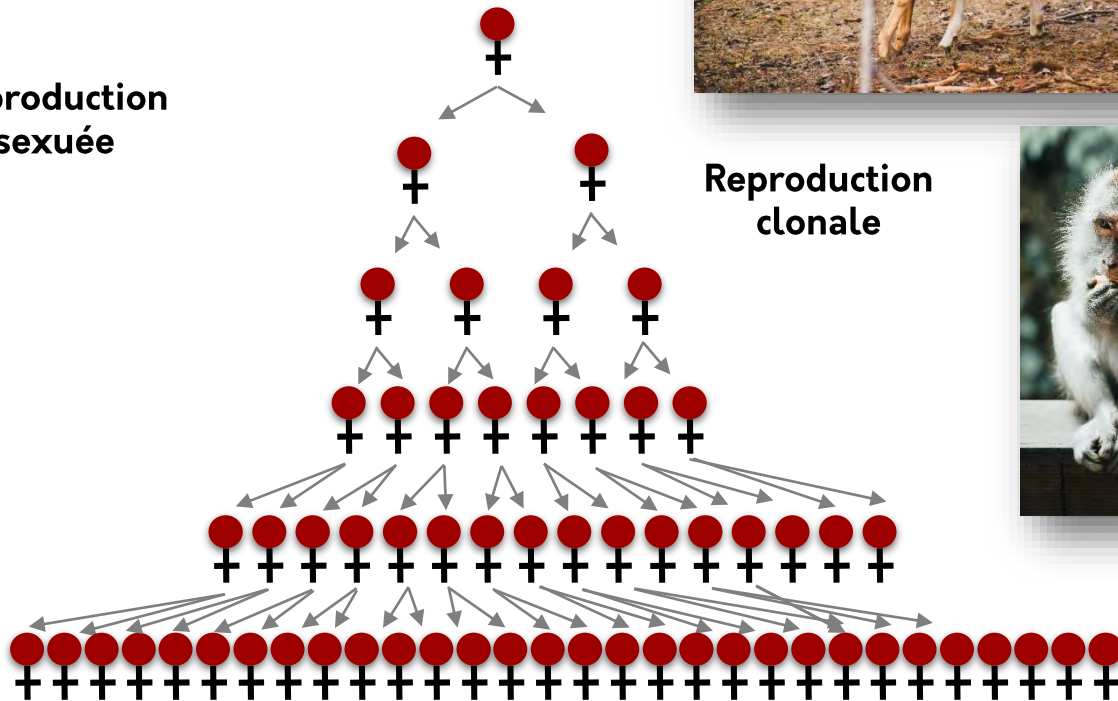


Pourquoi la reproduction sexuée?

Le « coût des mâles »



Reproduction
sexuée

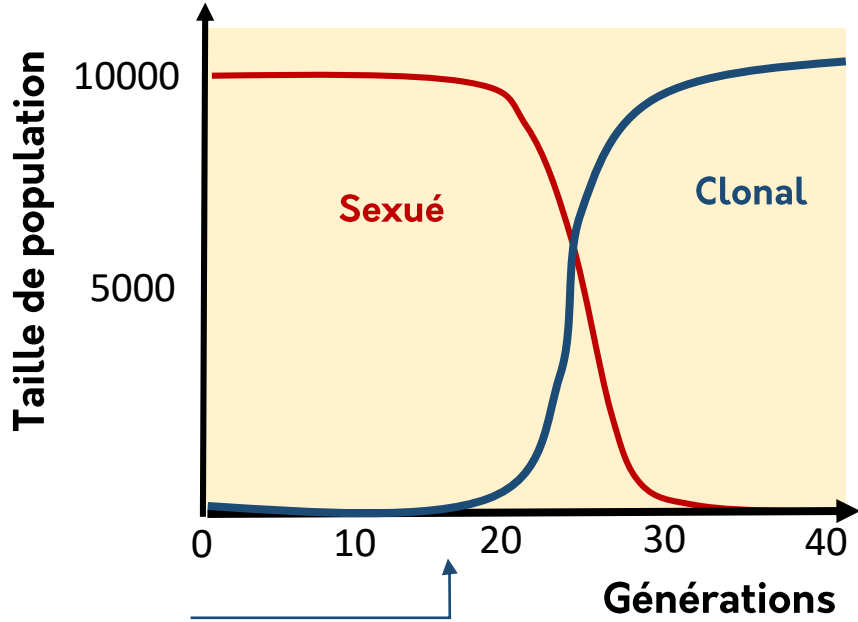


Reproduction
clonale

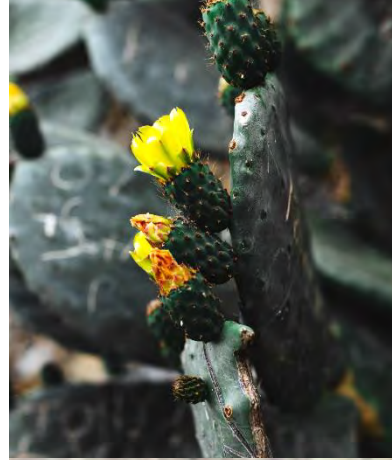


Pourquoi la reproduction sexuée?

Le « double coût des mâles »

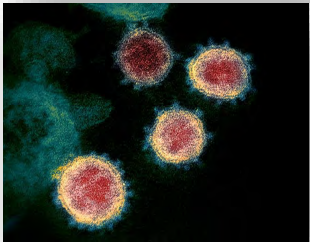


Apparition d'une mutante clonale



Pourquoi la reproduction sexuée?

- Coût physiologique de la méiose
- Coût de trouver un partenaire
- Risque de prédation, parasites, ...



De nombreuses espèces clonales



Traces de comportements sexués chez des espèces asexuées:
le sexe a été perdu récemment



Cnemidophorus



Poeciliopsis

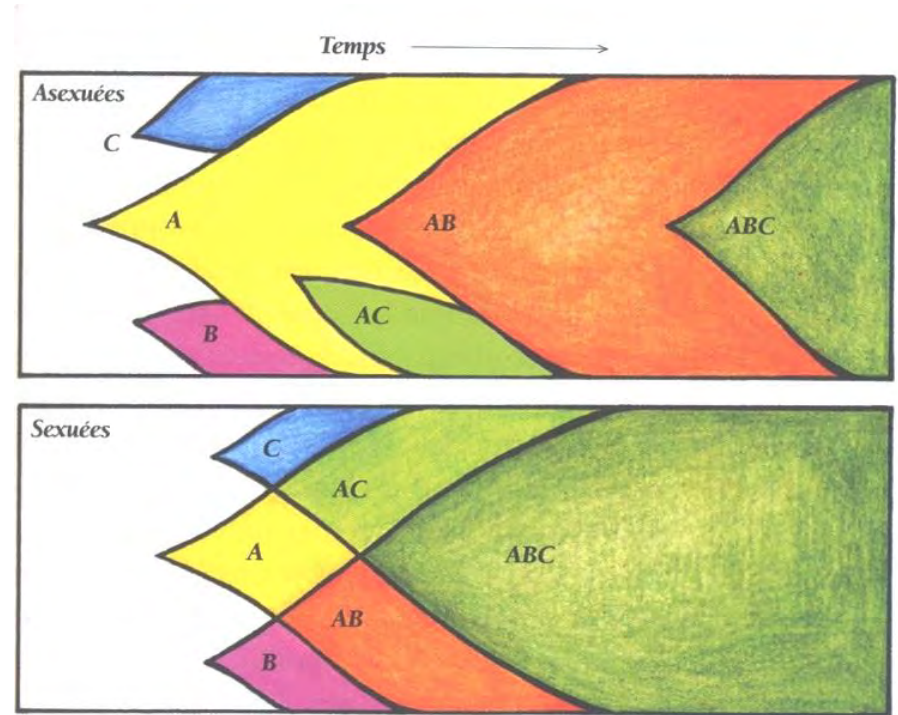
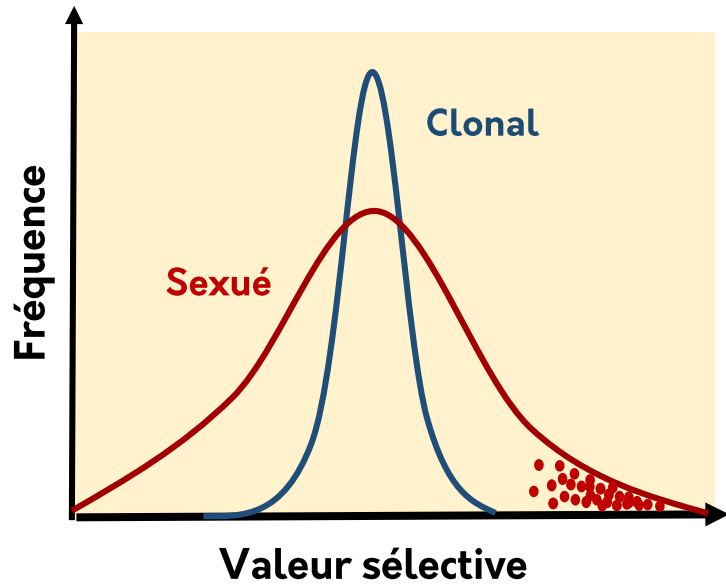
Pourquoi la reproduction sexuée?

Des avantages à court terme pour contre-balancer le “double coût”?



Pourquoi la reproduction sexuée?

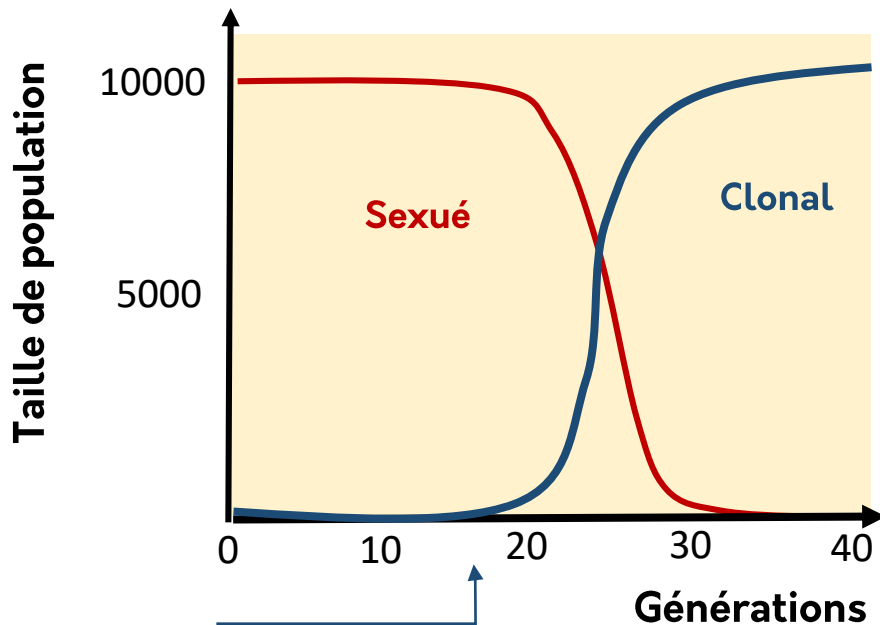
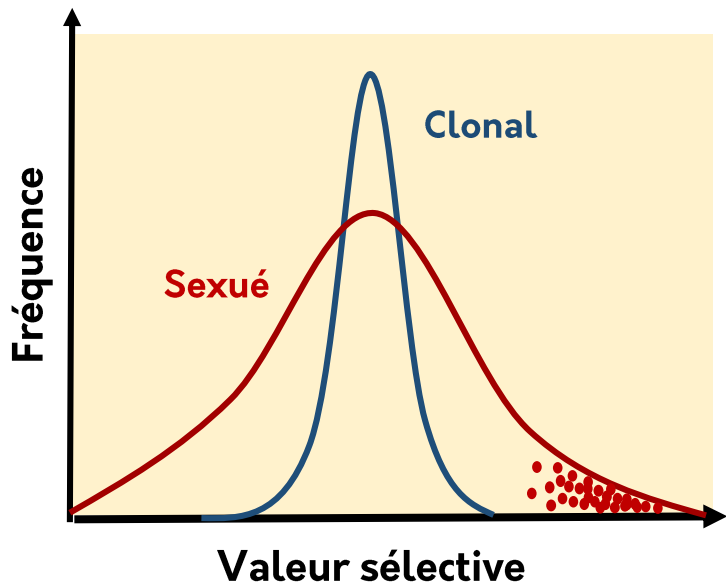
Accroître la vitesse d'adaptation?



Pourquoi la reproduction sexuée?

Accroître la vitesse d'adaptation?

Trop lent?

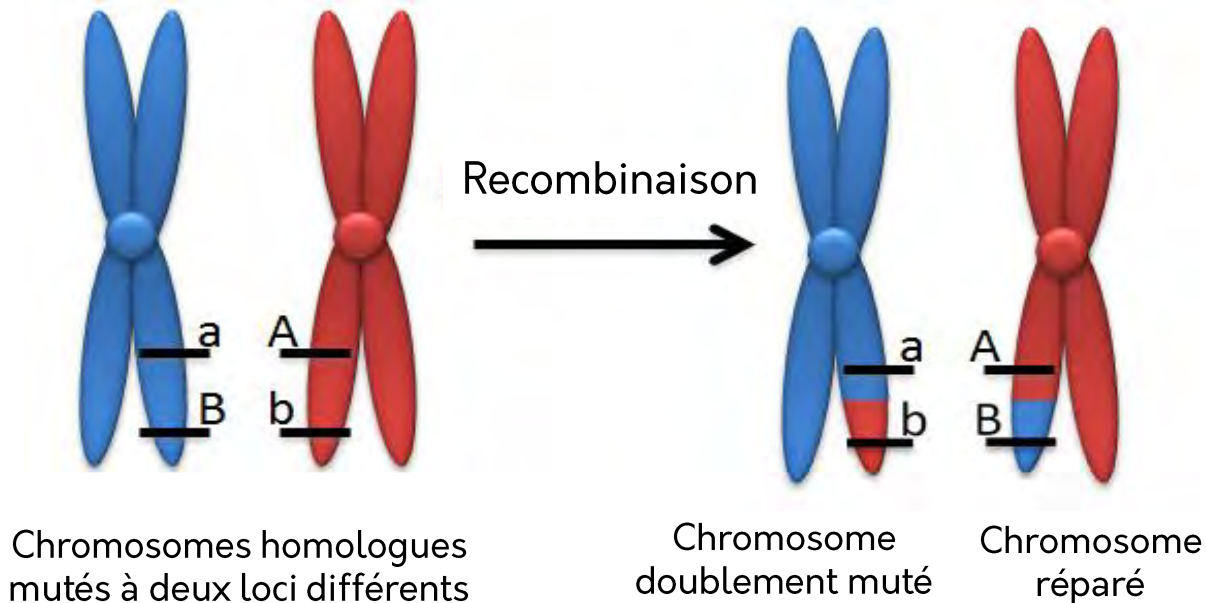


Apparition d'une
mutante clonale

Pourquoi la reproduction sexuée?

La réparation de l'ADN?

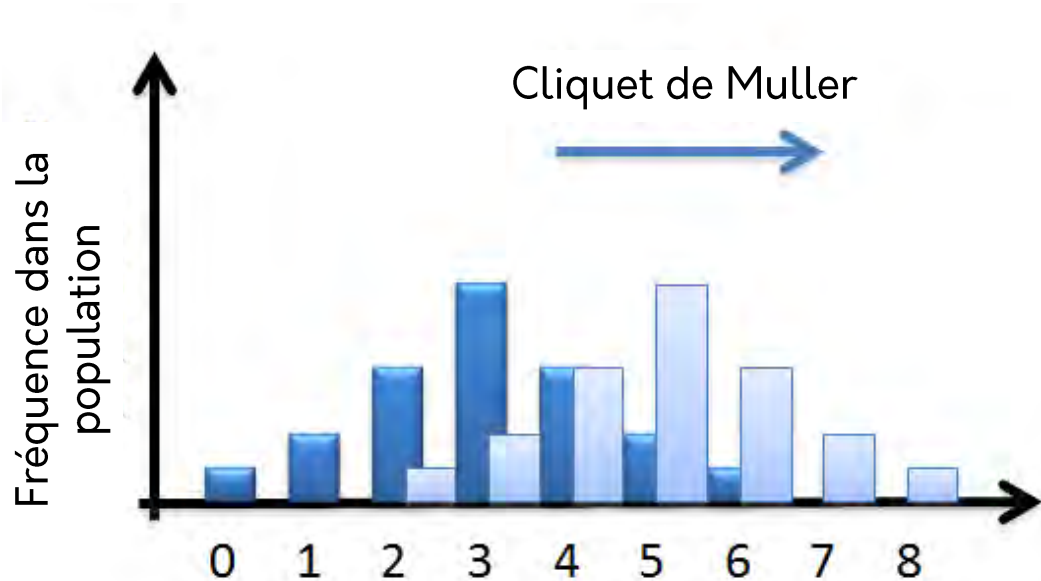
La recombinaison permet de restaurer un haplotype sans mutation à partir de deux haplotypes portant des mutations délétères différentes



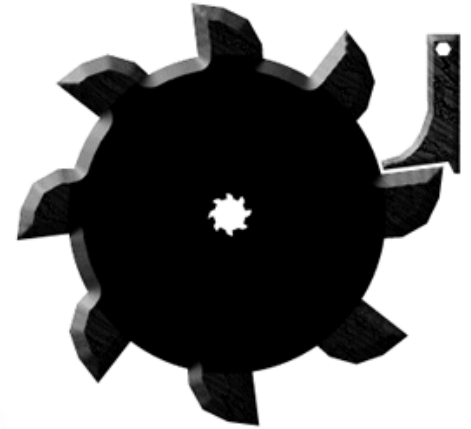
Pourquoi la reproduction sexuée?

La réparation de l'ADN?

Un organisme asexué ne peut qu'accumuler des mutations...



Nombre de mutations délétères par chromosome

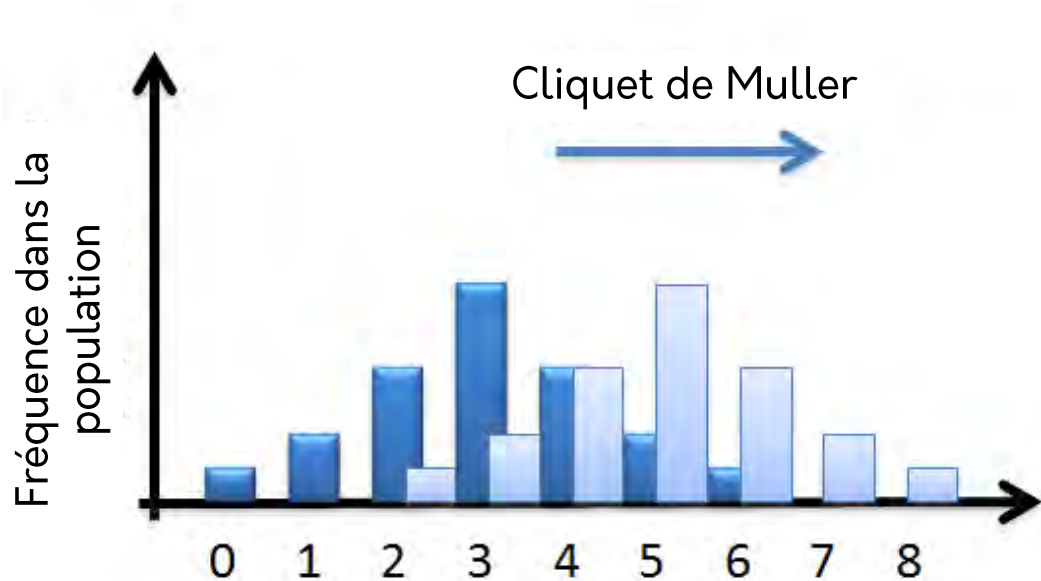


Pourquoi la reproduction sexuée?

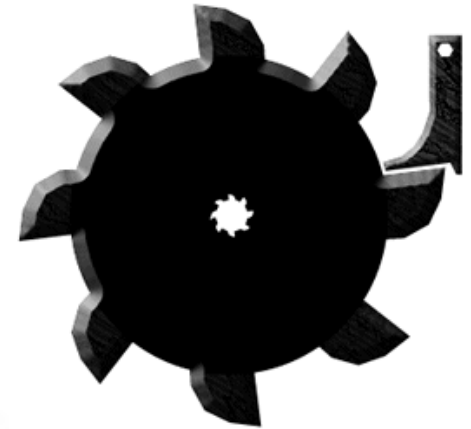
La réparation de l'ADN?

Trop lent?

Un organisme asexué ne peut qu'accumuler des mutations...

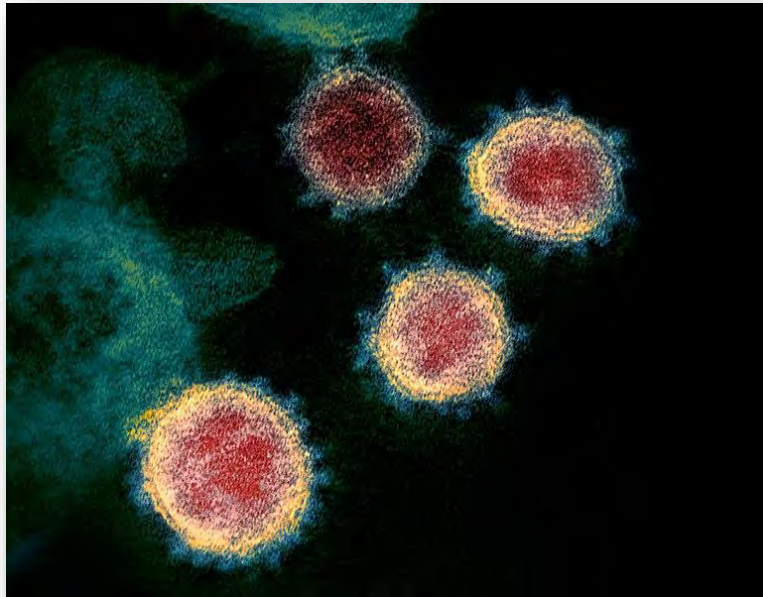


Nombre de mutations délétères par chromosome



Pourquoi le sexe ?

Des avantages à court terme
pour contrebalancer le
« double coût du sexe » ?



NIAID



© Alex Wild
alexanderwild.com



Preuves en faveur de l'hypothèse de la reine rouge

Potamopyrgus antipodarum, escargot d'eau douce de Nouvelle Zélande
Mâles, femelles sexuées, femelles asexuées



Preuves en faveur de l'hypothèse de la reine rouge

Plus de femelles sexuées et de mâles
dans les lacs où la fréquence des parasites est plus élevée



Photos: Gabe Harp



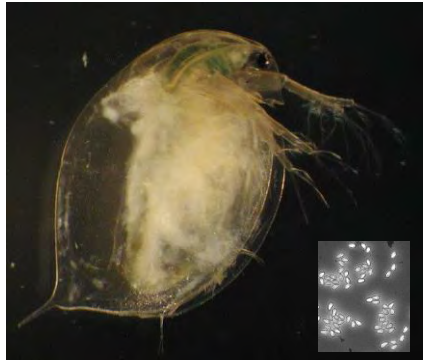
"Evolution" Bergstrom and Dugatkin, WW Norton & Company, Inc.

Preuves en faveur de l'hypothèse de la reine rouge

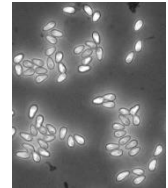
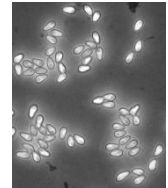
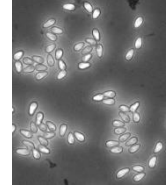
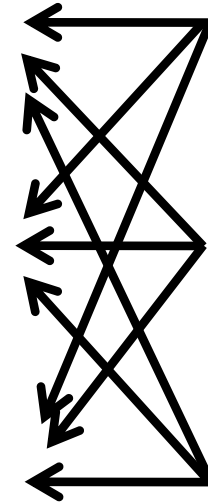
Daphnie saine



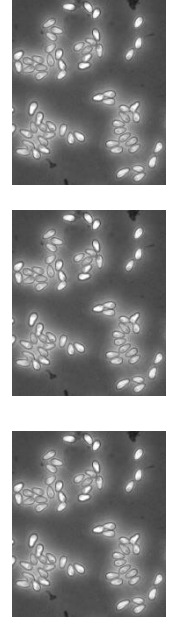
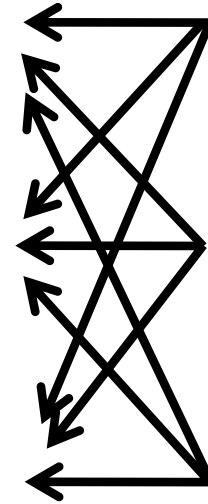
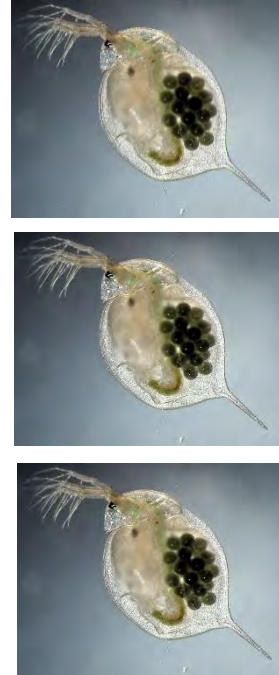
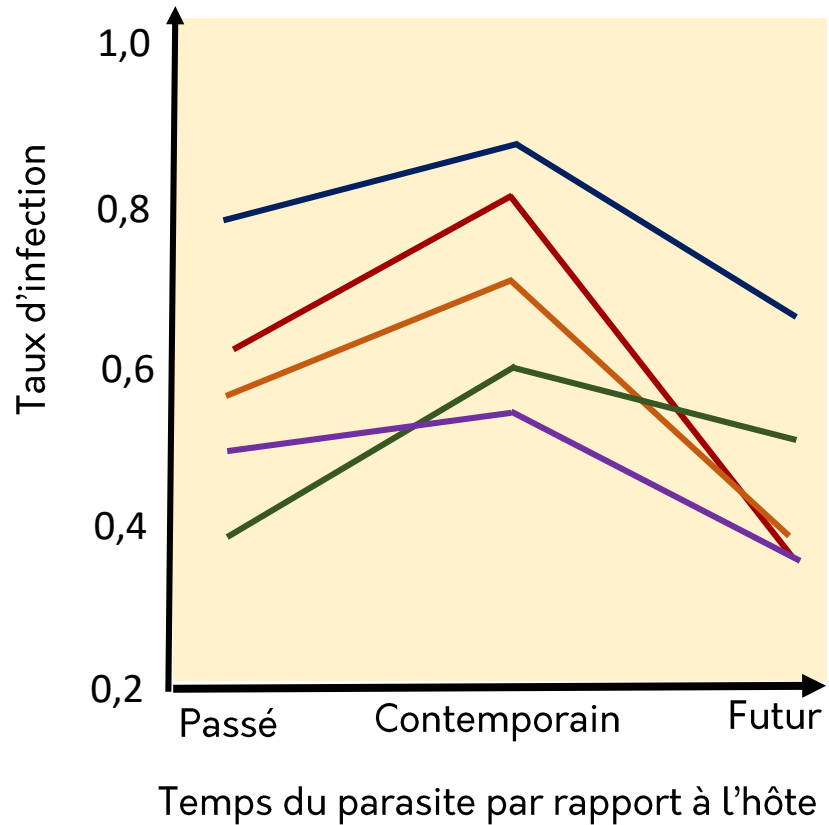
Daphnie parasitée
(microsporidies)



Extraction de carottes de
sédiments jusque ~ 39 ans

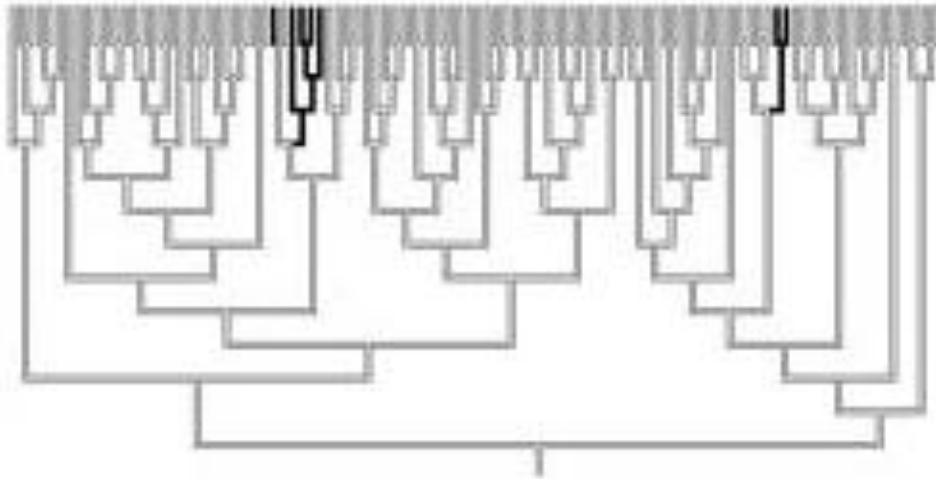


Preuves en faveur de l'hypothèse de la reine rouge



Pourquoi la reproduction sexuée ?

Espèces clonales jeunes



Pourquoi la reproduction sexuée ?

Espèces clonales jeunes...

Sauf quelques « scandales évolutifs »

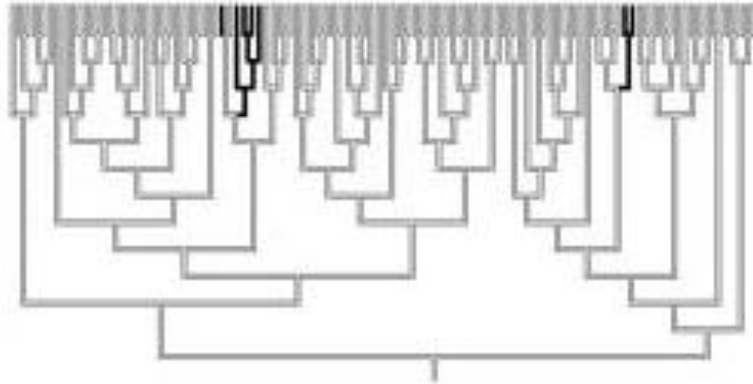
Rotifères bdelloïdes : parthénogénétiques
depuis plus de 65 millions d'années



Pourquoi la reproduction sexuée ?

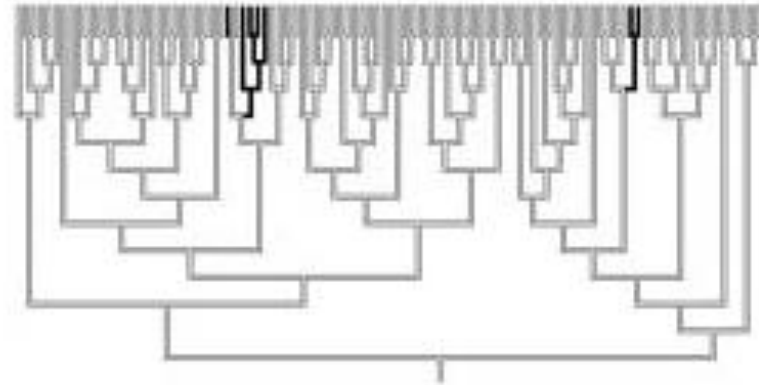
Pour différentes raisons...

...autres que la diversité?

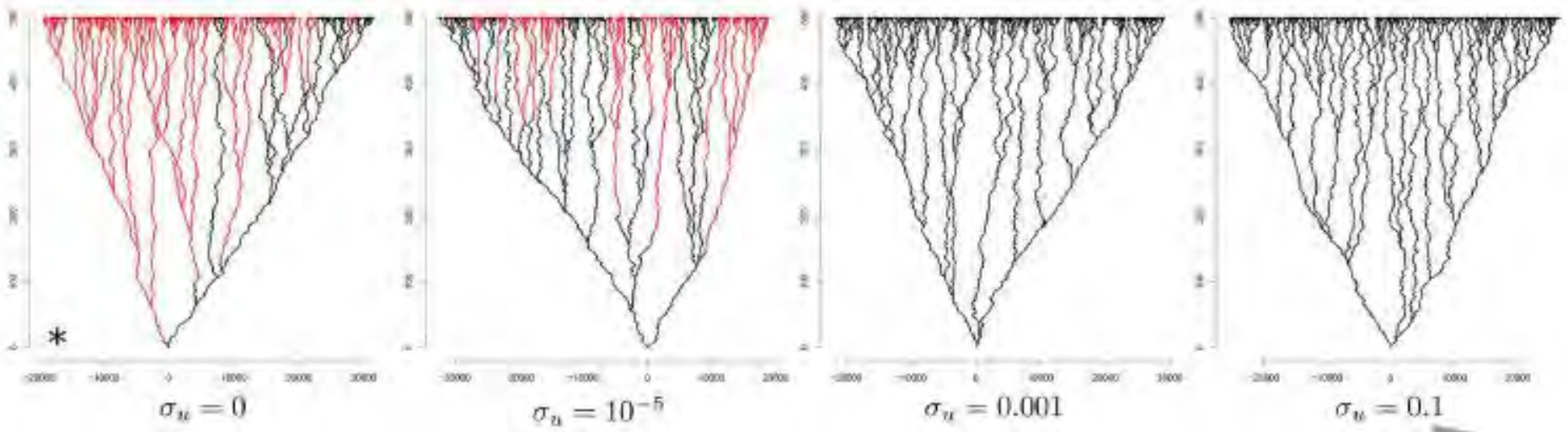


Pourquoi la reproduction sexuée ?

Sélection à l'échelle de l'espèce?



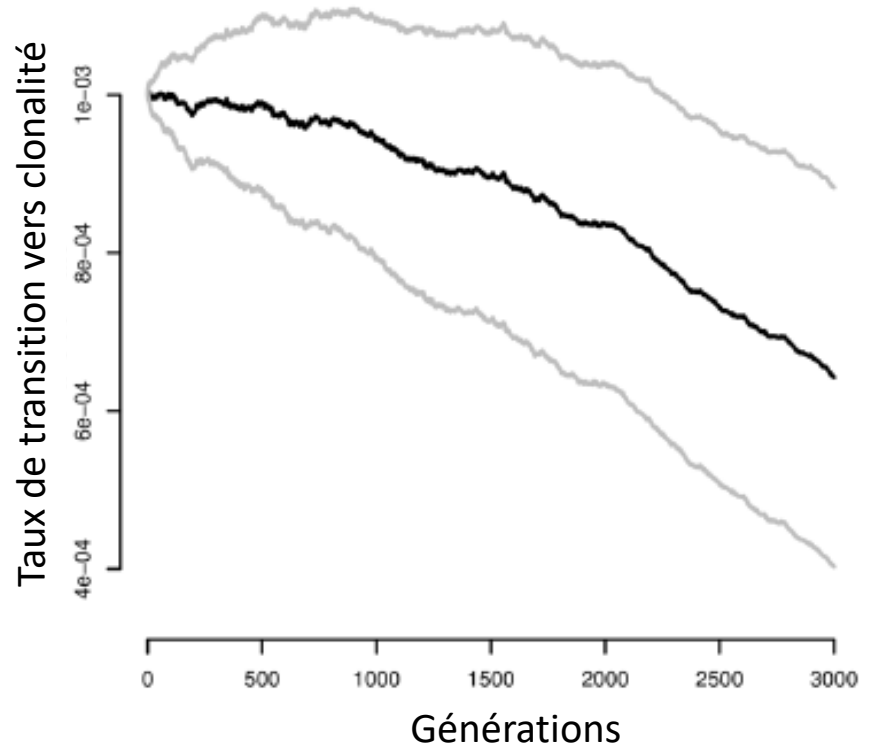
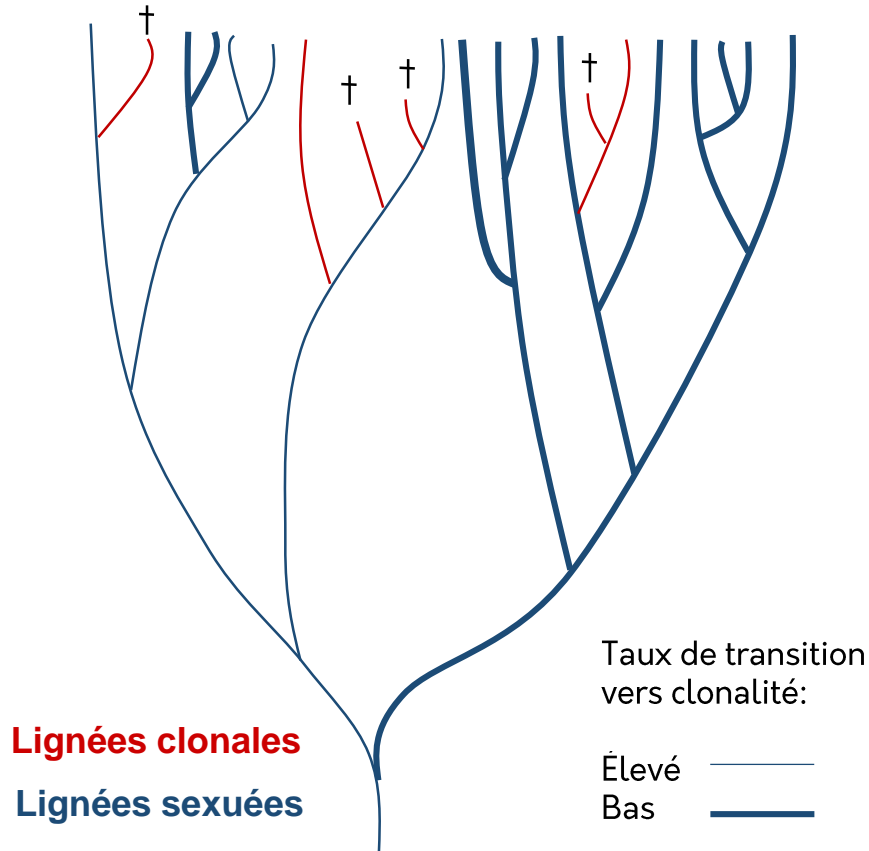
Simulations de diversifications avec un taux de transition σ vers la clonalité qui évolue

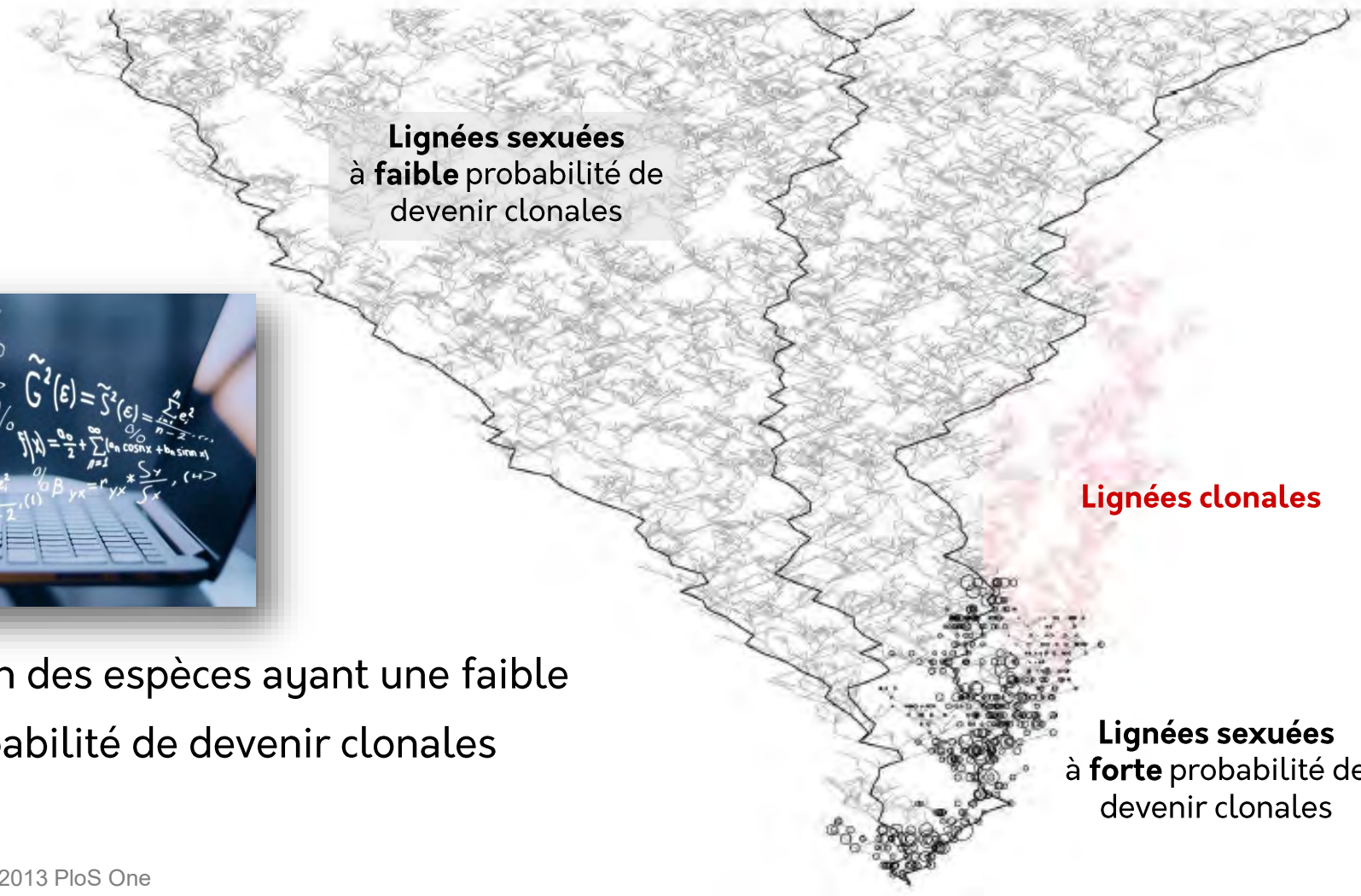


Lignées clonales

Lignées sexuées

Evolution vers des taux de transition vers la clonalité plus bas: Sélection des espèces ayant une faible probabilité de devenir clonales





Lignées sexuées
à **faible** probabilité de
devenir clonales



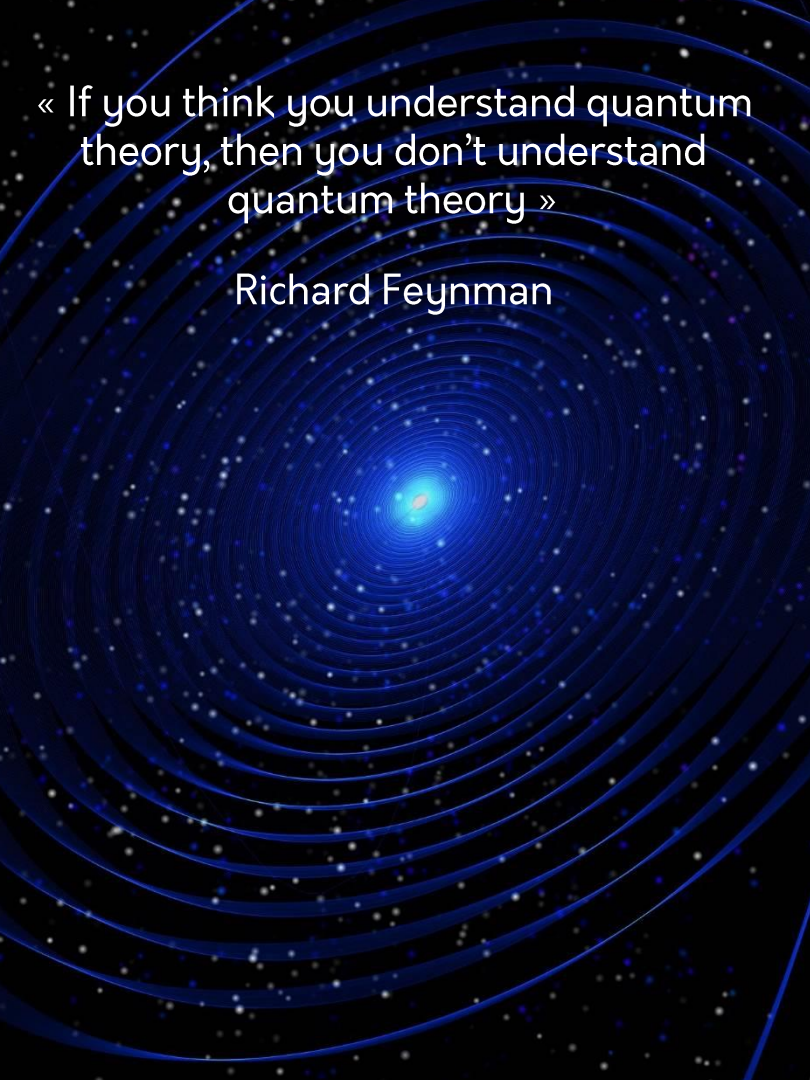
Lignées clonales

Sélection des espèces ayant une faible
probabilité de devenir clonales

Lignées sexuées
à **forte** probabilité de
devenir clonales

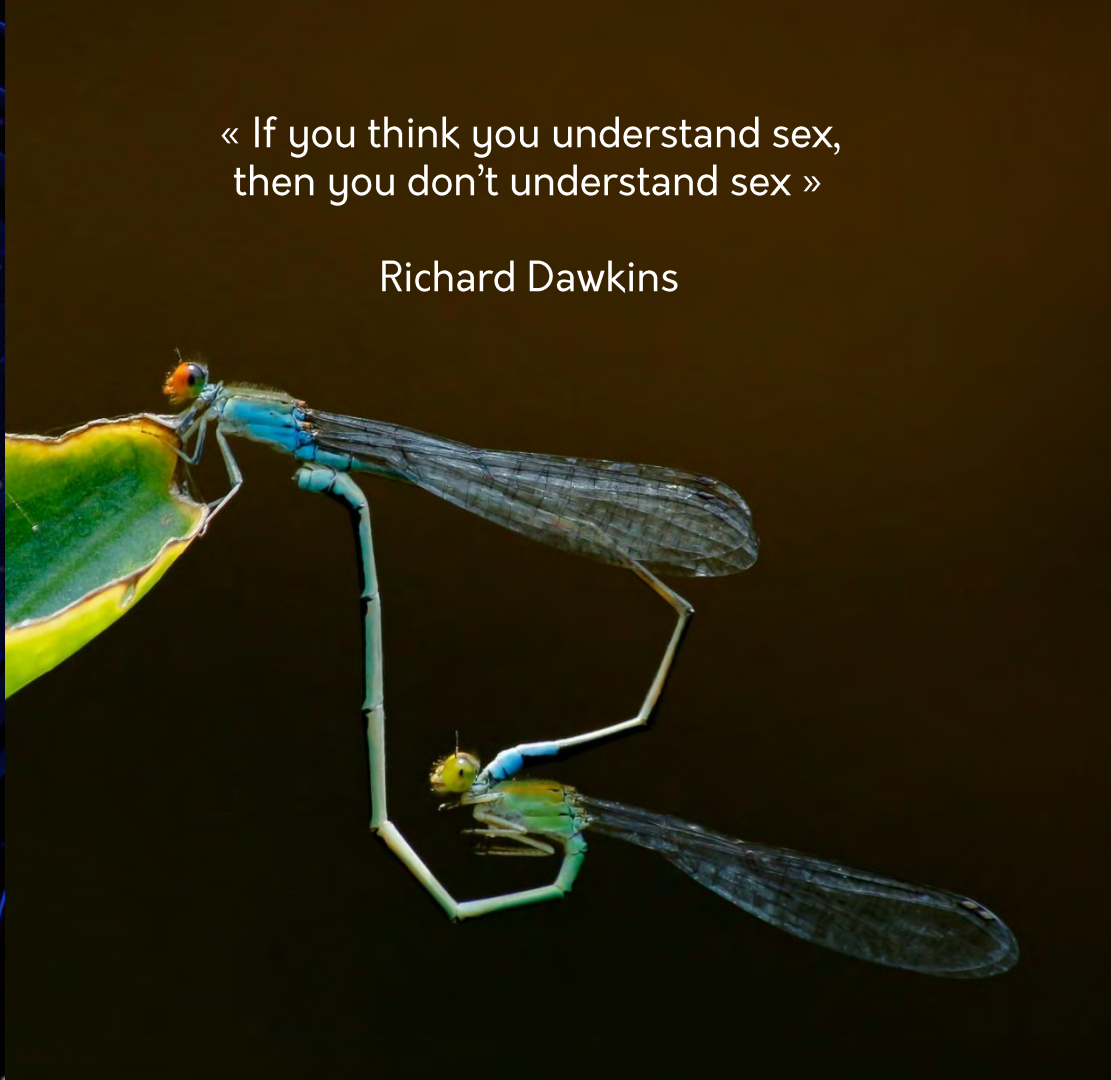
« If you think you understand quantum theory, then you don't understand quantum theory »

Richard Feynman



« If you think you understand sex, then you don't understand sex »

Richard Dawkins

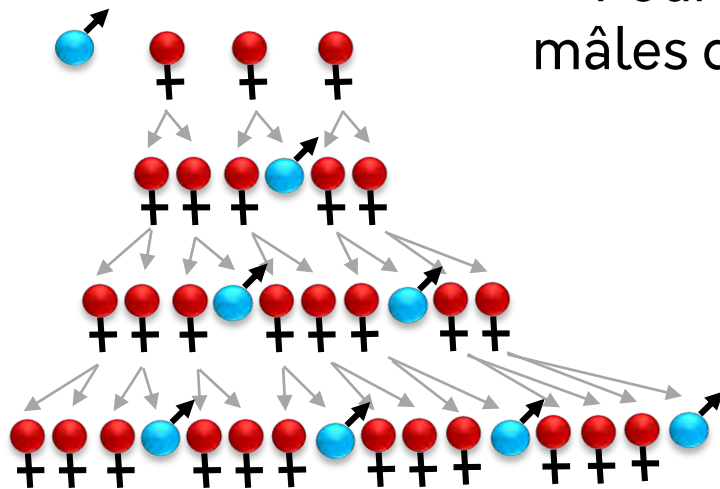


Pourquoi autant de mâles que de femelles?



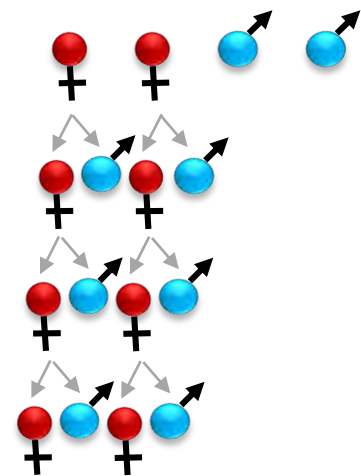


Sex-ratio 3/4

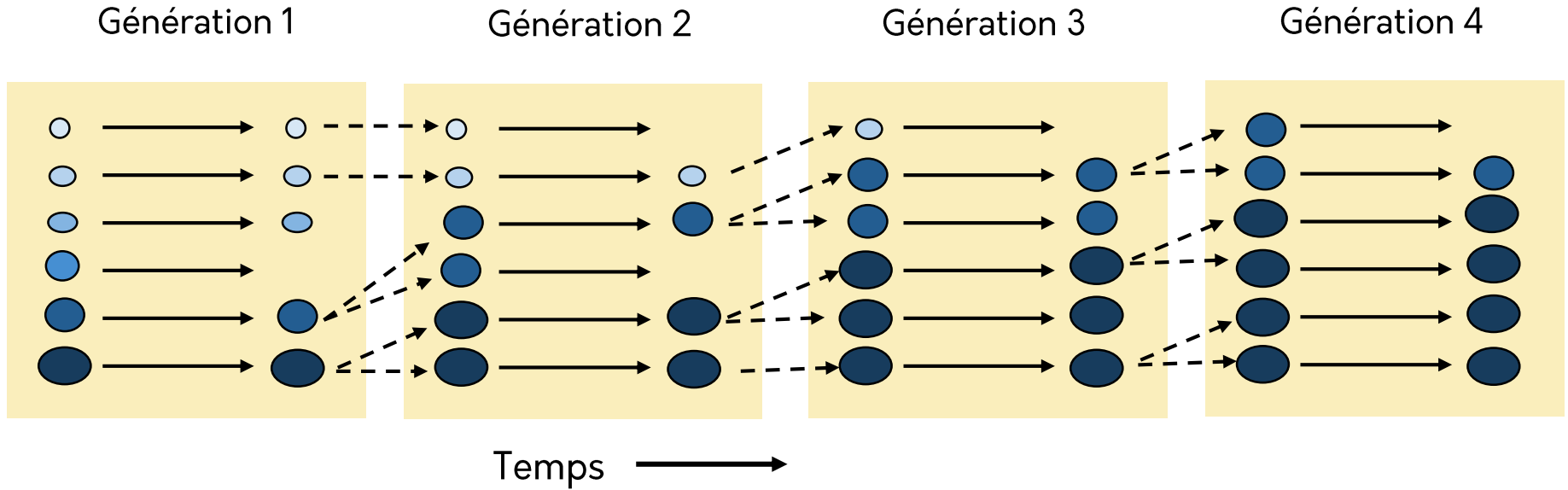


Pourquoi autant de mâles que de femelles?

Sex-ratio 1/2

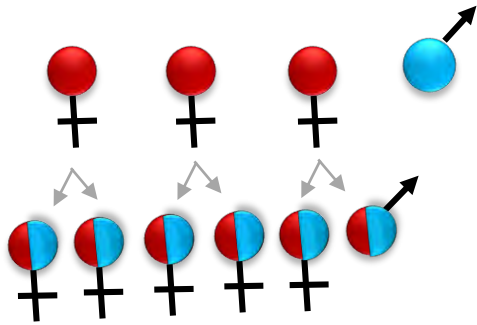


Sélection naturelle



Pourquoi autant de mâles que de femelles?

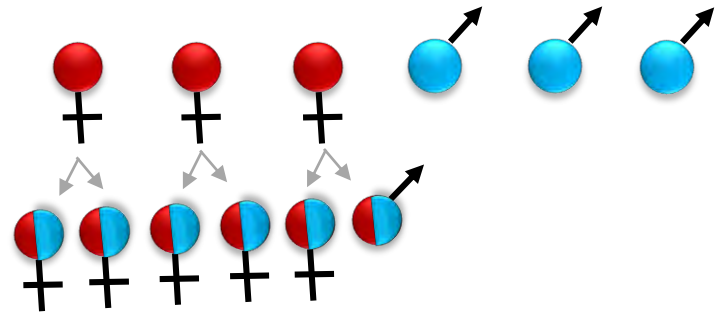
Sex-ratio 3/4



6 enfants par mâle
2 enfants par femelle

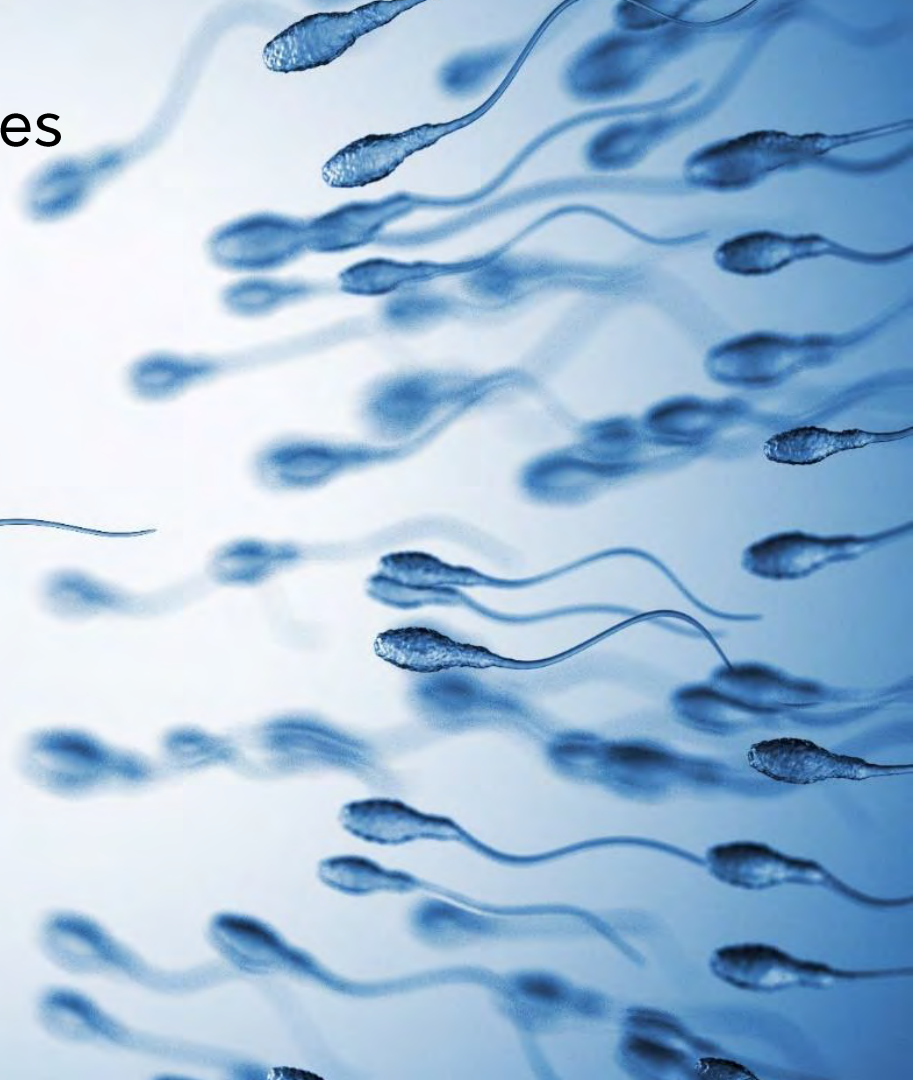
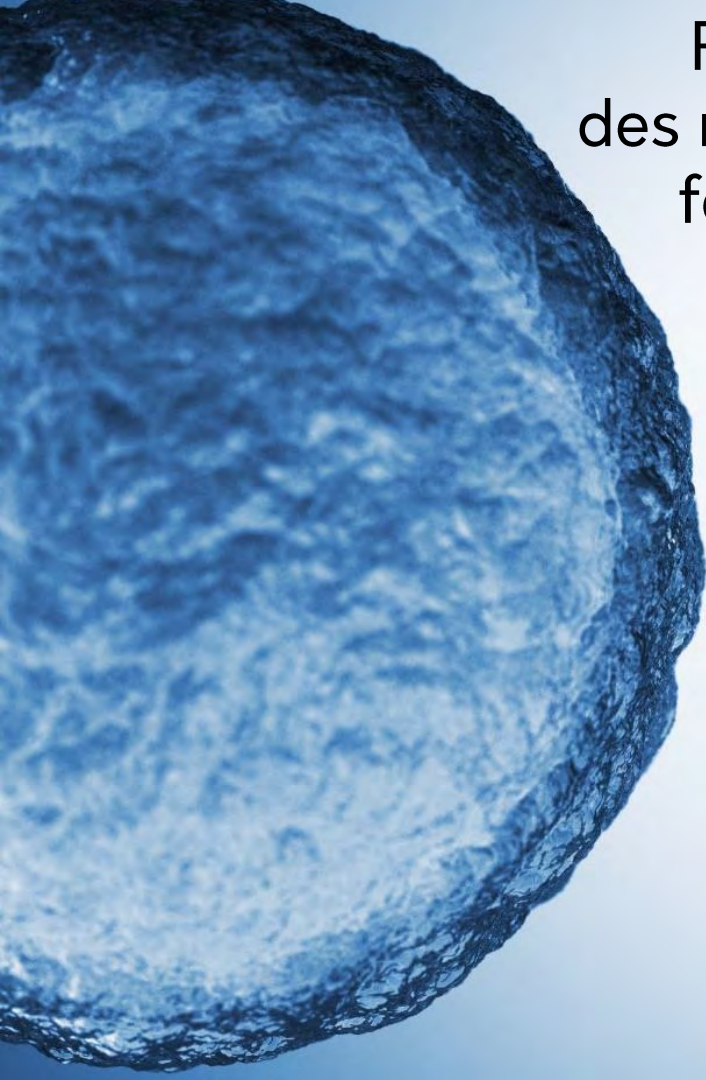


Sex-ratio 1/2



2 enfants par mâle
2 enfants par femelle

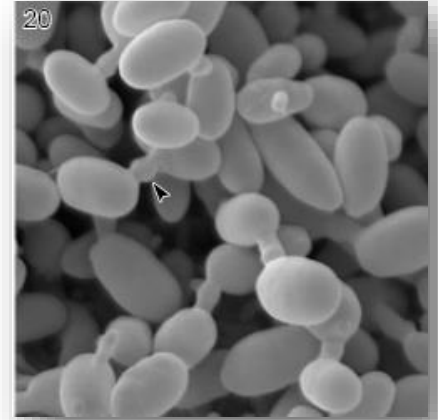
Pourquoi
des mâles et des
femelles?



L'évolution des classes de gamètes

Pourquoi y a-t-il eu évolution de classes de gamètes?

Pourquoi le plus souvent seulement 2 classes de gamètes
(2 sexes ou 2 types sexuels)?



L'évolution des sexes



Champignons:
types sexuels et sexes



Myxomycètes



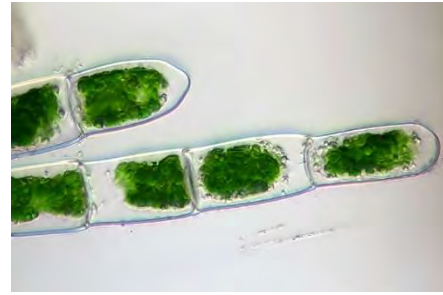
Plantes:
sexes et systèmes d'incompatibilité



Animaux



Ciliés



Algues vertes



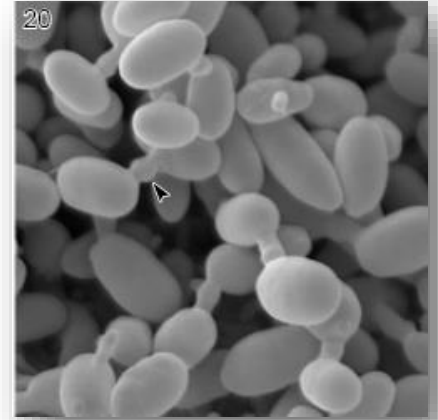
Oomycètes

L'évolution des classes de gamètes

Pourquoi y a-t-il eu évolution de classes de gamètes?

Pourquoi le plus souvent seulement 2 classes de gamètes
(2 sexes ou 2 types sexuels)?

Alors que c'est le cas le plus défavorable:
incompatibilité avec la moitié de la population!



“Bisexuality immediately
doubles your chances for
a date on Saturday night”
Woody Allen

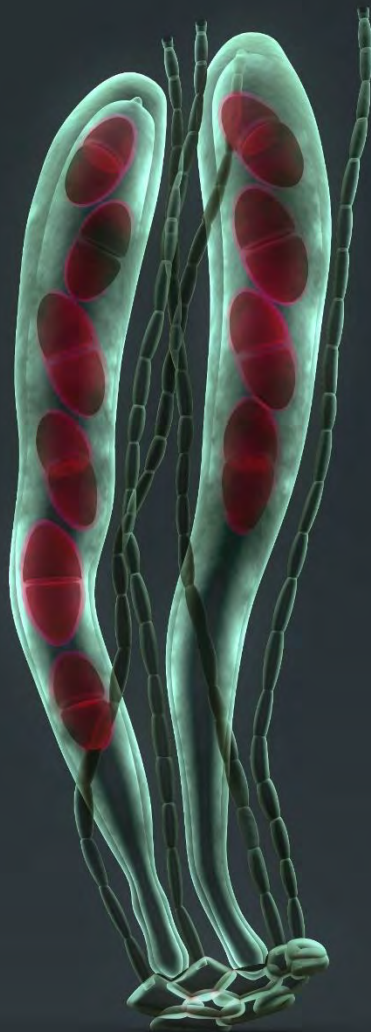
Pourquoi des mâles et des femelles?



“Bisexuality immediately doubles your chances for a date on Saturday night”
Woody Allen



Homothallisme



L'évolution des sexes



Isogamie



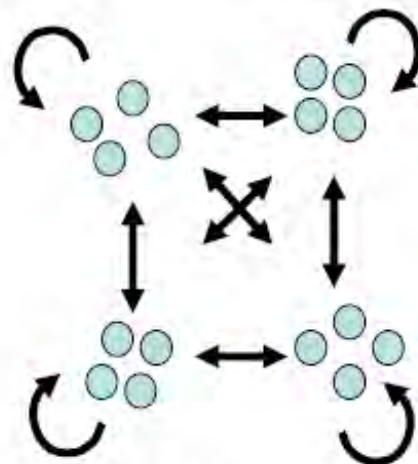
Anisogamie



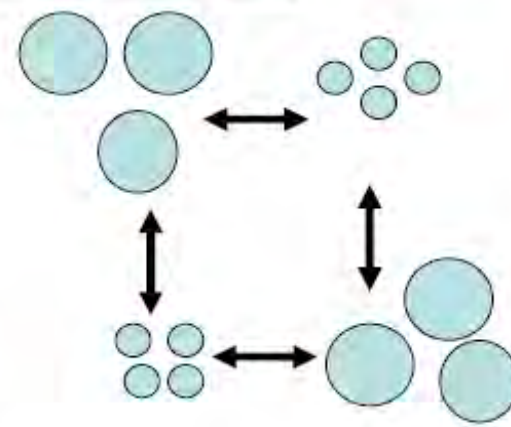
Types sexuels



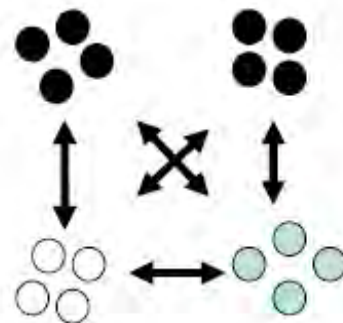
Compatibilité



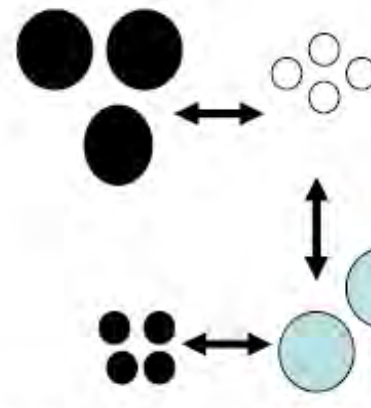
Homothallisme



Anisogamie



Types sexuels



Types sexuels+anisogamie

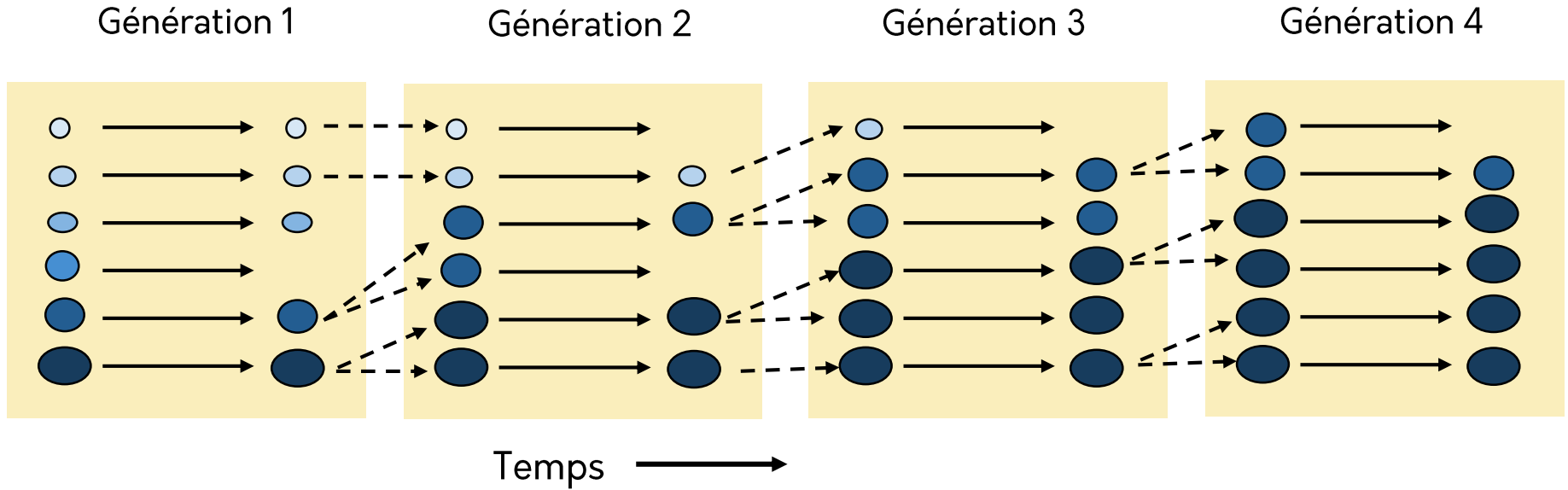
L'évolution des classes de gamètes

Pourquoi y a-t-il eu évolution de classes de gamètes?

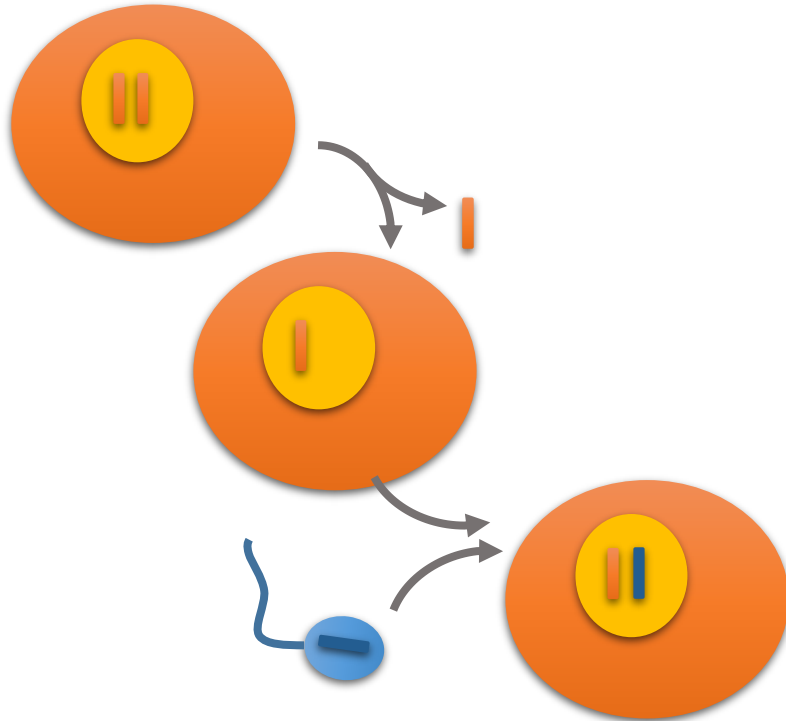
Pourquoi le plus souvent seulement 2 classes de gamètes
(2 sexes ou 2 types sexuels)? Pourquoi parfois 1000?



Sélection naturelle

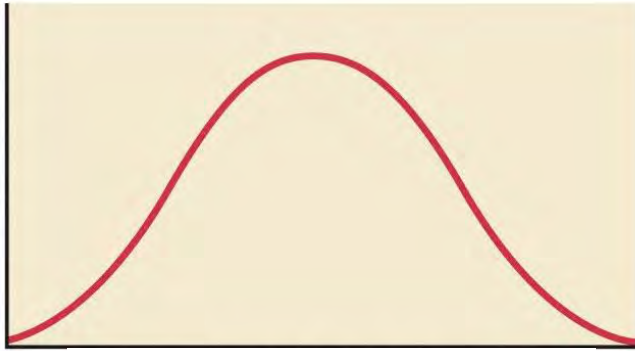


Pourquoi des mâles et des femelles?

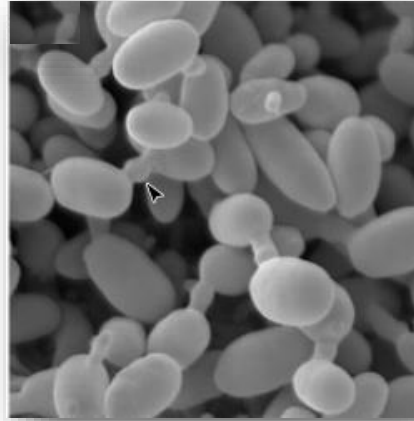


Pourquoi des mâles et des femelles?

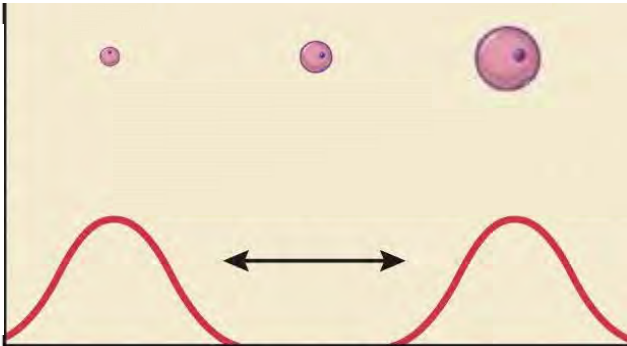
Fréquence



Taille des gamètes



Fréquence

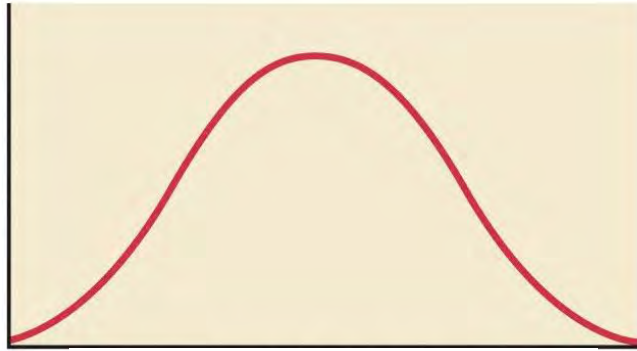


Taille des gamètes



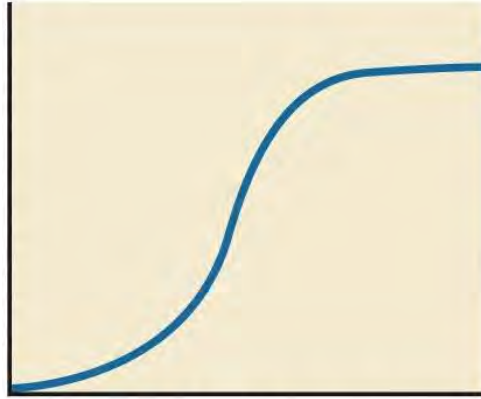
Pourquoi des mâles et des femelles?

Fréquence



Taille des gamètes

Valeur sélective

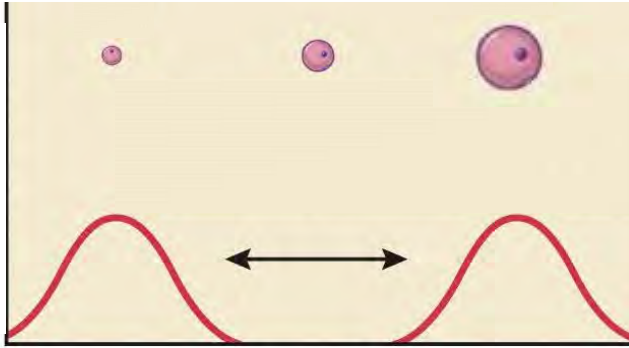


Taille du zygote



Nina Sesina

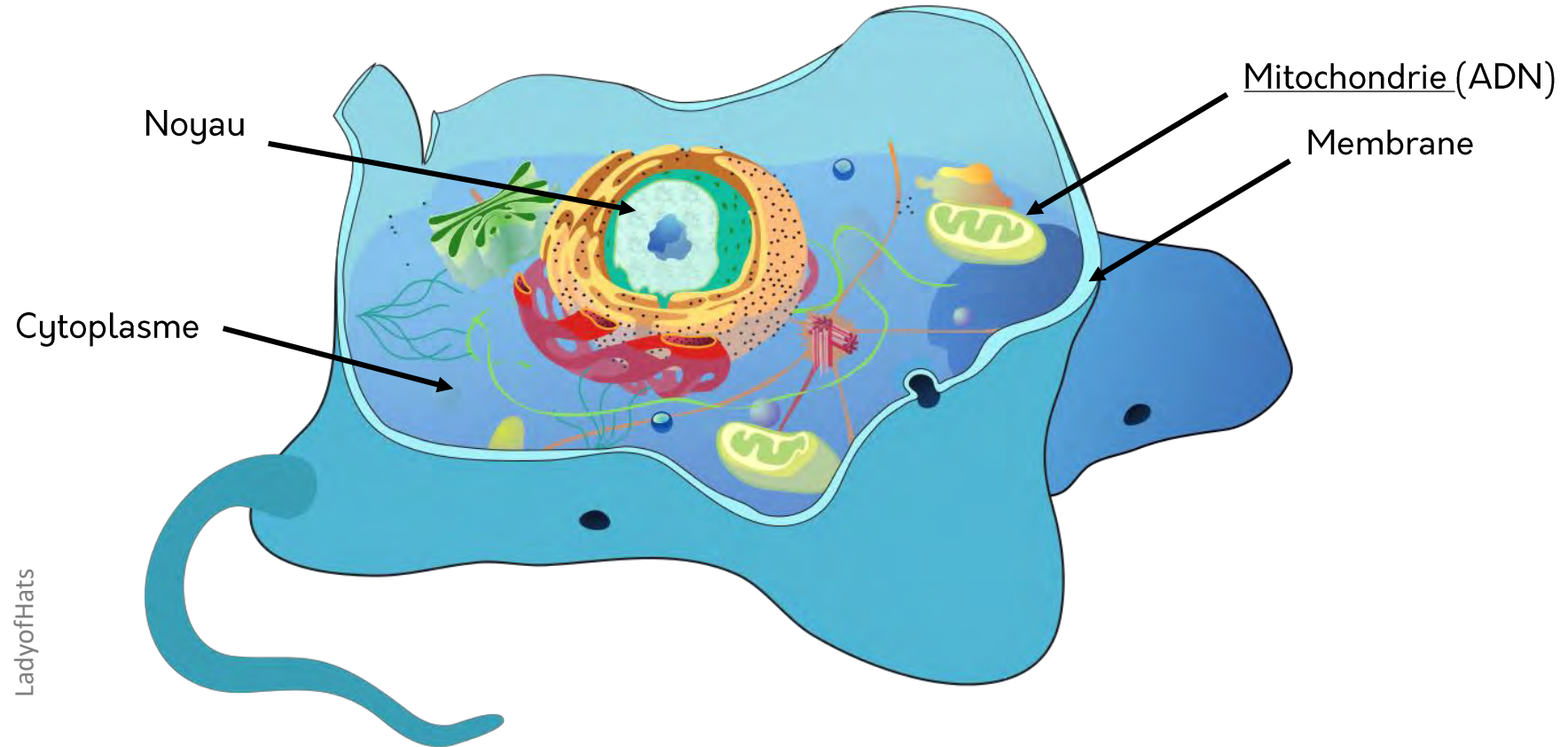
Fréquence

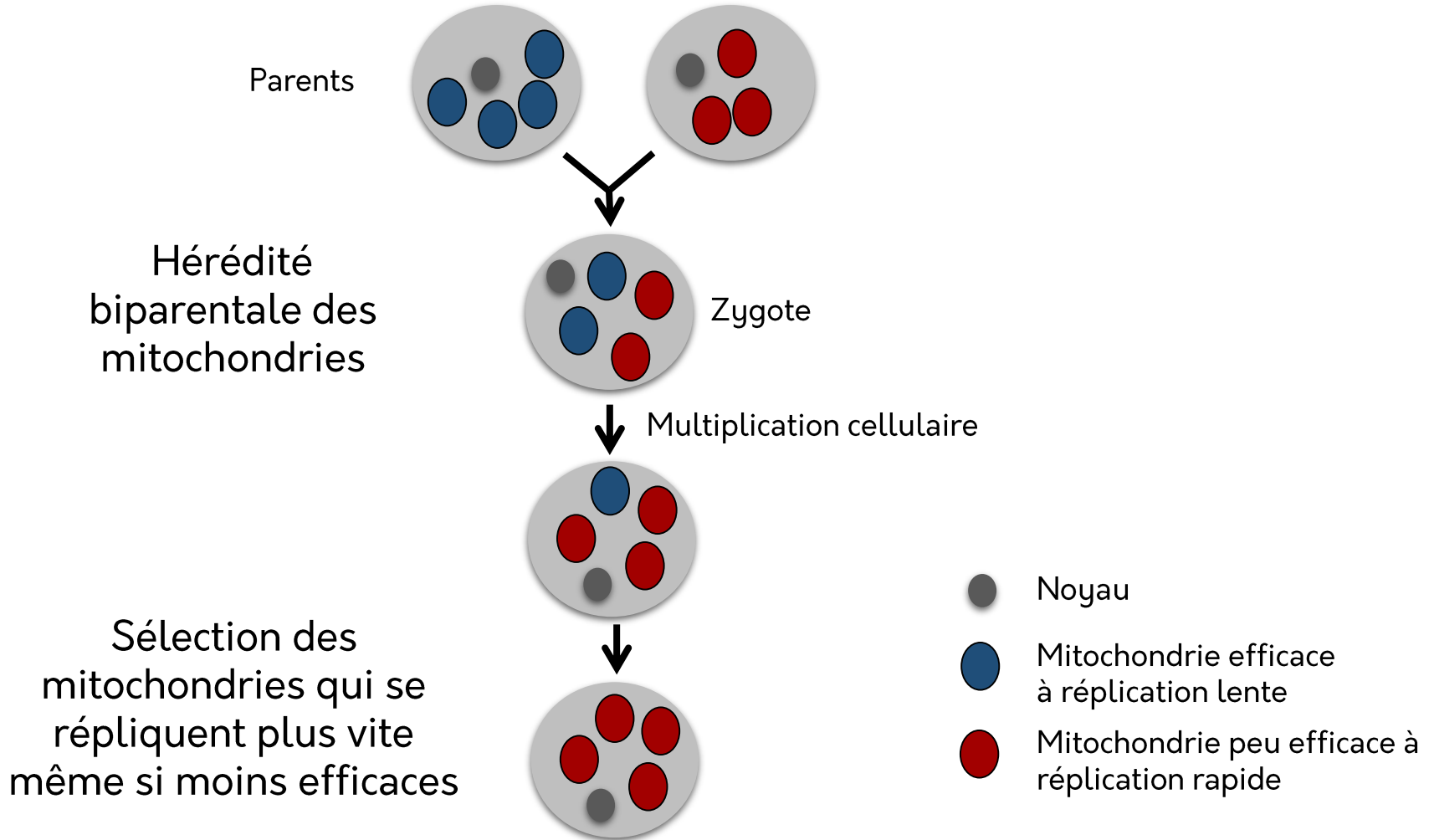


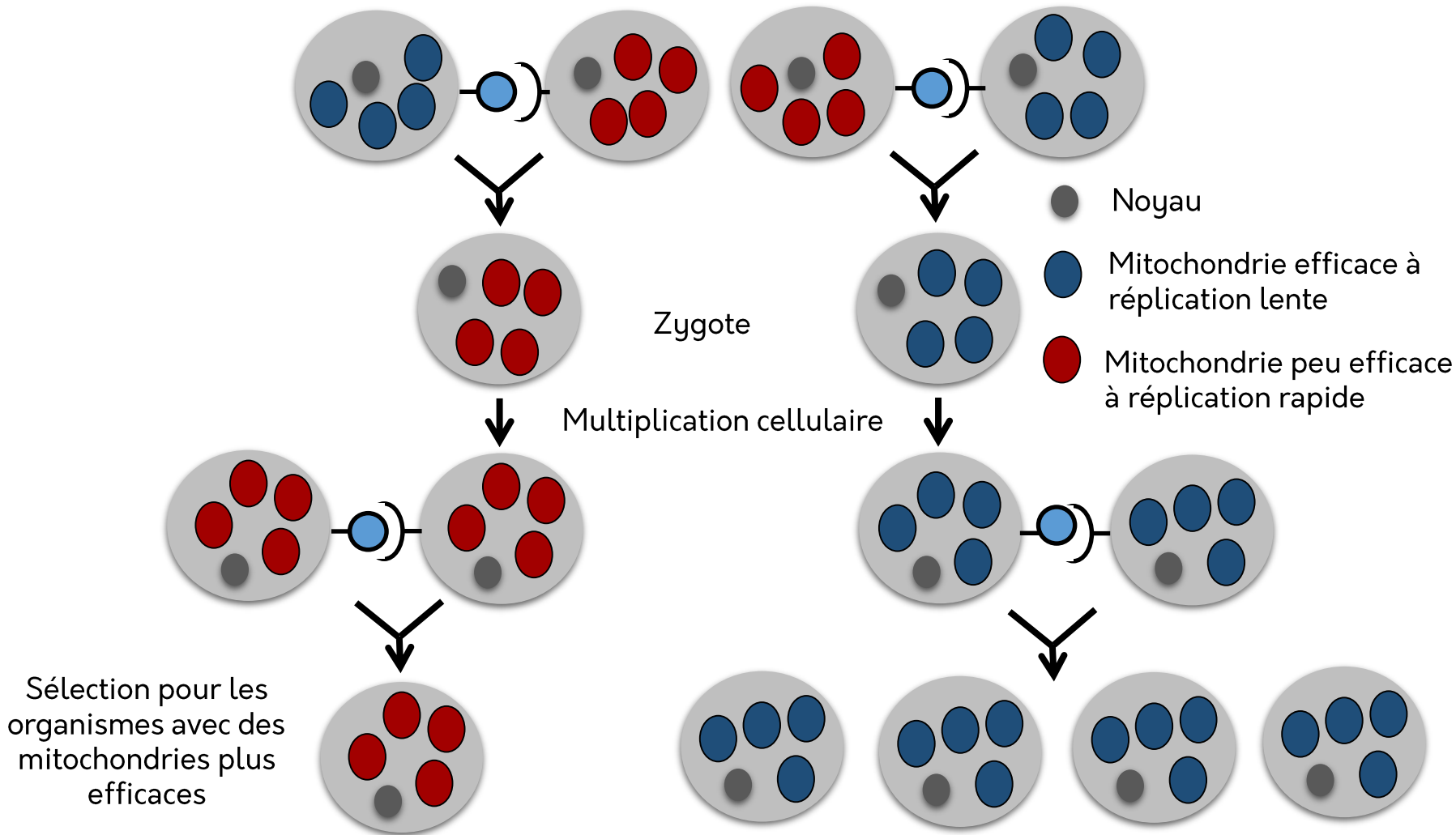
Taille des gamètes




L'évolution des classes de gamètes pour éviter l'évolution de mitochondries « égoïstes » ?







A microscopic image showing a large, textured egg cell on the left and several sperm cells on the right. One sperm cell is in sharp focus in the upper center, showing its head and long tail. The background is a light blue, slightly blurred field of other sperm cells.

L'évolution de l'anisogamie

- Sélection disruptive sur la taille des gamètes ?
- Pour hérédité uniparentale des mitochondries ?
- Seulement deux sexes dans ces cas là...

L'évolution des types sexuels



- Pour se croiser avec un individu autre que soi-même:
Auto-incompatibilité chez les plantes et certains champignons
- Sélection pour les allèles rares compatibles avec tous les autres:
Des centaines ou milliers de types sexuels

L'évolution des types sexuels



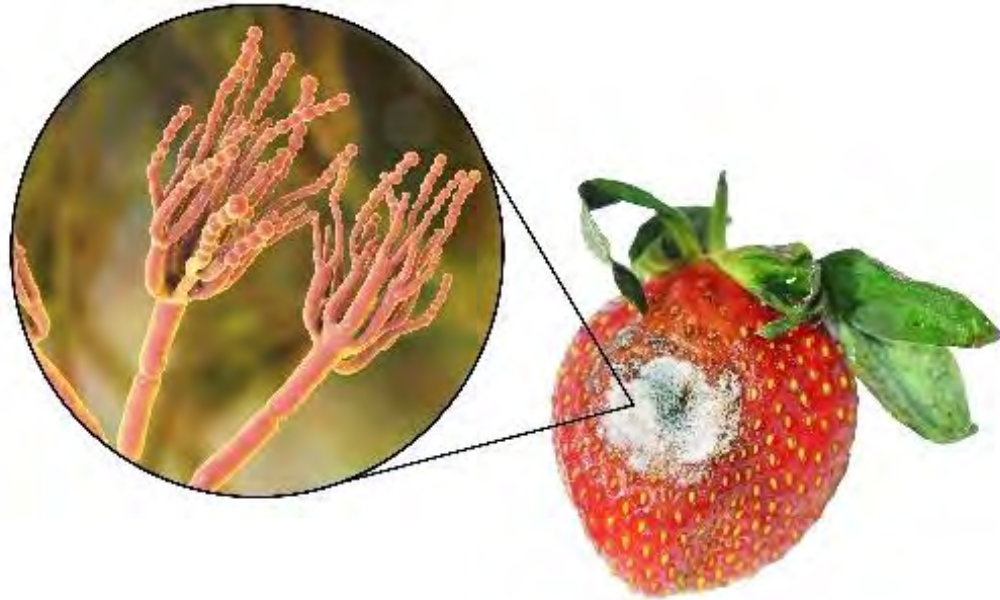
- Pour se croiser avec un individu autre que soi-même :
Auto-incompatibilité chez les plantes et certains champignons
- Sélection pour les allèles rares compatibles avec tous les autres:
des centaines ou milliers de types sexuels
- Sauf si contrôle l'hérédité des mitochondries: 2 types sexuels

Contraintes sur le nombres de types sexuels?



Gould et Lewontin (1979)

Contraintes sur le nombres de types sexuels?



Types sexuels ascomycètes:
deux « idiomorphes »

Billiard et al 2011 Biol Rev
Billiard et al 2012 JEB



L'évolution des sexes

Anisogamie: monoécie ou sexes séparés?





Zoran Veselinović



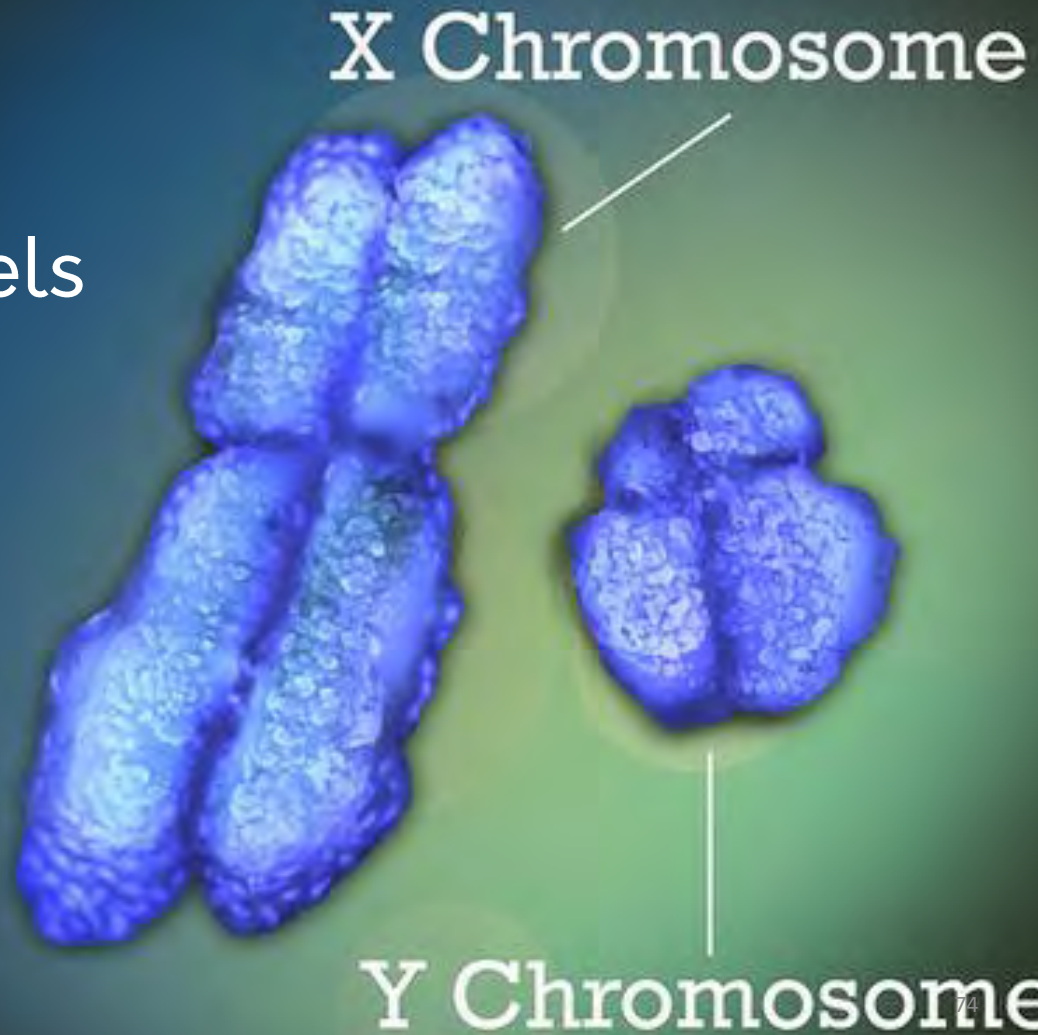
Artaxerxes

L'évolution des sexes

Anisogamie: monoécie ou sexes séparés?

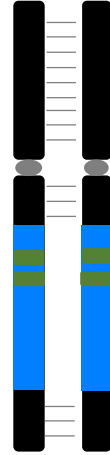
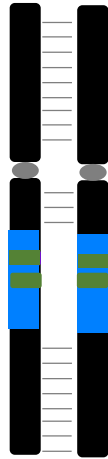
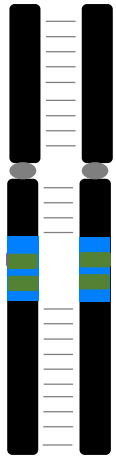


Pourquoi des chromosomes sexuels si différenciés?

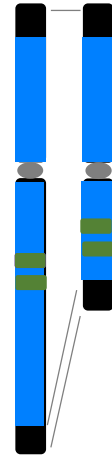




Suppression de recombinaison en plusieurs étapes

Proto X Proto Y



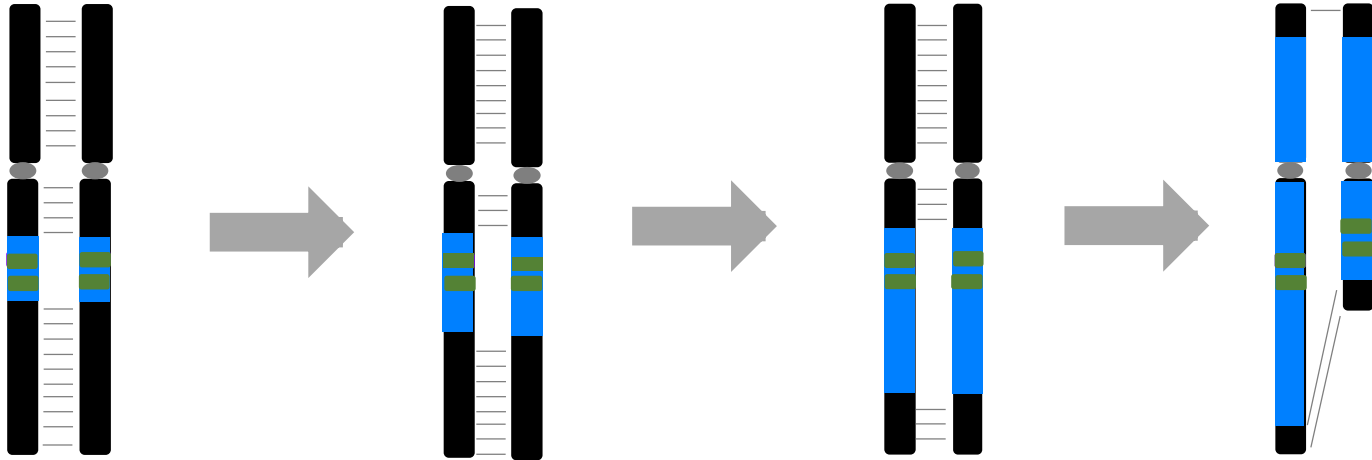
X Y



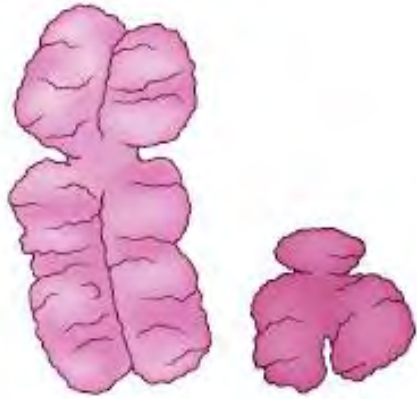
-  Gènes de déterminisme du sexe
-  Suppression de recombinaison

Suppression de recombinaison en plusieurs étapes Mais pourquoi?

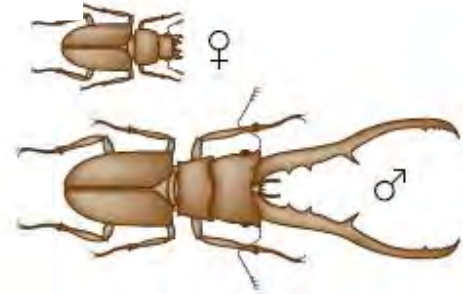
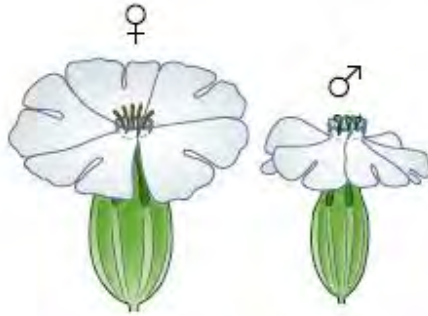
Proto X Proto Y



- Gènes de déterminisme du sexe
- Suppression de recombinaison

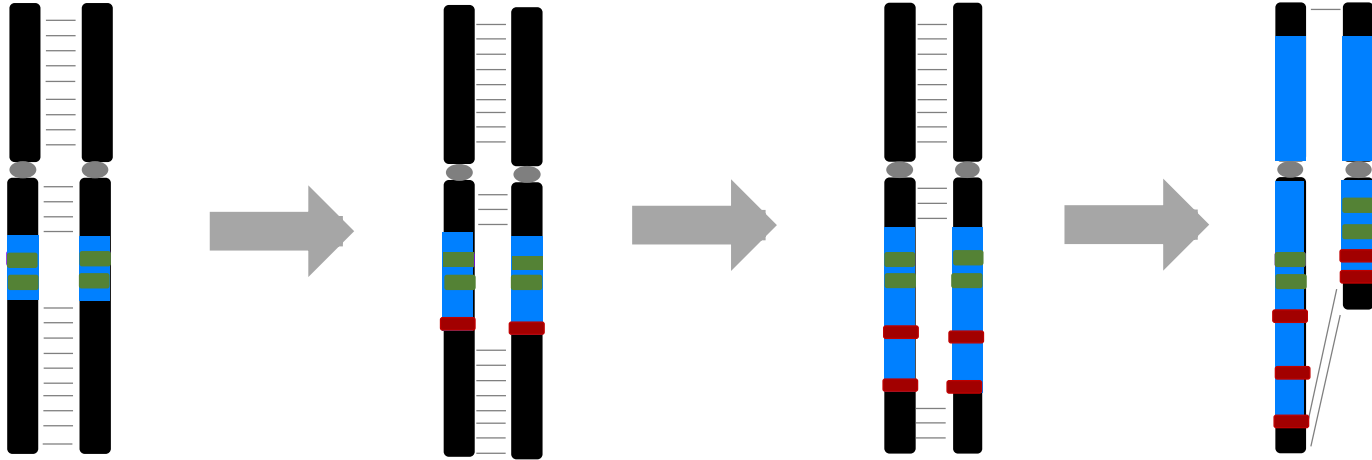


Sélection antagoniste entre sexes?



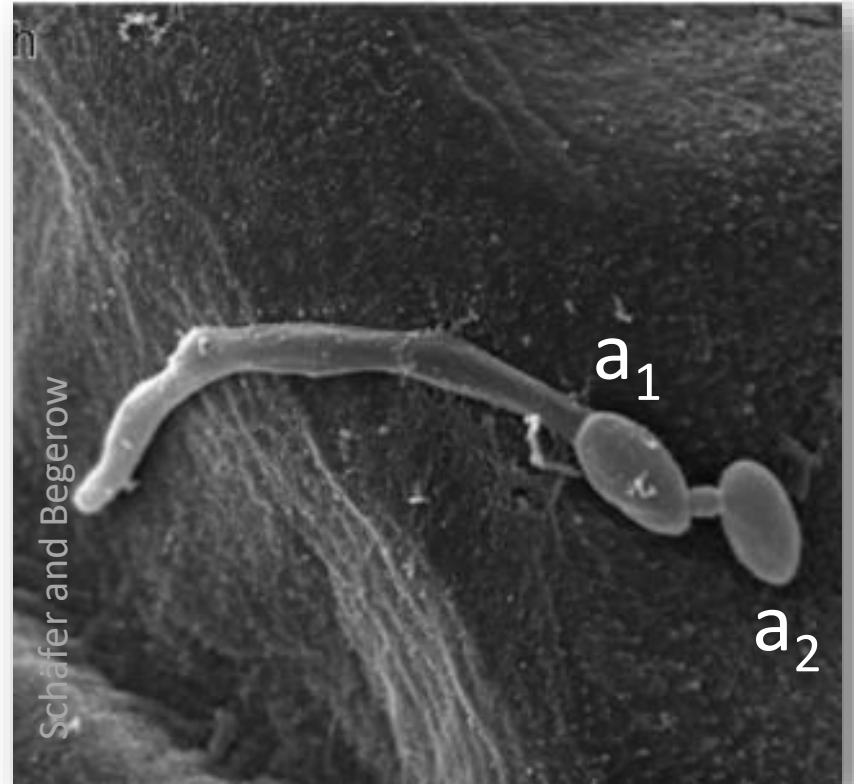
Suppression de recombinaison en plusieurs étapes

Proto X Proto Y



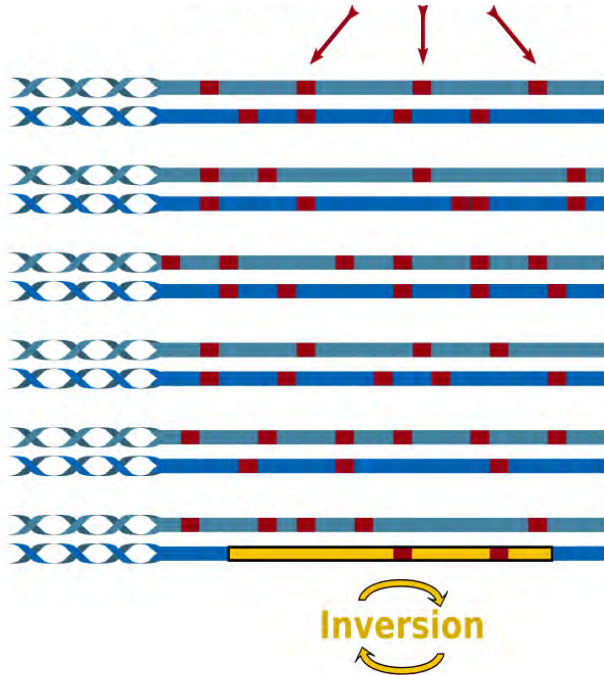
- Gènes de déterminisme du sexe
- Suppression de recombinaison
- Gènes sous sélection antagoniste

Mais alors pourquoi
des chromosomes
sexuels aussi chez les
champignons?



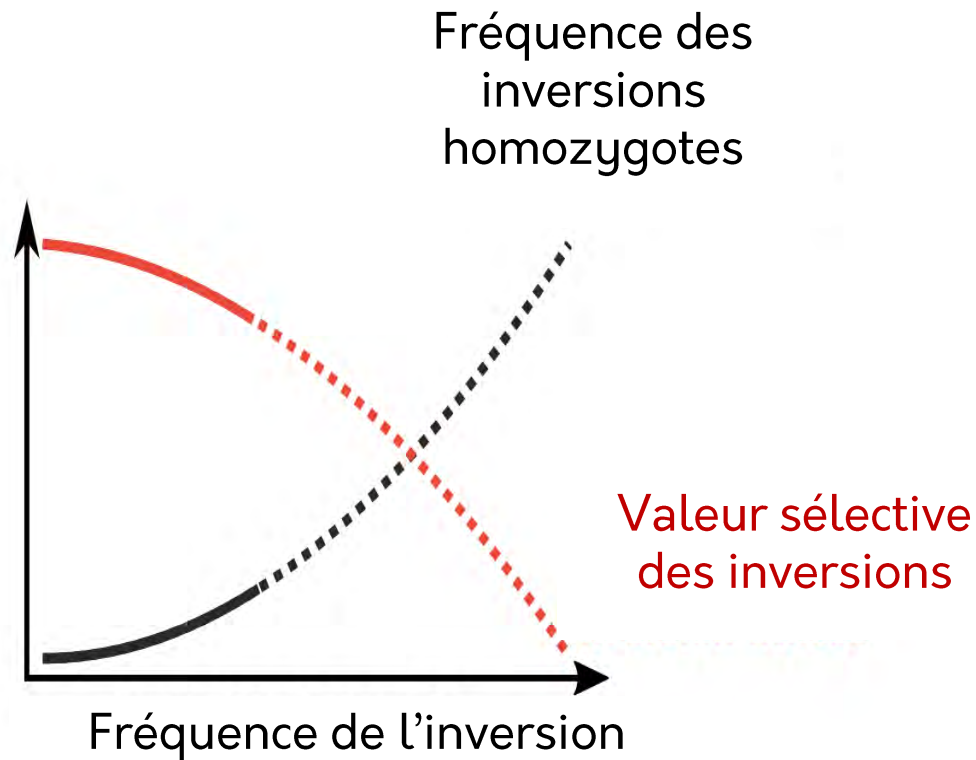
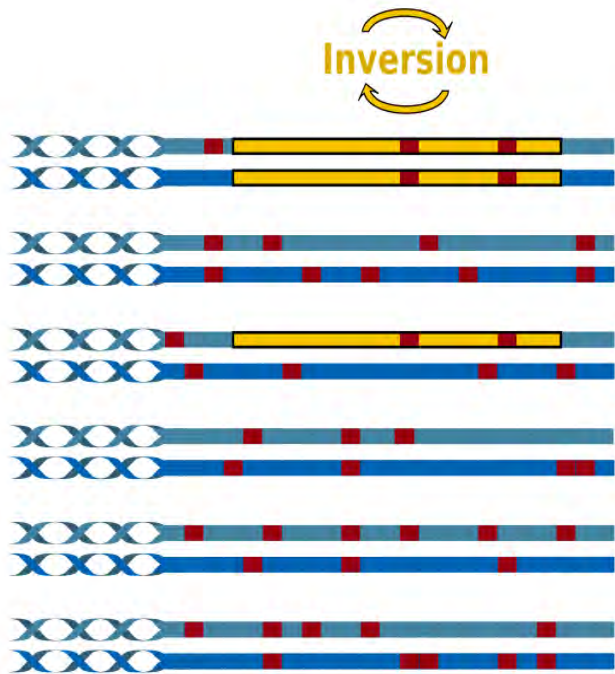
Pour abriter des mutations délétères récessives?

mutations délétères récessives

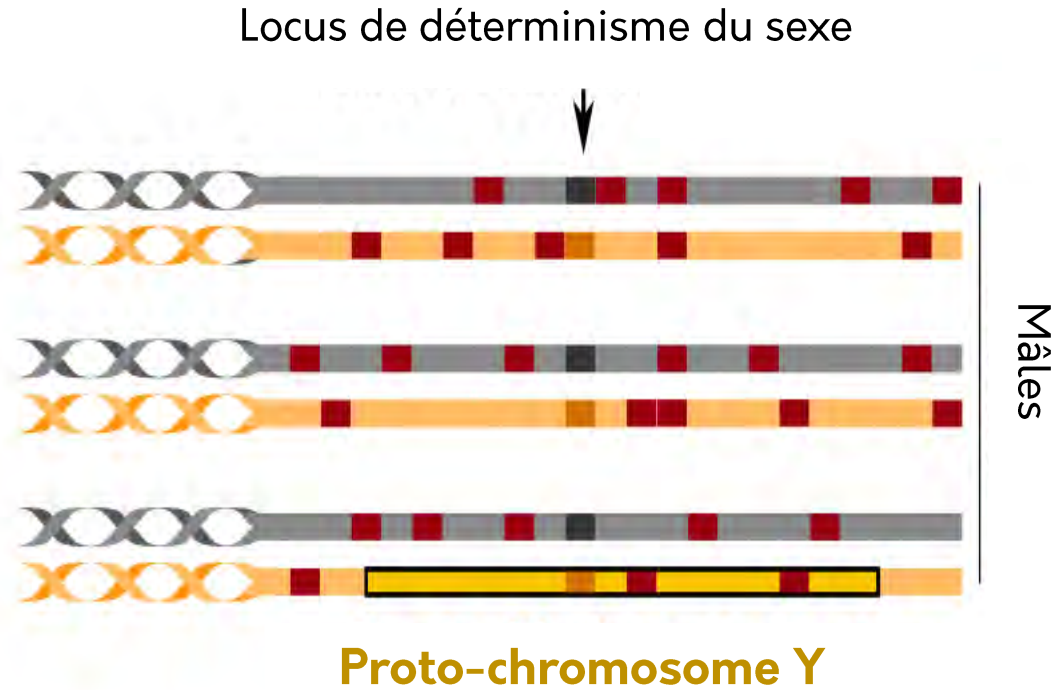


Les inversions avec le moins de mutations délétères sont sélectionnées...

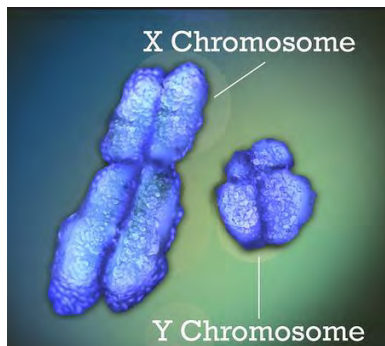
... mais elles ont un désavantage à l'état homozygote



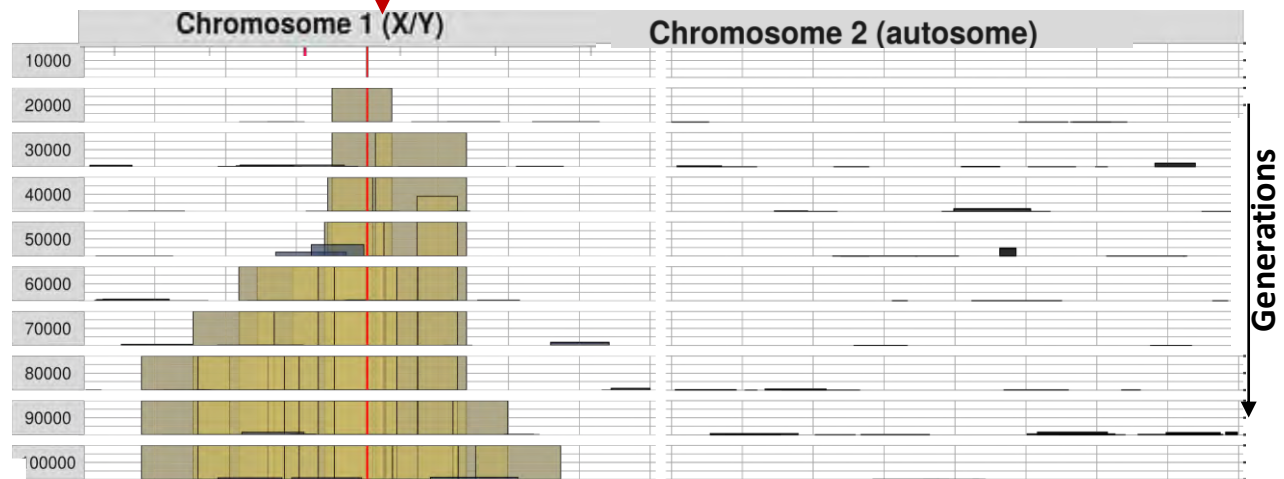
... sauf si elles sont sur le chromosome Y...



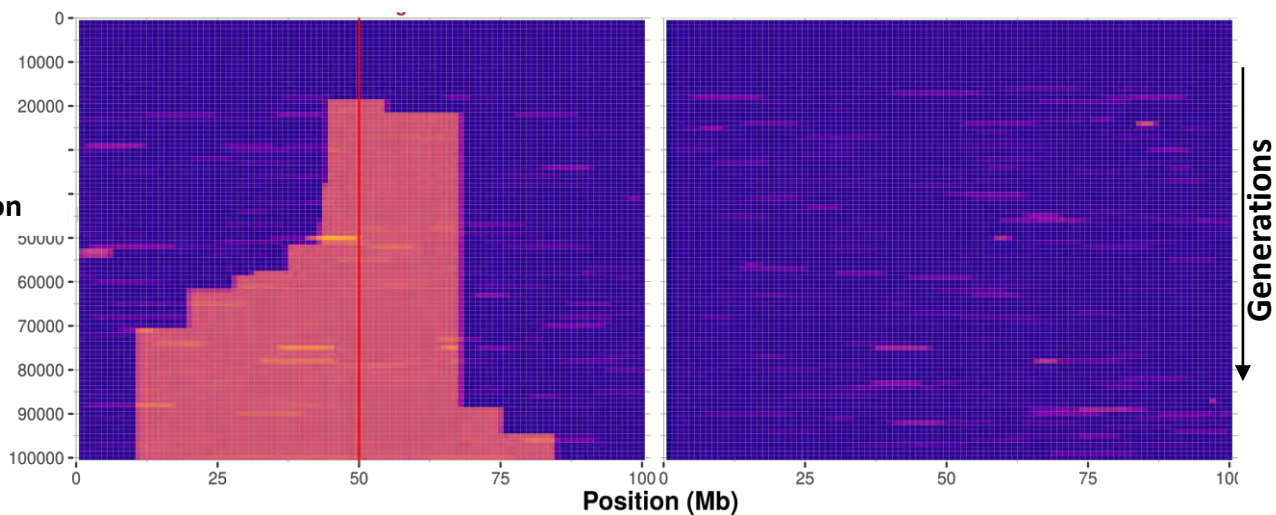
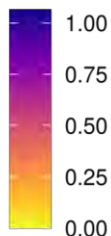
Evolution des chromosomes sexuels pour abriter des mutations délétères?



Gène du déterminisme du sexe mâle



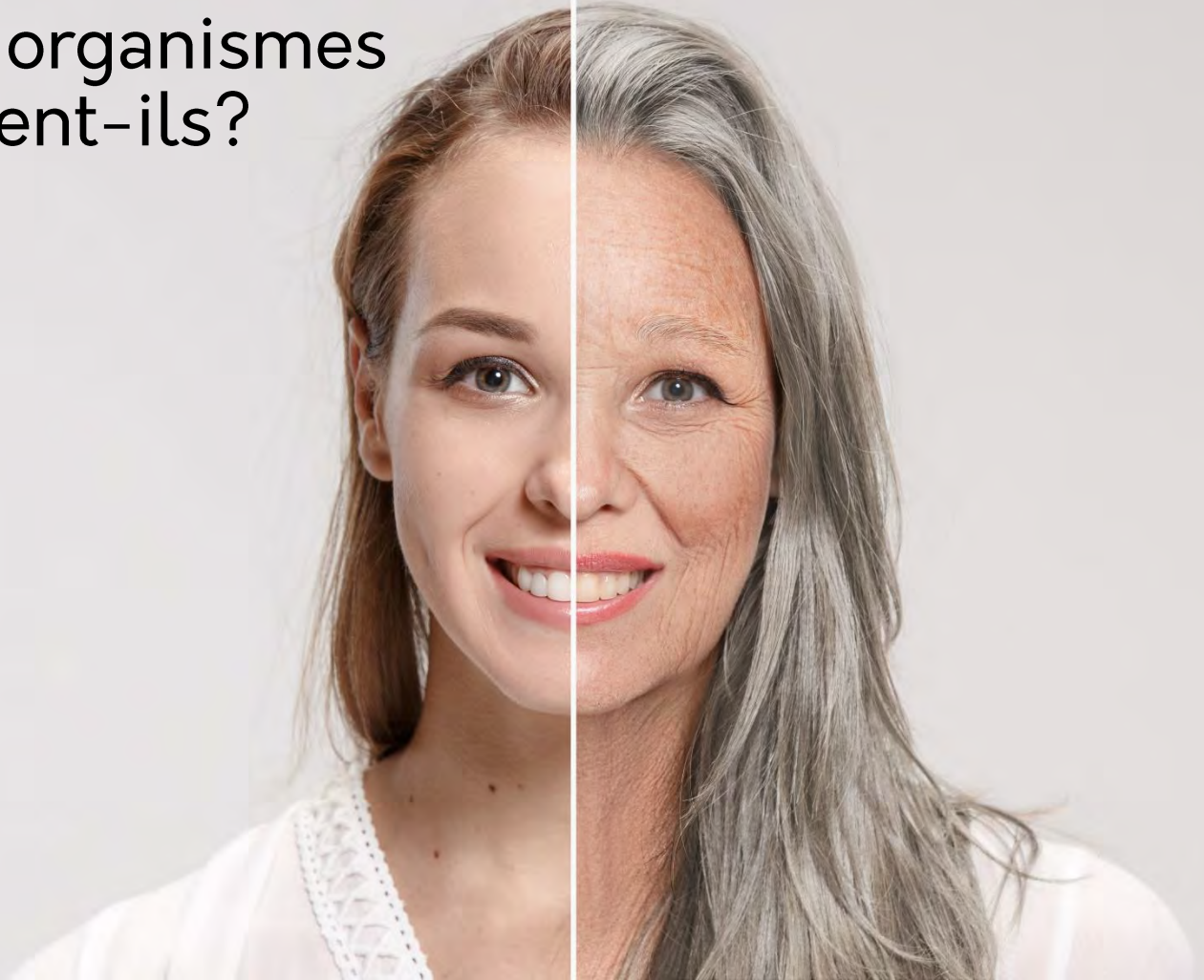
Taux de recombinaison



Pourquoi la reproduction sexuée?
Pourquoi des mâles et des femelles?
Pourquoi autant de mâles que de femelles?
Pourquoi des chromosomes sexuels?



Pourquoi les organismes
vieillissent-ils?



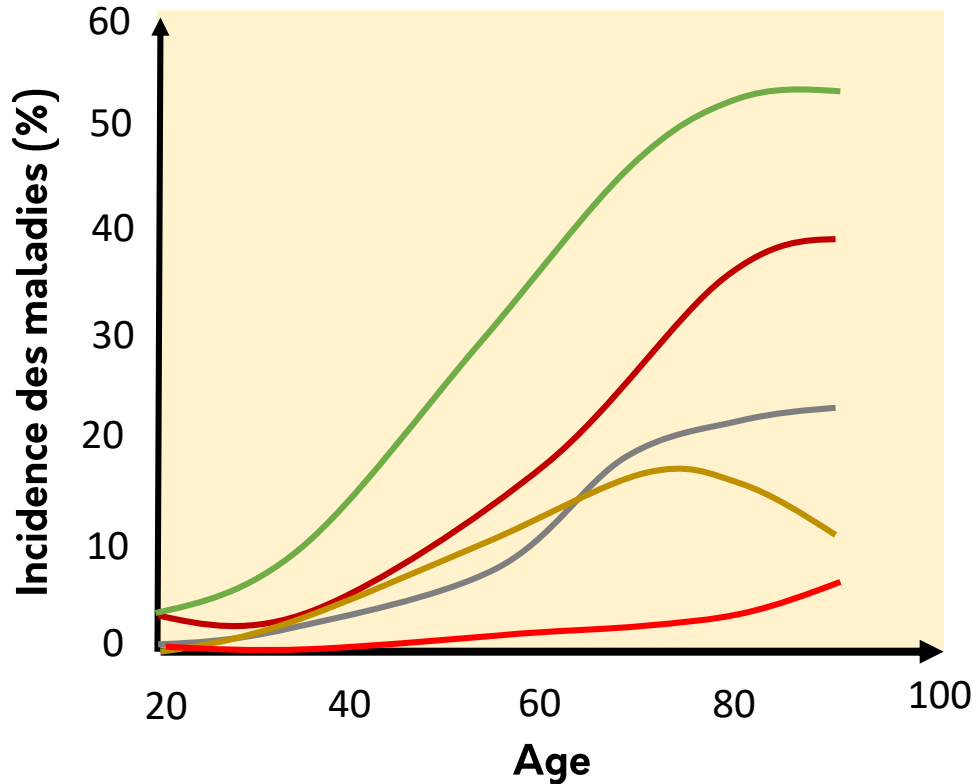
Qu'est-ce que la sénescence?

- Déclin physiologique
- Augmentation de fréquence des maladies
- Diminution de la fertilité
- Augmentation de la mortalité



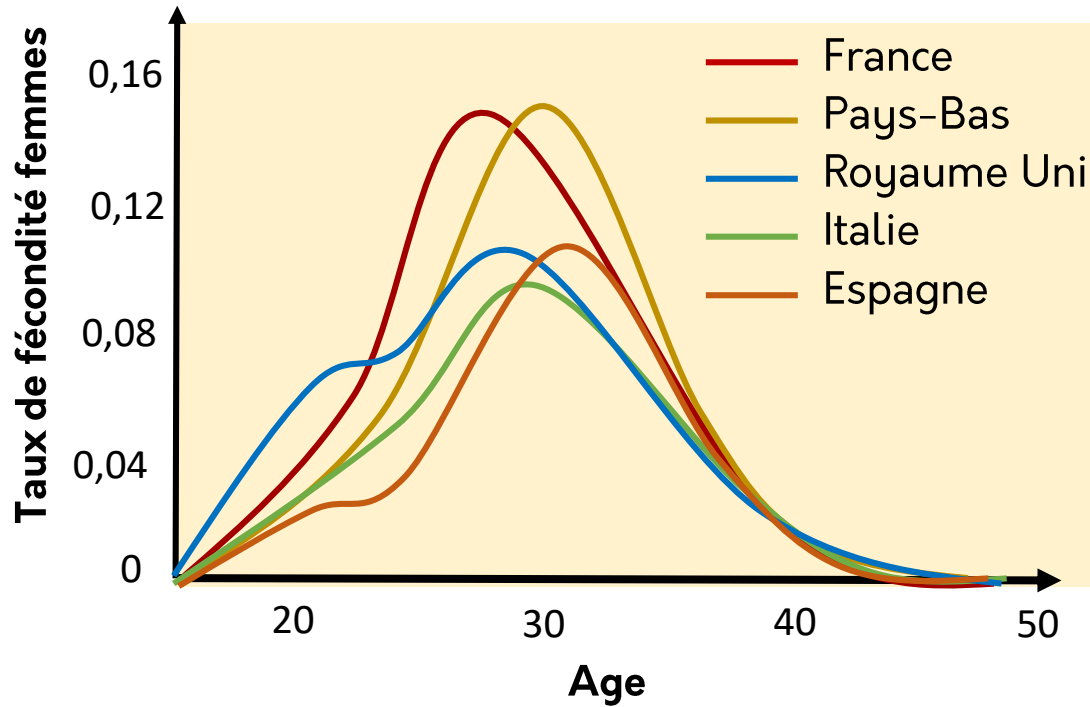
Les trois âges et la Mort,
Hans Baldung

Fréquence des maladies



- Maladie rein
- Arthrite
- Diabète
- Cancer
- Maladies cardio-vasculaires

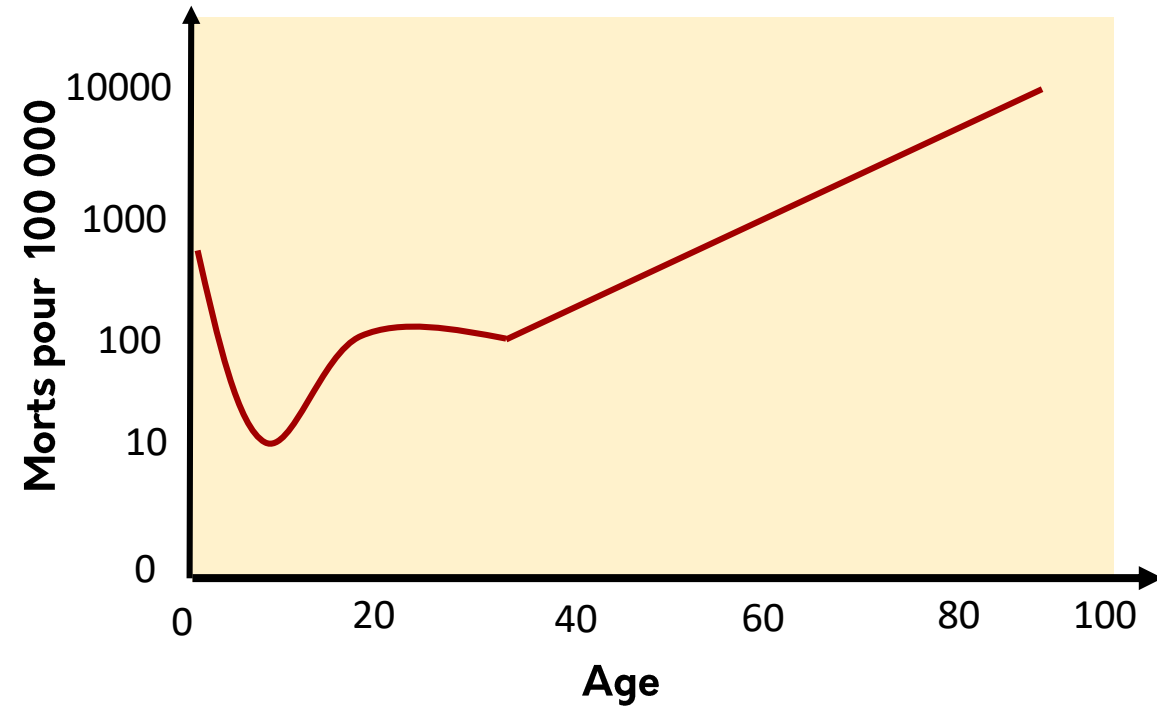
Fertilité

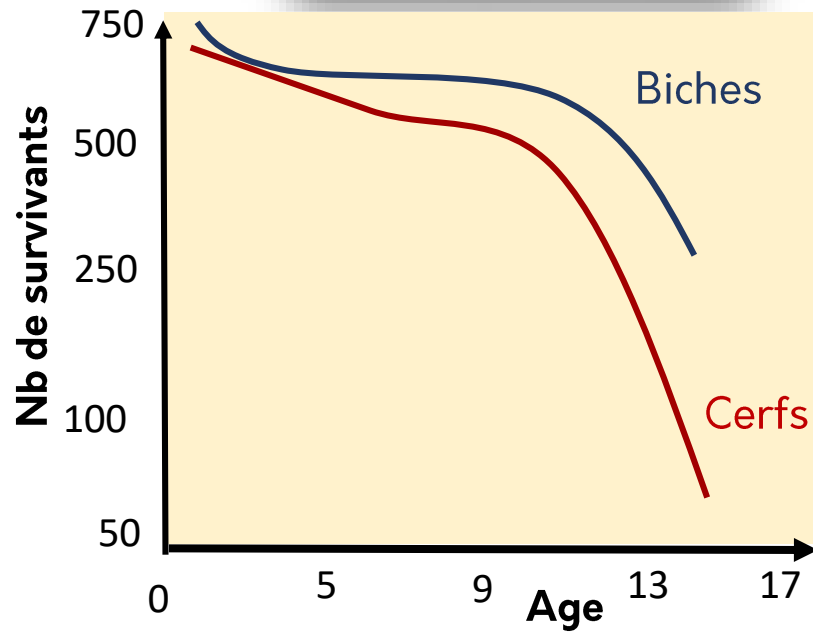
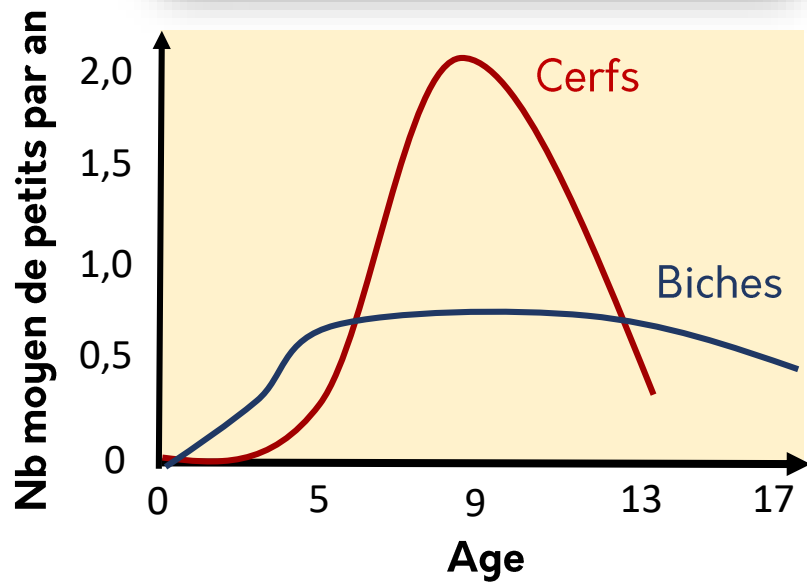


Année 2000 Eurostat



Mortalité





Certains organismes ne vieillissent pas

Pin Bristlecone 4600 ans



Andrew C



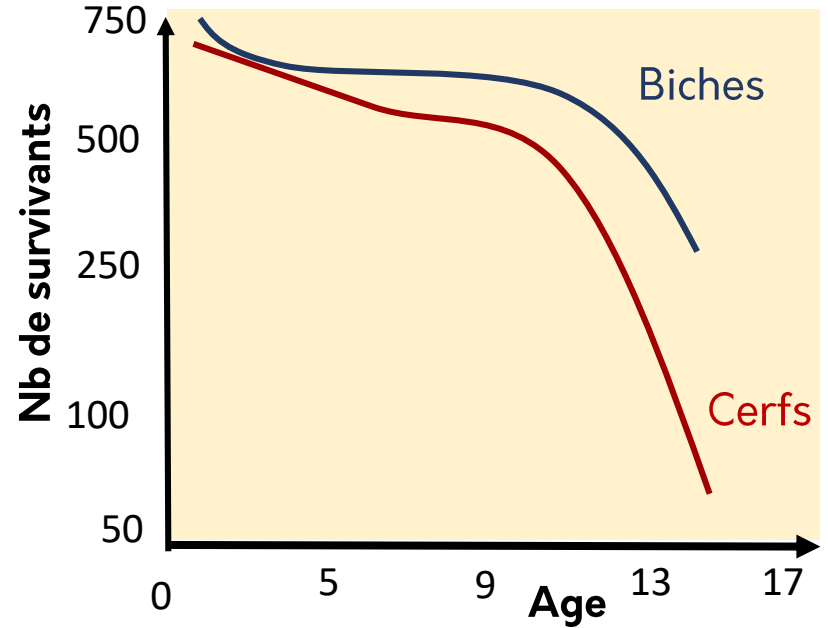
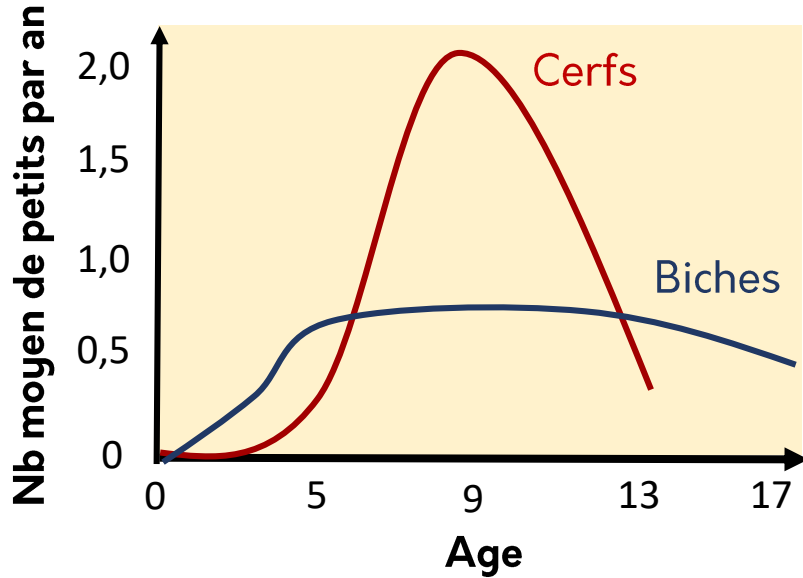
Ed Siernan

Mécanismes proximaux du vieillissement



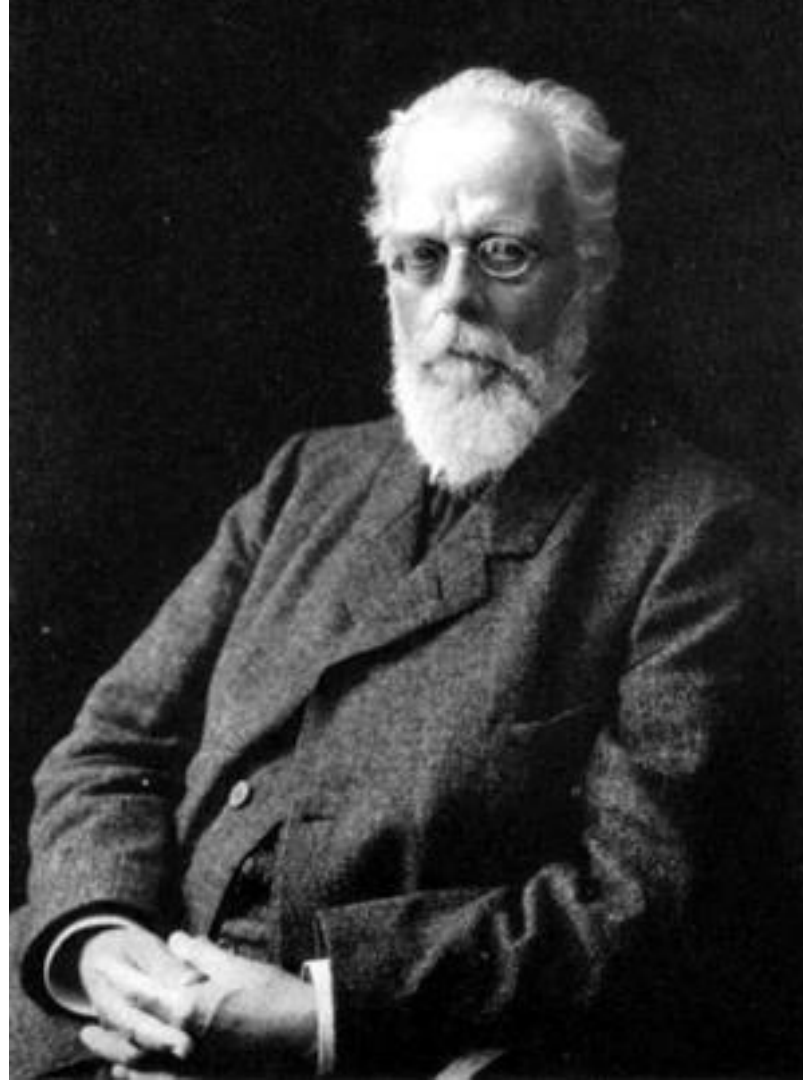
- Production de radicaux libres
- Accumulation d'erreurs non réparées

Pourquoi la sénescence n'est-elle pas contre-sélectionnée?



Pour le bien de l'espèce?

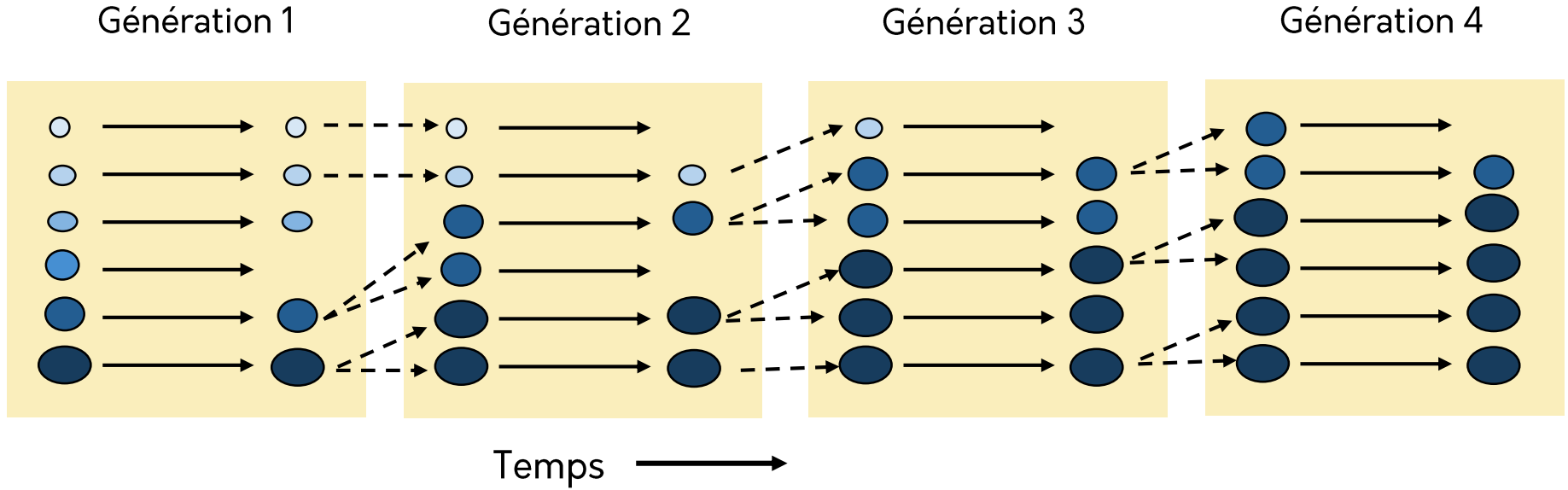
Les individus vieillissent et meurent
pour laisser la place aux jeunes
(Auguste Weismann)



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



Sélection naturelle



Contraintes métaboliques?

Contraintes qui rendent impossible
une plus grande longévité?

(notamment les radicaux libres
produit par le métabolisme?)



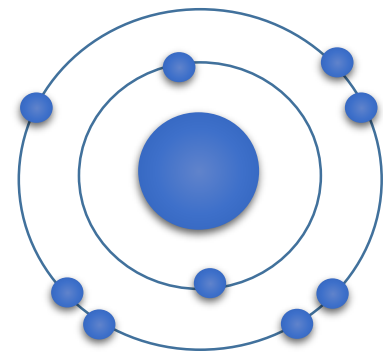
**JAMES
DEAN**

**"REBEL
WITHOUT
A CAUSE"**

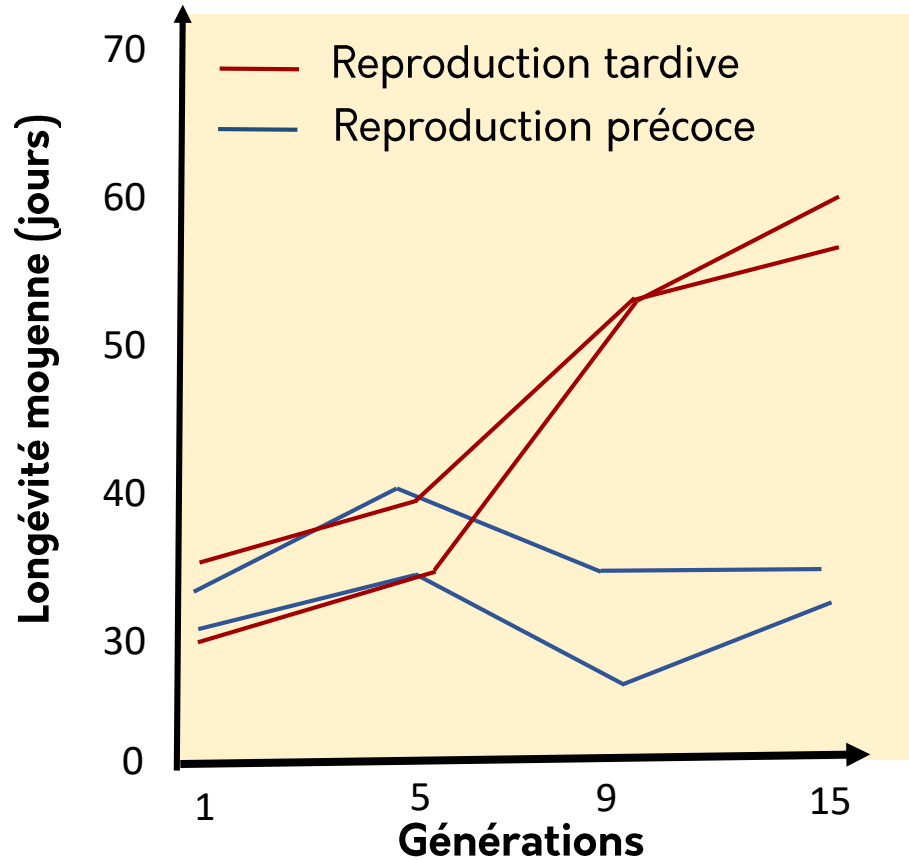


Contraintes métaboliques?

Impossible de sélectionner une plus grande longévité?



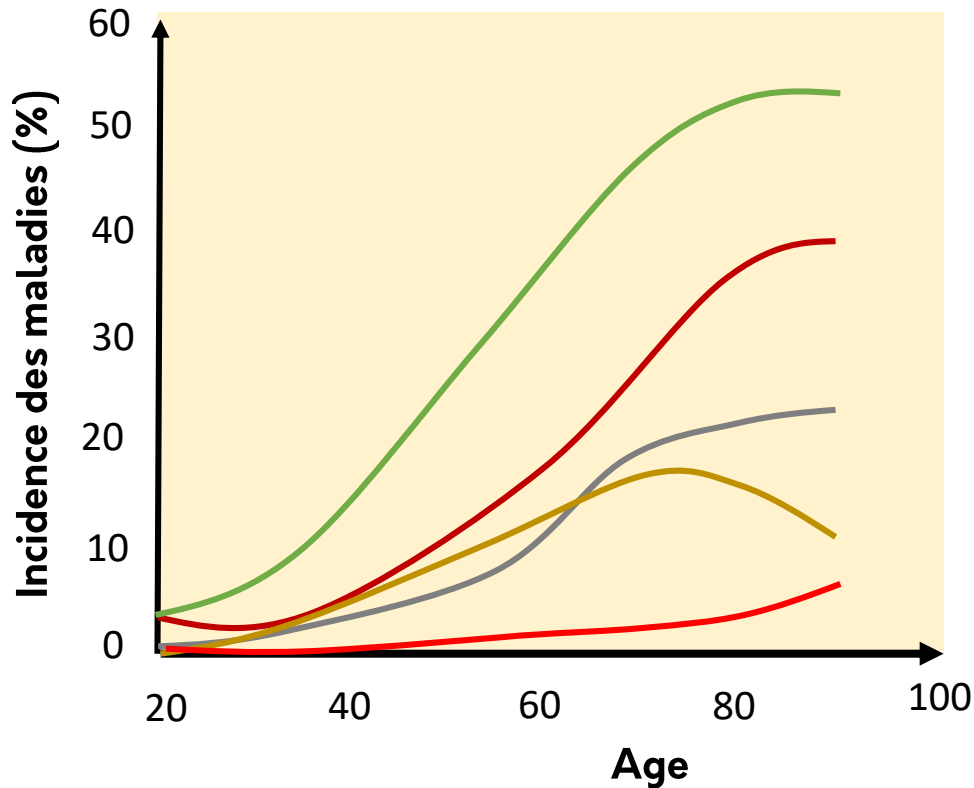
Contraintes métaboliques?



Pourquoi pas de
sélection pour une
plus grande longévité
et moindre
senescence?

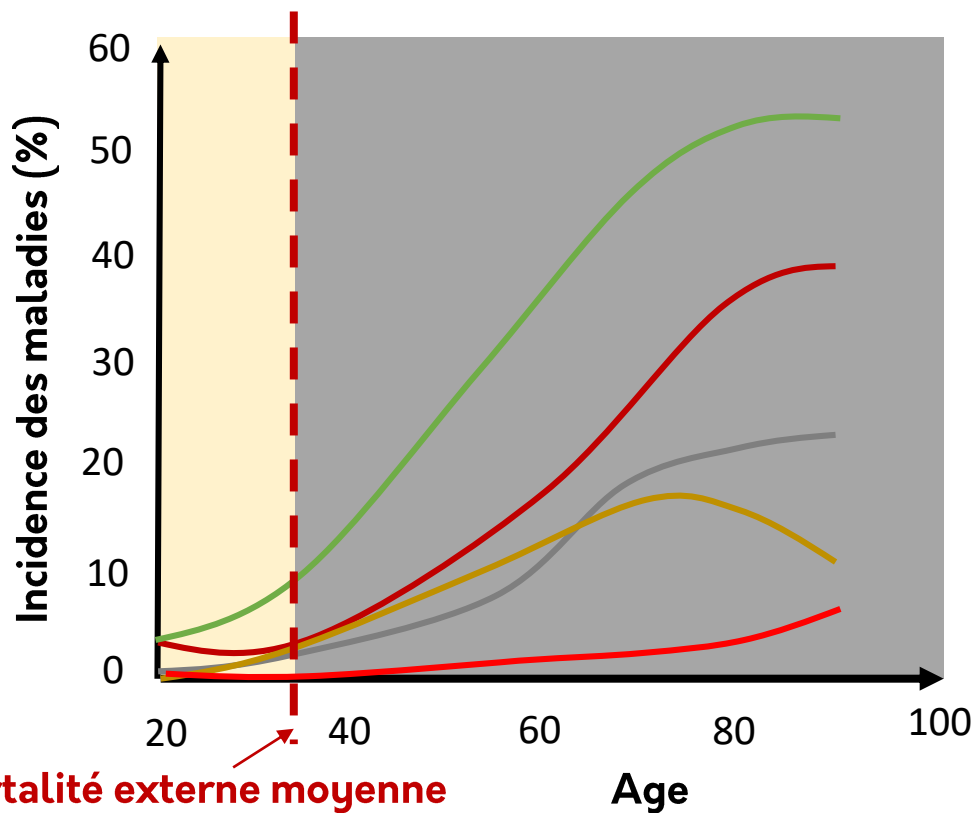


Pourquoi pas de sélection pour une plus grande longévité et moindre sénescence?



- Maladie rein
- Arthrite
- Diabète
- Cancer
- Maladies cardio-vasculaires

Pourquoi pas de sélection pour une plus grande longévité et moindre senescence?

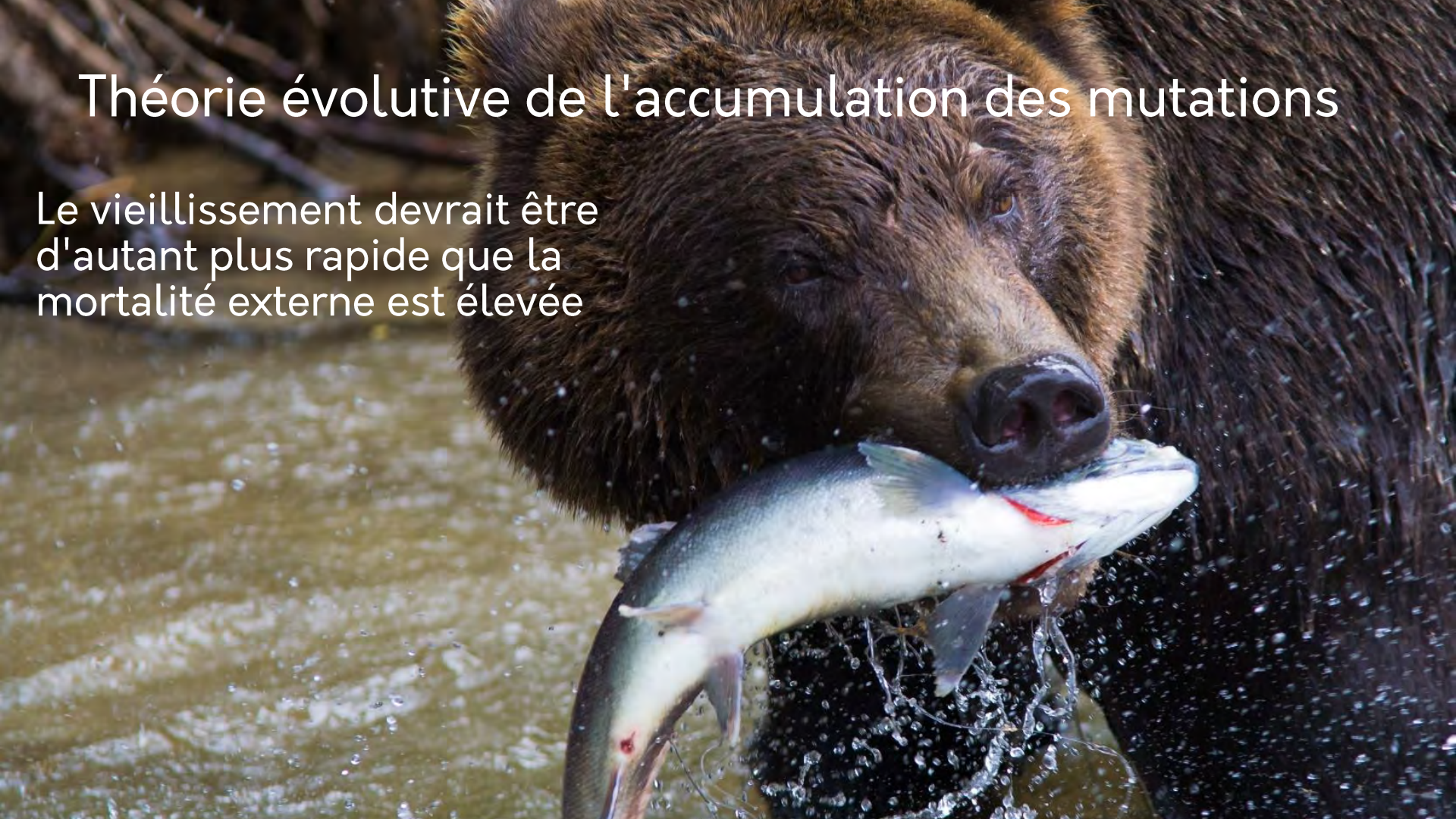


- Maladie rein
- Arthrite
- Diabète
- Cancer
- Maladies cardio-vasculaires

Mortalité externe moyenne

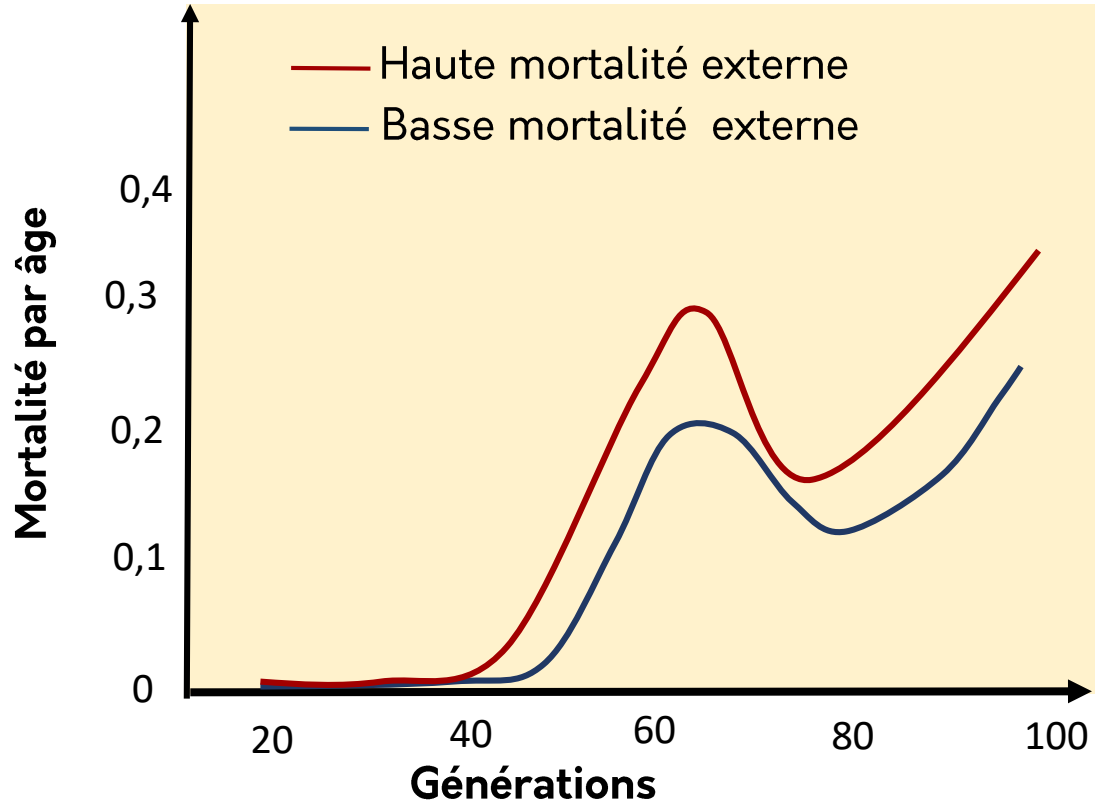
Théorie évolutive de l'accumulation des mutations

Le vieillissement devrait être d'autant plus rapide que la mortalité externe est élevée

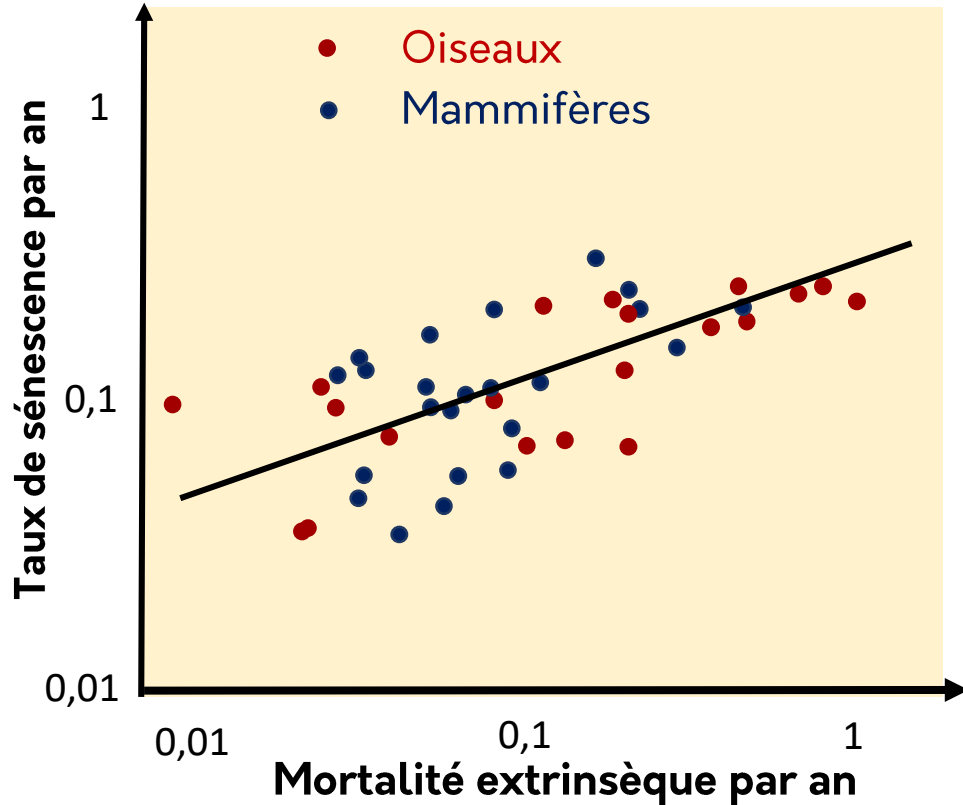


Effet mortalité externe?

En 13 générations, la durée de vie moyenne est passée de 35 à 60 jours



Effet mortalité externe?



Effet mortalité externe?

Pas de sénescence chez les champignons, sauf ceux vivant dans des habitats éphémères comme les fèces



La pléiotropie antagoniste "Je paierai plus tard"

Gènes avec un effet positif sur la survie de l'individu avant l'âge de reproduction et négatif ensuite



**JAMES
DEAN**

**"REBEL
WITHOUT
A CAUSE"**



La pléiotropie antagoniste

Les souris possédant des cellules qui ne sénescent pas meurent jeunes de cancer

Corrélation négative entre la fécondité des jeunes et la longévité
(analyses de fratries, croisements entre lignées)



La pléiotropie antagoniste

Mutations à effets pléiotropes:

- *Coenorhabditis elegans* : mutation *age-1* augmente la survie mais réduit la fertilité
- *Drosophila subobscura* mutation *grandchildless* : Les descendantes femelles ont des longévités plus élevées, mais pas d'ovaires....



Antje Thomas, Schulenburg Lab, Kiel



Martin Cooper

Pourquoi les organismes vieillissent-ils?

- Non contre-sélection des mutations à effet tardifs
- D'autant plus tôt que la mortalité externe est élevée
- Effets pléiotropes



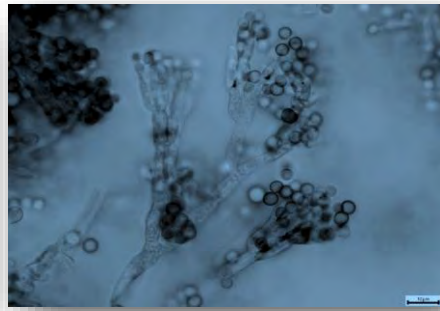
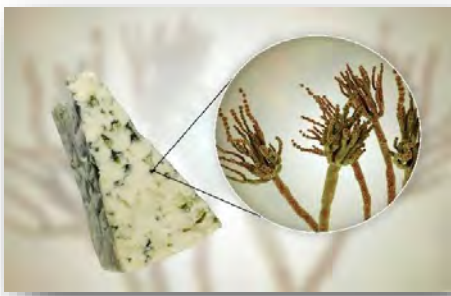
Pourquoi la reproduction sexuée?
Pourquoi des mâles et des femelles?
Pourquoi autant de mâles que de femelles?
Pourquoi des chromosomes sexuels

Pourquoi vieillit-on?

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

Theodosius Dobjansky





Etudier la domestication pour
comprendre l'évolution et l'adaptation:
cas des pommiers et
des champignons du fromage



Conseils lectures

Pierre-Henri Gouyon
Jean-Pierre Henry
Jacques Arnould

Les avatars du gène



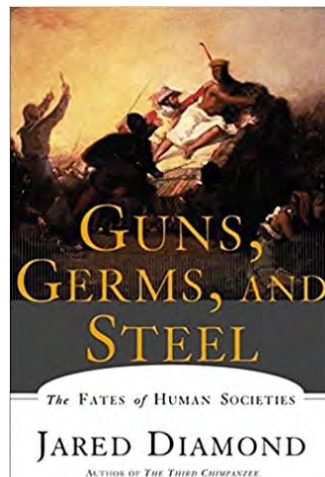
Richard Dawkins
Le Gène égoïste



Robert Axelrod
**Comment réussir
dans un monde
d'égoïstes**
Théorie du comportement
coopératif



Laurent Keller
Élisabeth Gordon
La Vie des fourmis



THE
RED QUEEN



**Sex and the Evolution
of Human Nature**

'Animals and plants evolved sex to fend off parasitic infection. Now look where it has got us. Men want BMWs, power and money in order to pair-bond with women who are blonde, youthful and narrow-waisted ... a brilliant examination of the scientific debates on the hows and whys of sex and evolution'
— Independent

MATT RIDLEY

**THE ORIGINS
OF VIRTUE**



'If my *The Selfish Gene* were to have a Volume Two devoted to humans, *The Origins of Virtue* is pretty much what I think it ought to look like'
— Richard Dawkins in *The Times Literary Supplement*, International Books of the Year

MATT RIDLEY



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —



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