

# Pourquoi autant d'espèces sur terre? Origine de la vie?

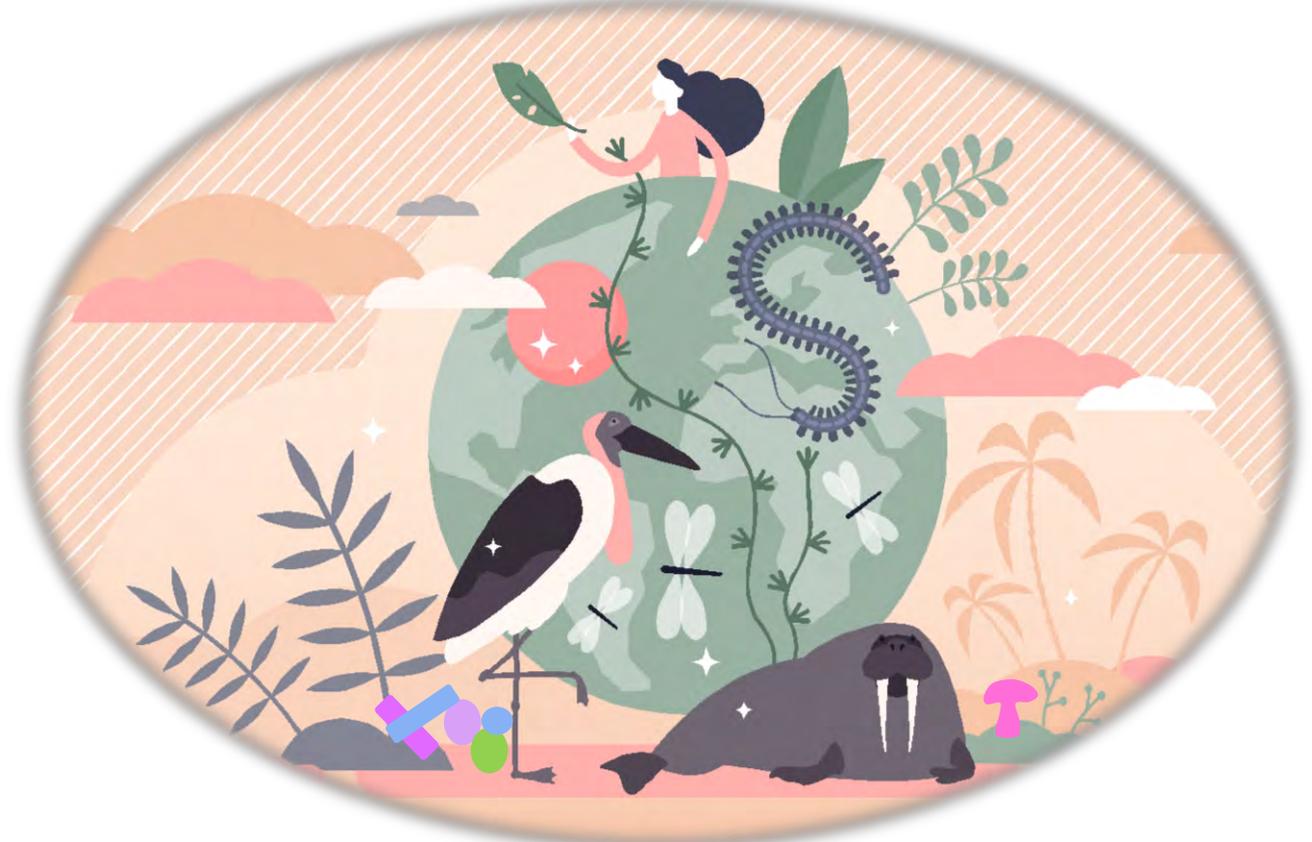
Tatiana Giraud



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —



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

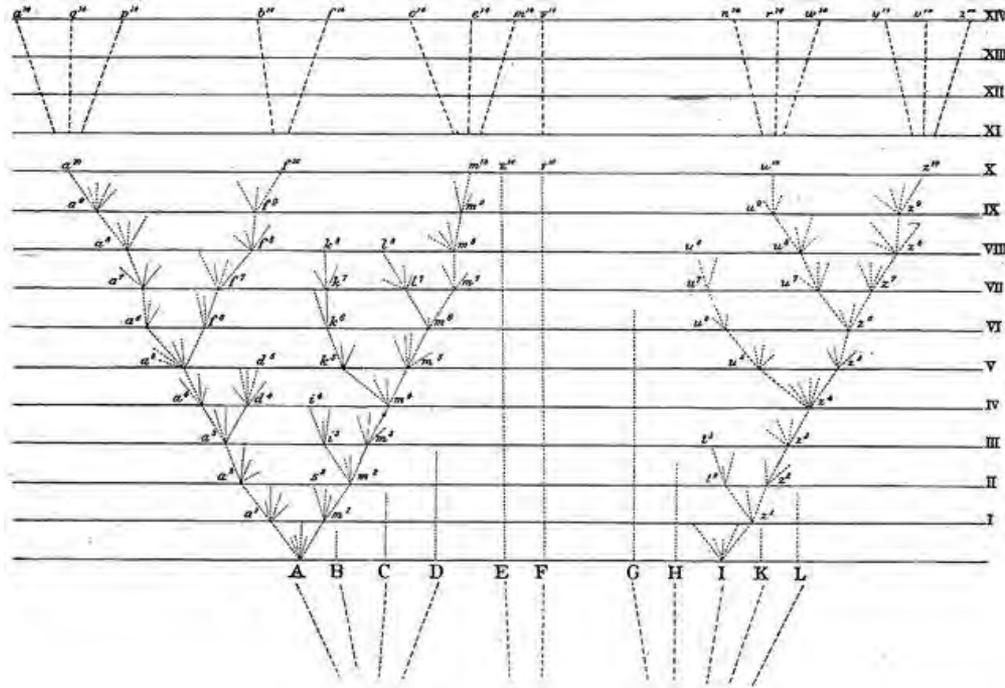




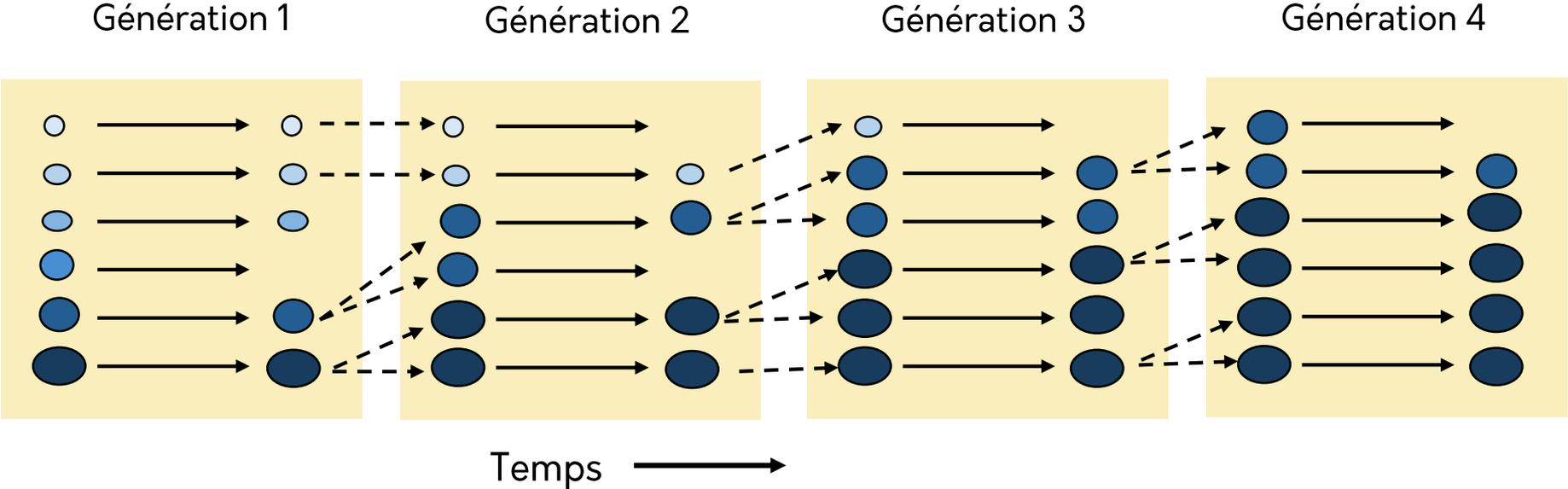
Pourquoi autant  
d'espèces sur  
terre?

# Charles Darwin :

## “On the origin of species by means of natural selection”

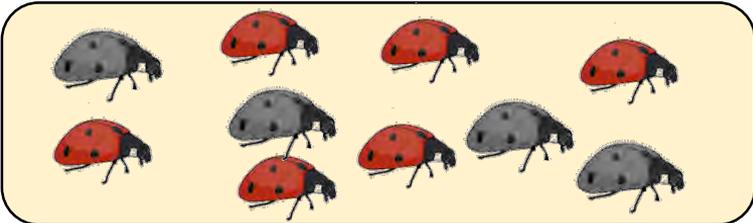


# Sélection naturelle

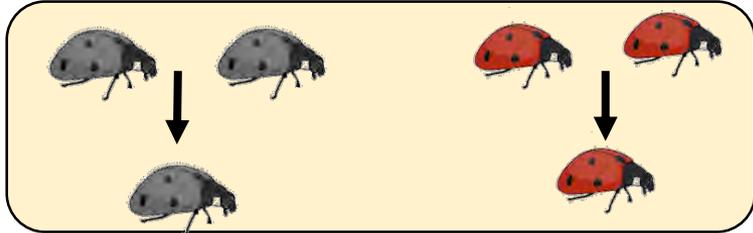


# Evolution par sélection naturelle

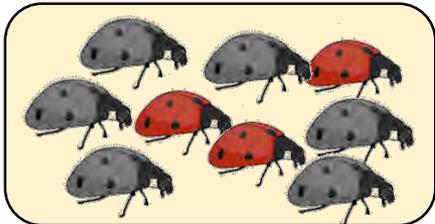
Variation



Héritabilité



Différences de survie ou succès reproducteur



Génération →

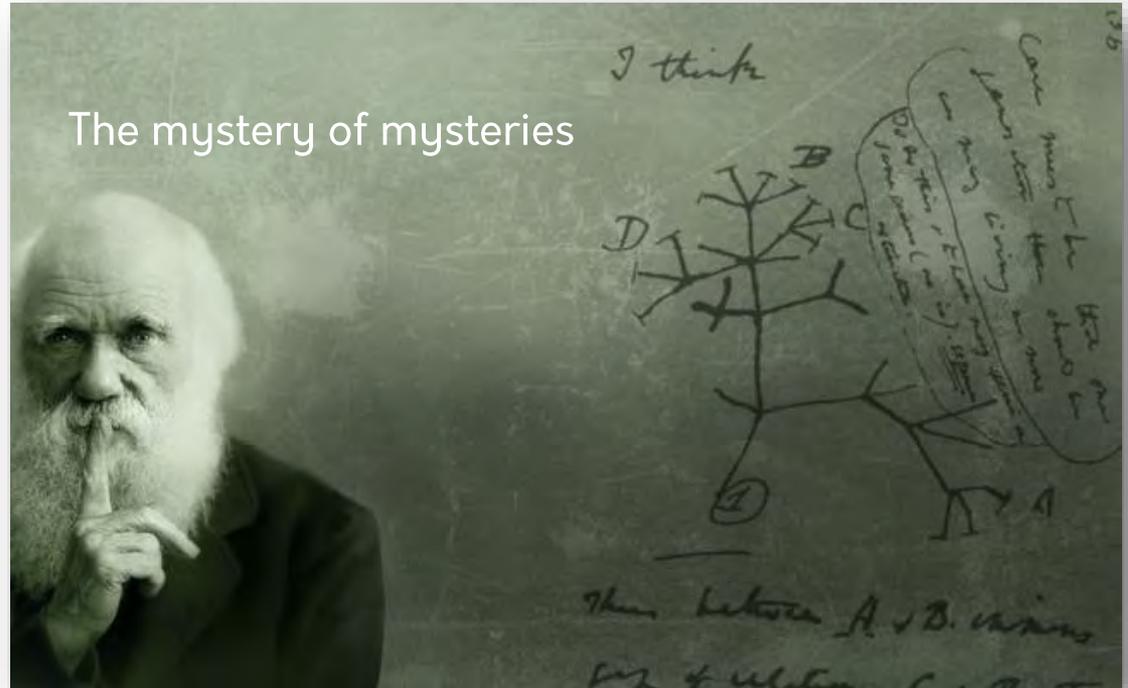
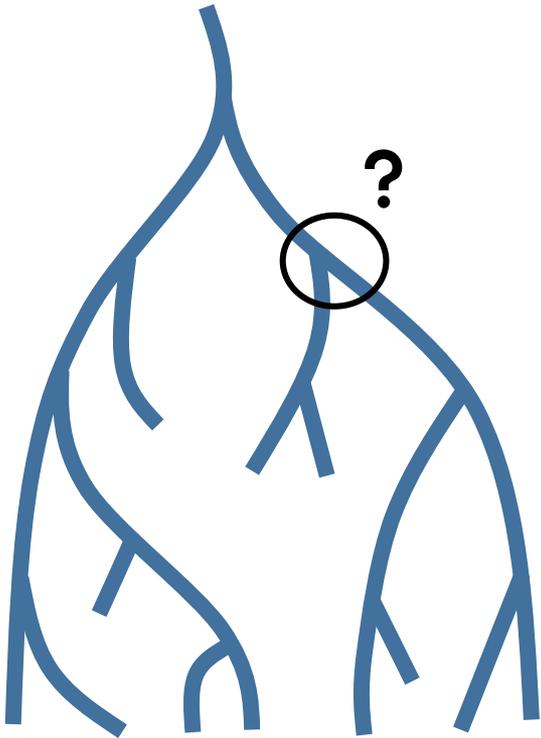


Génération →

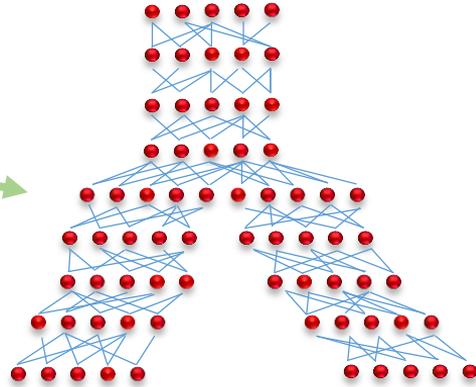
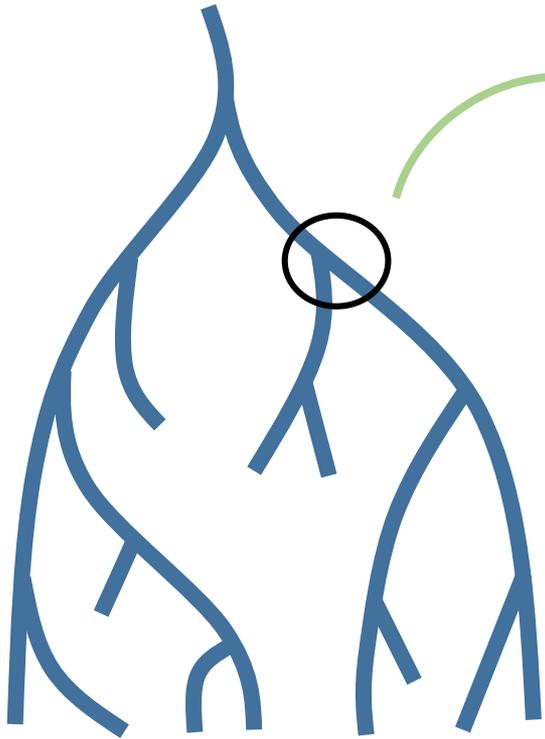


# Spéciation: un problème fondamental toujours pas résolu

Spéciation: divergence d'une lignée évolutive en deux



# Comment stopper les flux de gènes?

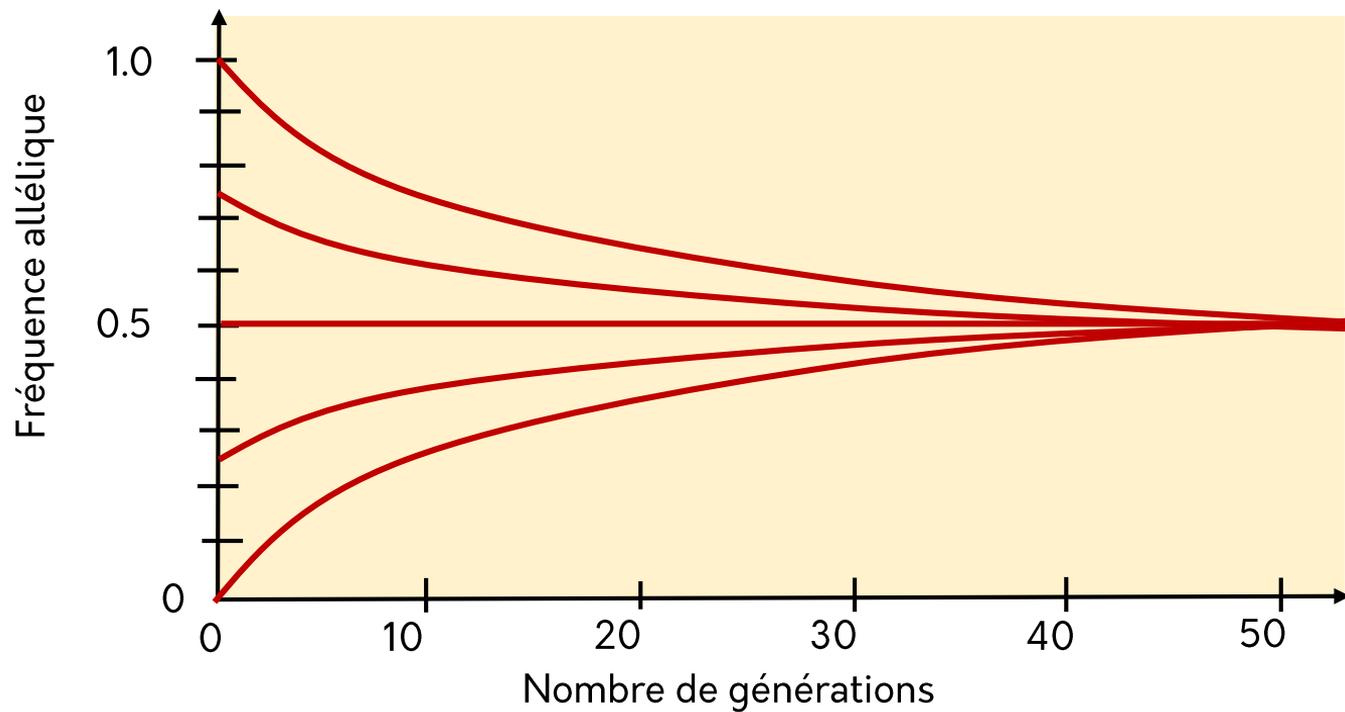


Andreas Kay

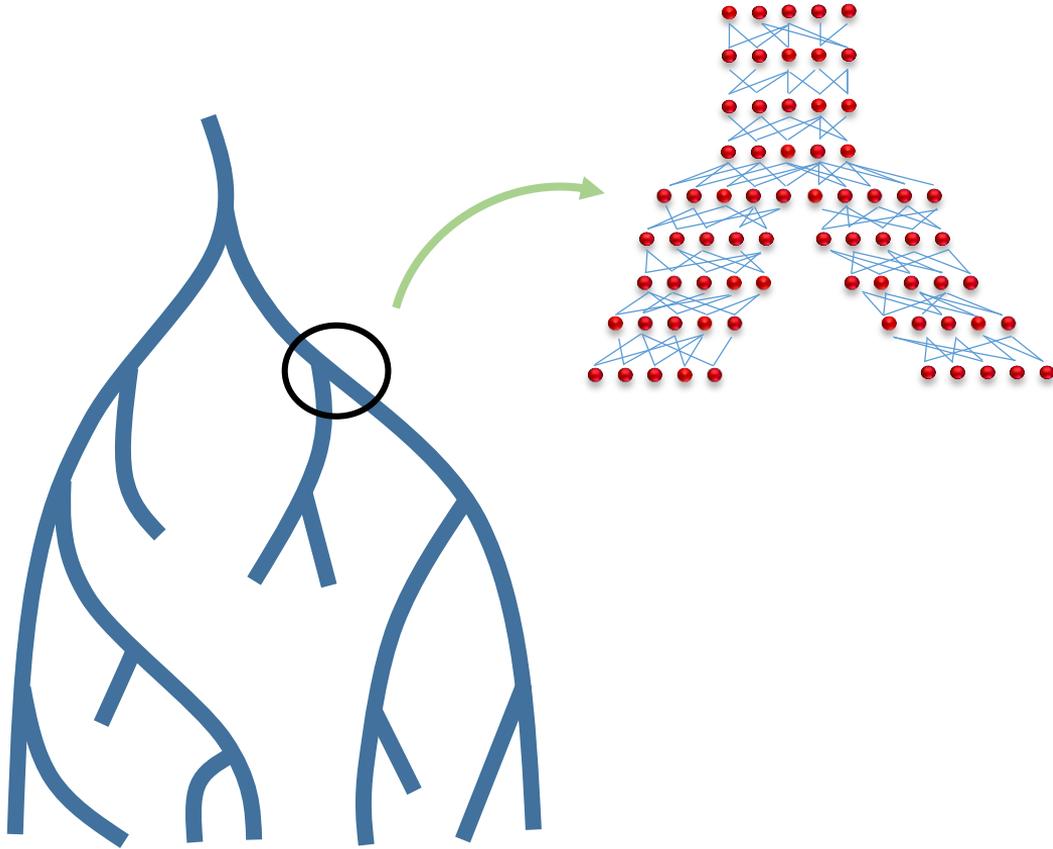


Chris Jiggins, PLOS Biology

# La migration homogénéise très vite les fréquences alléliques

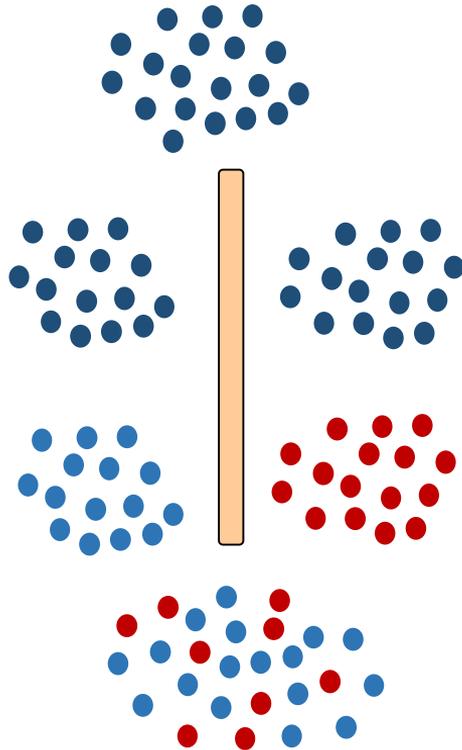


# Comment évolue l'isolement reproducteur?



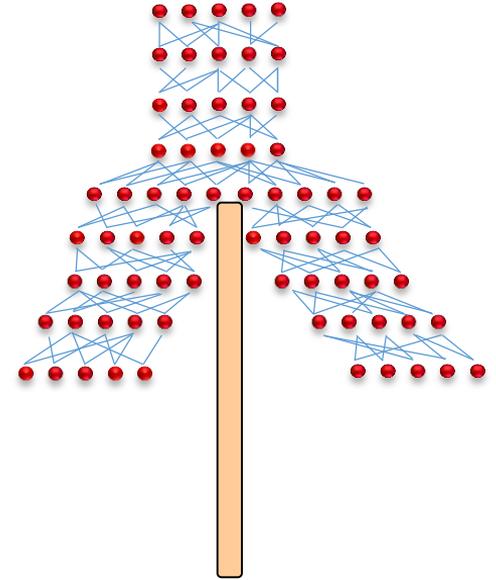
# Comment évolue l'isolement reproducteur?

Allopatrie



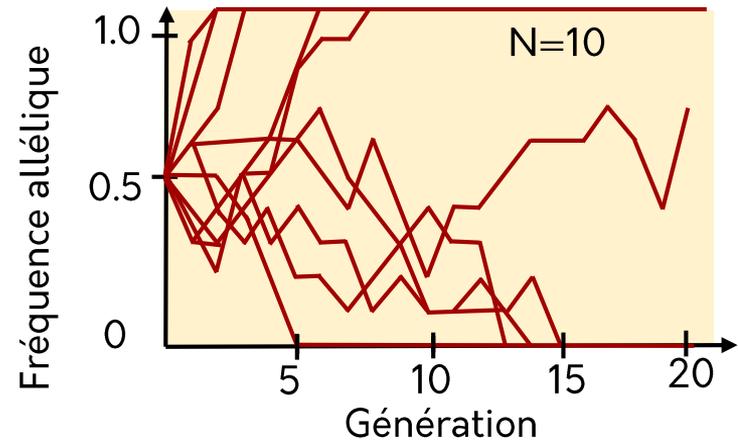
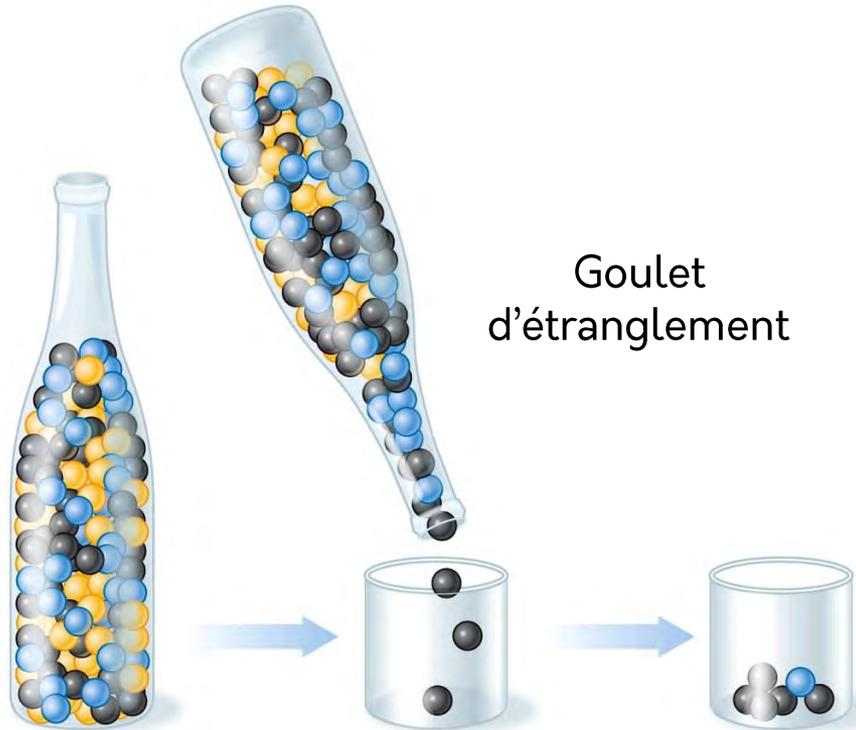
Sélection  
Dérive génétique

Temps



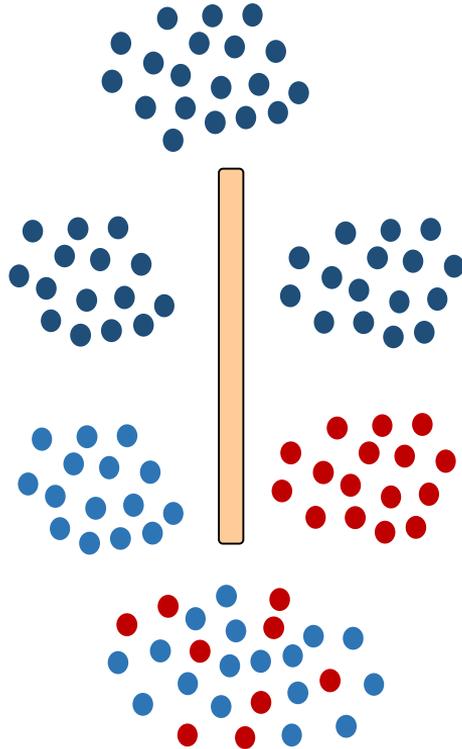
# Dérive génétique

## Stochasticité

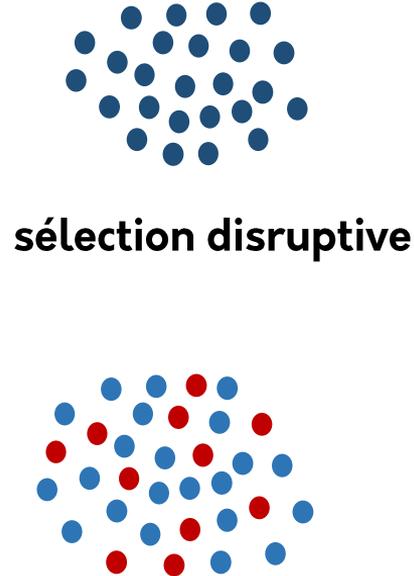


# Comment évolue l'isolement reproducteur?

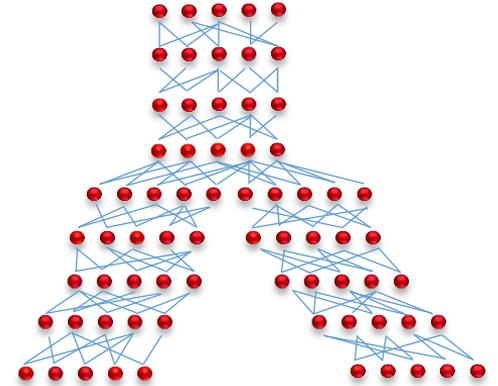
Allopatrie



Sympatrie



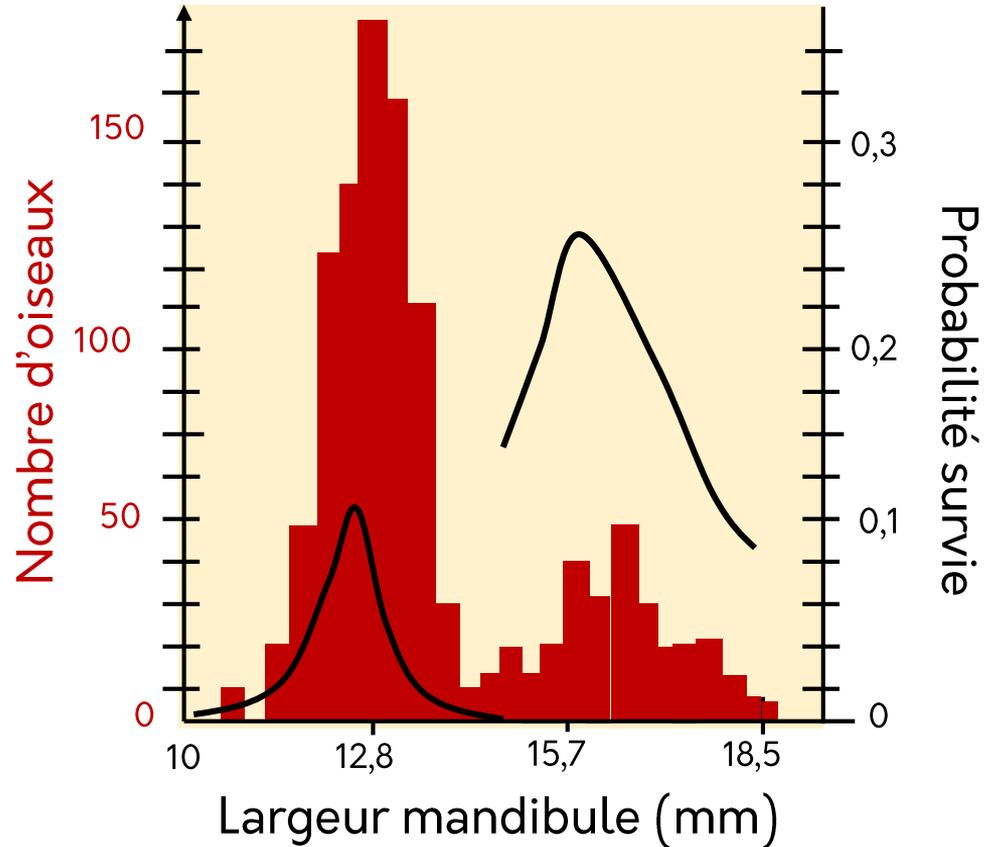
Temps



# Sélection disruptive: il faut que les intermédiaires soient désavantagés



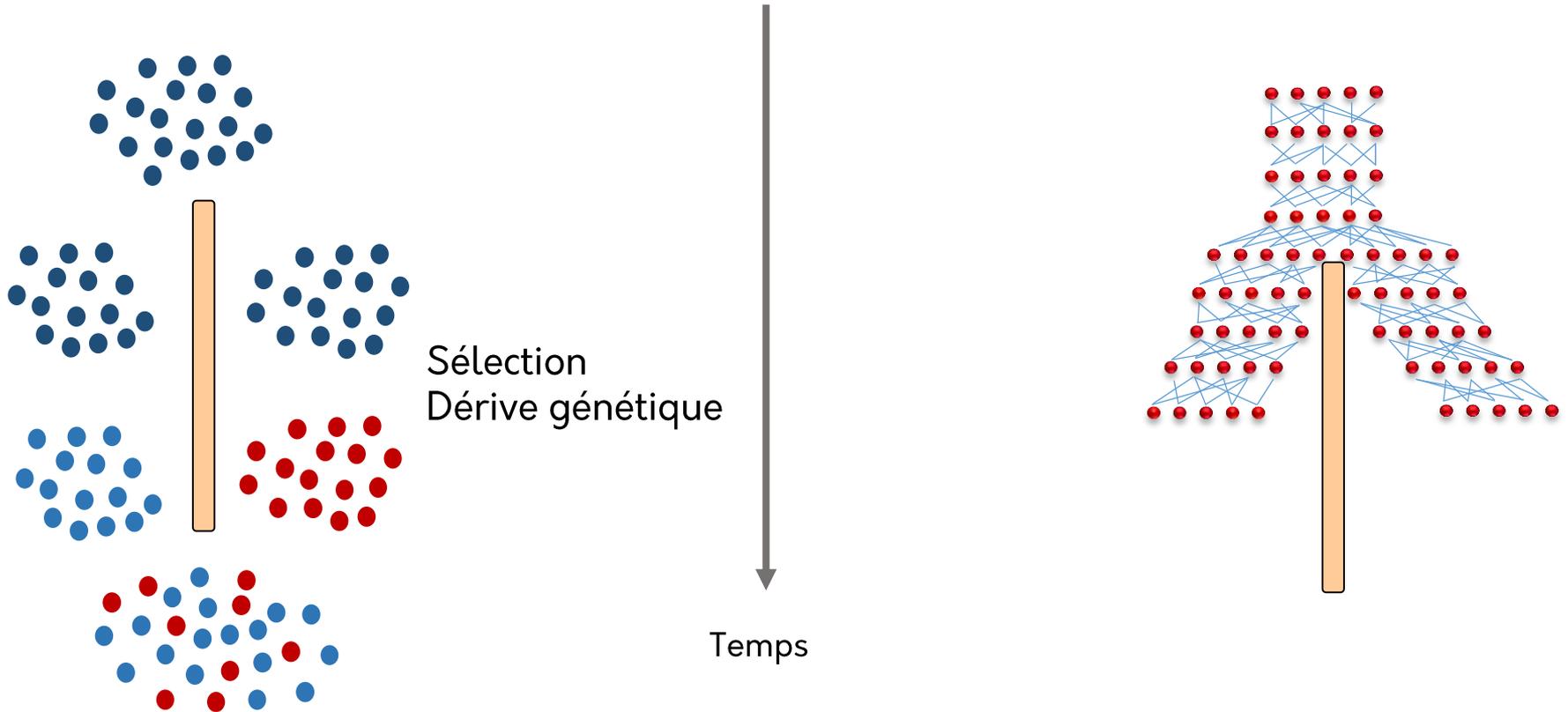
*Pyrenestes ostrinus*



Sélection disruptive



# La spéciation allopatrique

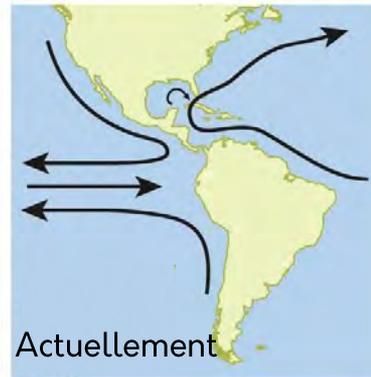
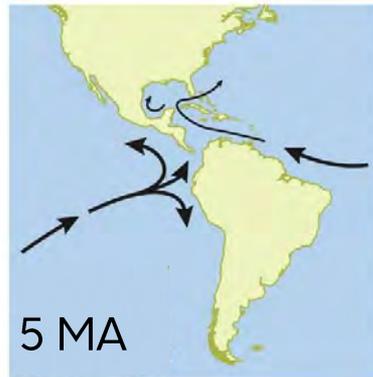
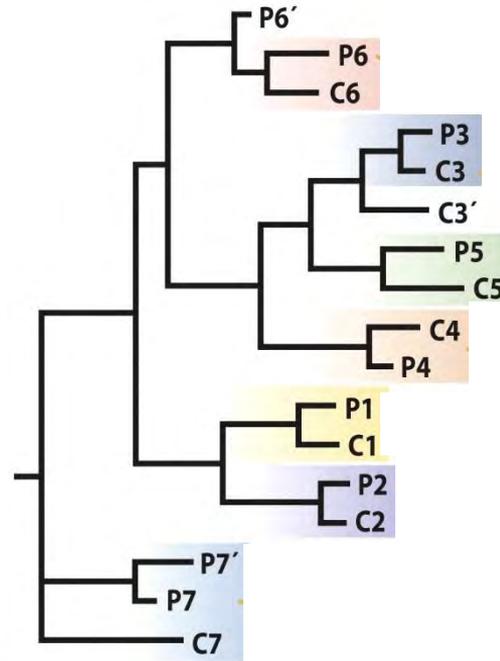


# La spéciation allopatrique

Pas de problème théorique

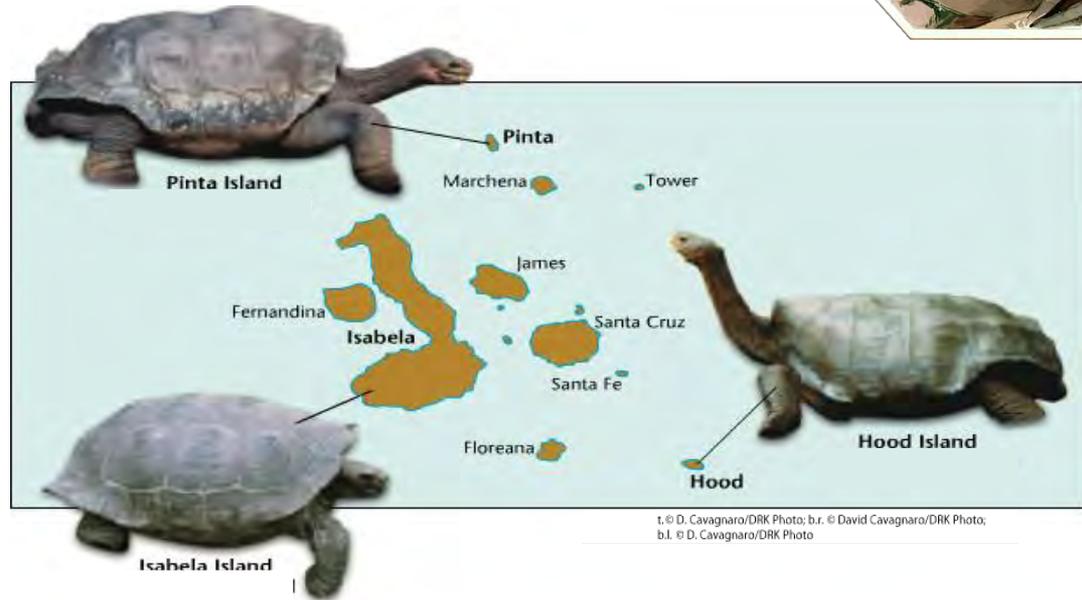
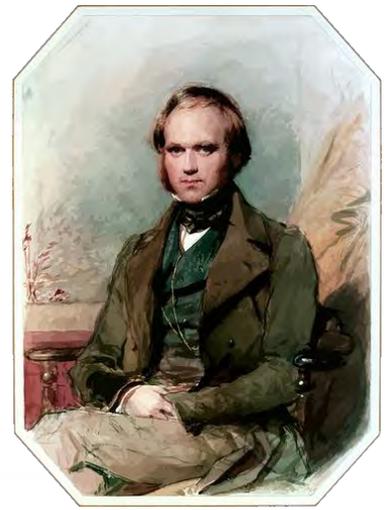
Paires d'espèces avec

- dates de divergences similaires
- mêmes barrières géographiques



# La spéciation allopatrique

Espèces proches dans les archipels  
Pinsons de Darwin aux Galapagos



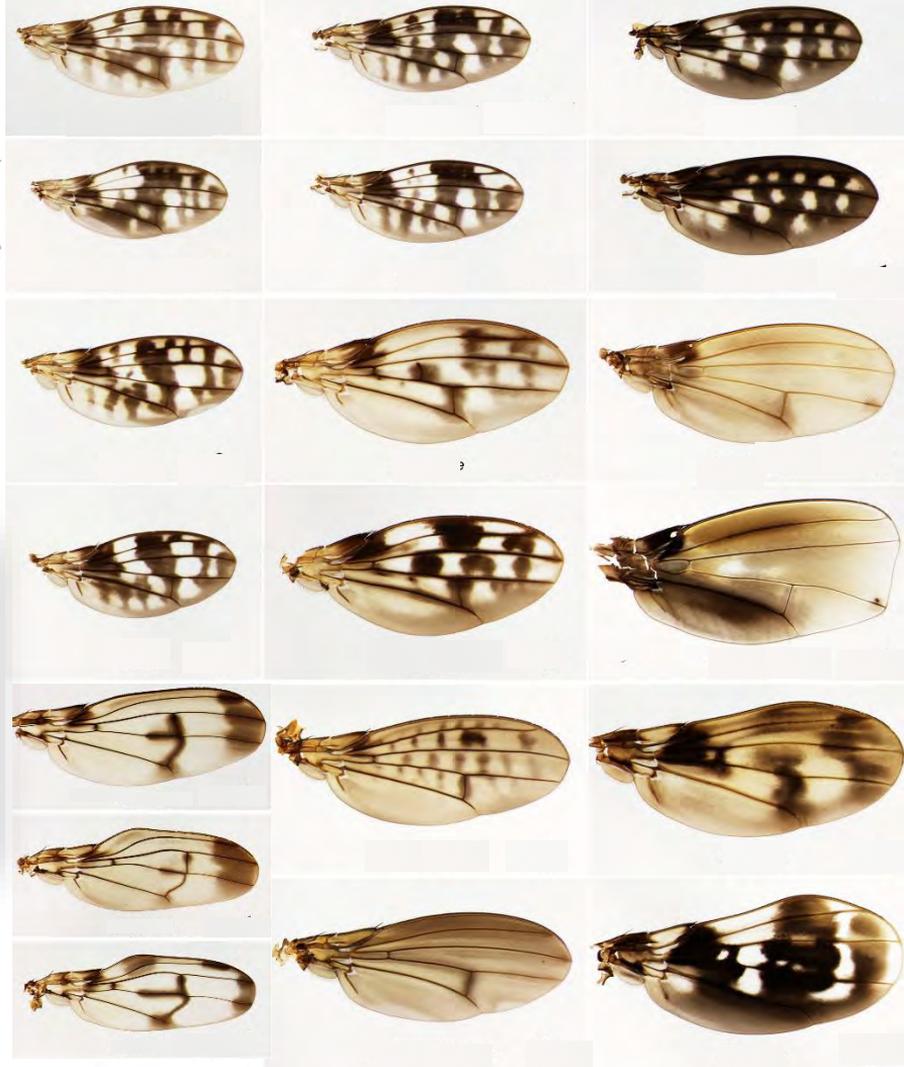
t. © D. Cavagnaro/DRK Photo; b.r. © David Cavagnaro/DRK Photo;  
b.l. © D. Cavagnaro/DRK Photo

# La spéciation allopatrique

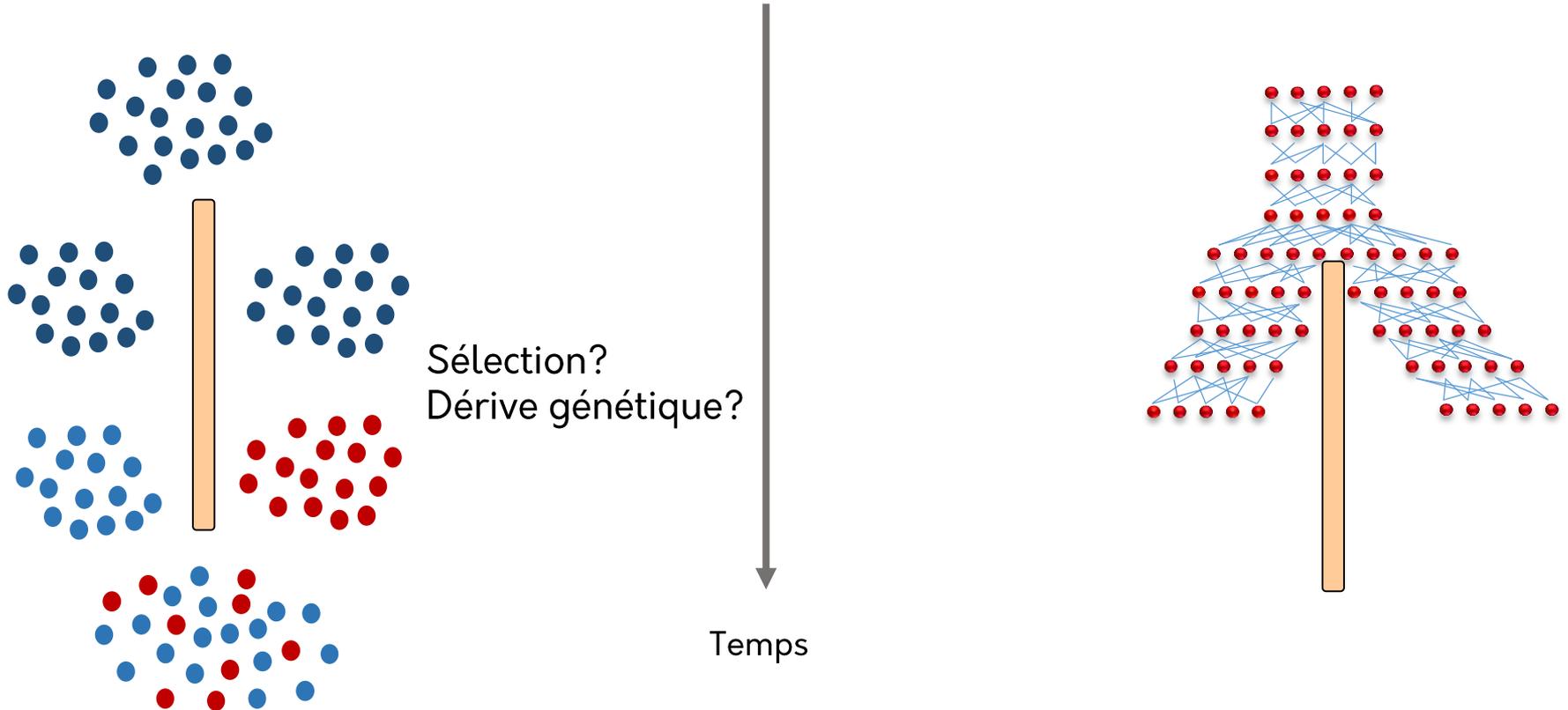
Drosophiles d'Hawaï: 400 espèces  
1/3 de la diversité du genre,  
toutes endémiques d'une île,  
avec un ancêtre commun récent



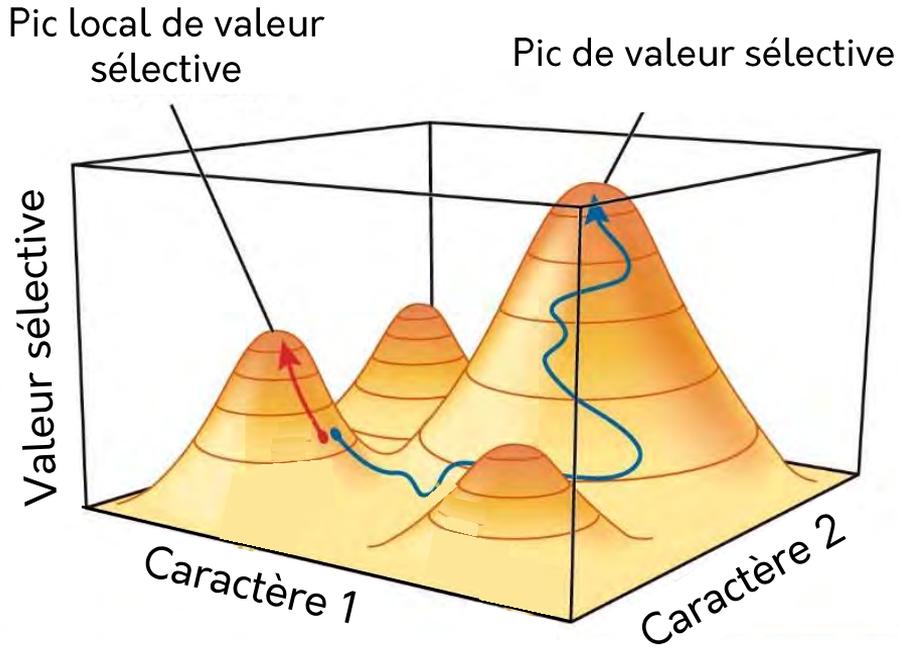
Edwards DOI:10.1371/journal.pone.0000487



# La spéciation allopatrique



# La spéciation allopatrique

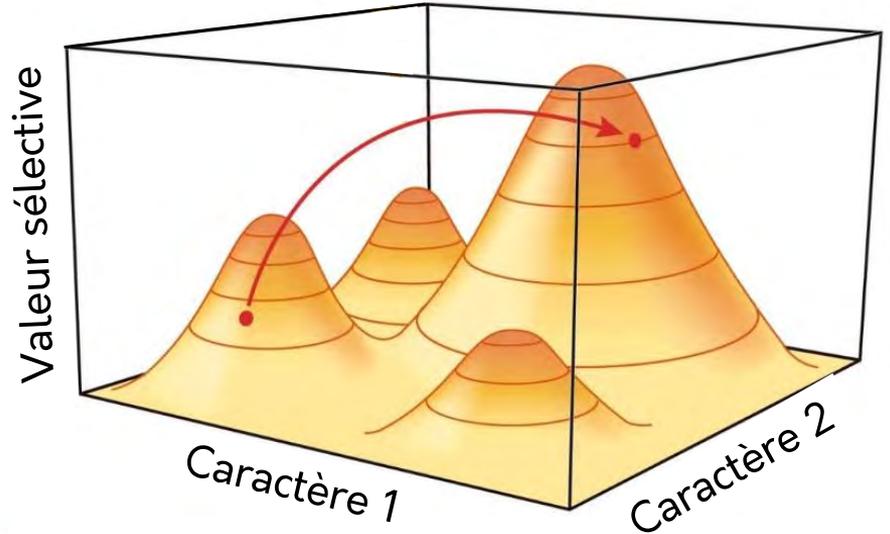
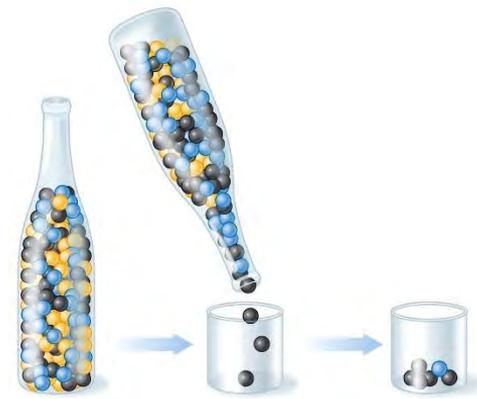
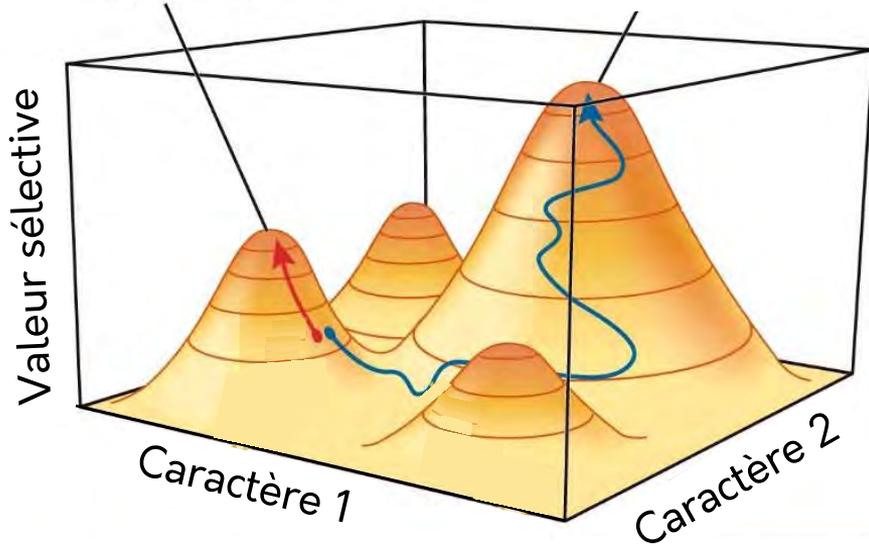


# La spéciation allopatrique

La dérive permettrait de franchir des  
« vallées adaptatives »

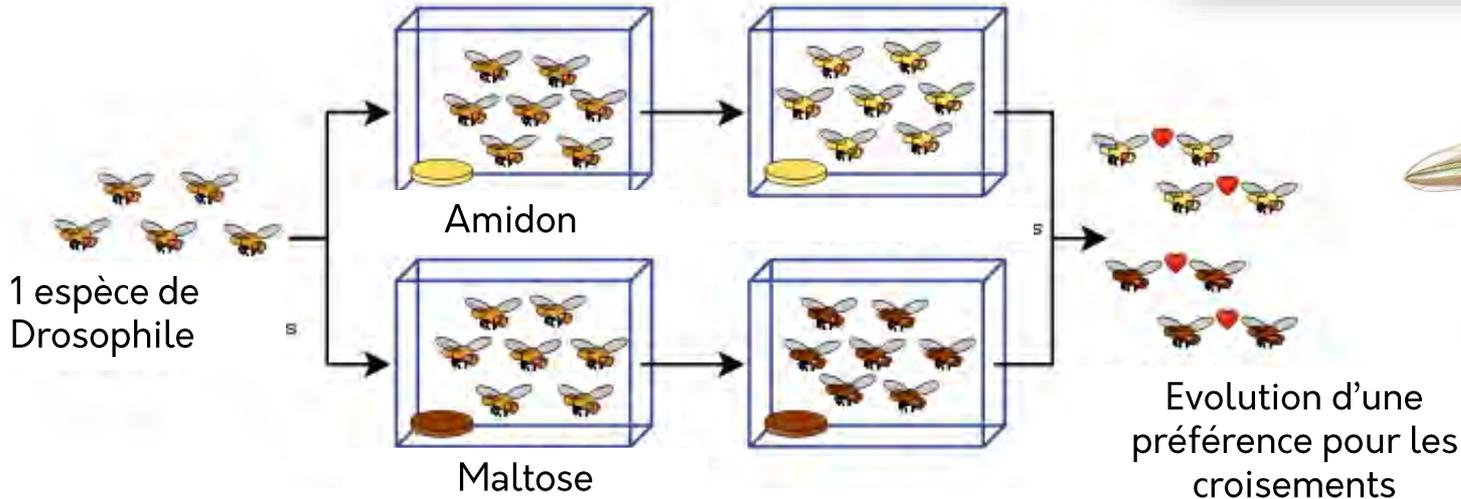
Pic local de valeur  
sélective

Pic de valeur sélective



# La spéciation allopatrique

Expériences de spéciation expérimentale:  
possible uniquement quand on exerce des  
pressions de sélection disruptive  
(mais relativement peu de générations)

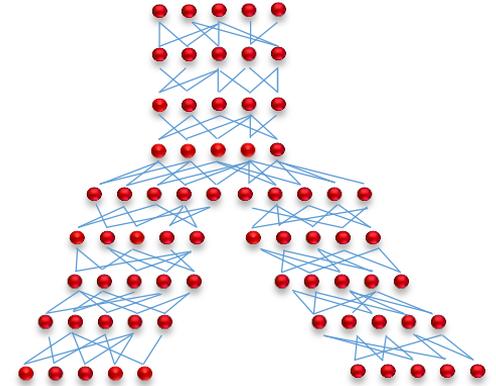
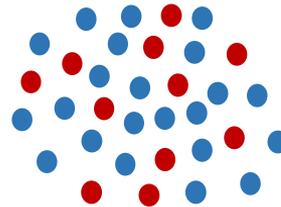


# La spéciation sympatrique

## Sélection disruptive

Une adaptation optimale ne doit pas être possible dans tous les environnements à la fois

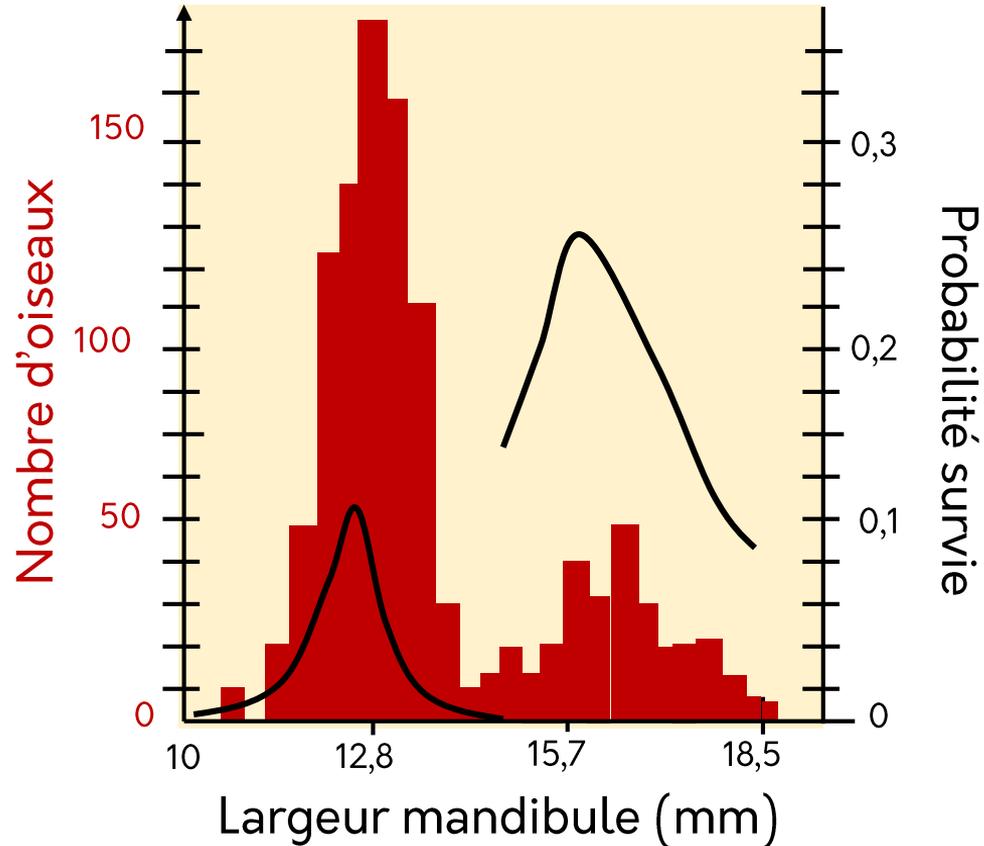
Temps



# Sélection disruptive: il faut que les intermédiaires soient désavantagés



*Pyrenestes ostrinus*



Spécialiste versus  
généraliste



Zoran Veselinović



Artaxerxes

# Sélection disruptive

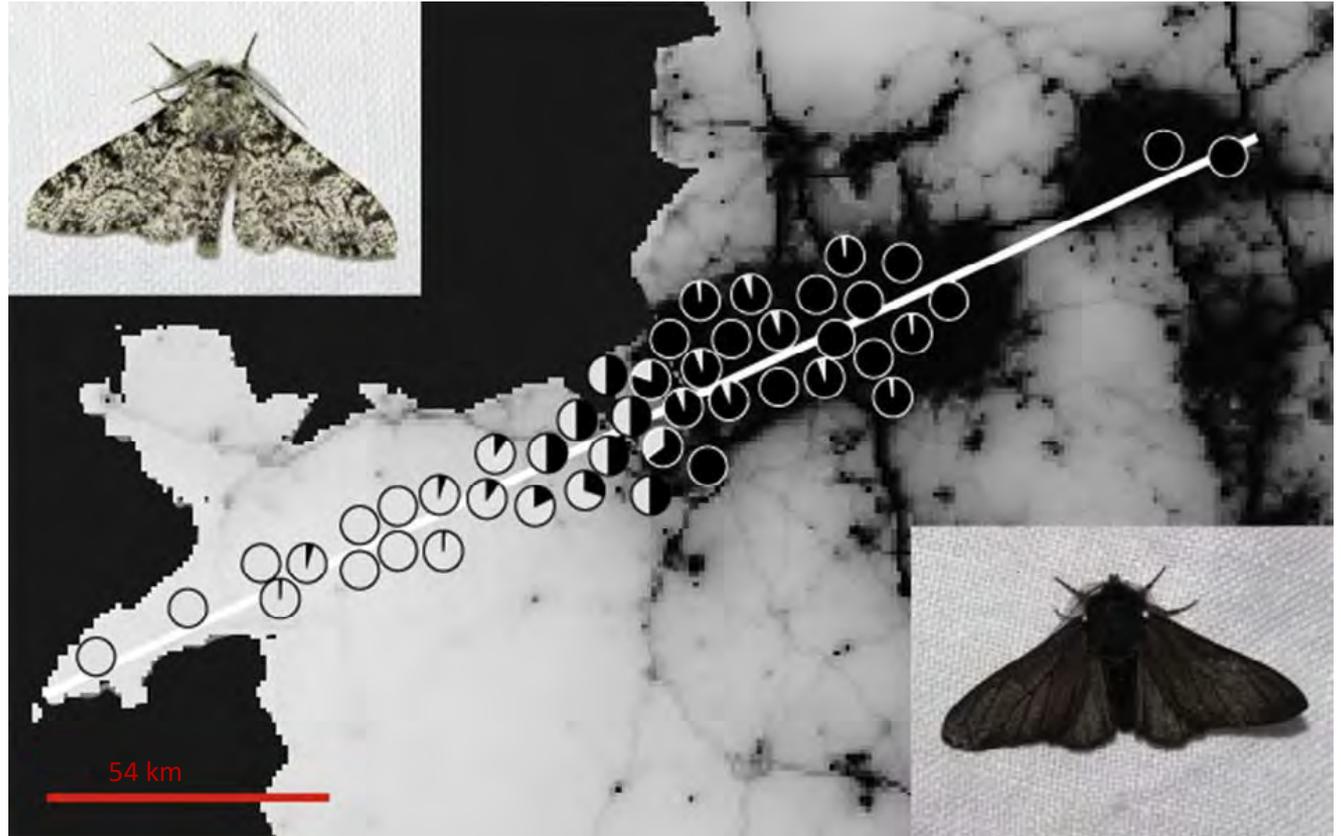
*Biston betularia*

Phalène du bouleau

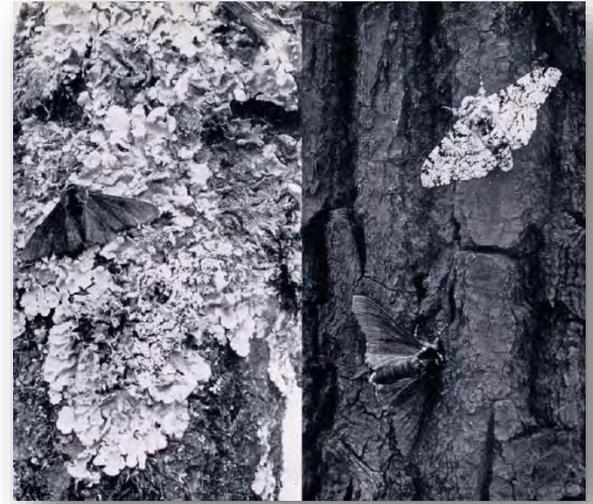
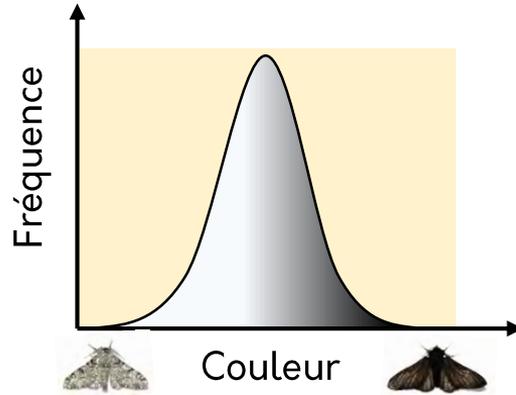


# *Biston betularia*

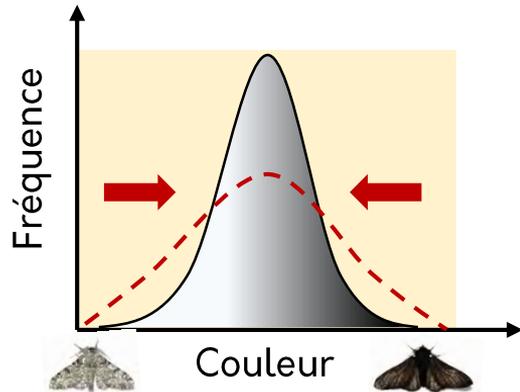
Fréquence des morphes en fonction du degré d'urbanisation



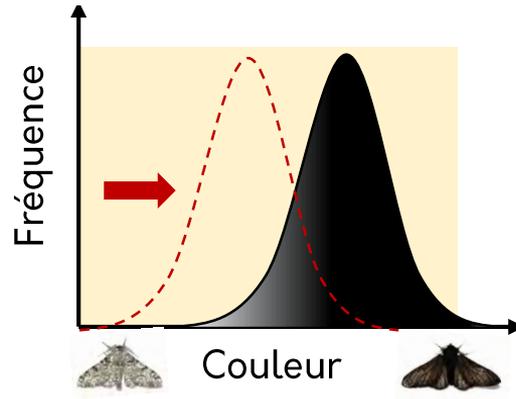
# Sélection disruptive



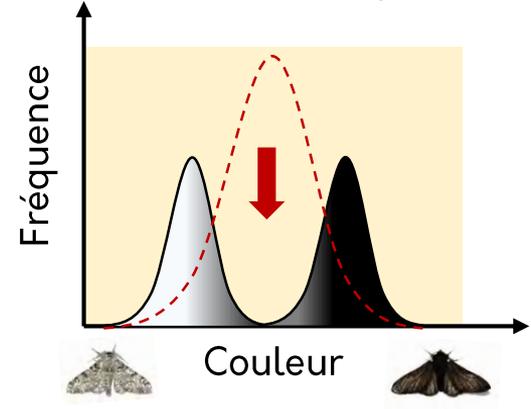
Sélection stabilisante



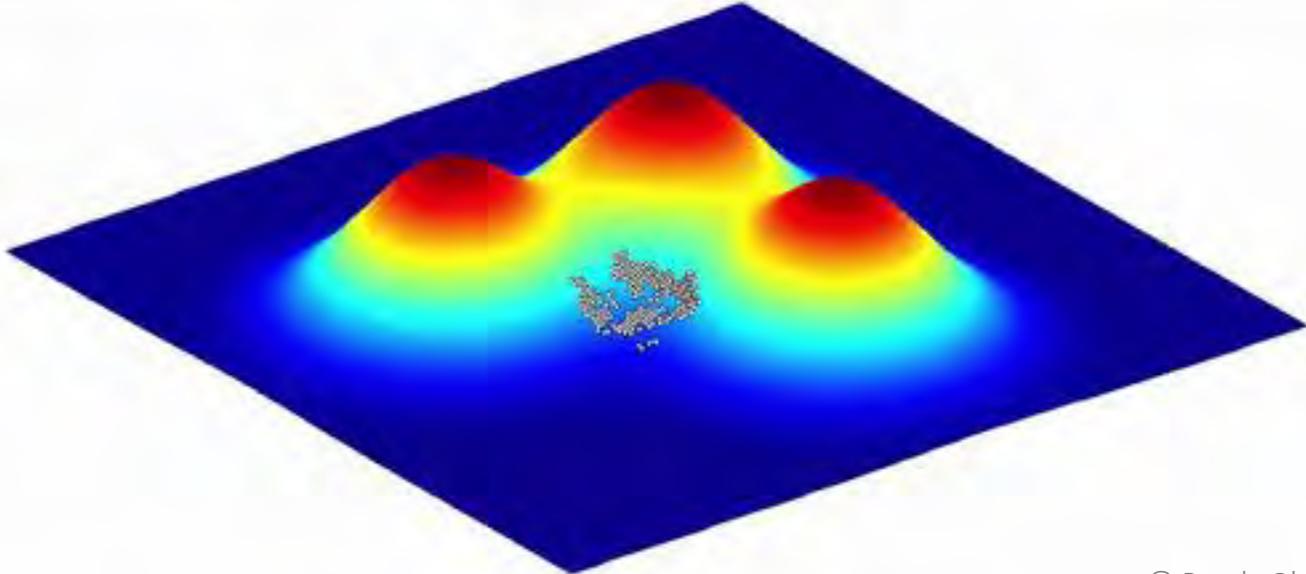
Sélection directionnelle



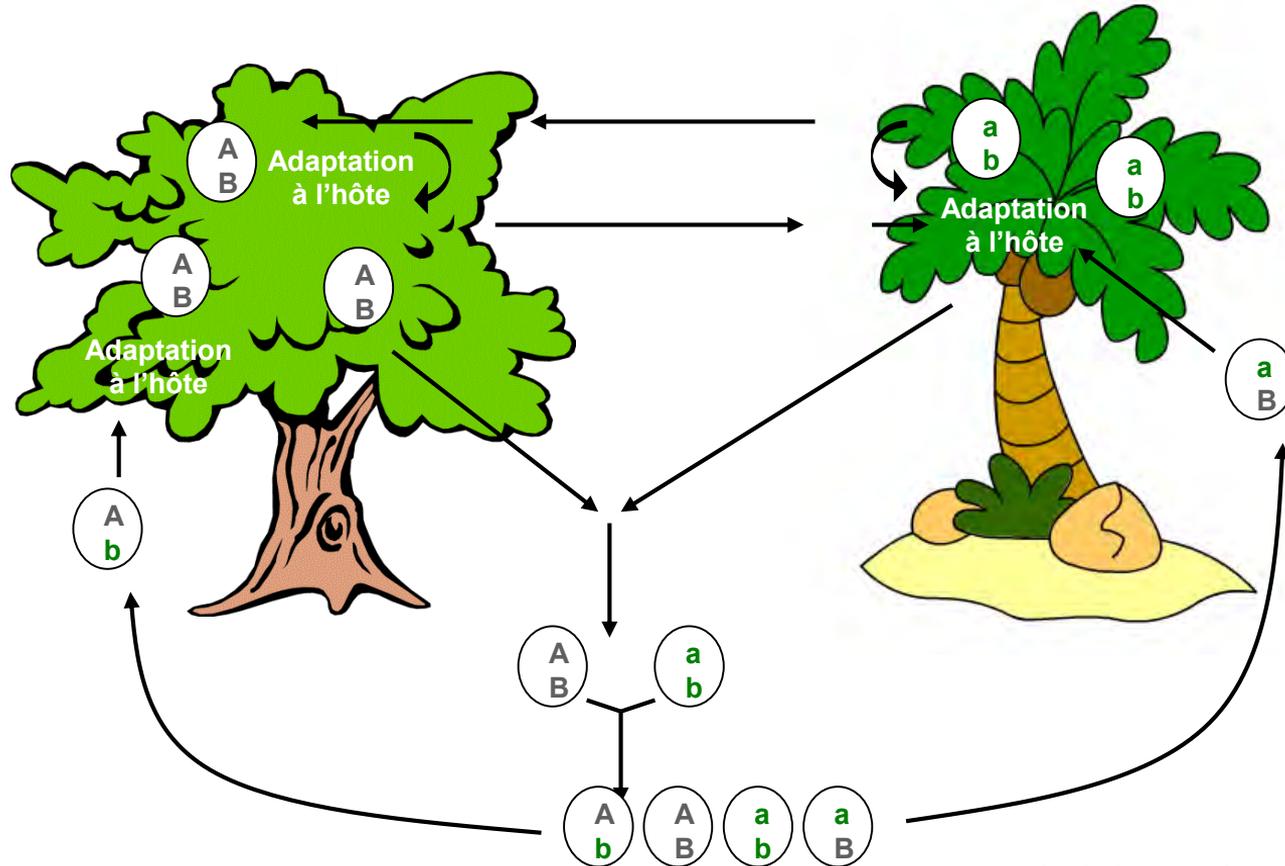
Sélection disruptive



Même avec une sélection disruptive, impossible de maintenir des groupes sur les différents pics adaptatifs

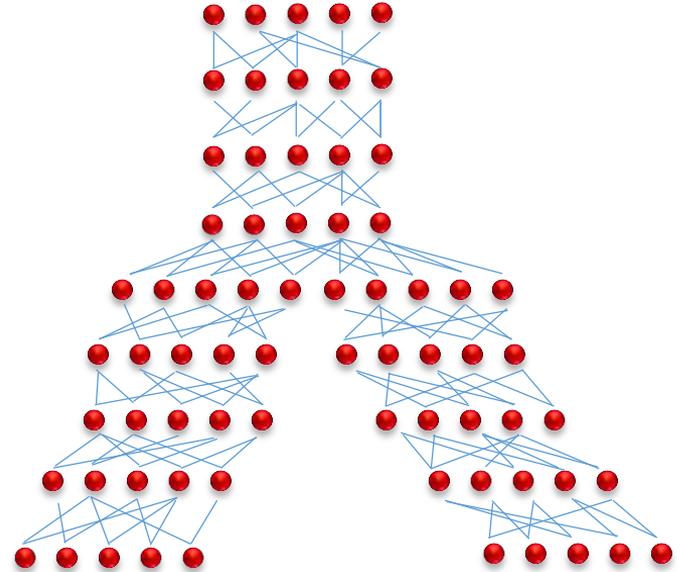


# Le problème de la spéciation sympatrique



# Le problème de la spéciation sympatrique

Il faut qu'il y ait homogamie entre les individus adaptés à une même niche écologique





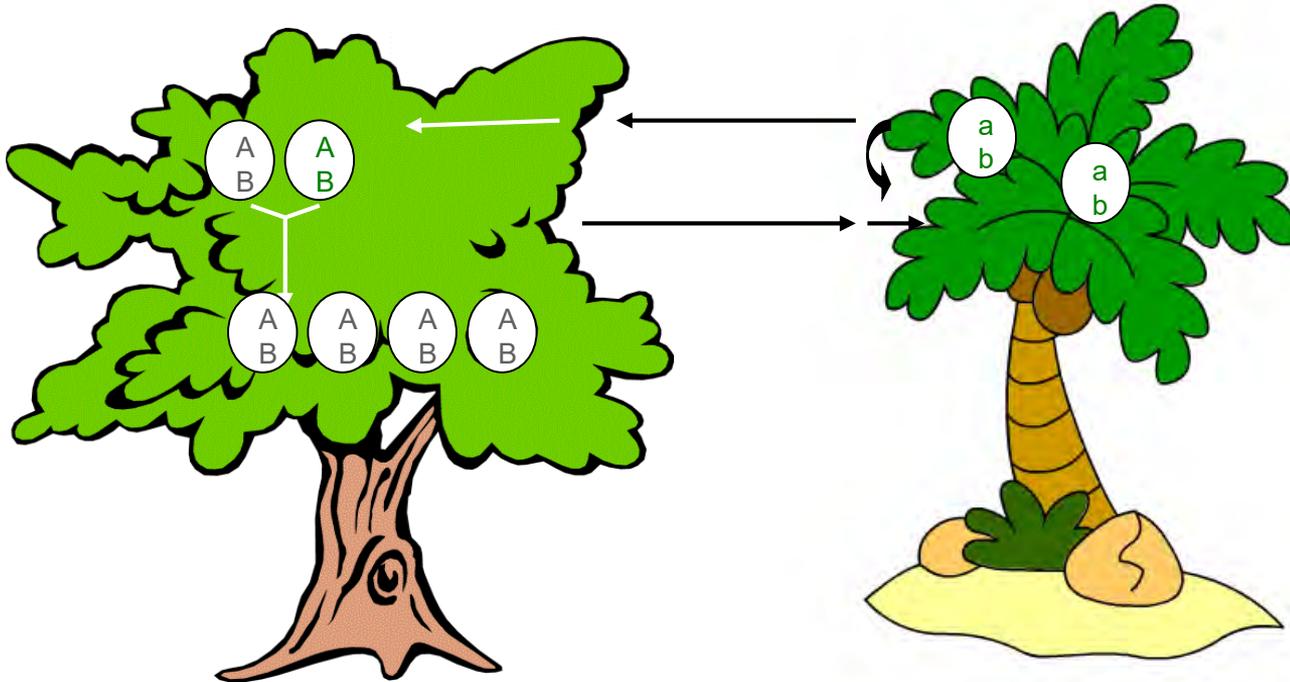
La spéciation sympatrique est facile si le même gène induit l'adaptation et l'isolement reproducteur...



La spéciation sympatrique est facile si le même gène  
induit l'adaptation et l'isolement reproducteur...  
Mais rare?



La spéciation sympatrique est facile si le même gène induit l'adaptation et l'isolement reproducteur

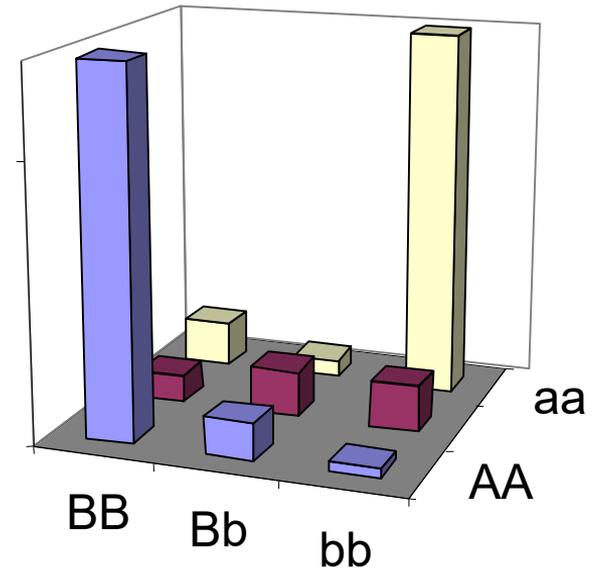


# La spéciation sympatrique

Un gène d'adaptation et un gène de choix du partenaire sexuel:  
déséquilibre de liaison

	AA	Aa	aa
Niche écologique 1	$1+\alpha$	$1-s$	$1-\alpha$
Niche écologique 2	$1-\alpha$	$1-s$	$1+\alpha$

Gène A: adaptation  
Gène B: choix du partenaire  
B avec B  
b avec b

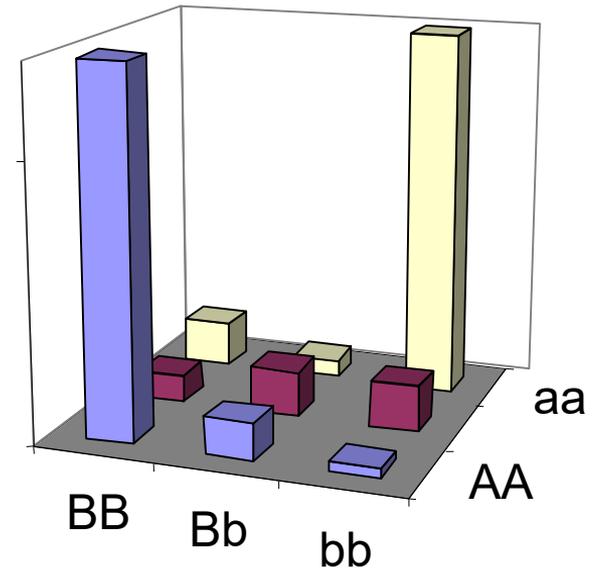


# La spéciation sympatrique

Un gène d'adaptation et un gène de choix du partenaire sexuel:  
déséquilibre de liaison

	AA	Aa	aa
Niche écologique 1	$1+\alpha$	$1-s$	$1-\alpha$
Niche écologique 2	$1-\alpha$	$1-s$	$1+\alpha$

Gène A: adaptation  
Gène B: choix du partenaire  
B avec B  
b avec b



- Très forte sélection
- Liaison entre les deux gènes
- Pas de coût à attendre le bon partenaire

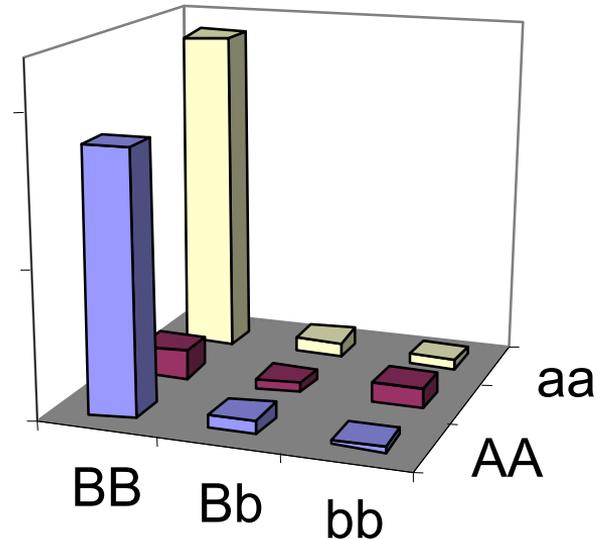
# La spéciation sympatrique

Un gène d'adaptation et un gène de choix du partenaire sexuel

	AA	Aa	aa
Niche écologique 1	$1+\alpha$	$1-s$	$1-\alpha$
Niche écologique 2	$1-\alpha$	$1-s$	$1+\alpha$

Plus besoin de déséquilibre de liaison

Modèles « 1 allèle » :  
B se croise avec un partenaire qui a le même allèle que lui au gène A



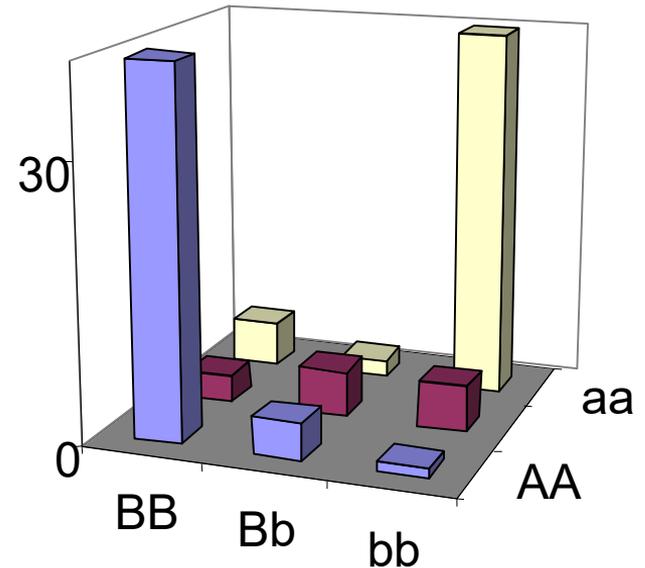
# La spéciation sympatrique

Plus facile!

Un gène d'adaptation et un gène de choix de l'hôte

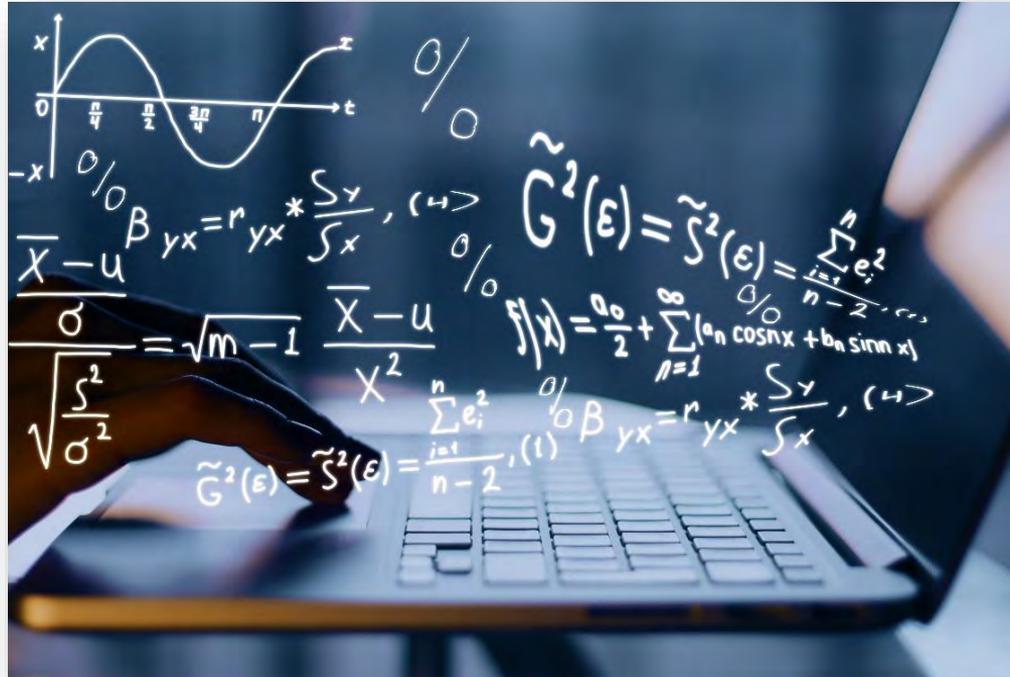


Gène A: adaptation  
Gène B: choix de l'hôte



# La spéciation sympatrique

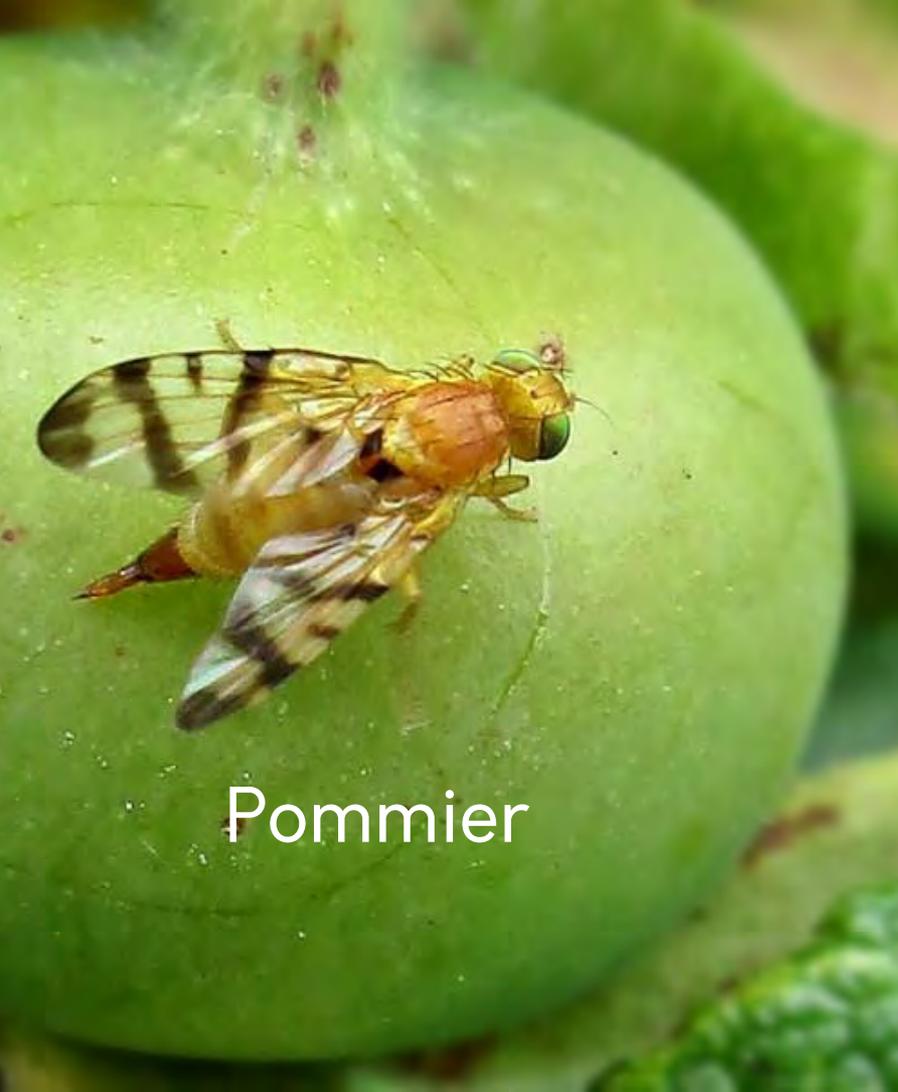
Nombreux modèles, utiles, mais difficile de savoir si les conditions et hypothèses des modèles sont remplies dans la nature...



# La spéciation sympatrique



*Rhagoletis pomonella* mouche parasite



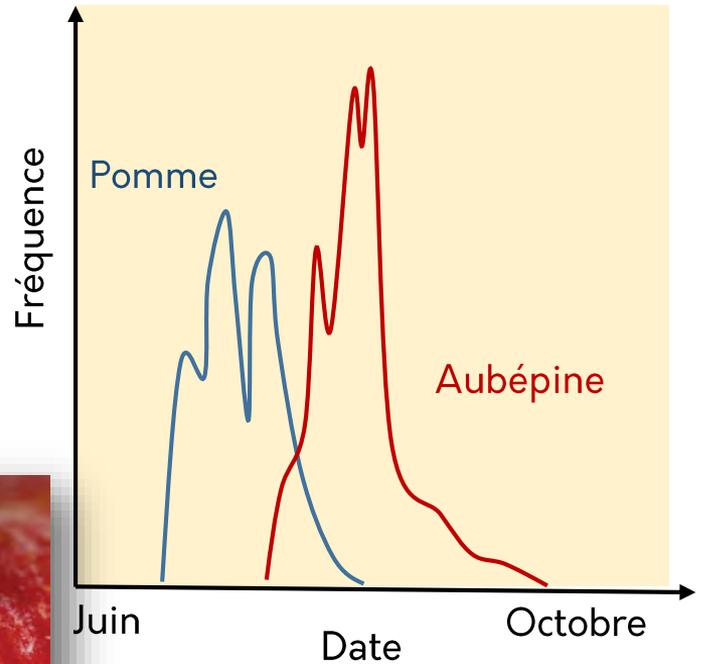
Pommier



Aubépine

# *Rhagoletis pomonella* mouche parasite

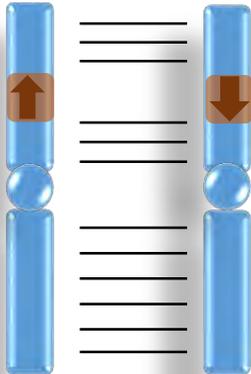
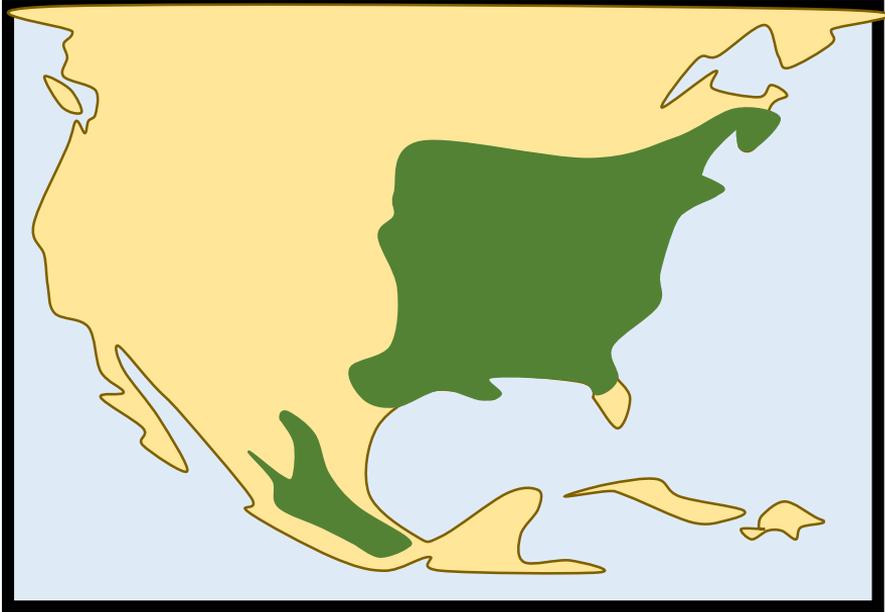
- Deux races-hôtes (flux de gènes 4-6%)
- Isolement temporel
- Attirées préférentiellement par leur plante
- Race sur pomme : origine unique récente (150 ans)



# La spéciation sympatrique

MAIS

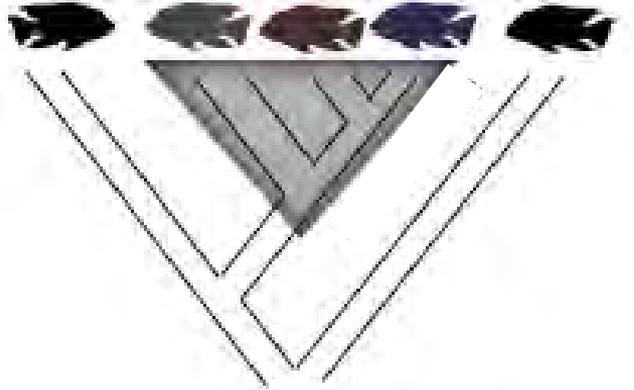
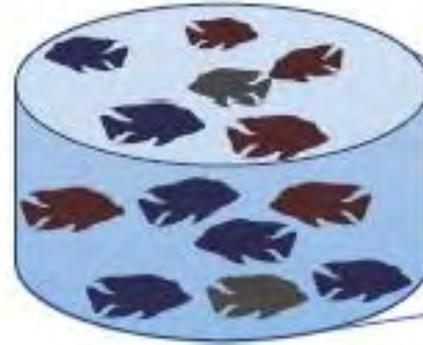
La race sur pomme viendrait d'une population allopatrique sur aubépine du Mexique avec une inversion génomique...



# La spéciation sympatrique

Cichlidae dans le lac Apoyo, Nicaragua

- *Amphilophus zaliosus* dérive d'*A. citrinellus* depuis moins de 10 000 ans
- *A. zaliosus* n'est connu que dans ce lac
- Différences morphologiques, écologiques, génétiques, homogamie



● *Amphilophus citrinellus*

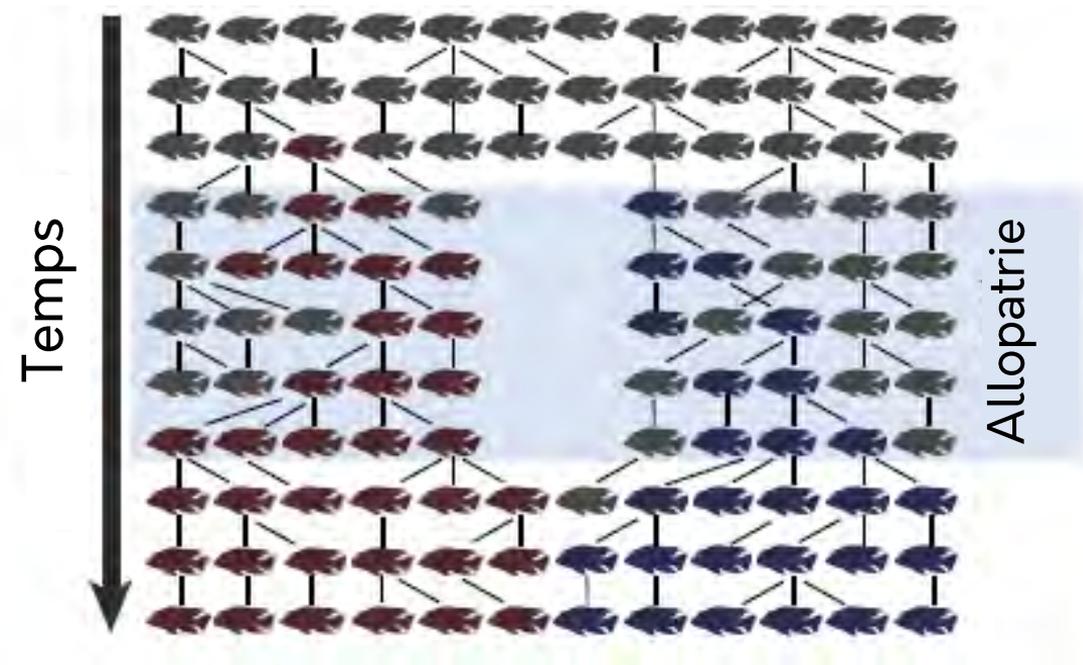


■ *Amphilophus zaliosus*



# La spéciation sympatrique

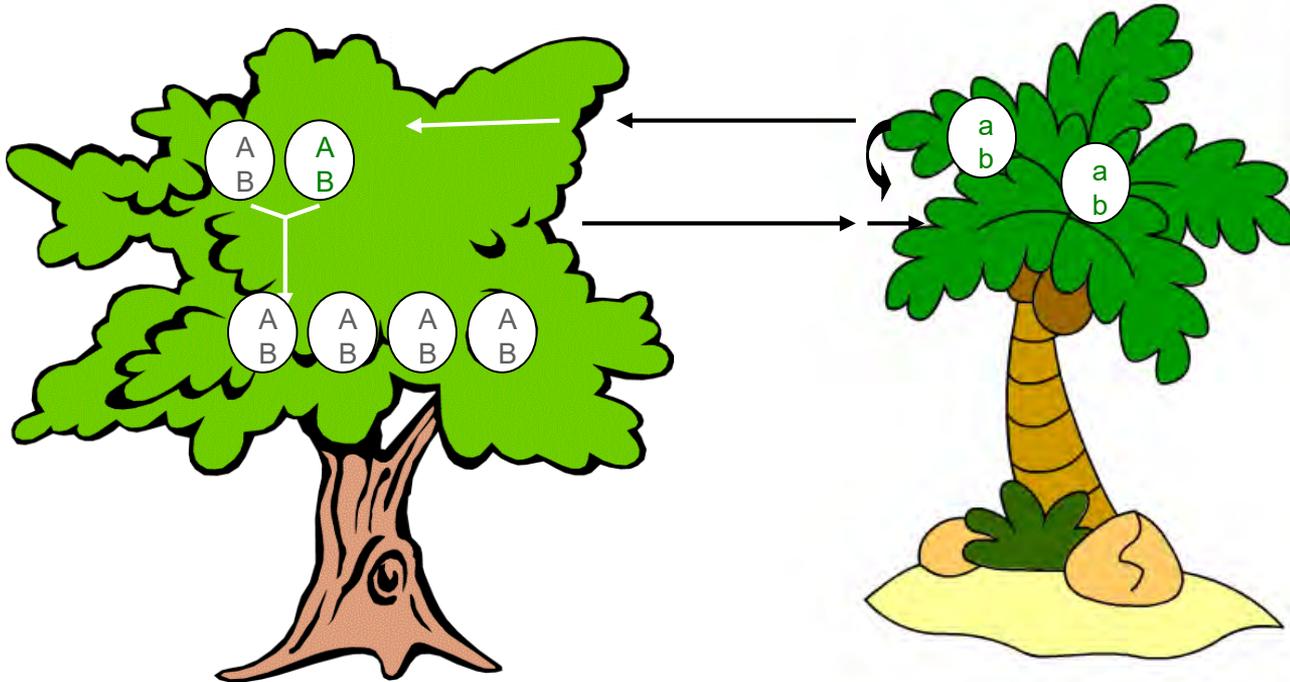
Mais peut-on vraiment exclure une allopatrie?  
(assèchement du lac en créant de plus petits lacs?)



Barluenga et al 2006 Science

Foote 2018 Trends Ecol Evol

La spéciation sympatrique est facile si le même gène induit l'adaptation et l'isolement reproducteur



T. Peever



Le Cam

# La spéciation sympatrique facilitée chez les champignons pathogènes

- Le même gène pour adaptation et choix du partenaire
- Forte sélection sur peu de gènes (système gène-pour-gène)



- Milliards de spores:
  - Mutations plus nombreuses
  - Fardeau plus supportable



*Venturia inaequalis*  
sur arbres sensibles



*Venturia inaequalis*  
sur arbres résistants



*Venturia inaequalis*

Bernard Blanc

La spéciation sympatrique facilitée chez les champignons pathogènes

Populations native et émergence sans flux de gènes en sympatrie

Gladieux et al. Mol Ecol. 2011

# Contournement de la résistance par introgression d'un gène d'une population allopatrique



*Malus domestica*

Le Van et al *New Phytol* (2012)  
Leroy et al *New Phytol* (2016)



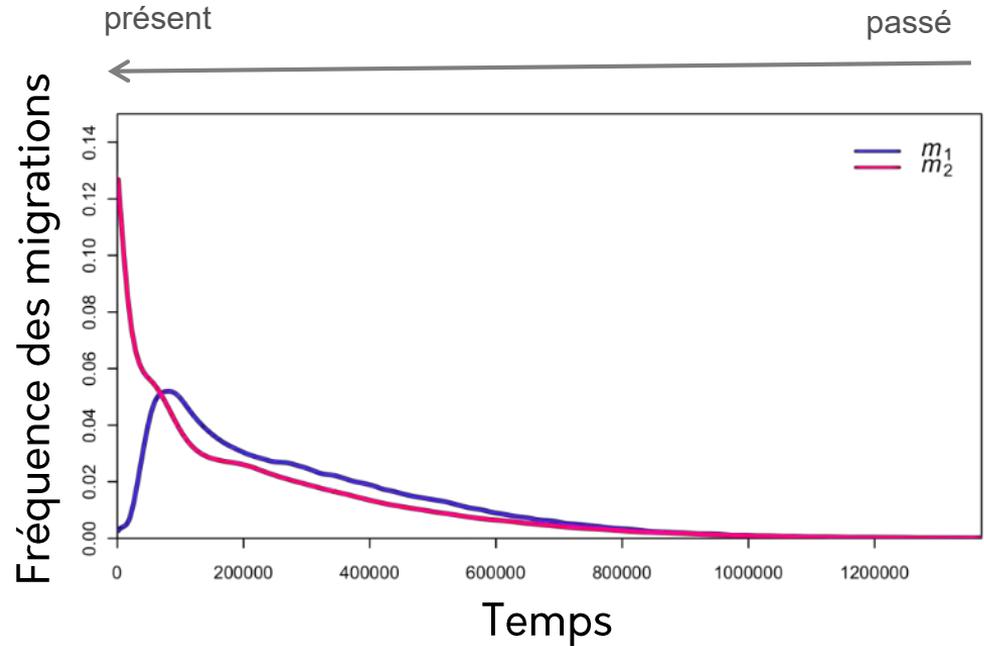
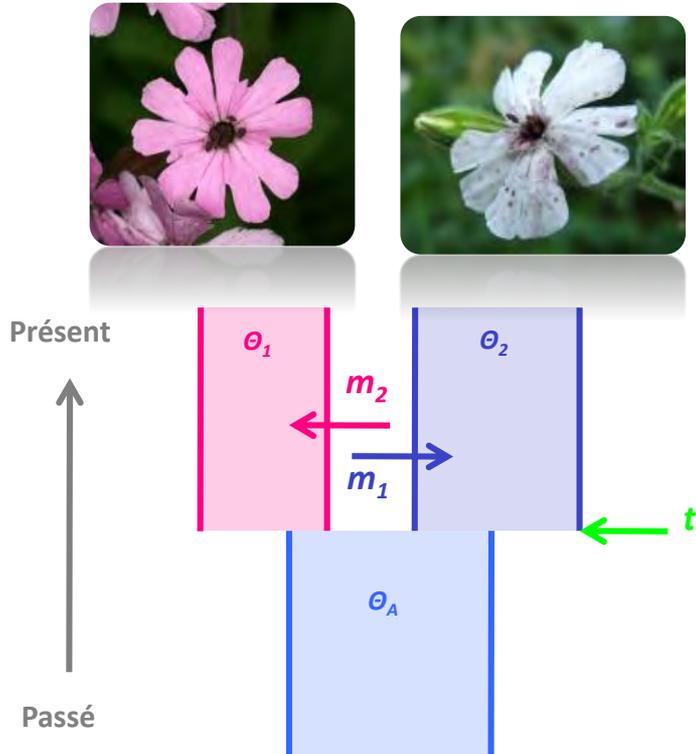
*Venturia inaequalis*

Feurtey et al *Molecular Ecology* (2020)  
Lemaire et al *New Phytol* (2016)



*Malus floribunda*

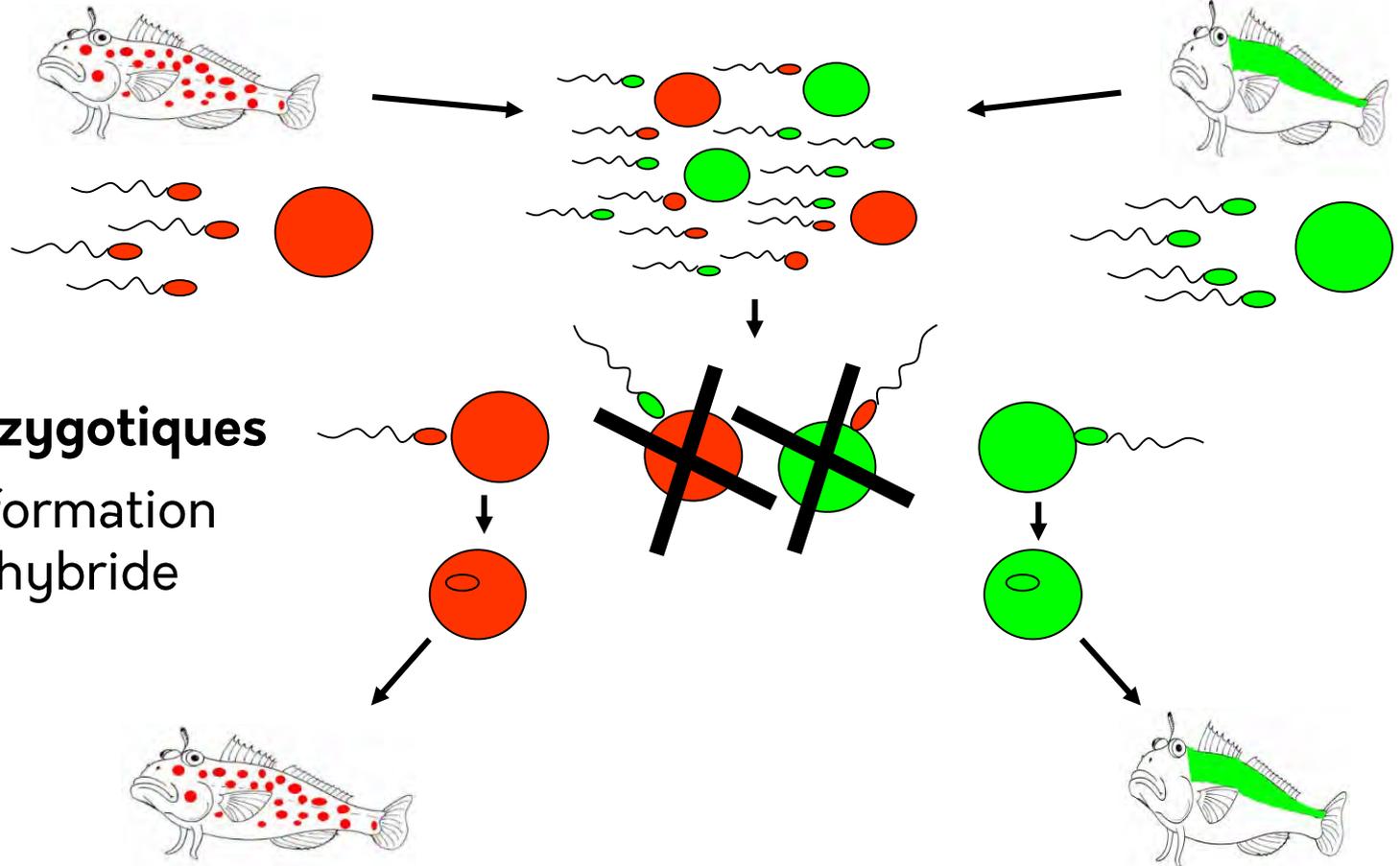
# Modèles mathématiques pour inférer l'histoire des flux de gènes



Mécanismes proximaux?  
Isolement reproducteur?



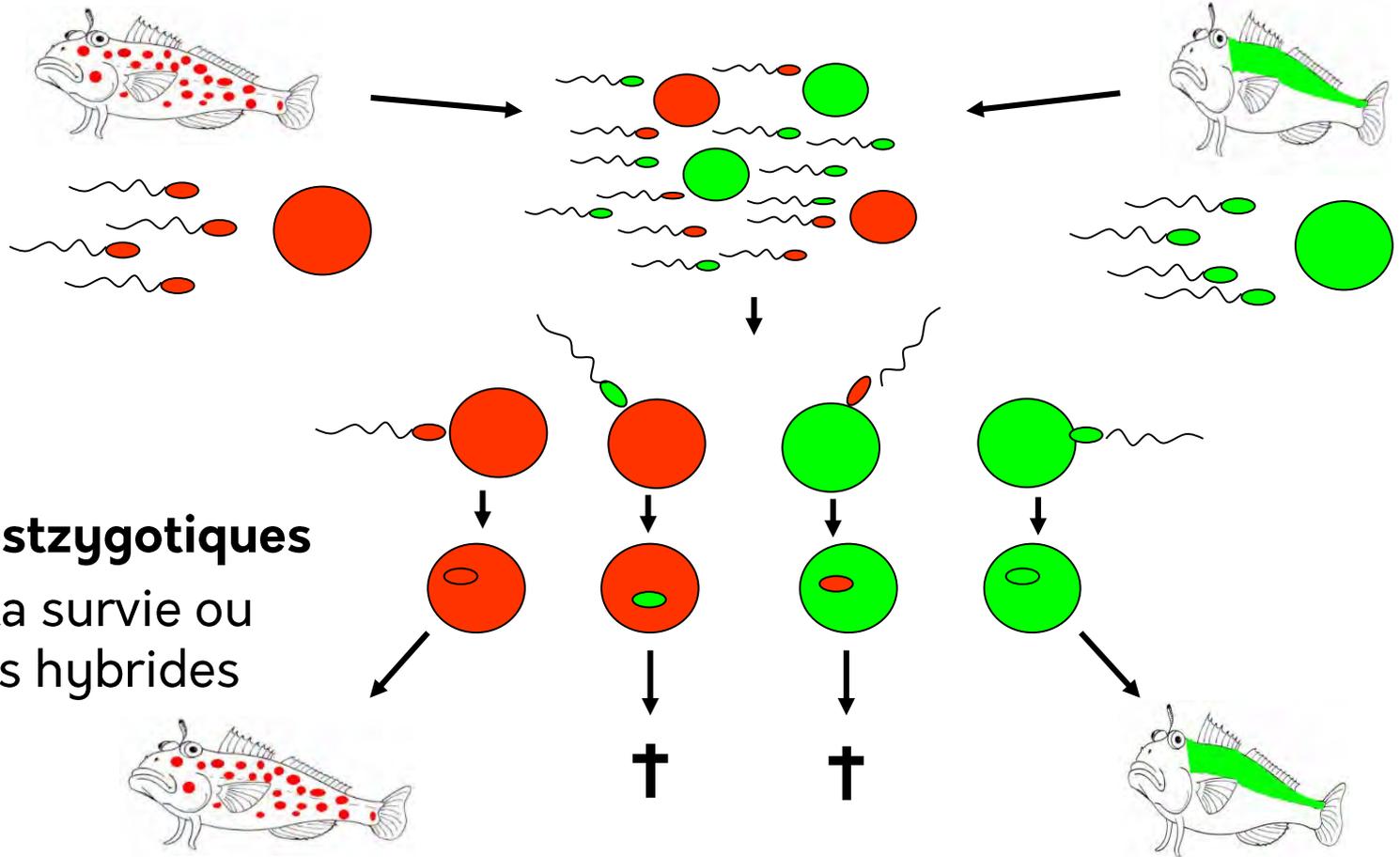
# Les types d'isolement reproducteur



## Barrières prézygotiques

Empêchent formation  
de zygote hybride

# Les types d'isolement reproducteur



## Barrières postzygotiques

Réduisent la survie ou fertilité des hybrides

# Isolement prézygotique: Isolement écologique

Différent de l'allopatrie car dépend de facteurs intrinsèques

*Silene dioica*



Andrew Curtis

janetgraham

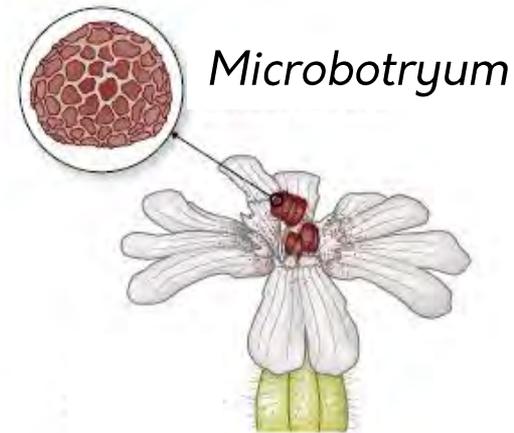
*Silene latifolia*



Udo Schmidt



A-M Labouche



*Microbotryum*

# Isolement prézygotique Isolement temporel



***Lactuca graminifolia***

Fleurit au début du printemps



***Lactuca canadensis***

Fleurit en été

Sympatriques  
et interfertiles

# Isolement prézygotique

## Isolement temporel



Jonathan Billinger

Printemps sur mildiou  
du pommier



Drazhnikova

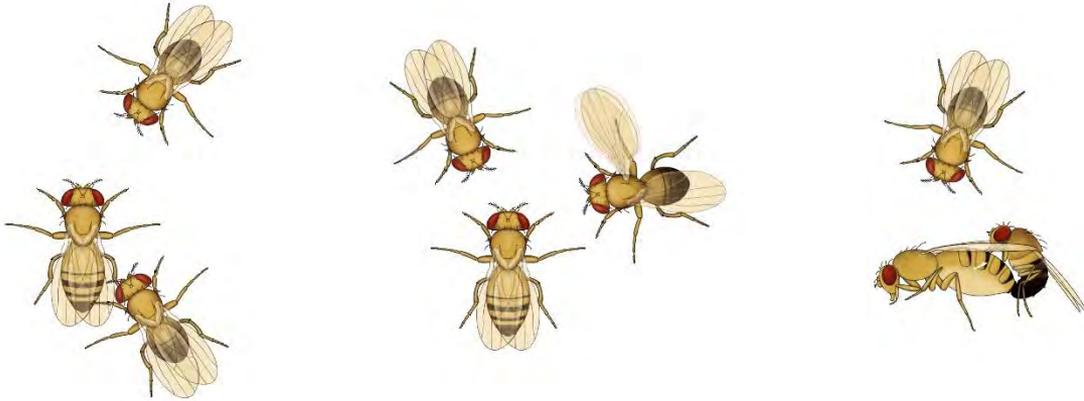
Été - automne sur  
autres mildiou

Mycoparasites  
*Ampelomyces*



# Isolement prézygotique

Phéromones, signaux visuels, chant,  
comportement, isolement mécanique





Isolement  
prézygotique

Reconnaissance  
des gamètes

Isolement  
prézygotique

Reconnaissance  
des gamètes



Isolement post-zygotique

A photograph of two young goats behind a wire fence. The goat on the left is white, and the goat on the right is brown. They are both looking towards the camera. The background is a grassy field.

Pas de développement de l'embryon

# Isolement post-zygotique



Pas de développement de l'embryon...  
...le plus souvent

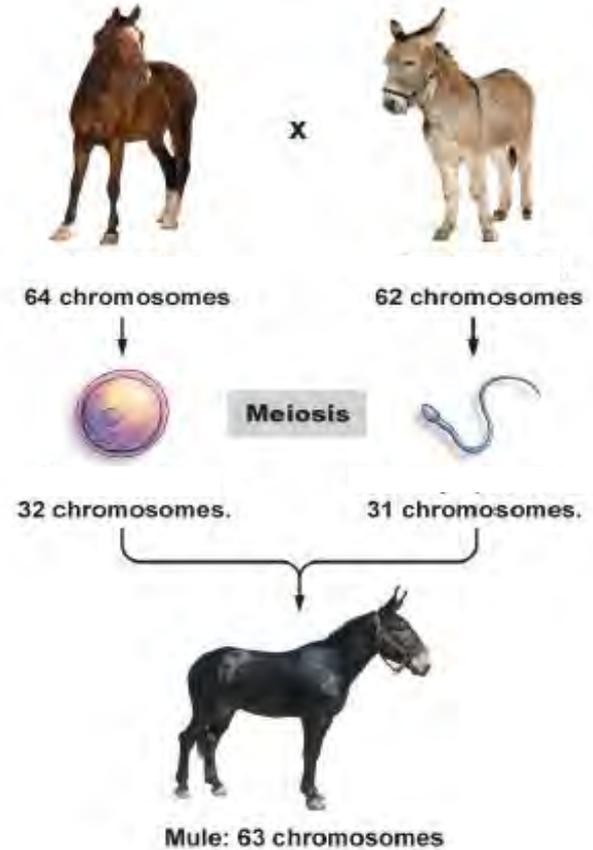
# Isolement post-zygotique

Isolement extrinsèque



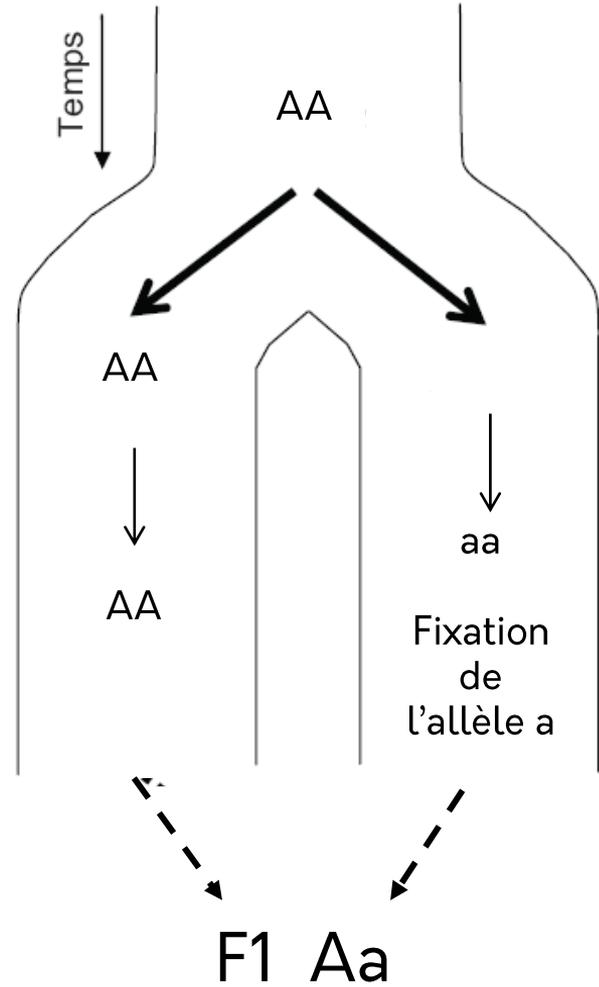
# Isolement post-zygotique

Baisse de viabilité  
ou de fertilité



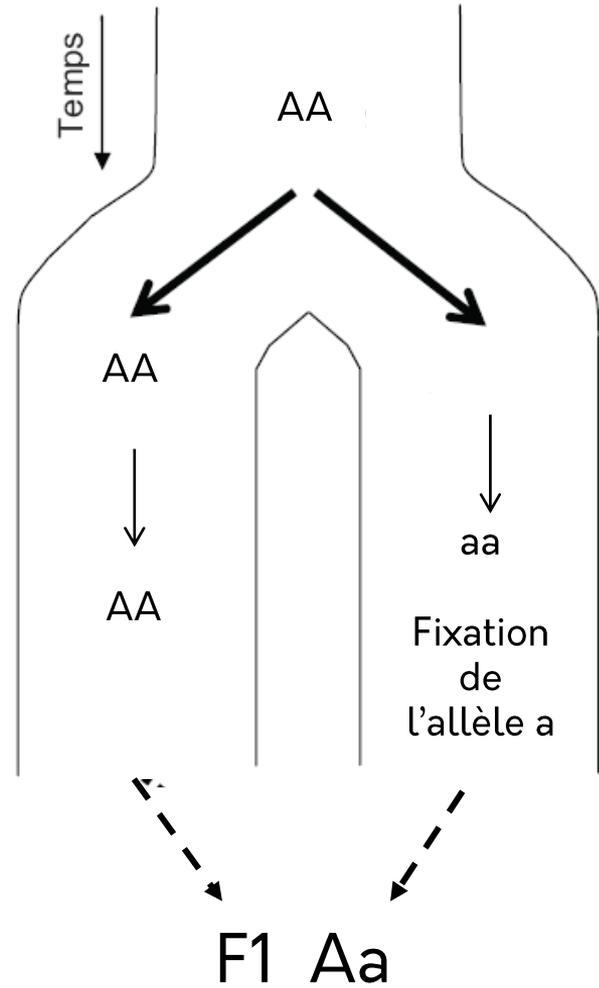
# Isolement post-zygotique

Evolution des incompatibilités?



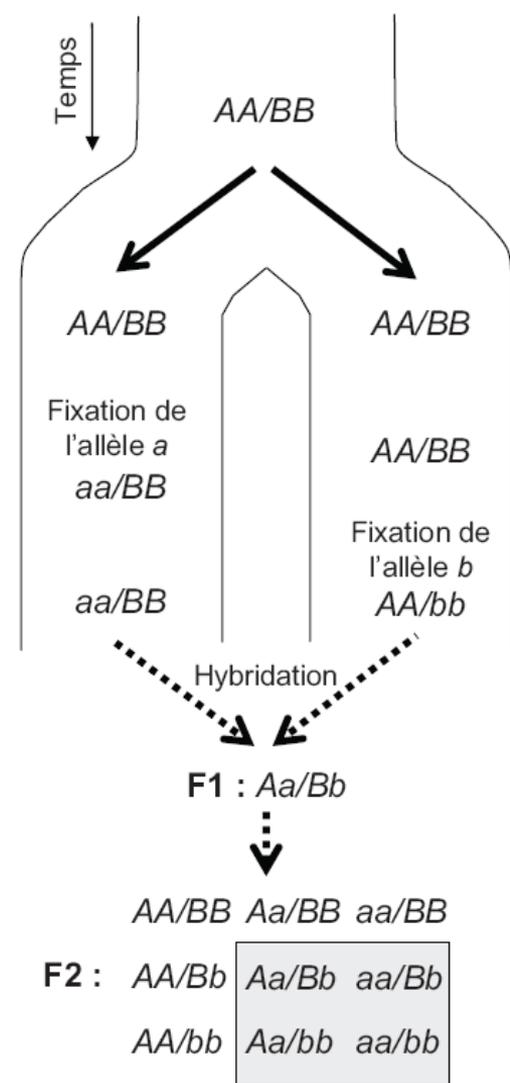
# Isolement post-zygotique

## Evolution des incompatibilités?



# Isolement post-zygotique

Modèle de Bateson-Dobzhansky-Müller:  
incompatibilité entre allèles de locus différents



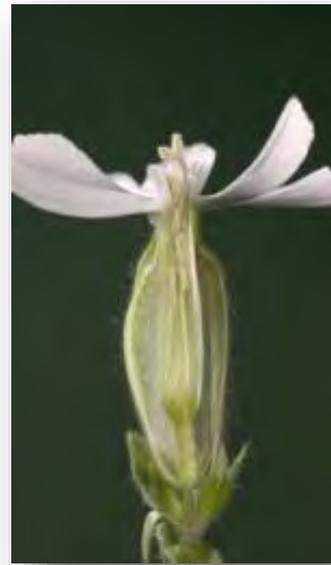
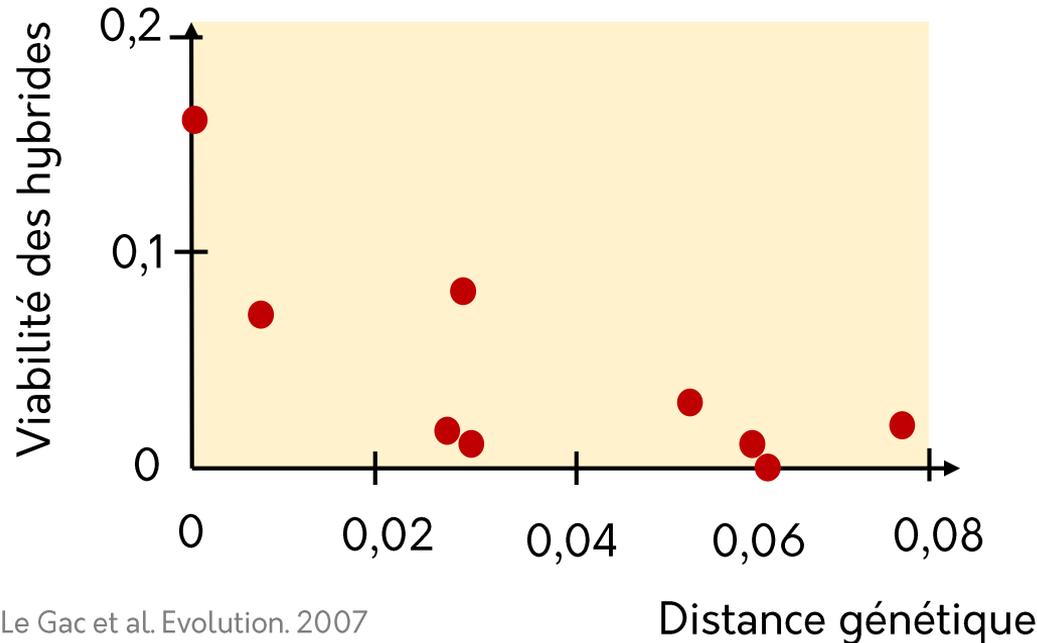
# Isolement post-zygotique

Modèle de Bateson-Dobzhansky-Müller:  
incompatibilité entre allèles de locus différents

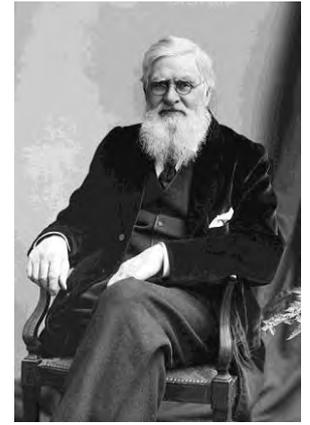
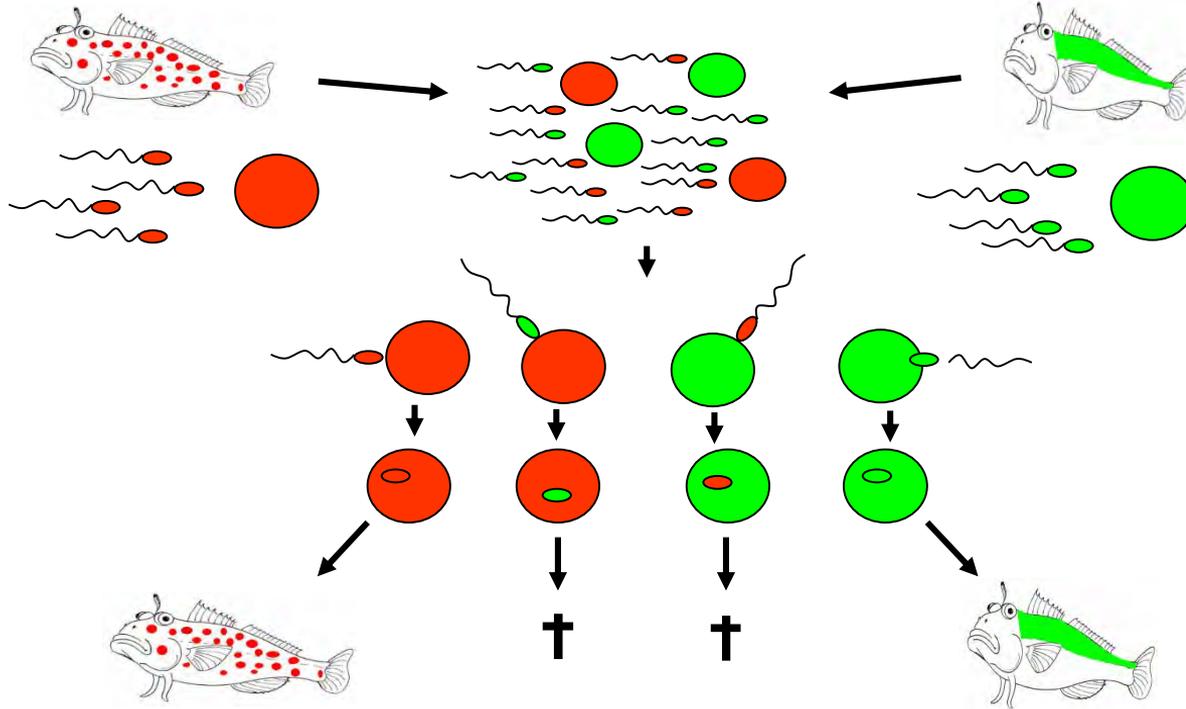


# Isolement post-zygotique

Diminution de la valeur sélective des hybrides avec la distance génétique entre espèces: accumulation d'incompatibilités



# Renforcement



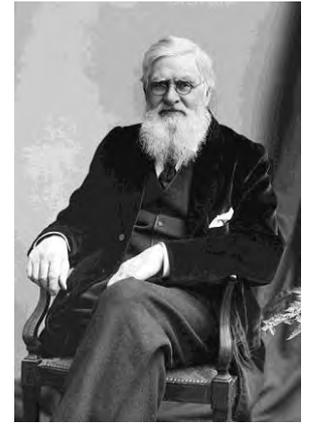
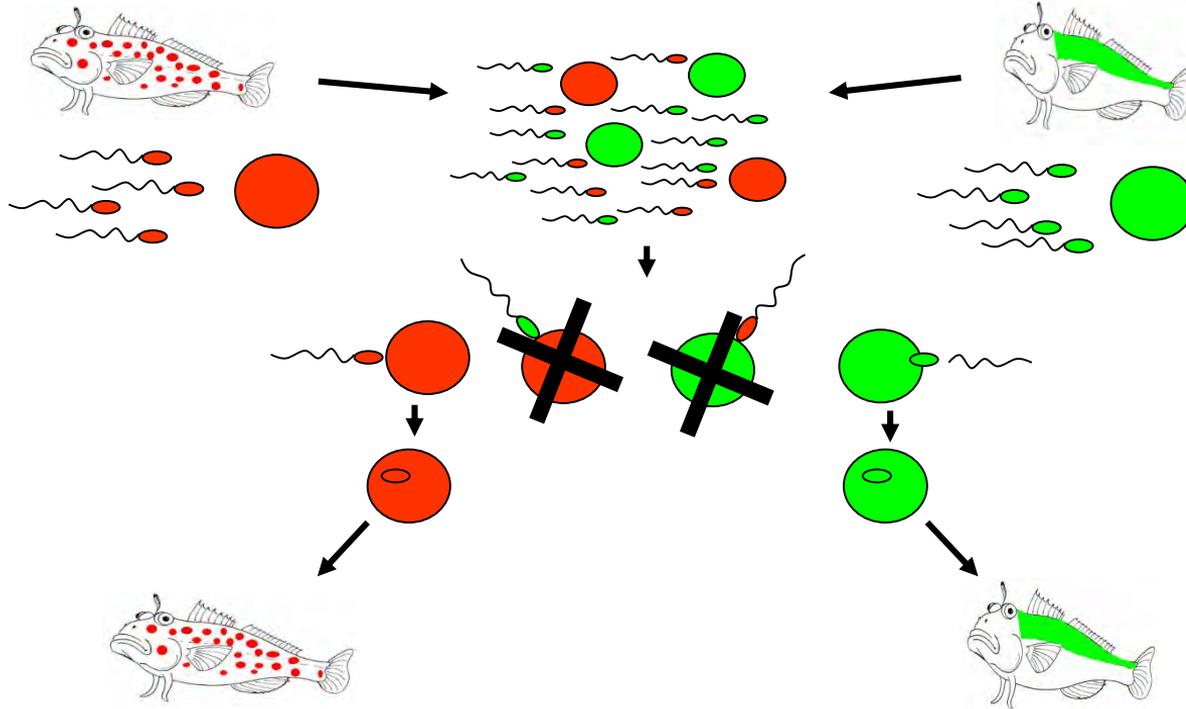
Geology Mazandaran

Alfred Wallace



Theodosius Dobzhansky

# Renforcement



Geology Mazandaran

Alfred Wallace



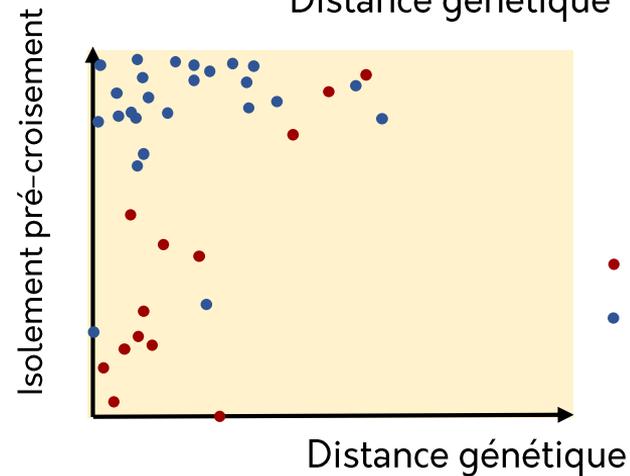
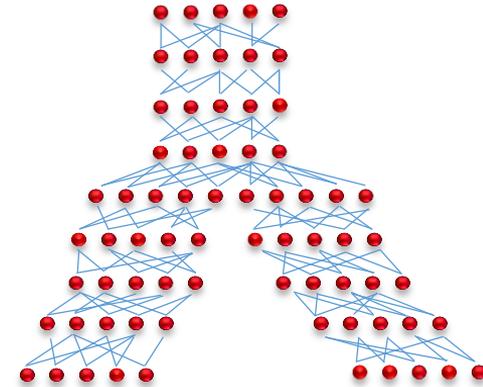
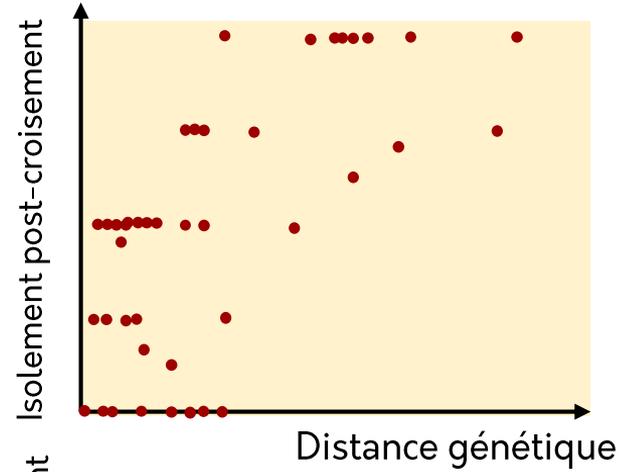
Theodosius Dobzhansky

# Renforcement



Rezával et al. Curr Biol 2016

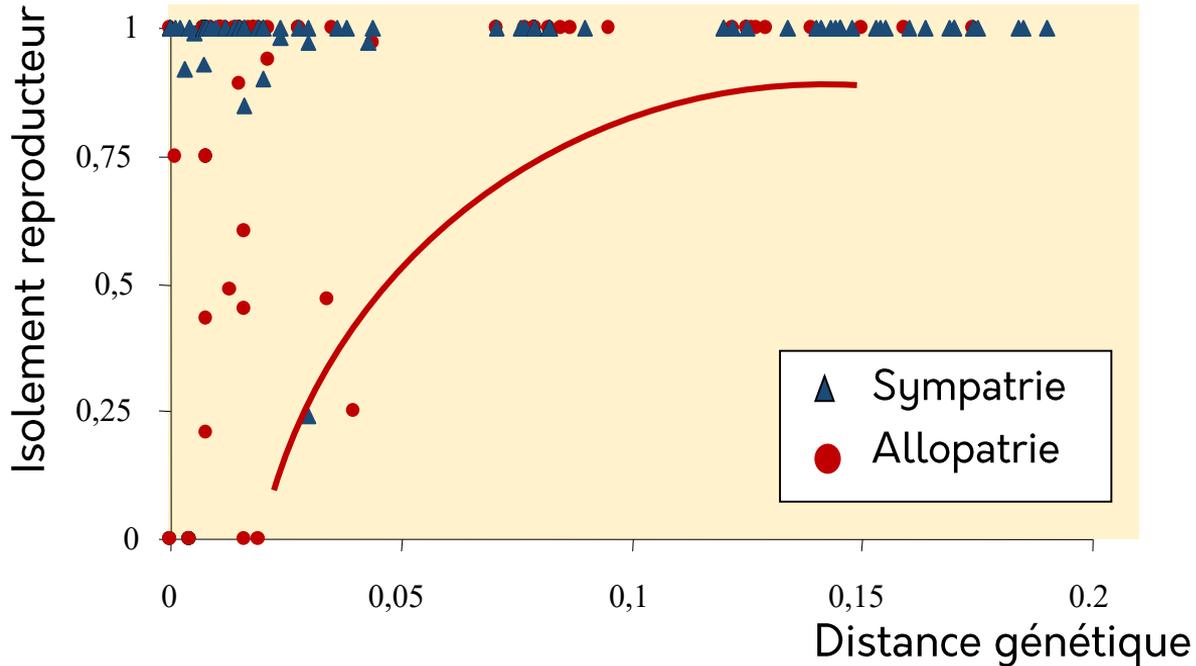
Coyne & Orr



- Allopatrie
- Sympatrie

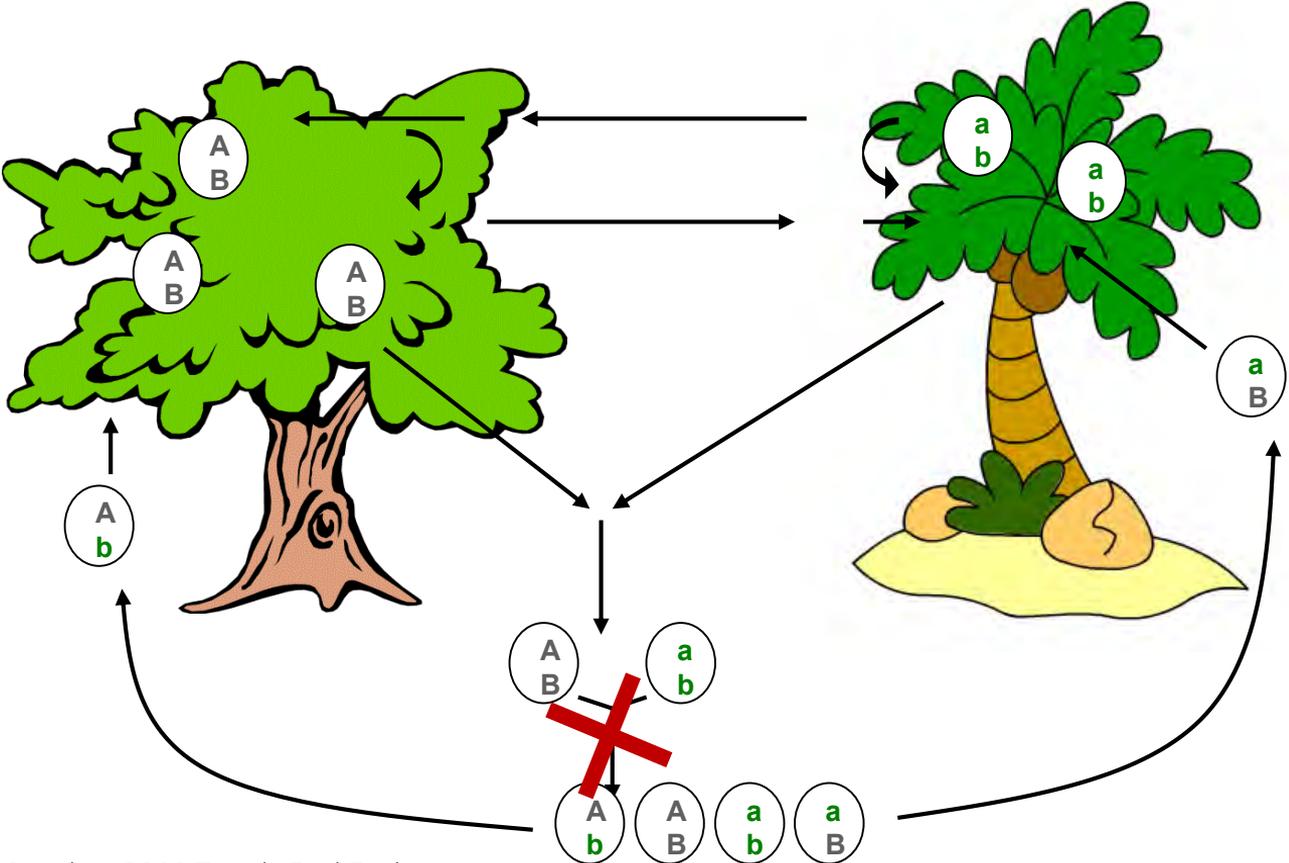
# Renforcement

## Basidiomycètes

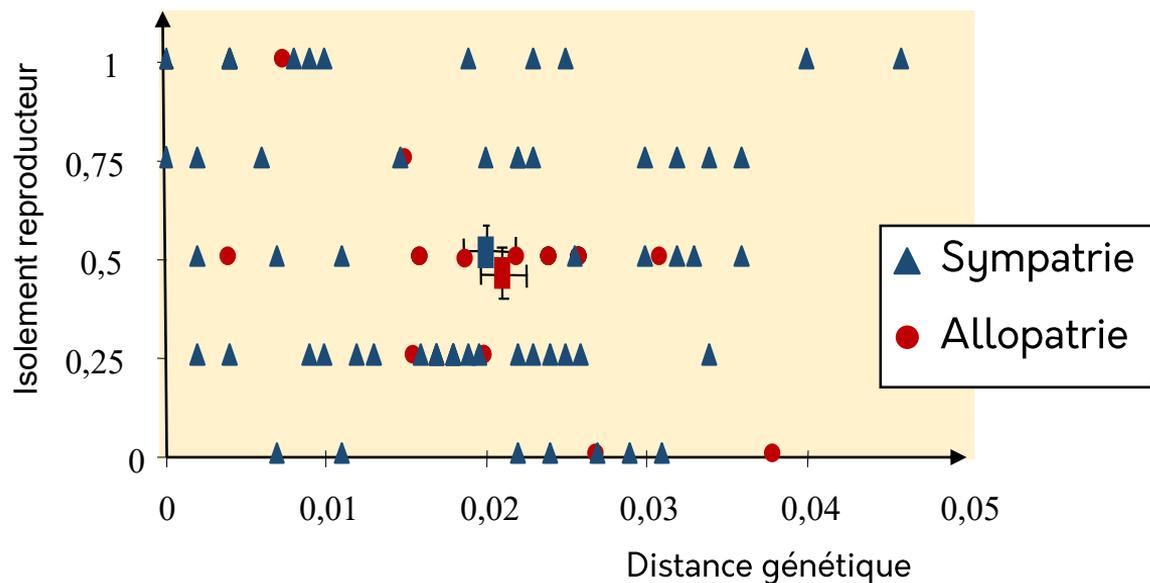


Le Gac & Giraud JEB 2008  
Giraud et al. FGB 2008  
Gourbière & Giraud 2012

# Renforcement

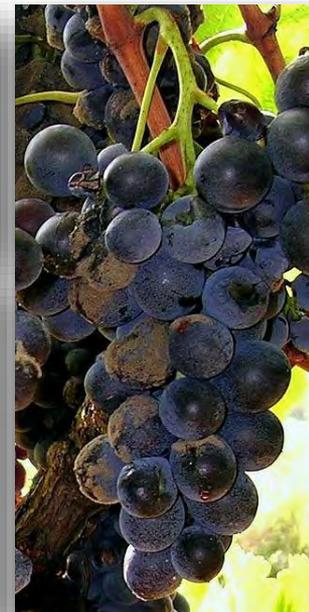


# Absence de renforcement Ascomycètes

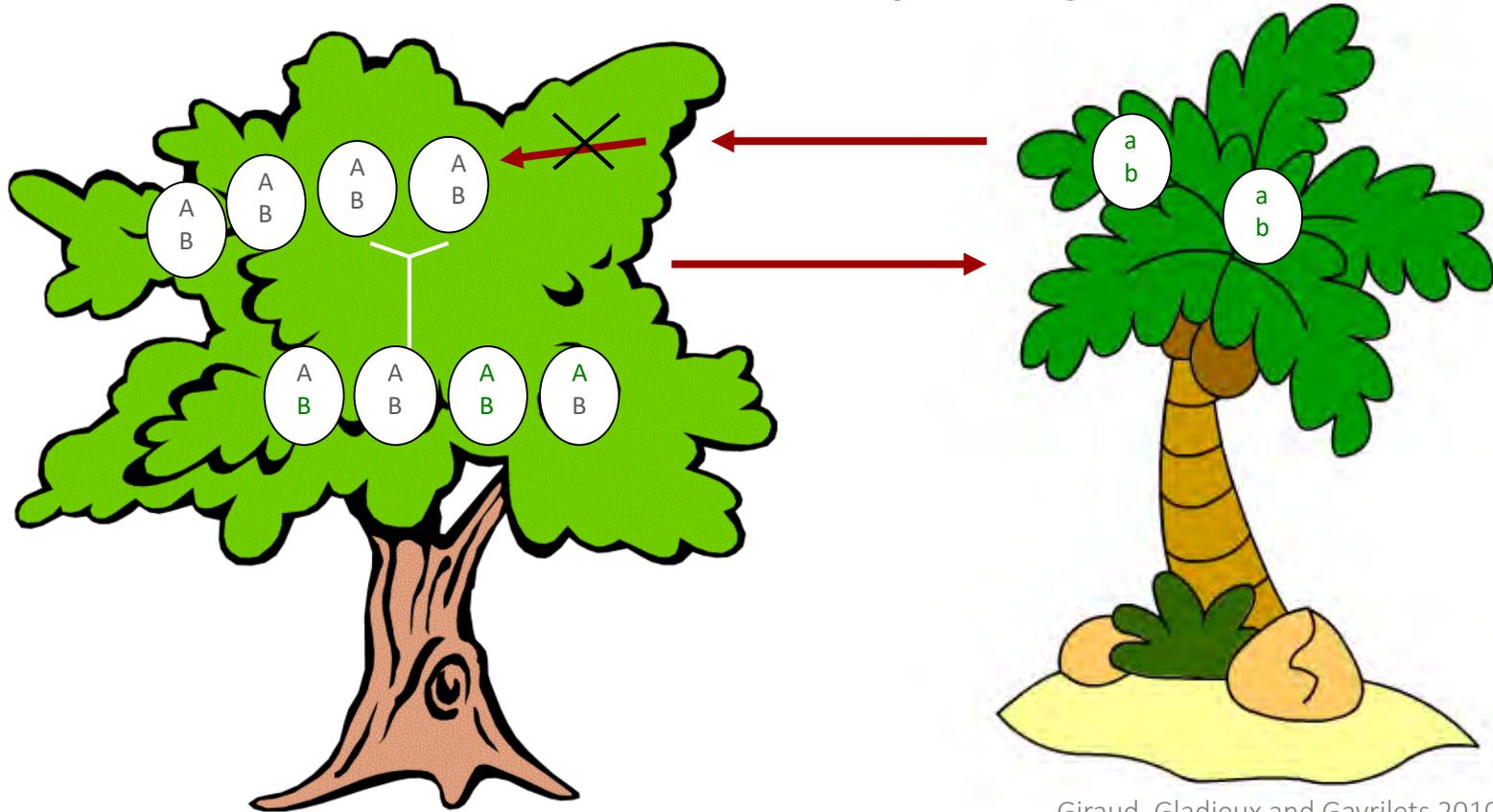


Le Gac & Giraud JEB 2008

Giraud et al. FGB 2008



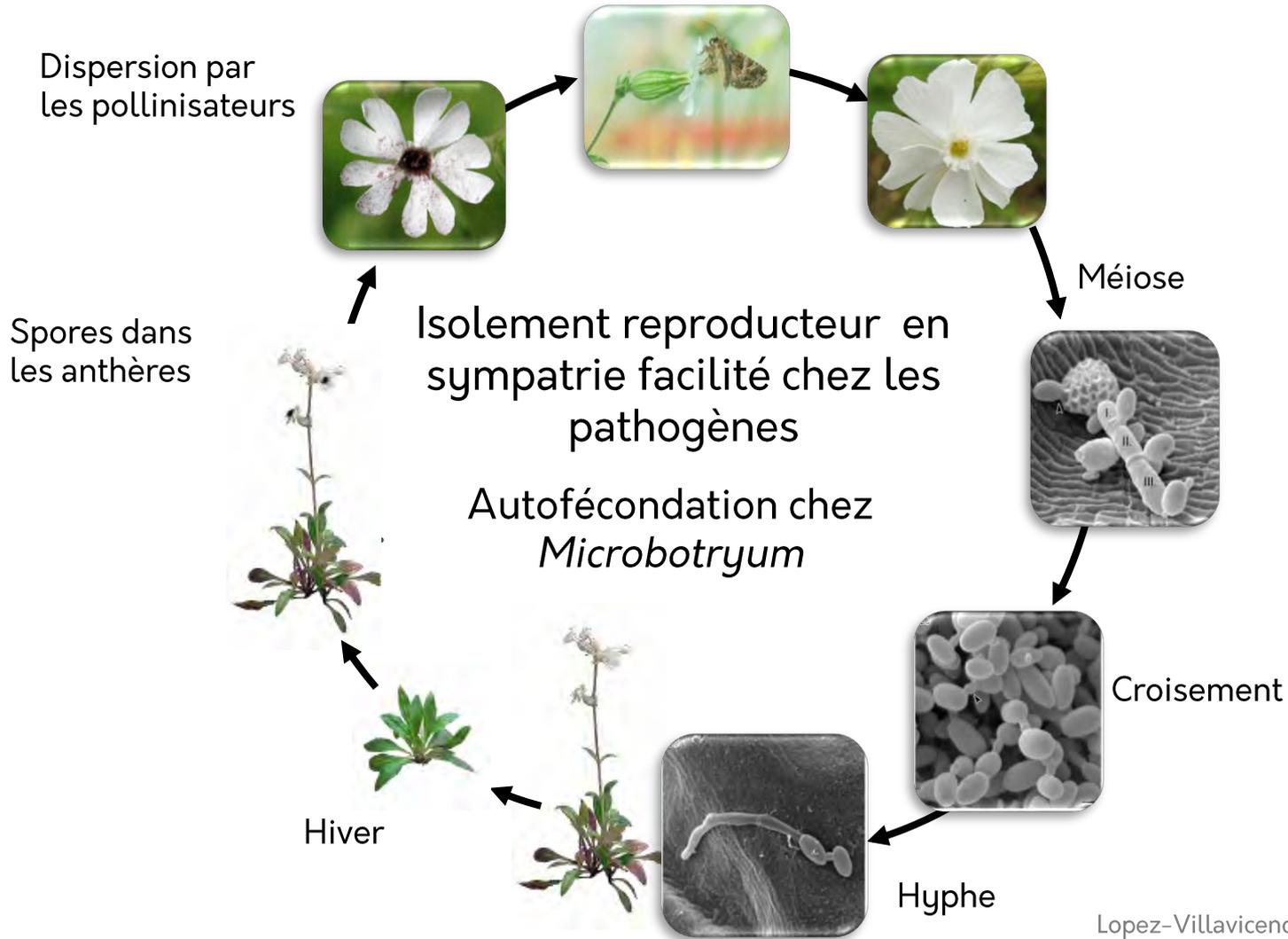
# Isolement reproducteur en sympatrie facilité chez les pathogènes



Isolement reproducteur en  
sympatrie facilité chez les  
pathogènes





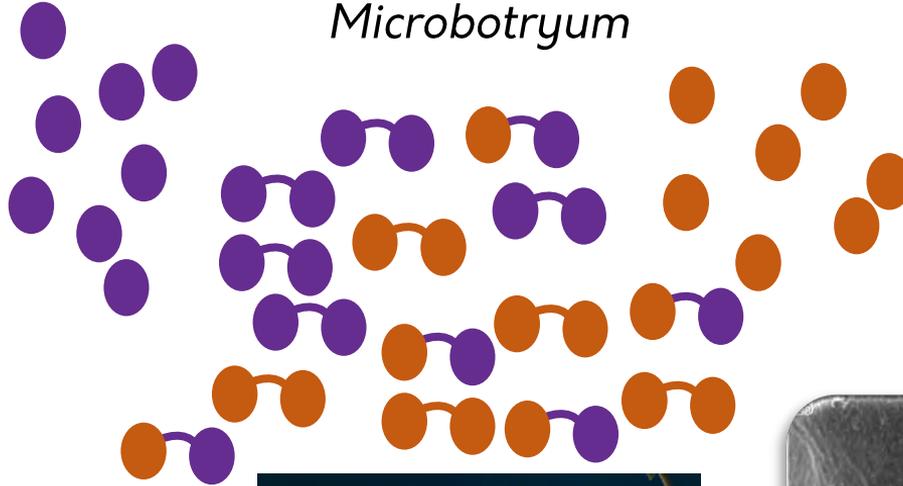


# Isolement reproducteur en sympatrie facilité chez les pathogènes

M.E. Hood



Autofécondation chez  
*Microbotryum*



M.E. Hood



Schäfer et al. 2010 Botany

Gibson et al. 2012 Evolution



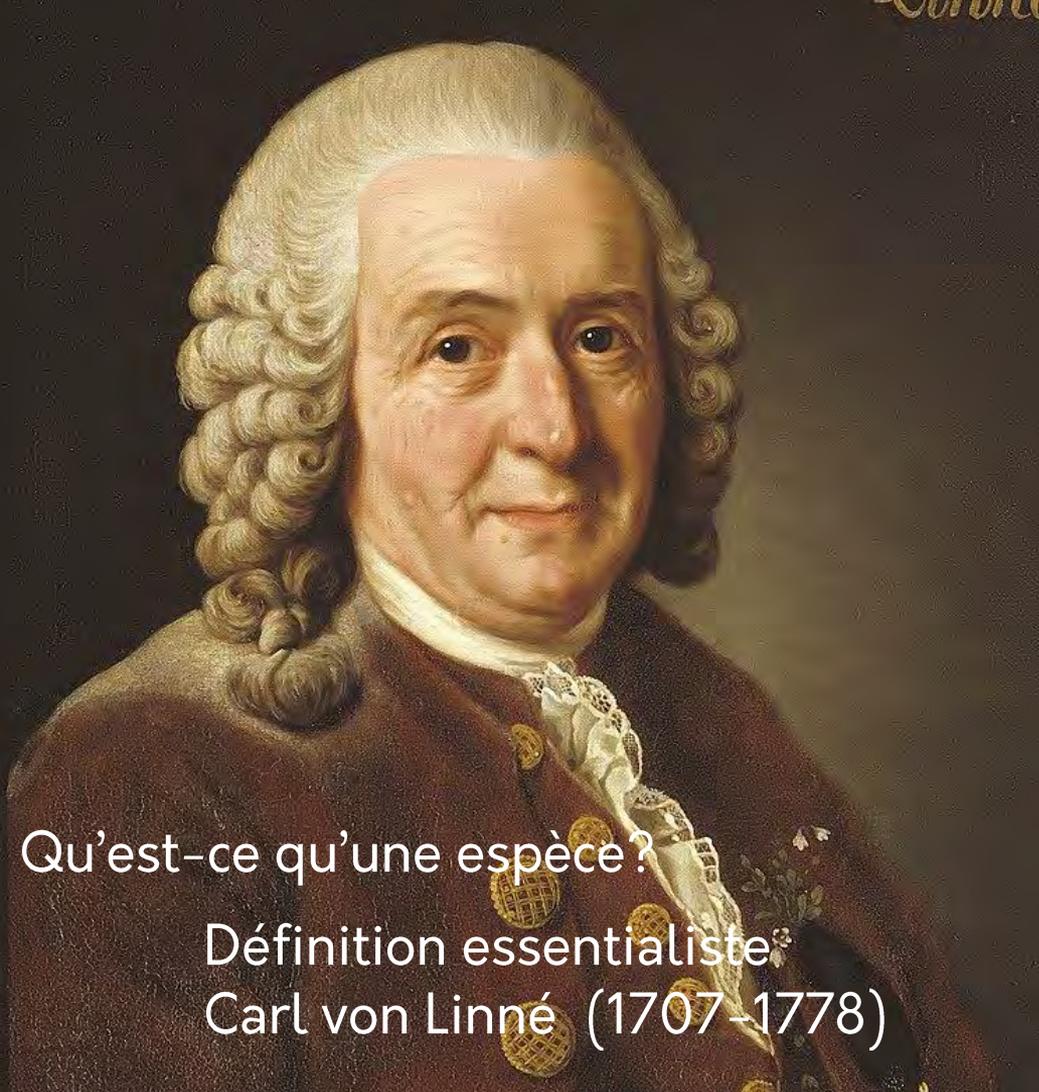
Pourquoi autant  
d'espèces sur  
terre?

Qu'est-ce qu'une  
espèce?



*Canis lupus*

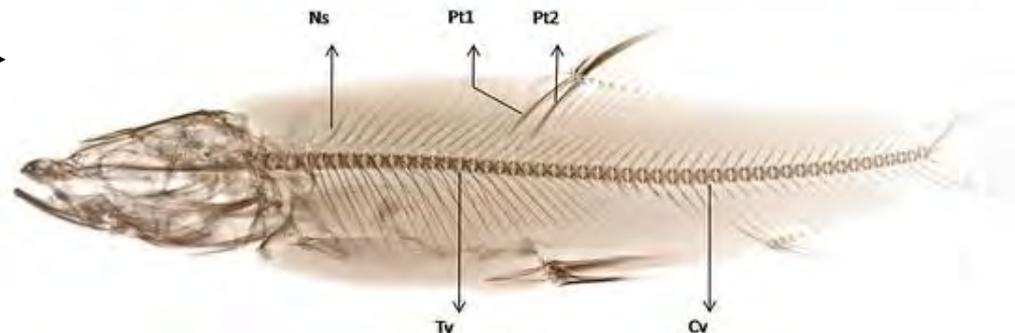
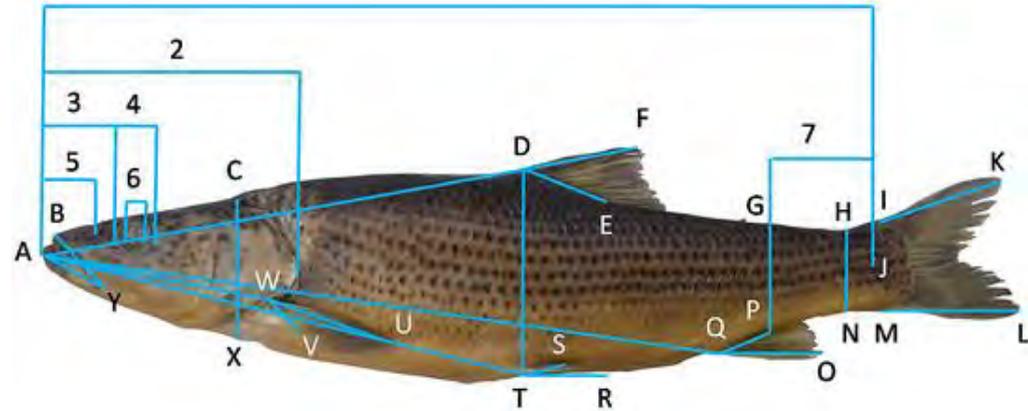
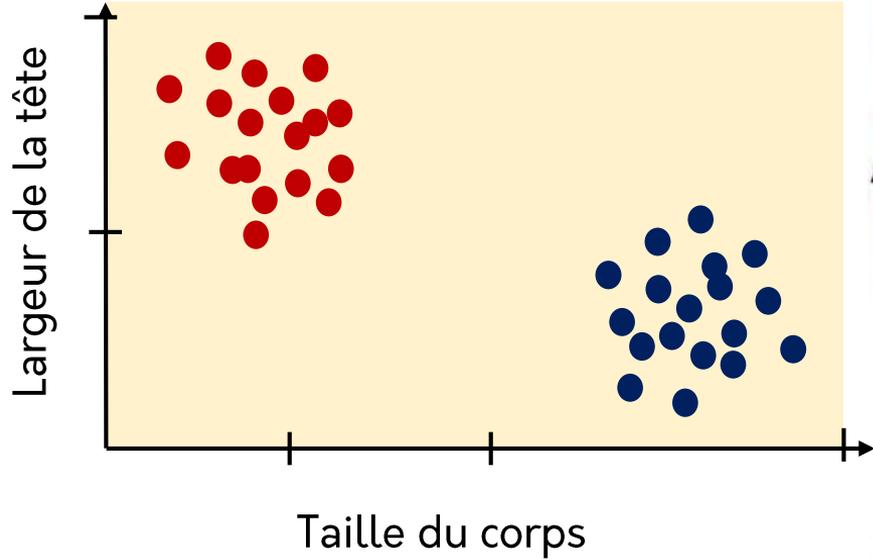




Qu'est-ce qu'une espèce ?  
Définition essentialiste  
Carl von Linné (1707-1778)

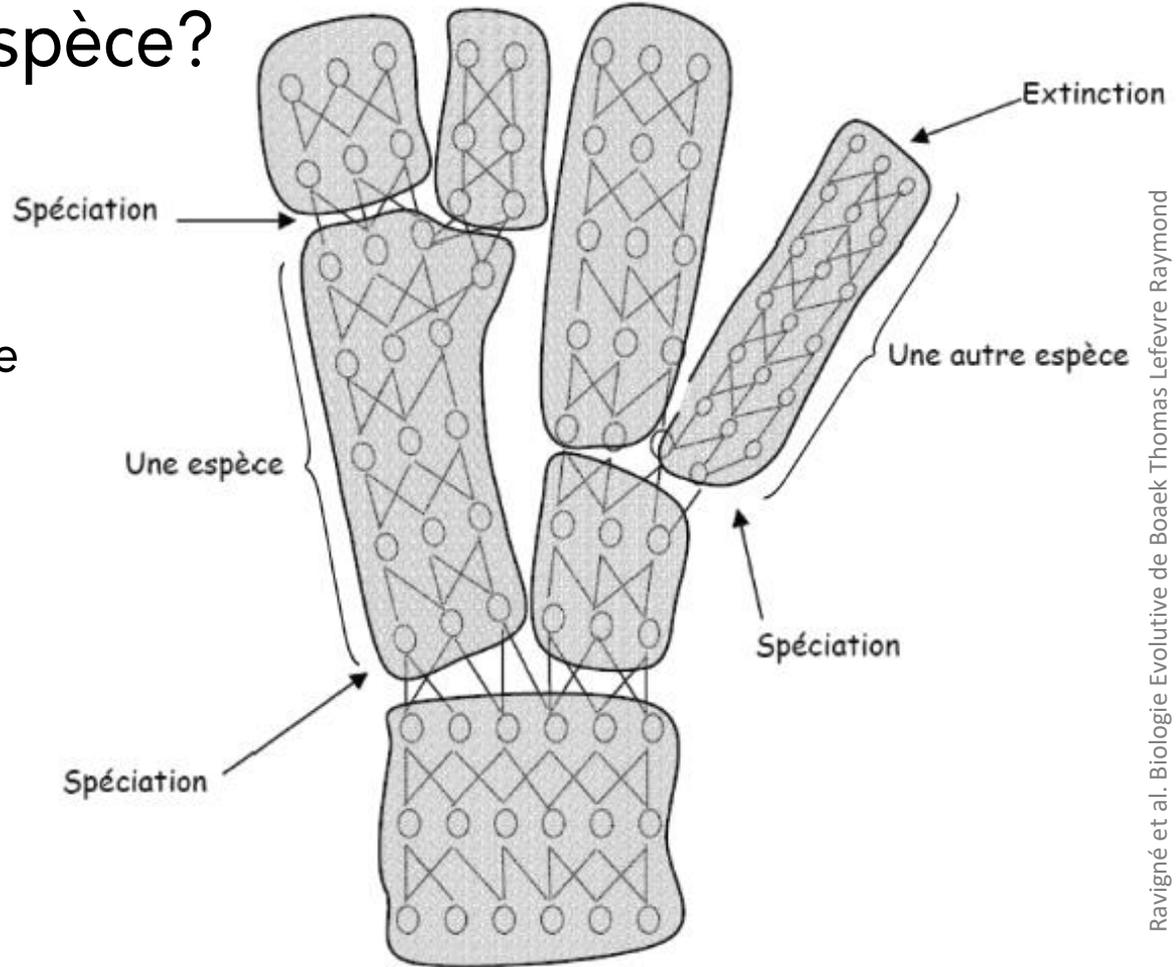


# Qu'est-ce qu'une espèce?



# Qu'est-ce qu'une espèce?

Biologie évolutive actuelle:  
Segment d'une lignée évolutive  
indépendante des autres

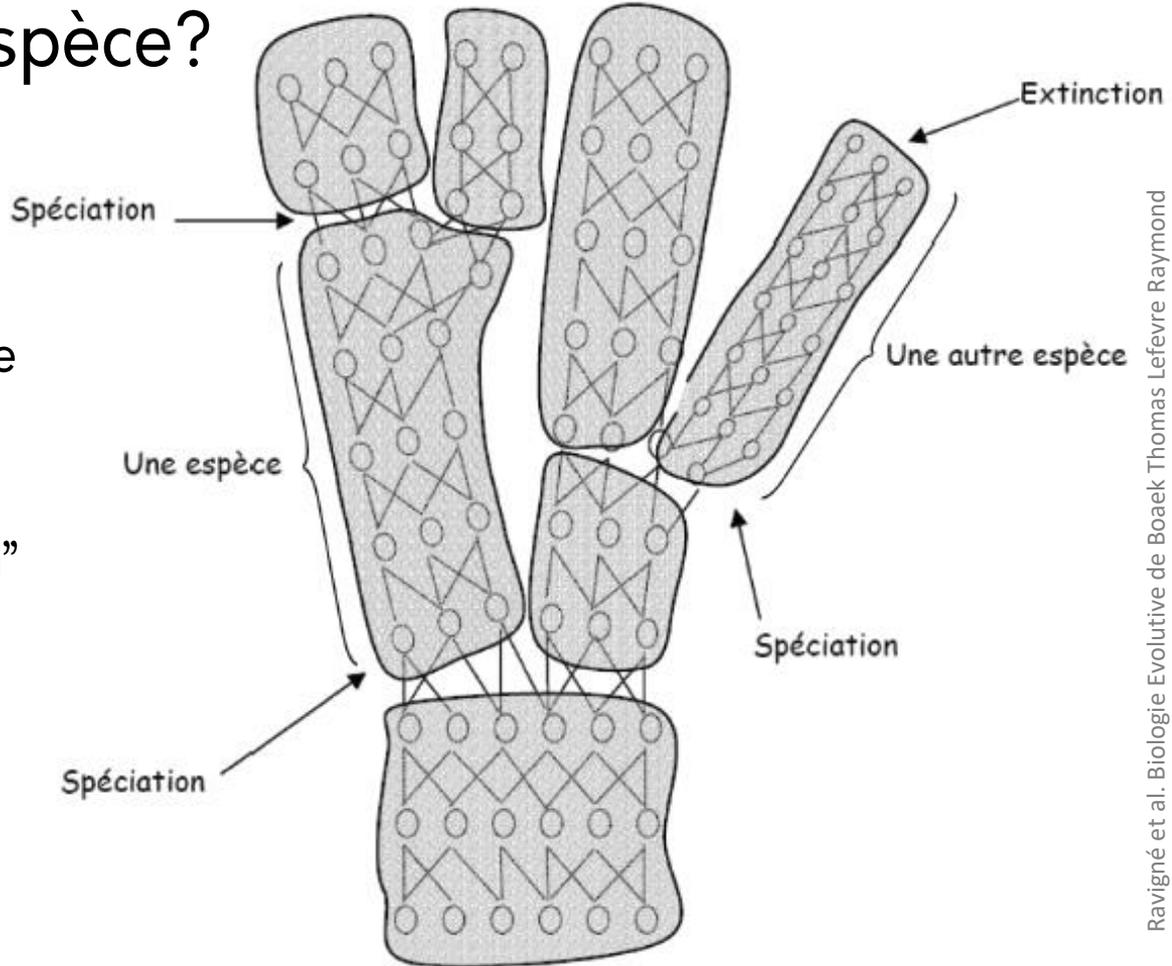


# Qu'est-ce qu'une espèce?

Biologie évolutive actuelle:  
Segment d'une lignée évolutive  
indépendante des autres

Pas de problème de "définition"  
ou de "concept"

Mais problème pour les  
délimiter dans la nature  
("critères" d'espèces)

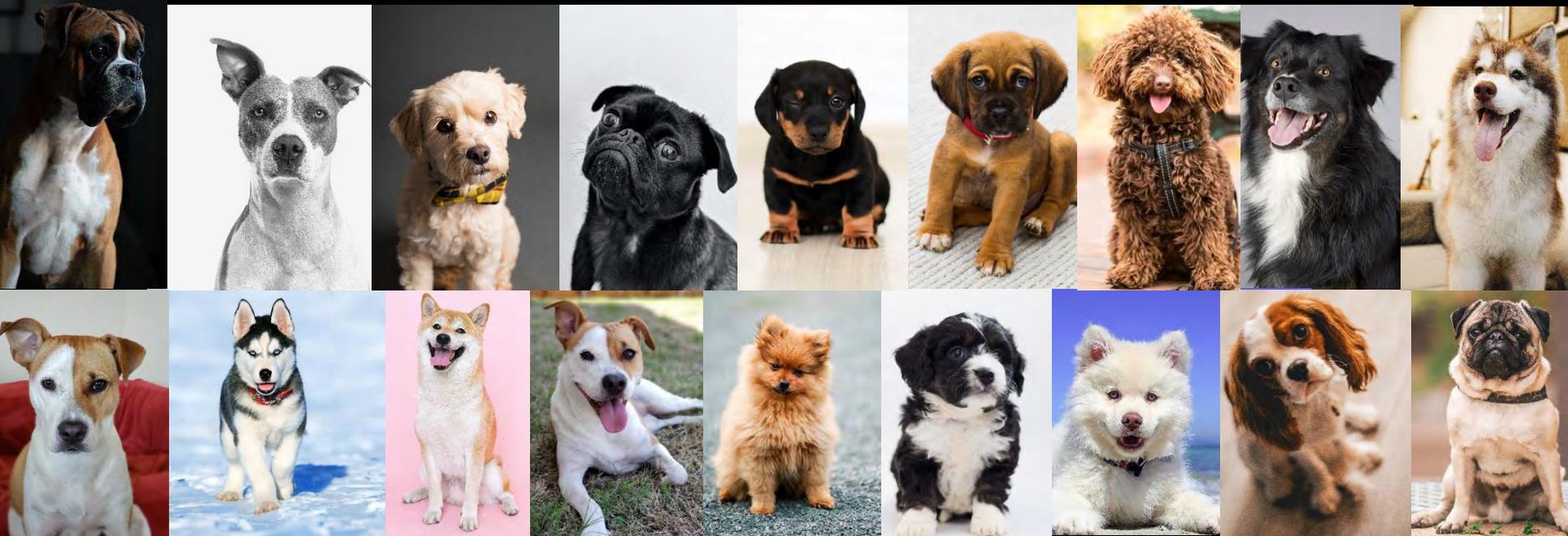


# Différents critères de délimitation d'espèces

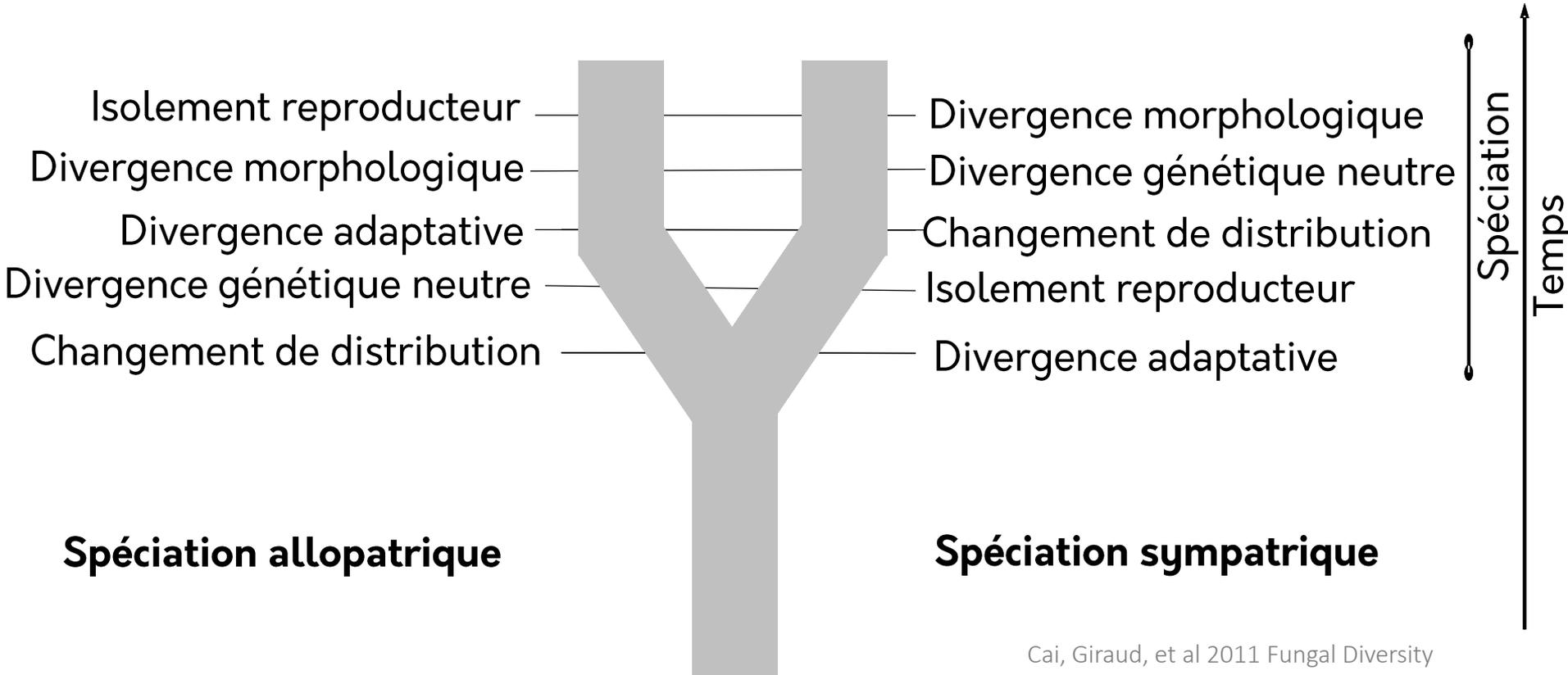
*Canis lupus*



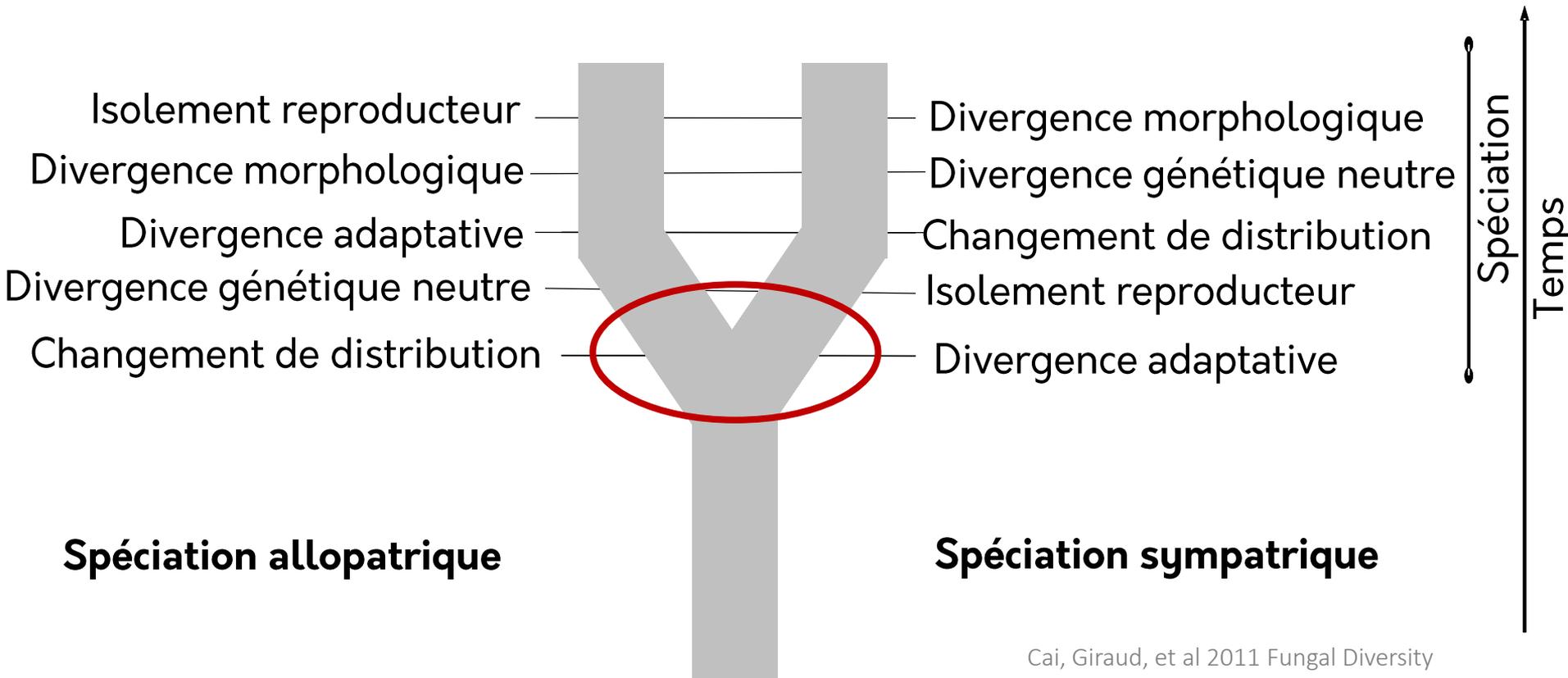
- Morphologique
- Biologique (interféconds)
- Phylogénétique



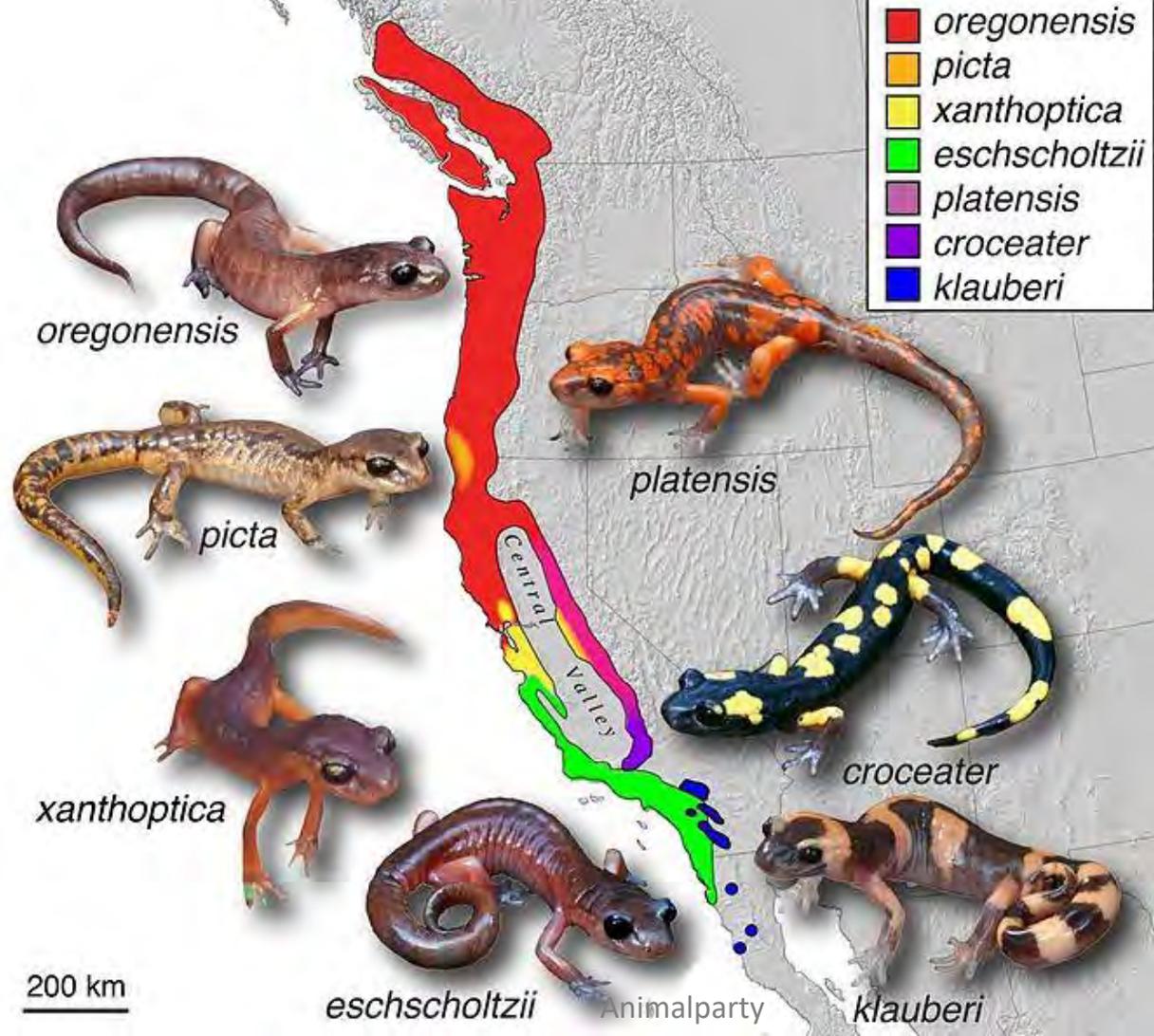
# Il n'y a pas de critère optimal absolu de délimitation d'espèces...



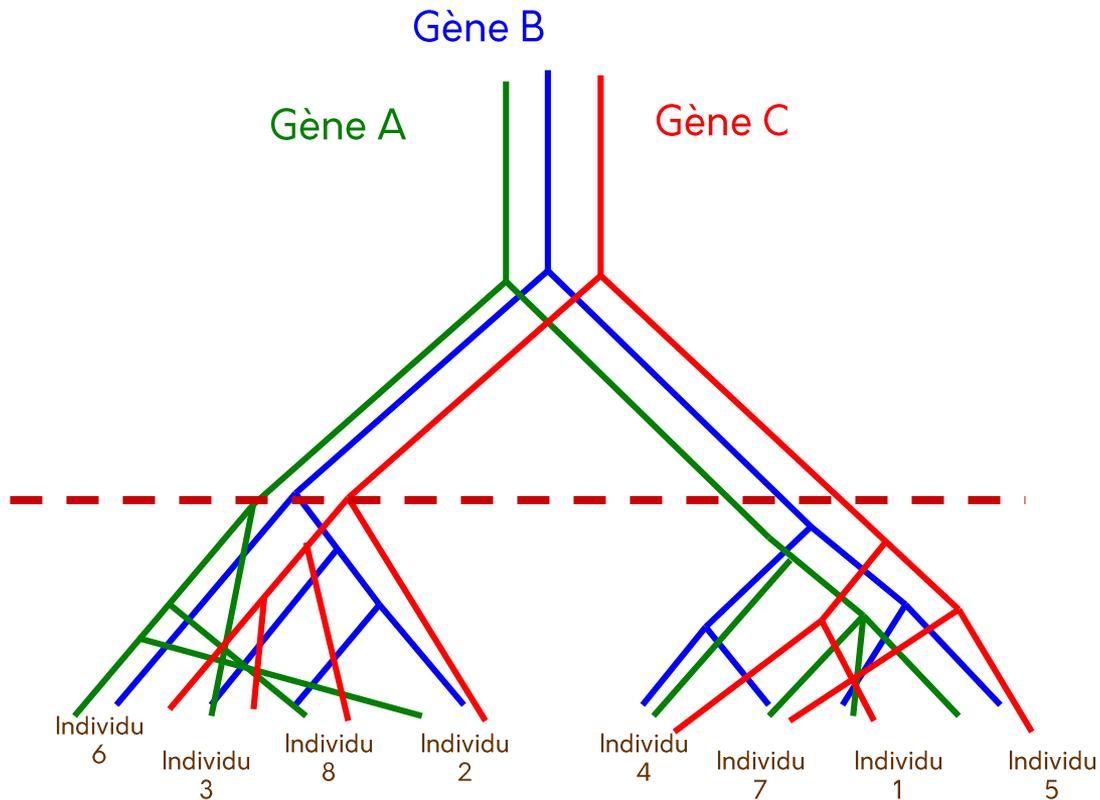
# Et il y a une « zone grise » de spéciation



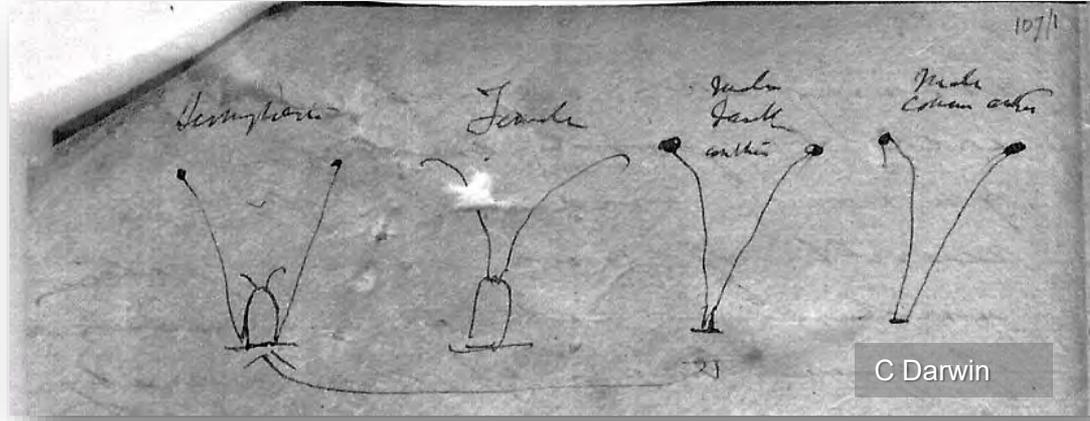
# Anneaux d'espèces



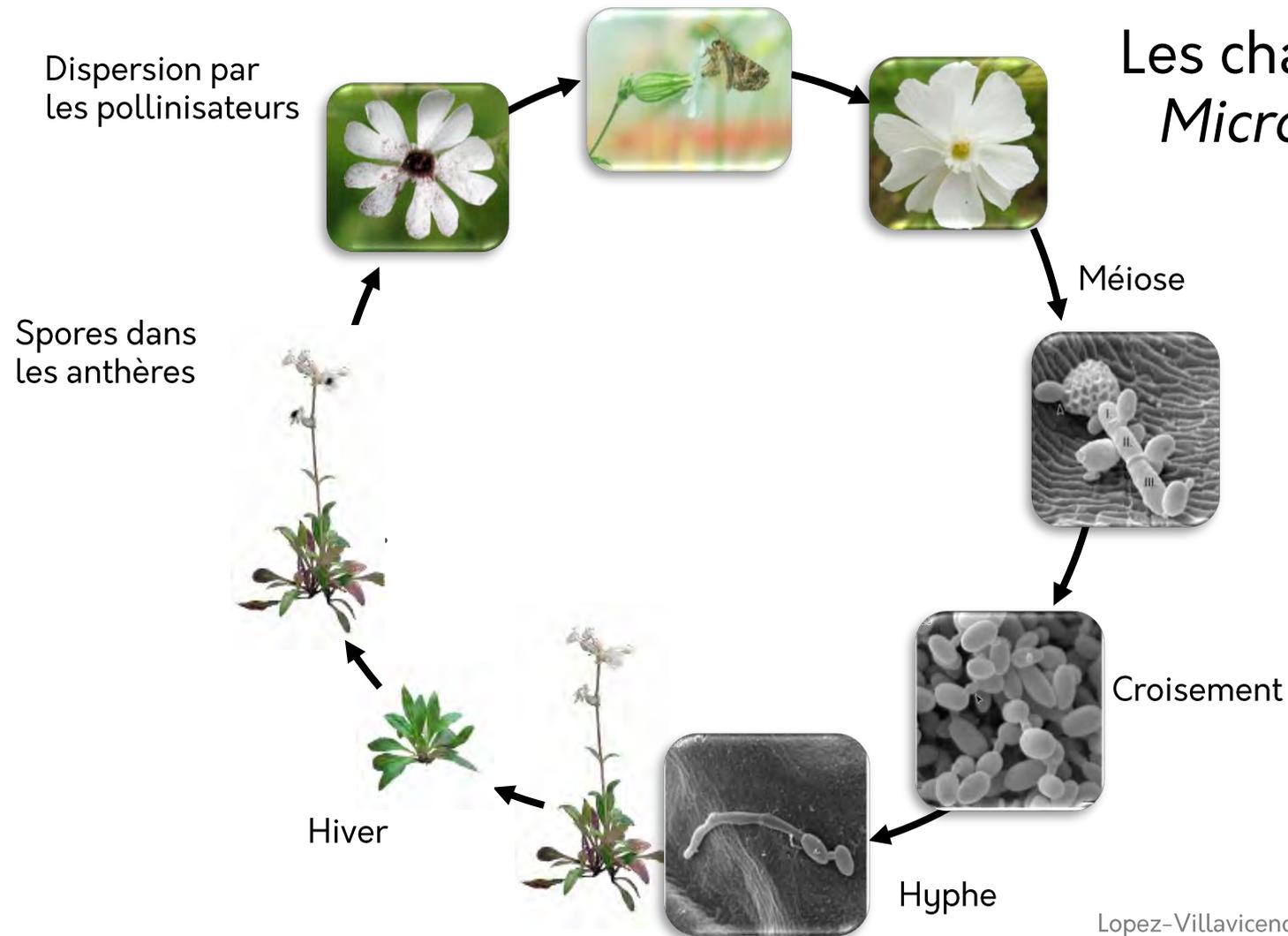
# Critères d'espèces : congruence entre phylogénies multiples



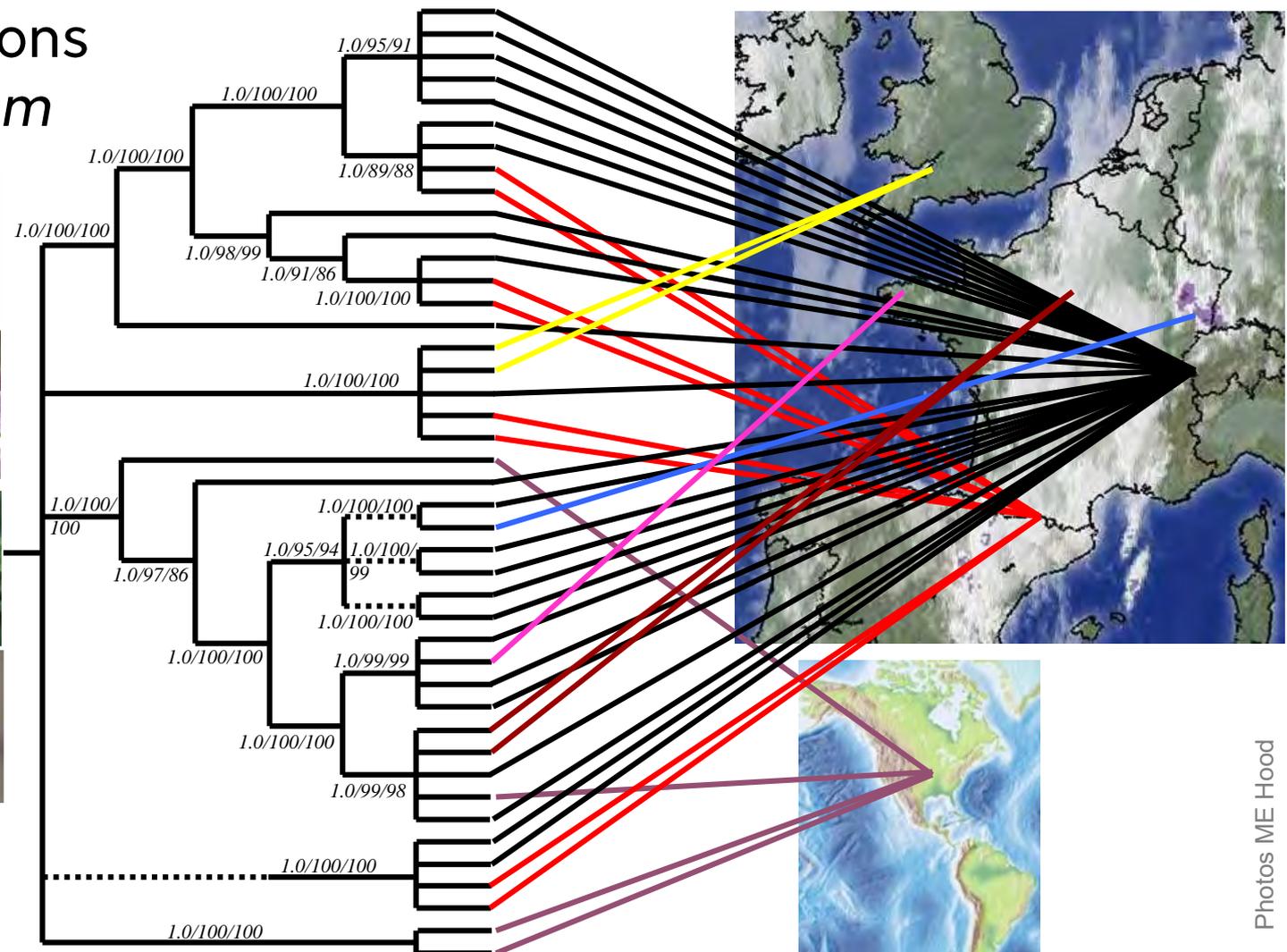
# Les champignons *Microbotryum*



# Les champignons *Microbotryum*



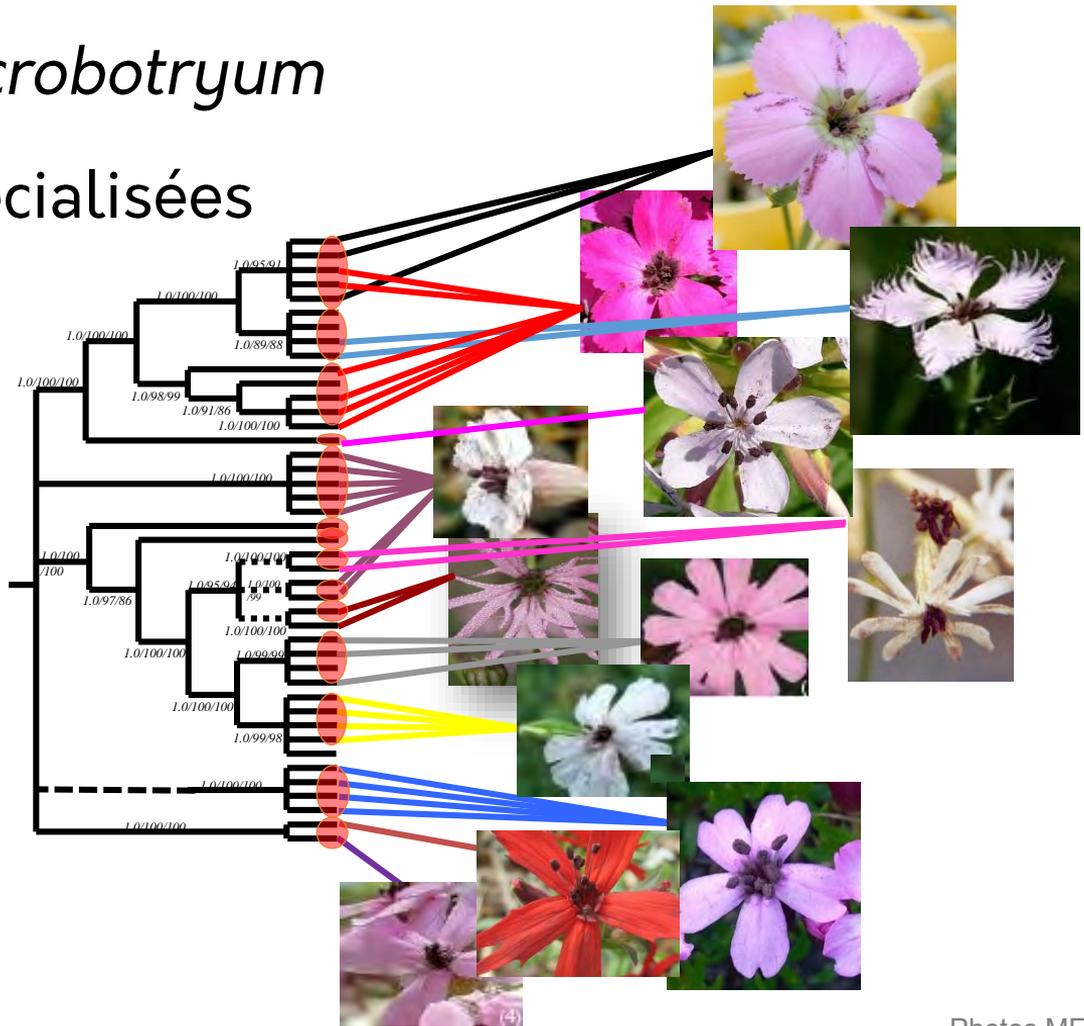
# Les champignons *Microbotryum*



Le Gac et al, Evolution 2007  
Refrégier et al. 2008  
Picts ME Hood

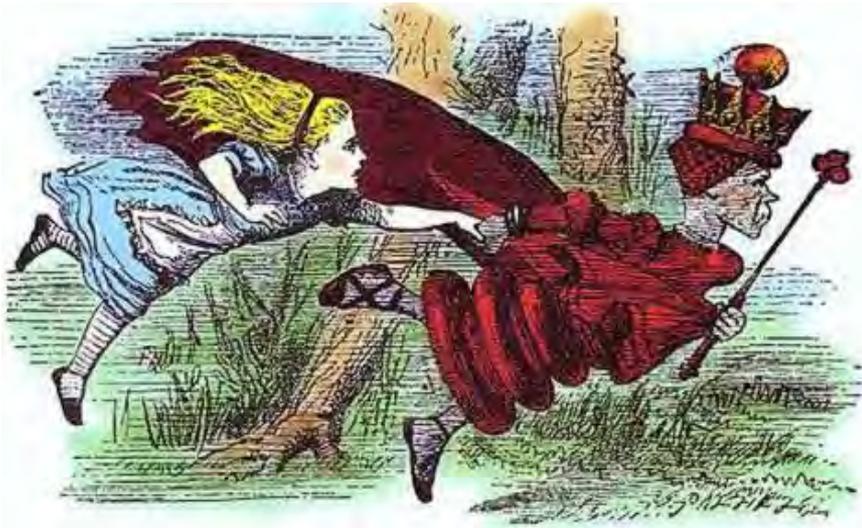
# Les champignons *Microbotryum*

## Espèces jumelles spécialisées

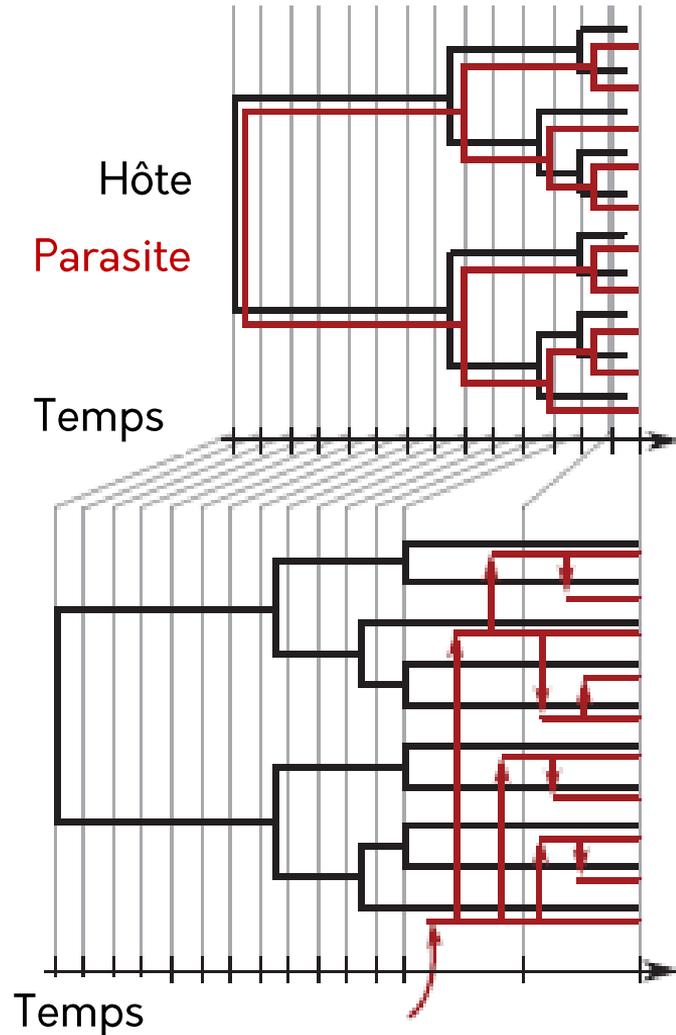


# Spéciation des parasites: Cospéciation ou sauts d'hôtes?

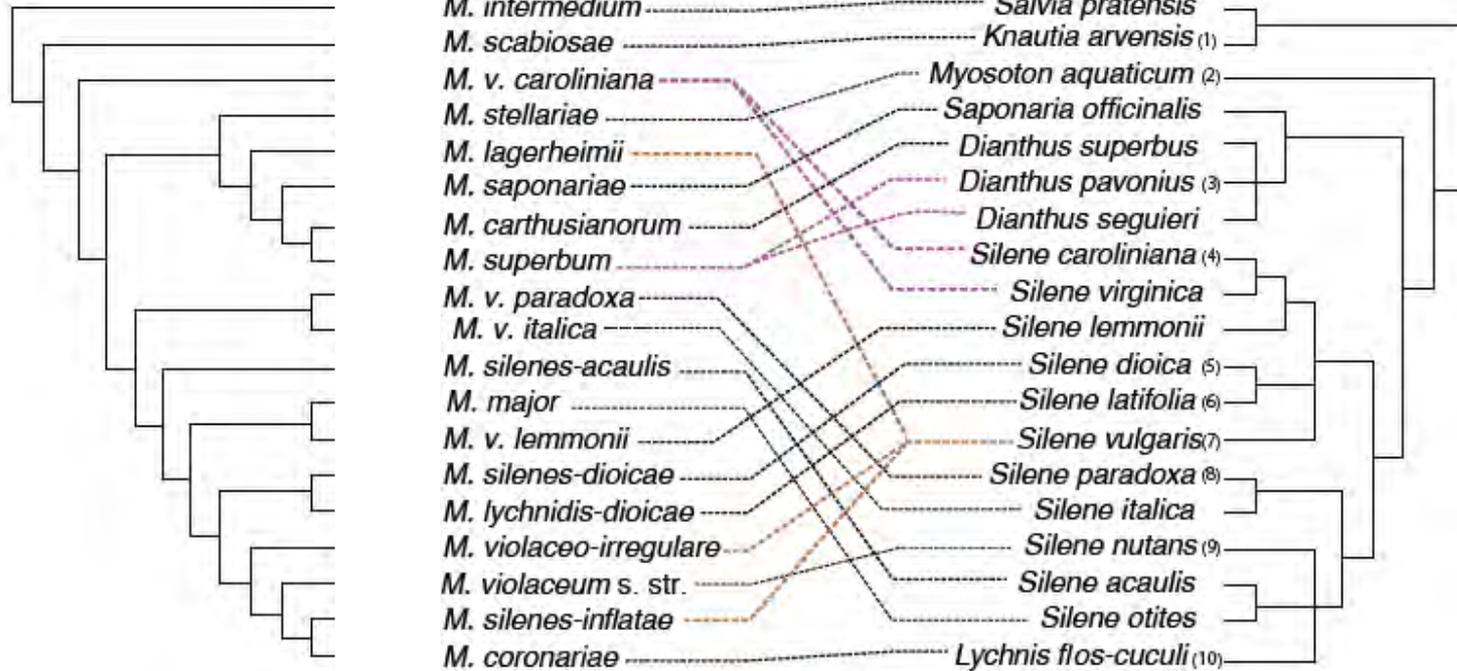
Différent de la question de la  
coévolution



de Vienne et al. 2013 New Phytol

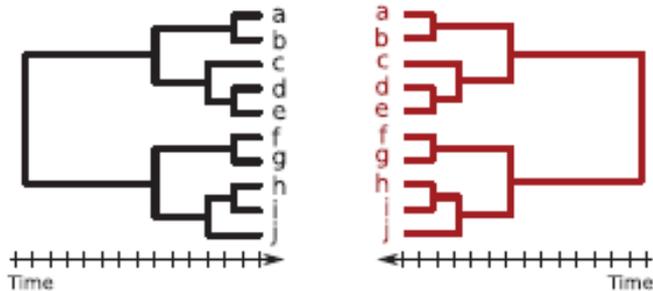


# Spéciation par sauts d'hôtes, pas de cospéciation



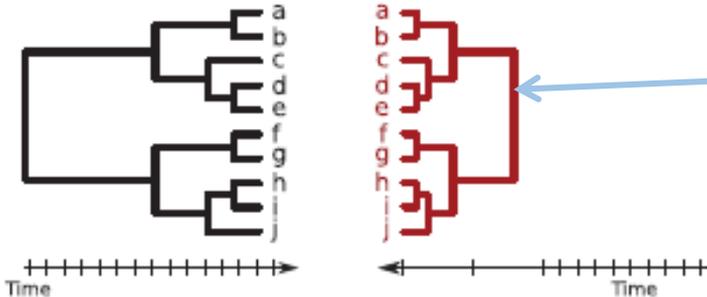
# La coévolution n'implique pas la cospéciation

Congruence



Cospéciation  
Uniquement des  
mutualistes

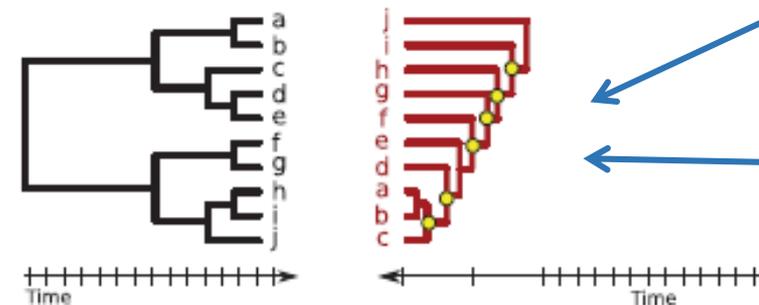
Pas clair



Incongruence  
temporelle  
Sauts d'hôtes



Incongruence



Incongruence  
topologique  
Sauts d'hôtes



Pourquoi autant  
d'espèces sur  
terre?



Origine de la vie?



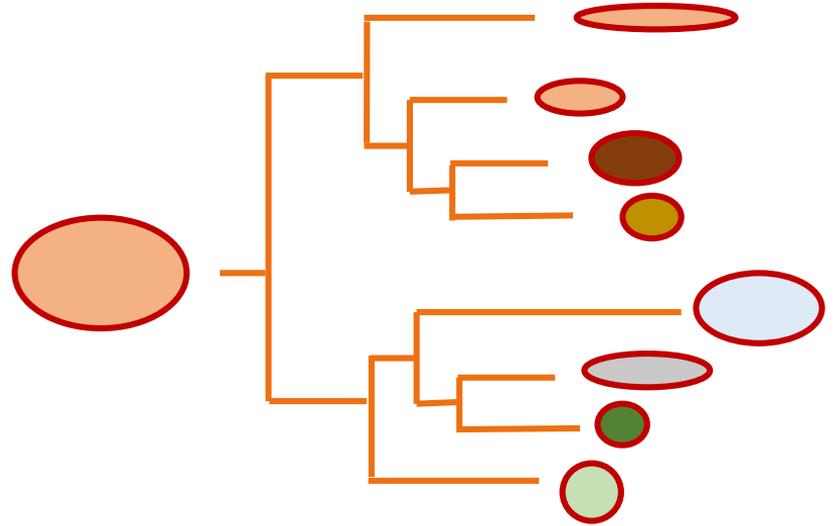
Définition de la vie ?



# Définition de la vie ?

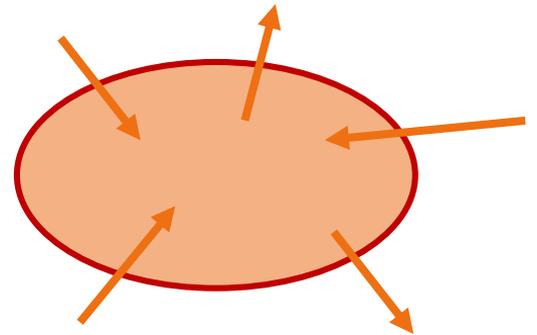
## - Basées sur l'auto-réplication et l'évolution

Exemple : La vie est un système chimique auto-entretenu capable d'évolution darwinienne  
(Joyce 1994, NASA)



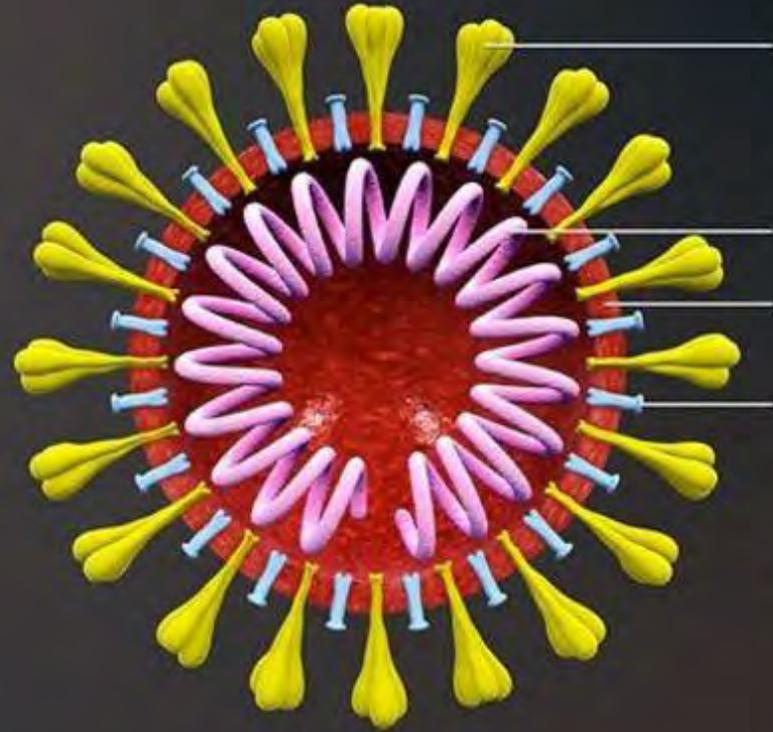
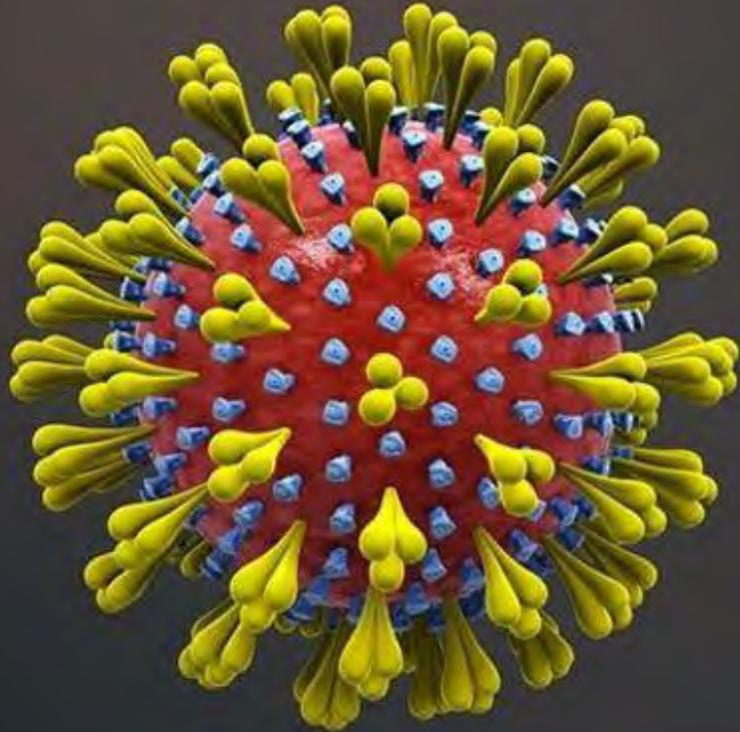
## - Basées sur l'auto-entretien (métabolisme)

La forme de vie minimale est un système circonscrit par un compartiment semi-perméable de sa propre fabrication et qui s'auto-entretient en produisant ses propres éléments constitutifs par la transformation de l'énergie et des nutriments extérieurs à l'aide de ses propres mécanismes de production  
(F. Valera / P. L. Luisi)



SARS-CoV-2

Vivant ?



Glycoprotéine S  
(de «Spike» = pointe)

ARN et protéine N  
(Nucléocapside)

Enveloppe

Glycoprotéine HE  
(Hémagglutinine  
Estérase)

Permet la fusion de  
l'enveloppe virale  
avec la membrane de  
la cellule hôte

Vie artificielle ?

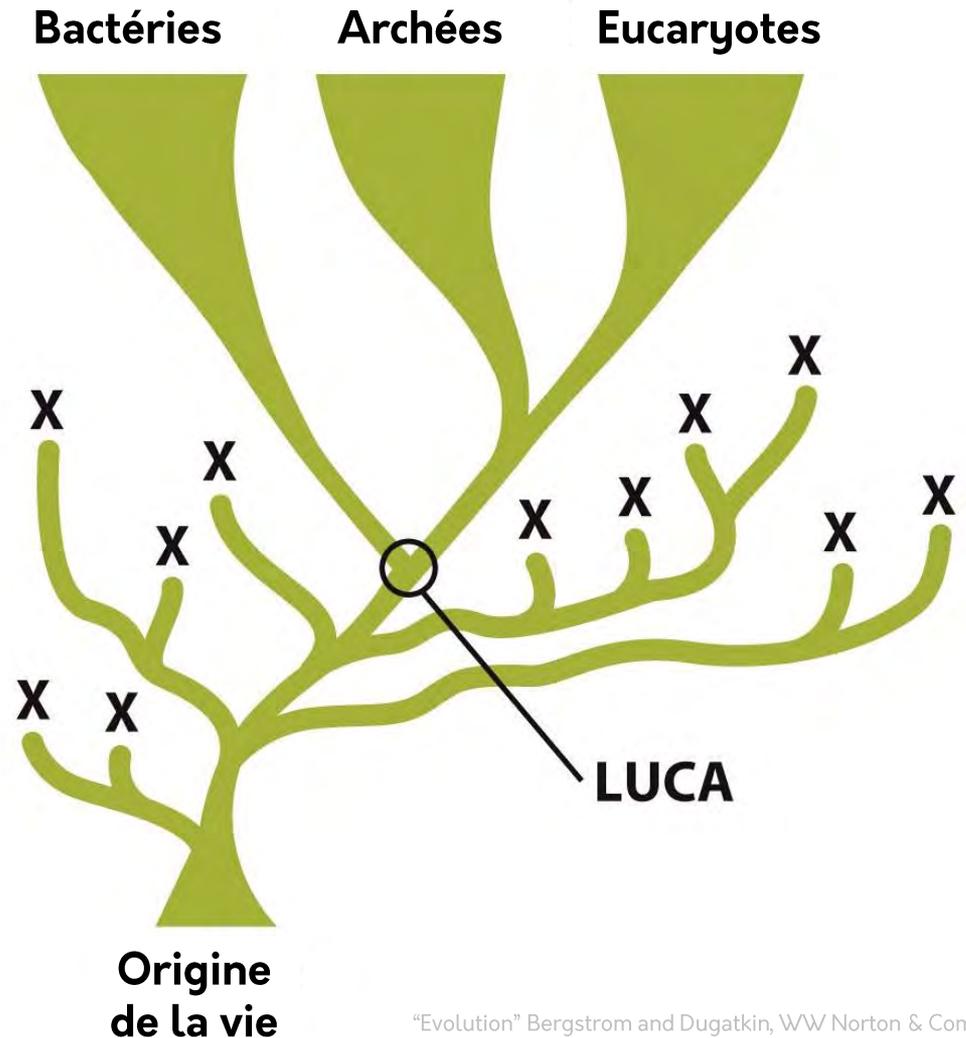


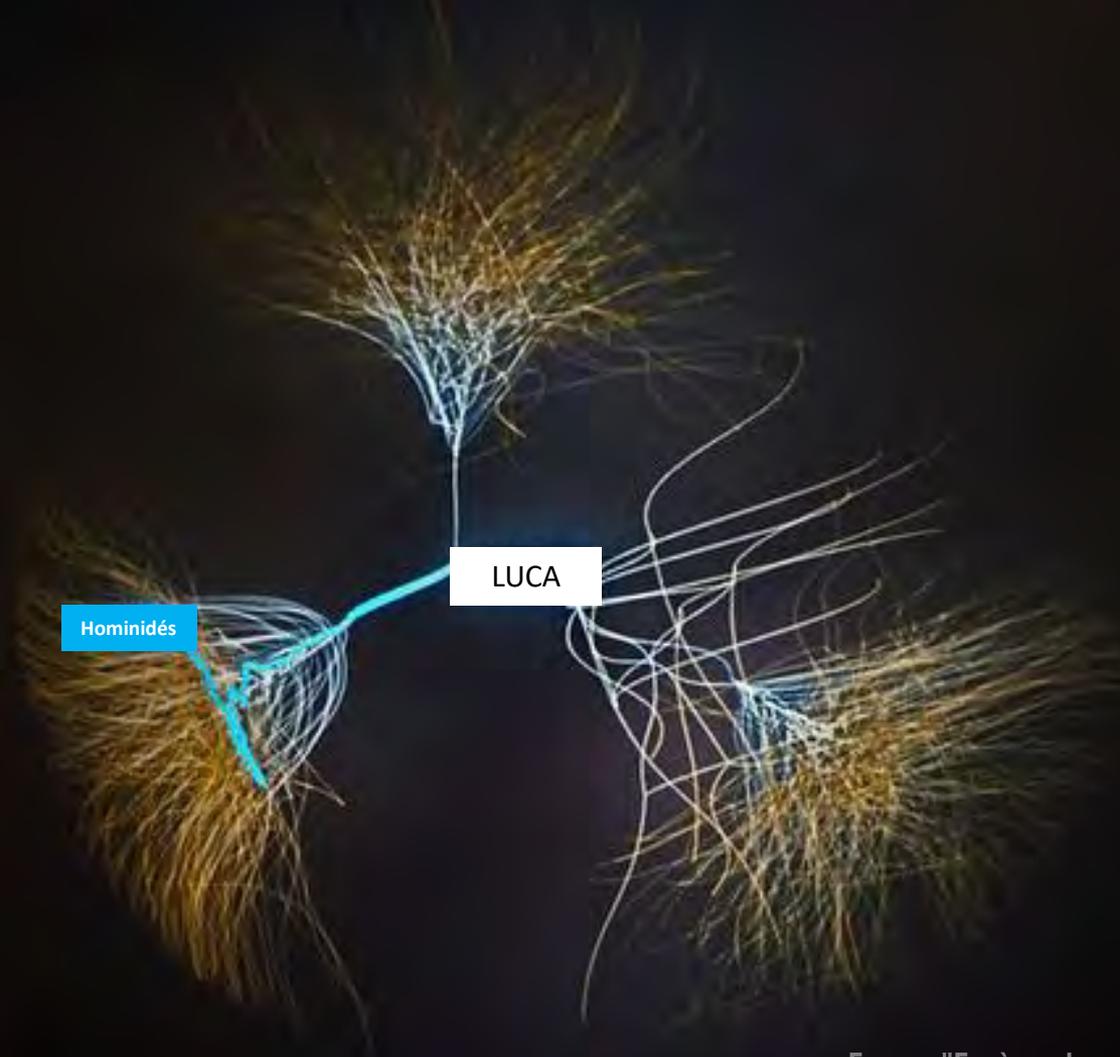
Origine de la vie?



**Origine de la vie**  
**≠**  
**Dernier ancêtre commun**

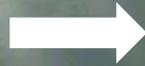
**LUCA**  
« Last universal  
common ancestor »







**Chimie  
prébiotique**



**Premières  
cellules**



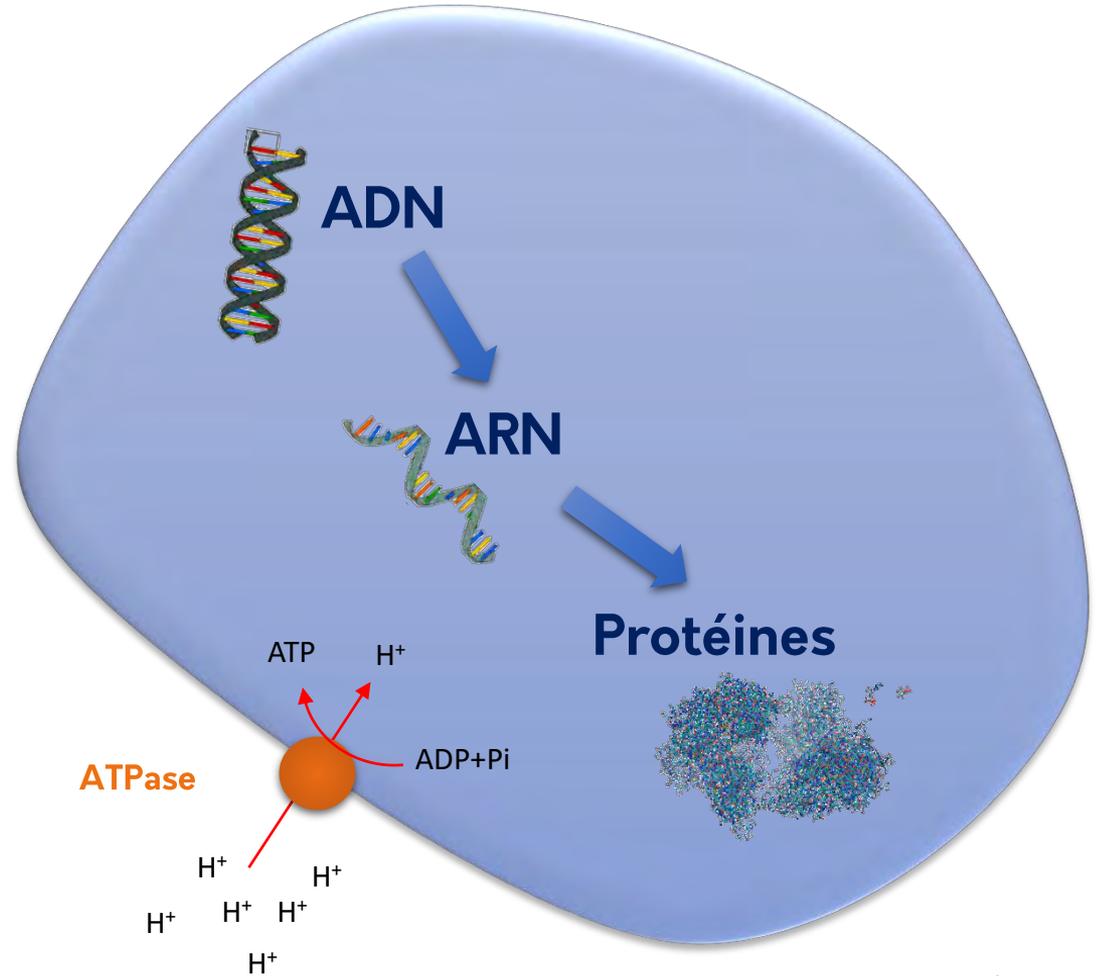
**Ancêtre  
commun**



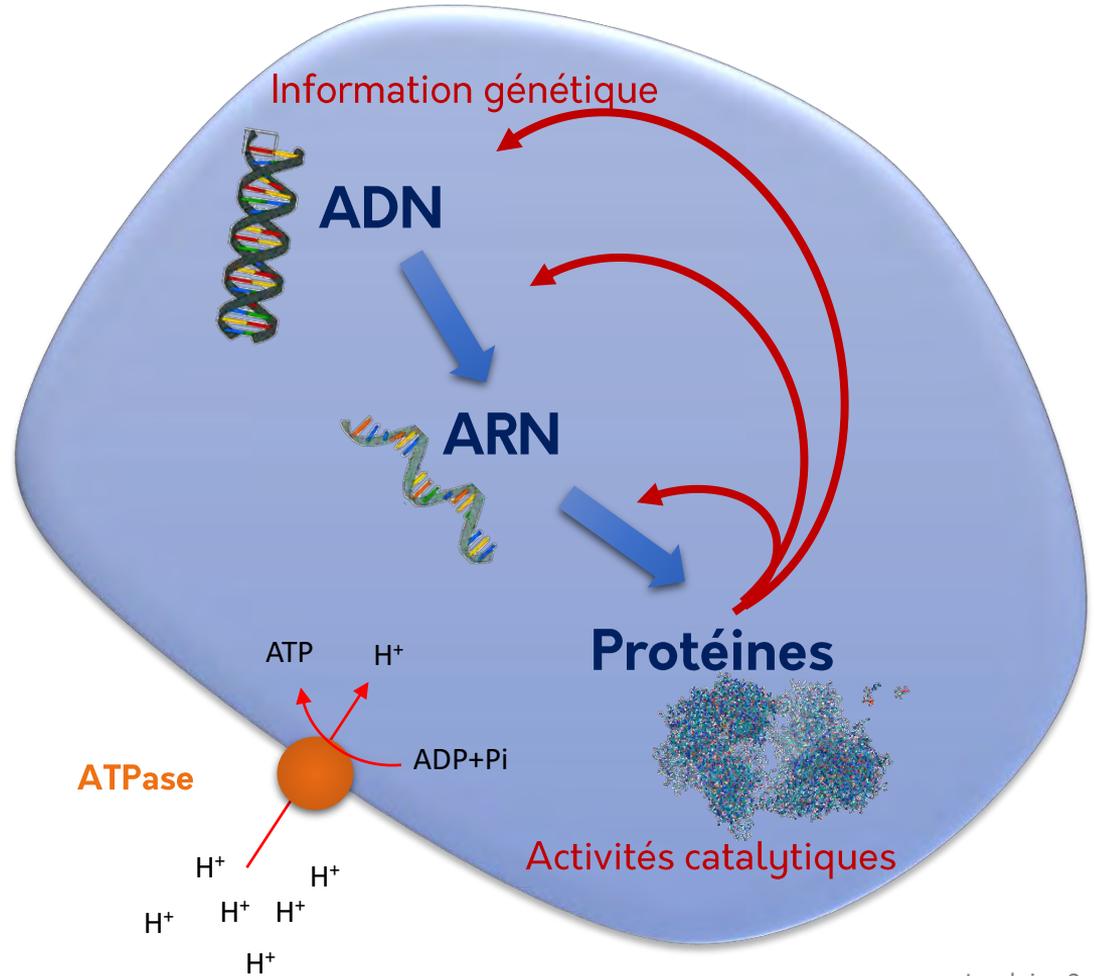
**Diversification  
(3 domaines)**

# LUCA (last universal common ancestor)

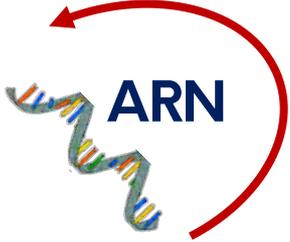
Organisme complexe  
> 600 gènes



# LUCA (Last universal common ancestor)



Information génétique



Activités catalytiques

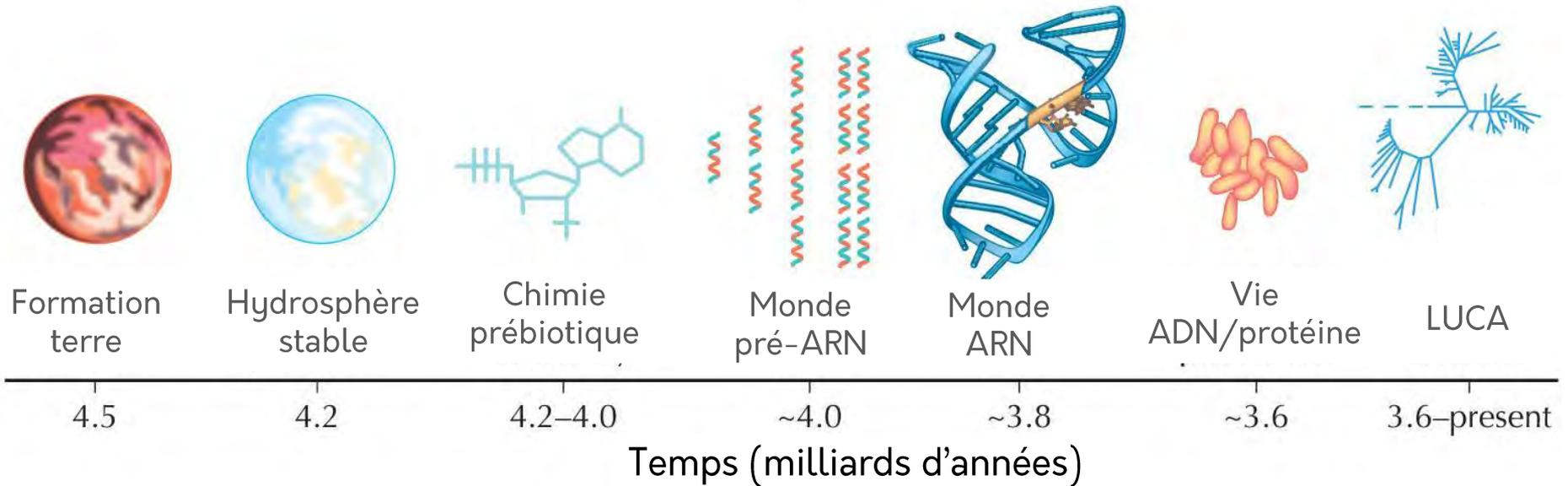
## Un monde à ARN



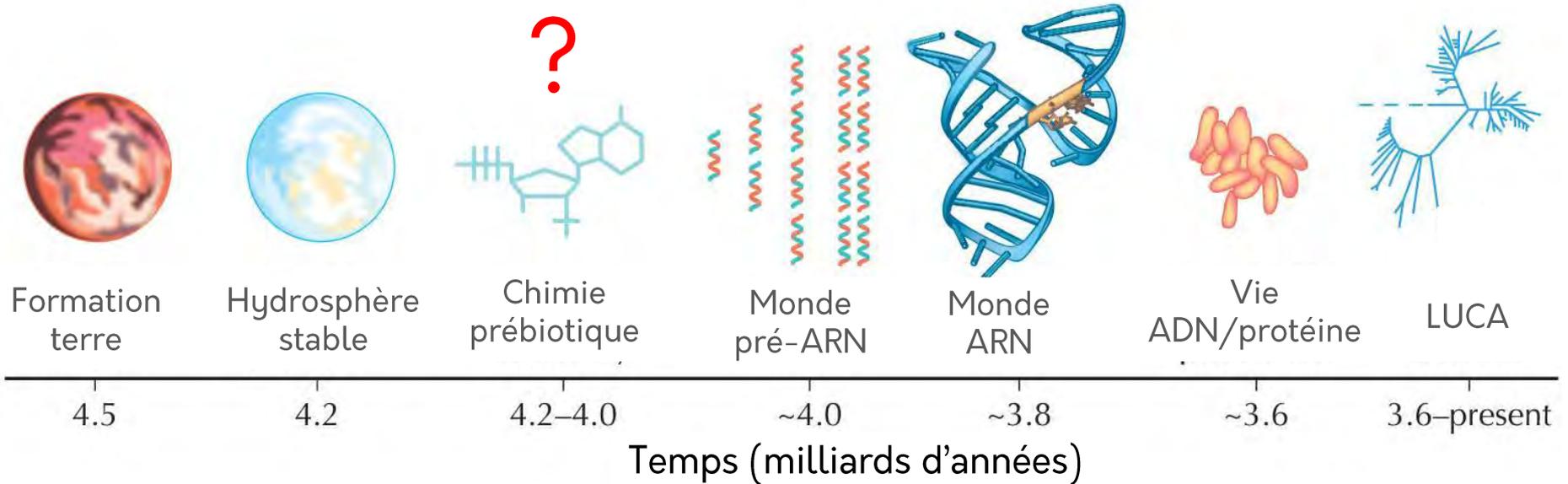
Plus stable  
Non catalytique

Moins stable  
Catalytique

# Etapes dans l'origine de la vie



# Etapes dans l'origine de la vie



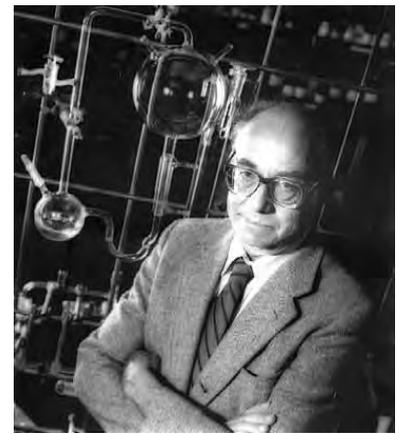
## Sources d'énergie



Eclairs et lumière ultraviolette, rayons cosmiques, éruptions volcaniques, chaleur interne de la terre



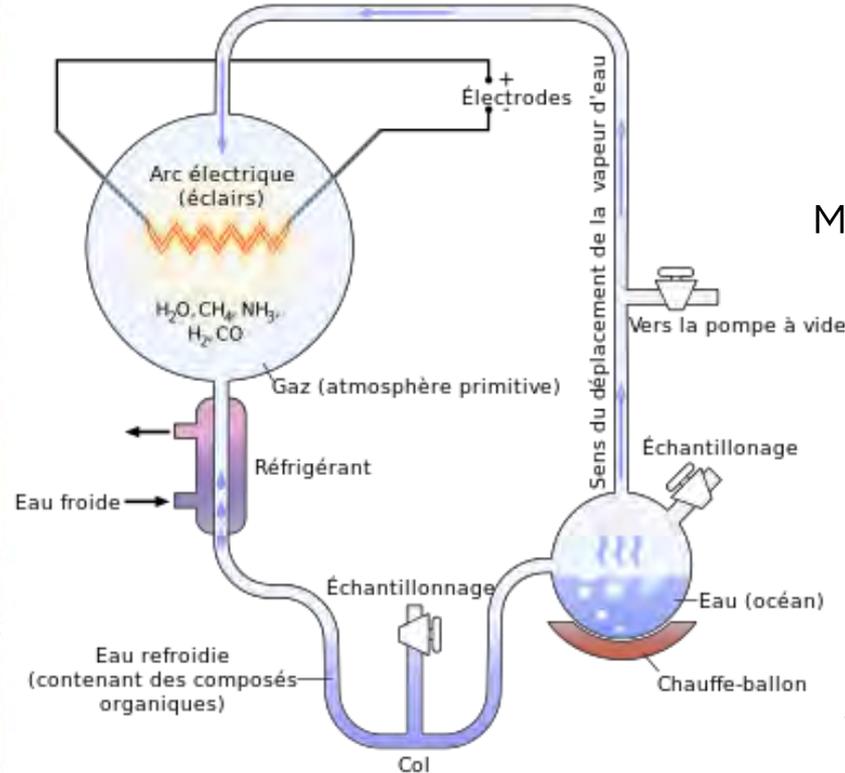
# Expérience de Stanley Miller 1953

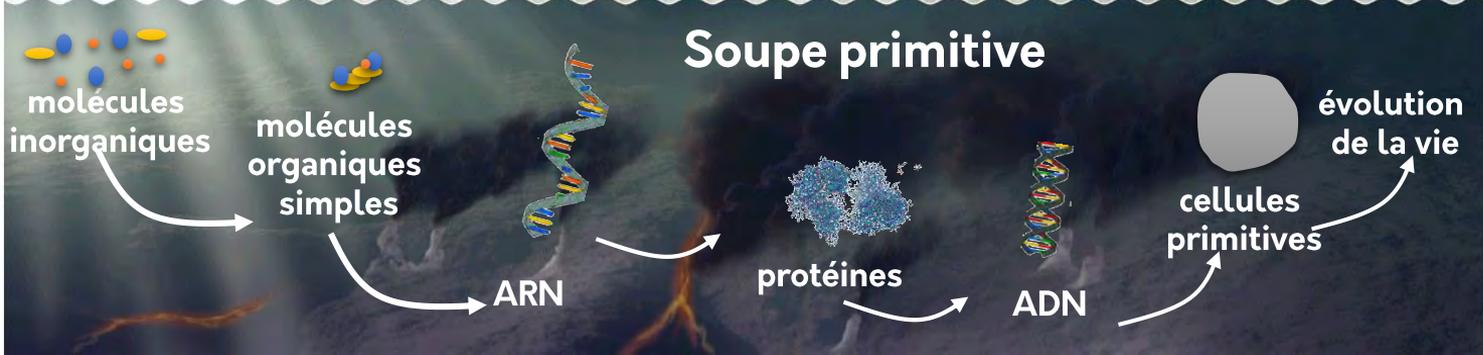


Méthane  $\text{CH}_4$ , ammoniac  $\text{NH}_3$ ,  
hydrogène  $\text{H}_2$  et eau +  
décharges électriques



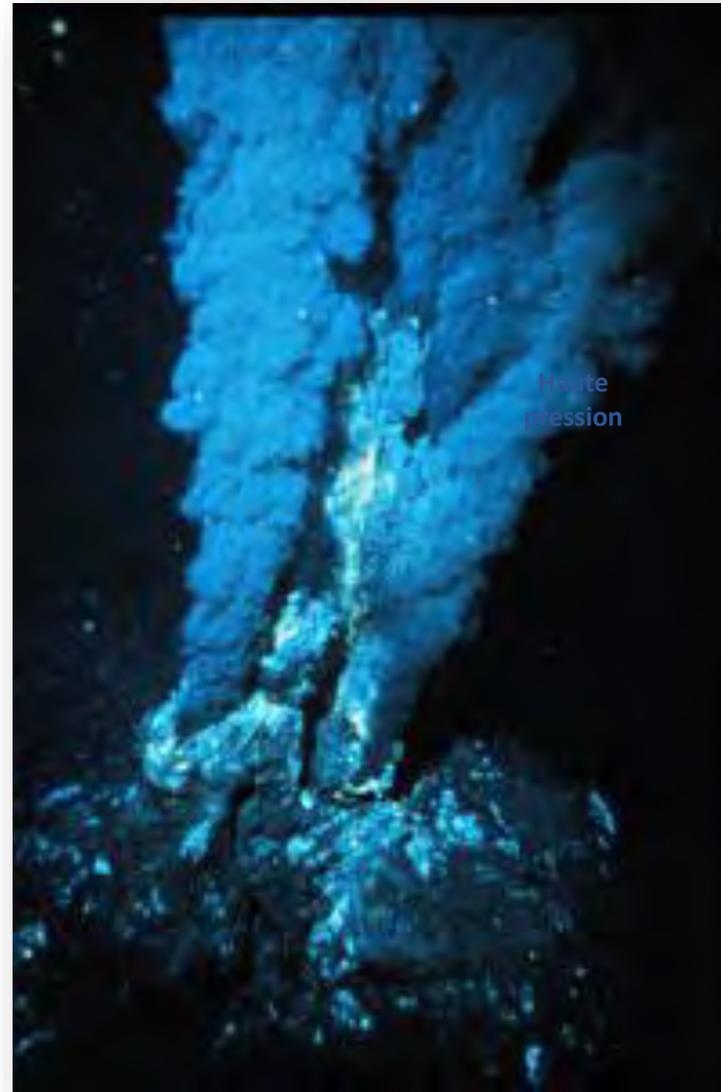
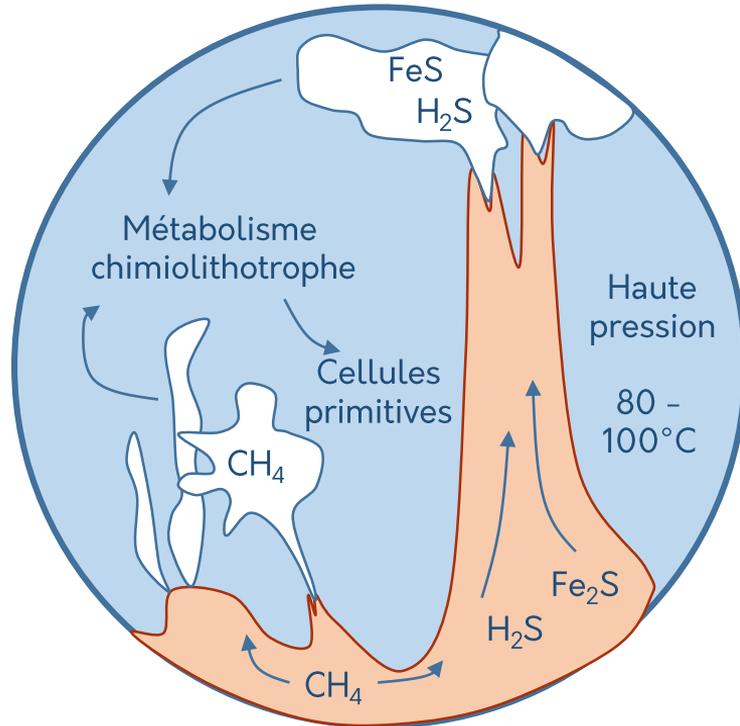
Urée ( $\text{CON}_2\text{H}_4$ ),  
formaldéhyde ( $\text{H}_2\text{CO}$ ),  
acide cyanhydrique ( $\text{HCN}$ ),  
bases et acides aminés



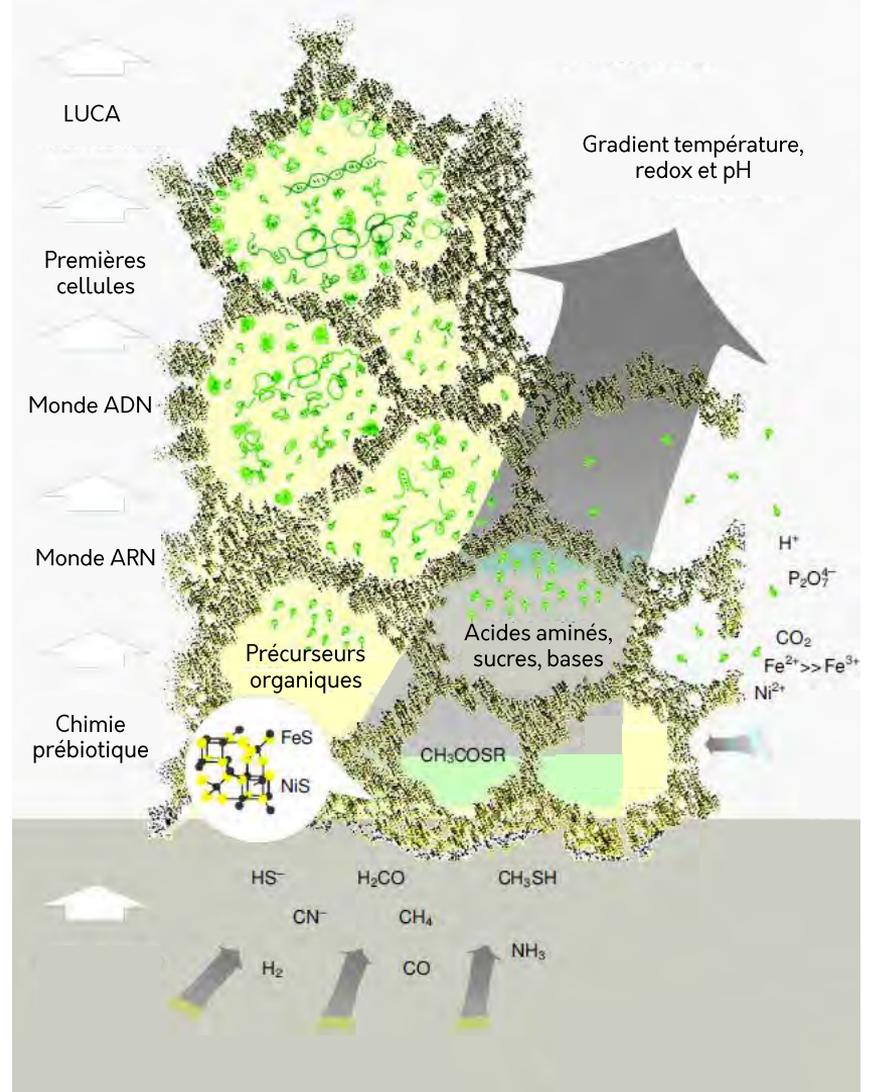
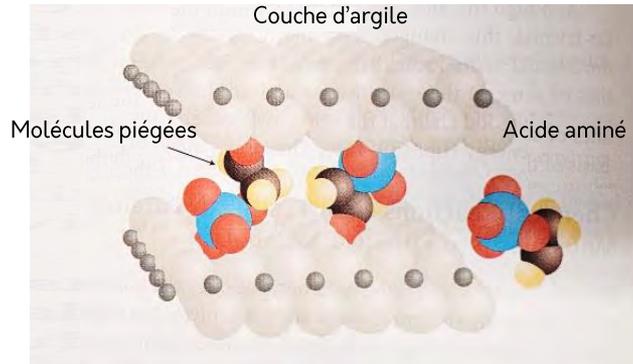
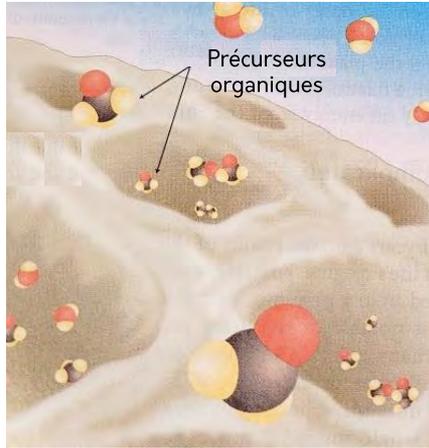


# Fumeurs noirs

Dans les années 80, la découverte de bactéries anaérobies chimio-autotrophes à proximité des fumeurs noirs (chauds) relance le débat sur l'origine de la vie



# La "pizza primitive"



# Les plus anciennes traces de vie



Rares actuellement

Fossiles de stromatolites de plus de 3 milliards d'années

Stromatolithes : structures biogéniques et organiques, construites par différentes communautés bactériennes, dominées par les cyanobactéries, qui ont permis le développement d'une vie plus complexe en produisant de l'Oxygène et de l'Ozone





# Pourquoi autant d'espèces sur terre? Origine de la vie?

Tatiana Giraud



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —



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



# Interactions entre espèces et distribution des espèces





COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —



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