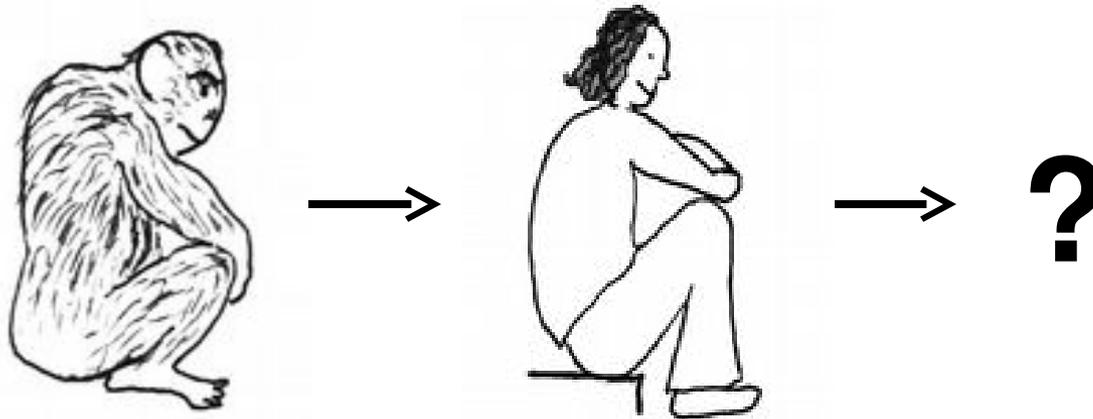
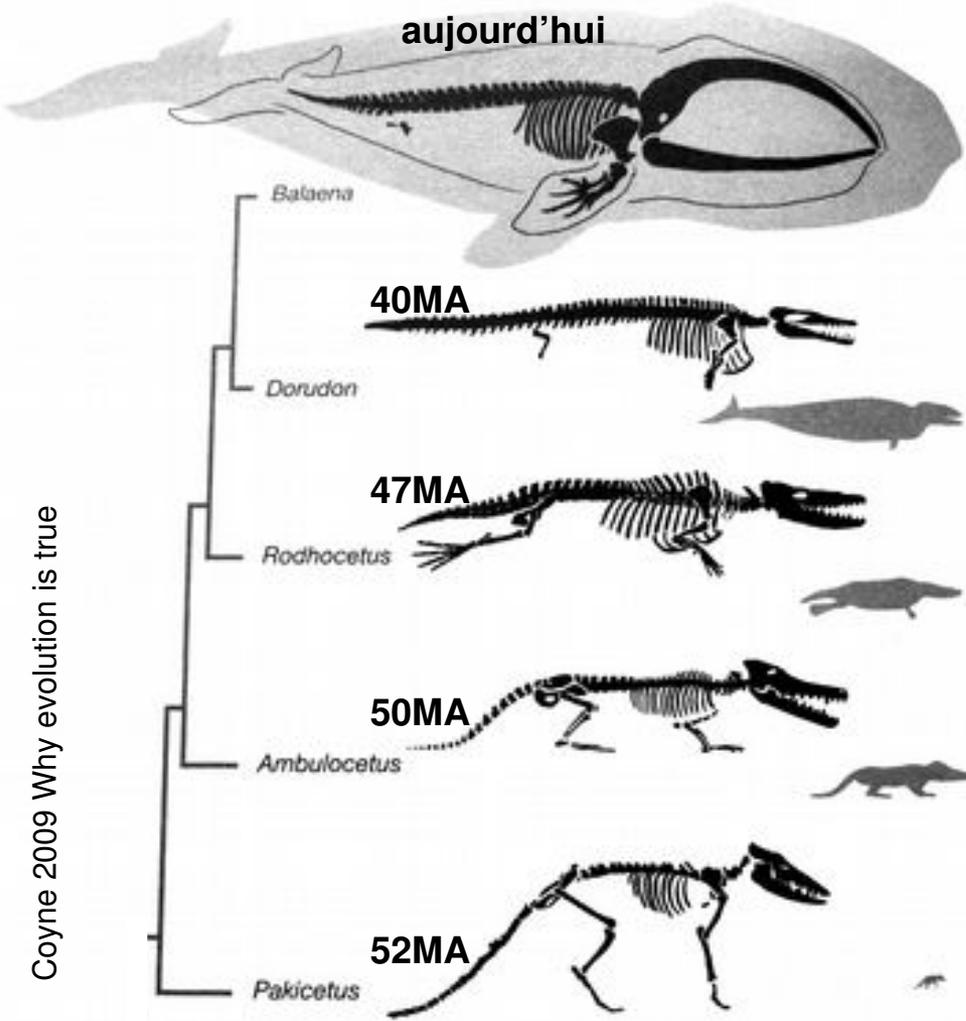


# L'évolution du monde vivant: prévisible ou imprévisible ?



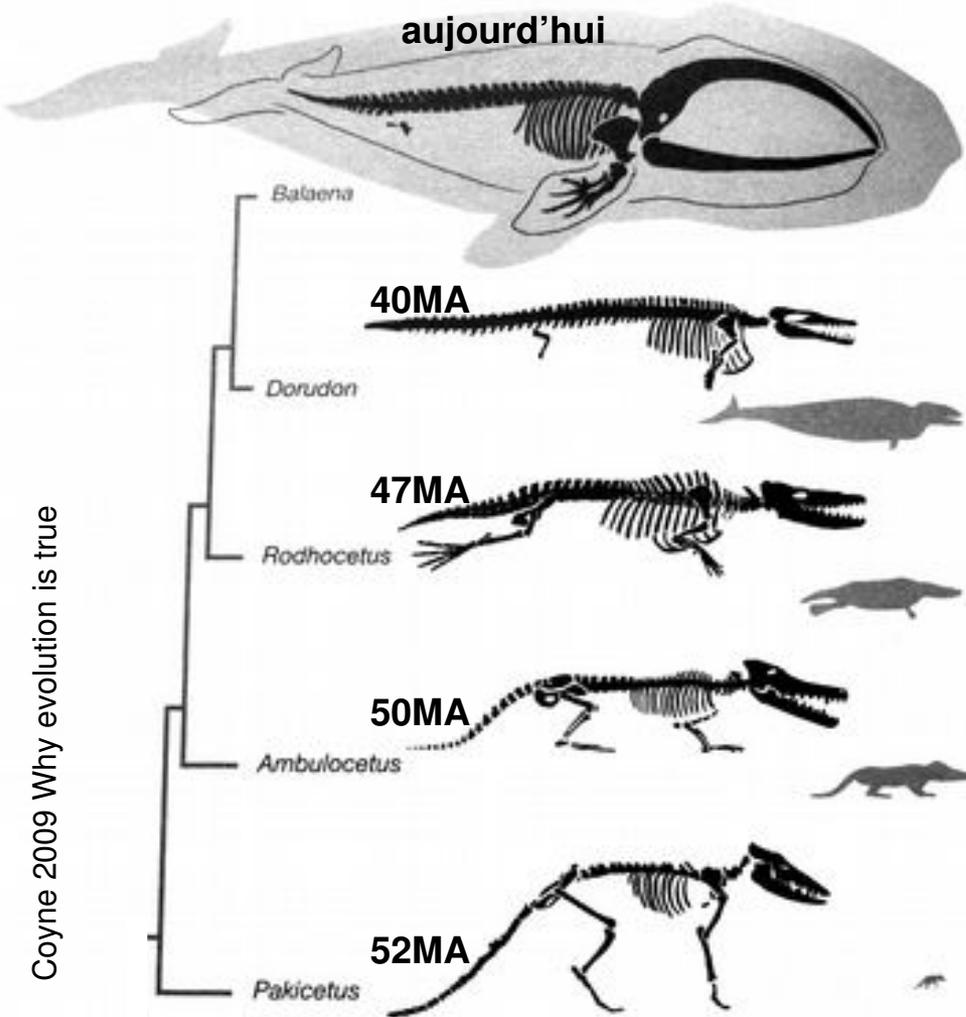
Virginie Orgogozo  
CNRS, Institut Jacques Monod, Paris

# Évolution = modification des êtres vivants au cours du temps



Coyne 2009 Why evolution is true

# Évolution = modification des êtres vivants au cours du temps



*Existe-t-il des lois générales ?*

*Peut-on faire des prédictions sur notre évolution passée ? sur notre évolution future ?*

# Les plus vieilles roches affleurant à la surface



**3,80 MMA**



**4,03 MMA**



**3,60 MMA**



4,5

milliards d'années

formation  
de la terre



# Les plus vieilles traces de vie

**3,48MMA: Biofilm**



(Noffke et al. 2013)

**3,7MMA: Graphite biogénique**



(Ohtomo et al. 2013)

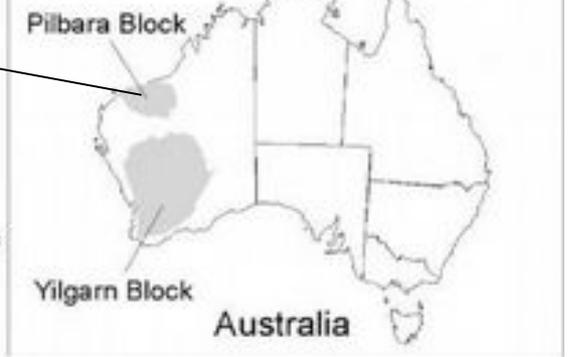
**3,80 MMA**



**4,03 MMA**



**3,48 MMA**

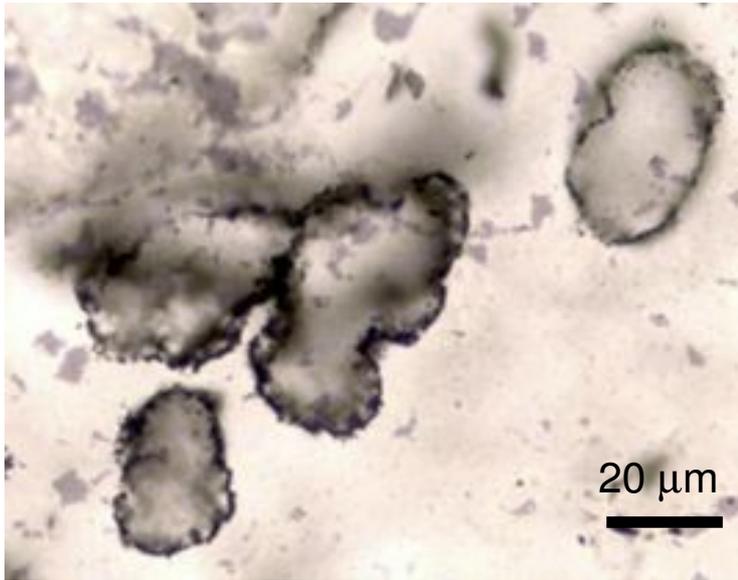


4,5  
3,7  
milliards d'années

1ères traces (graphite)



# Premières cellules fossilisées : 3,4 MMA



(Wacey et al. 2011)

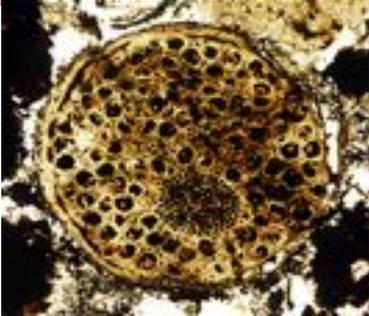


Strelley Pool Formation, Australie



1ères traces (graphite)  
1ères cellules fossiles

# Fossiles d'Ediacara : 630-540MA



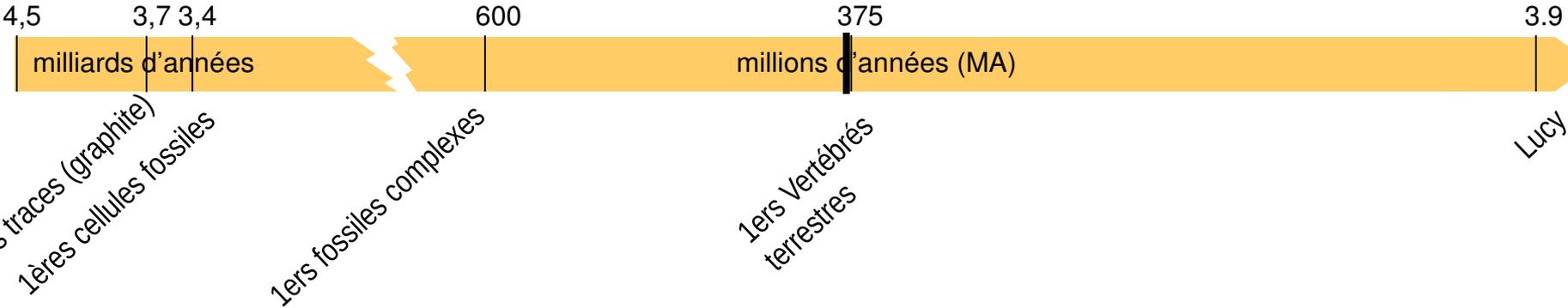
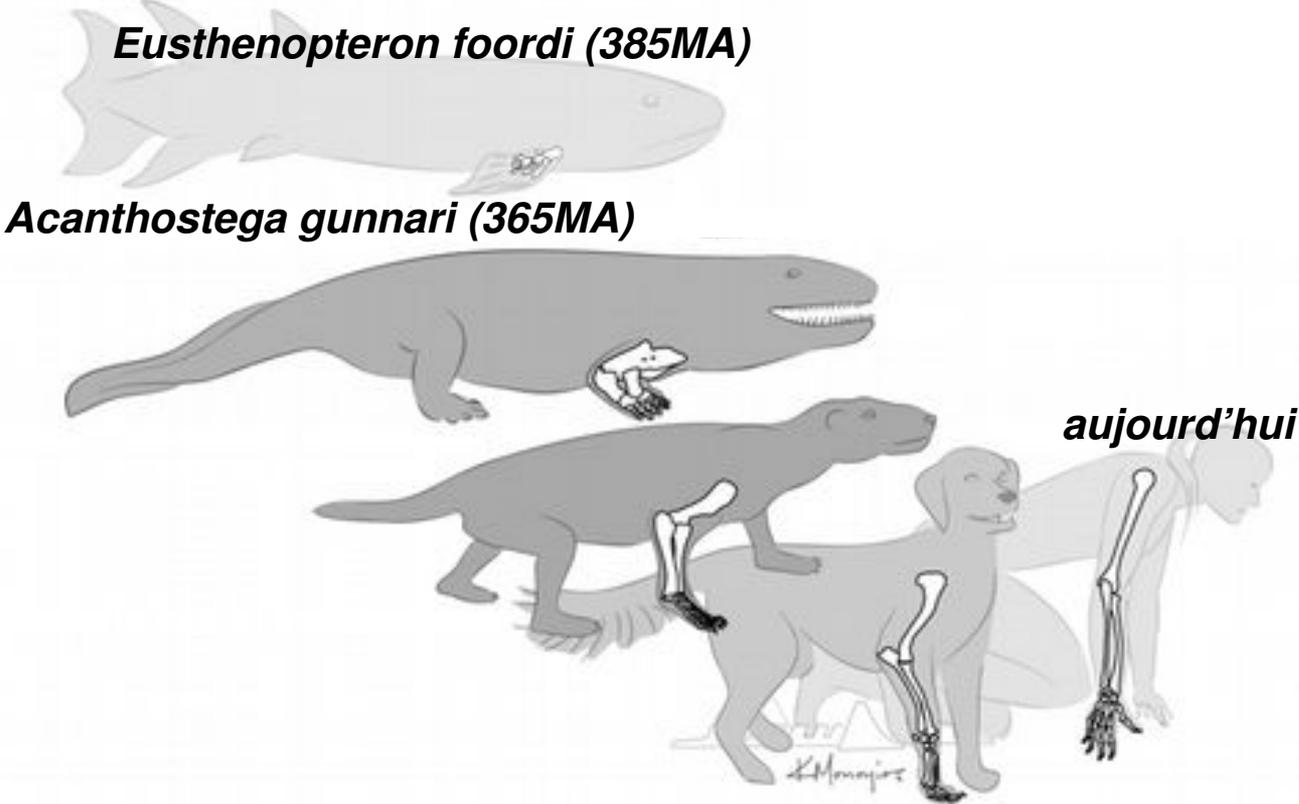
<http://commons.wikimedia.org/>



1ères traces (graphite)  
1ères cellules fossiles

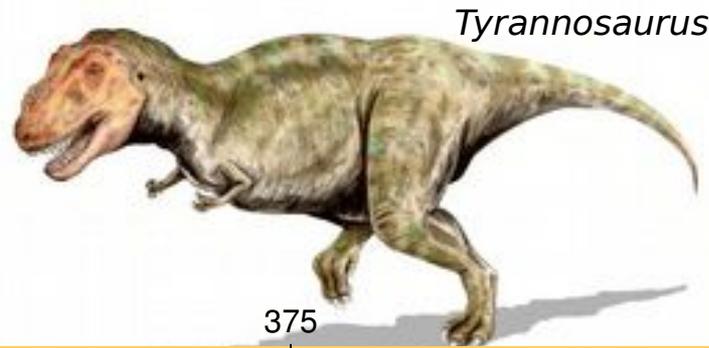
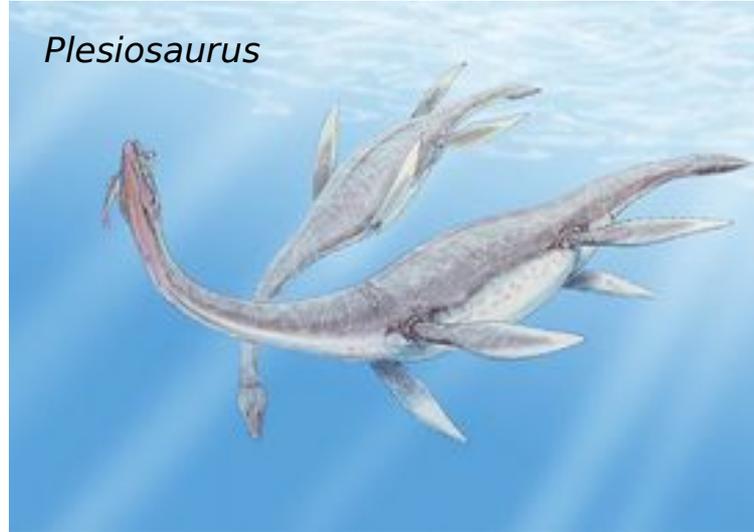
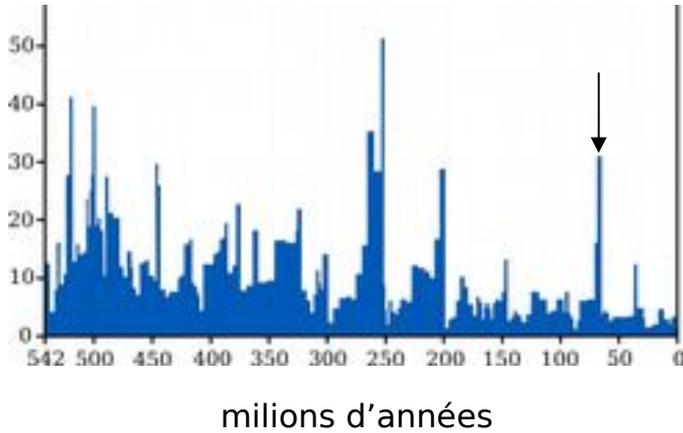
1ers fossiles complexes  
**faune d'Ediacara**

# Sortie de l'eau des Vertébrés



# Extinction de masse : 65MA

% de genres de fossiles animaux marins disparus



1ères traces (graphite)  
1ères cellules fossiles

1ers pluricellulaires fossiles

1ers Vertébrés terrestres

extinction des dinosaures

# Liée à d'importants changements de l'environnement

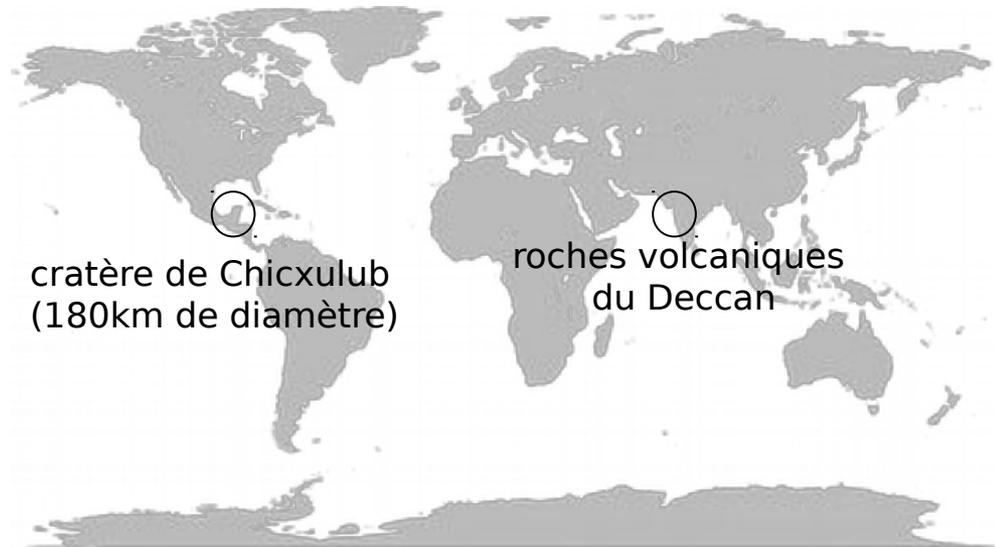


après 65MA

couche 65MA : 1000 fois plus d'iridium

avant 65MA

Roche du Wyoming (États-Unis)

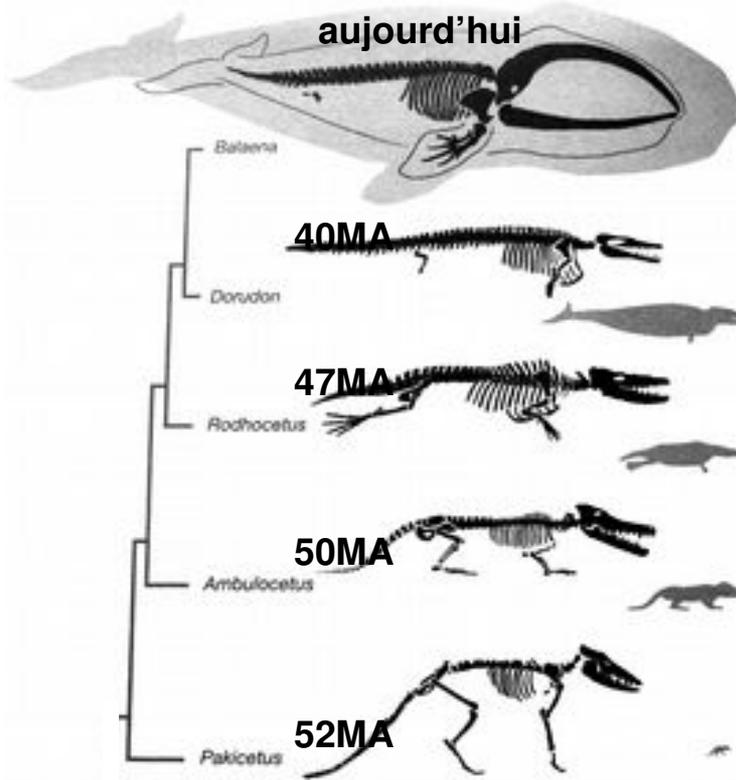


cratère de Chicxulub  
(180km de diamètre)

roches volcaniques  
du Deccan



# Retour dans l'eau de certains Mammifères



4,5  
milliards d'années

3,7 3,4

1ères traces (graphite)  
1ères cellules fossiles

600

1ers fossiles complexes

375

millions d'années (MA)

1ers Vertébrés  
terrestres

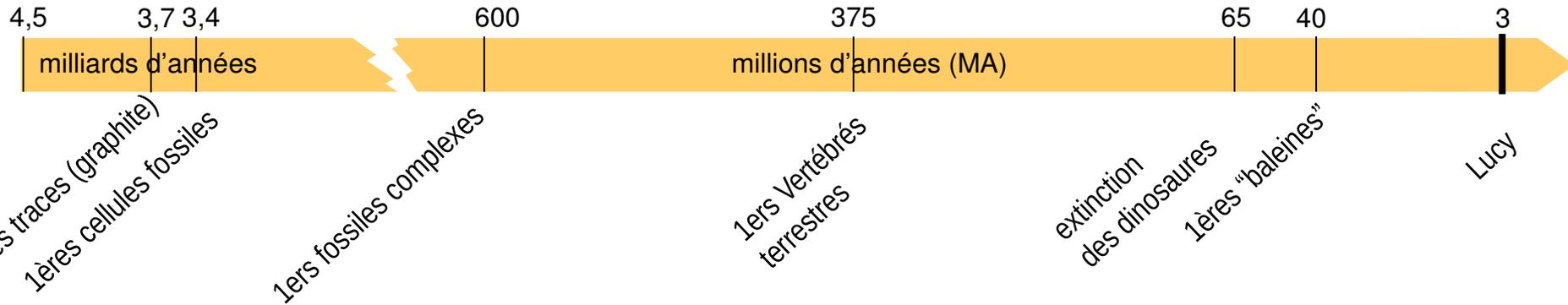
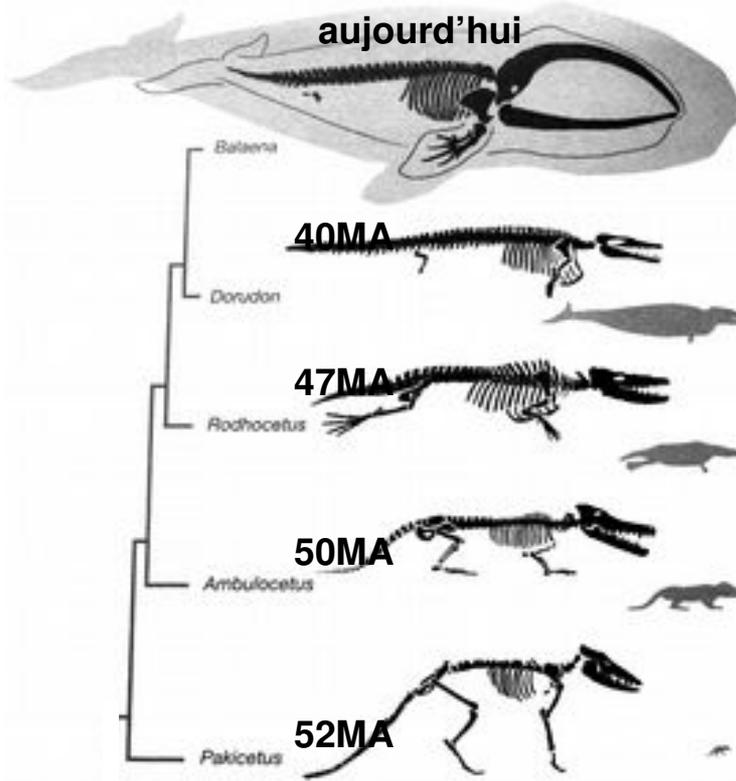
65

extinction  
des dinosaures

40

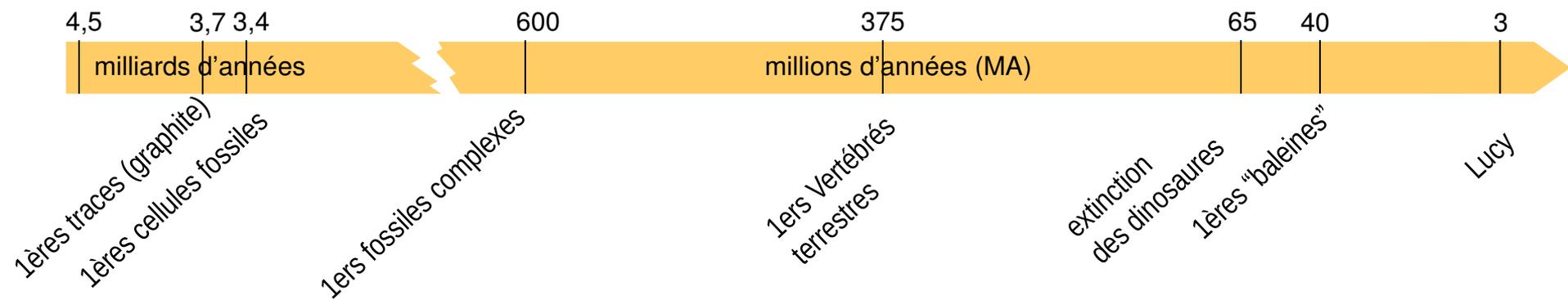
1ères "baleines"

# Retour dans l'eau de certains Mammifères



**IMPRÉVISIBLE ?**

*Des événements rares  
aux conséquences majeures*



IMPRÉVISIBLE ?

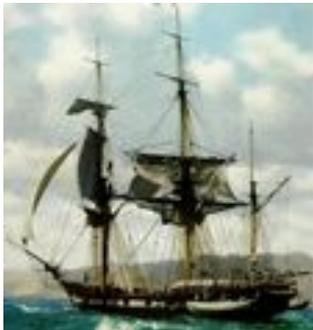
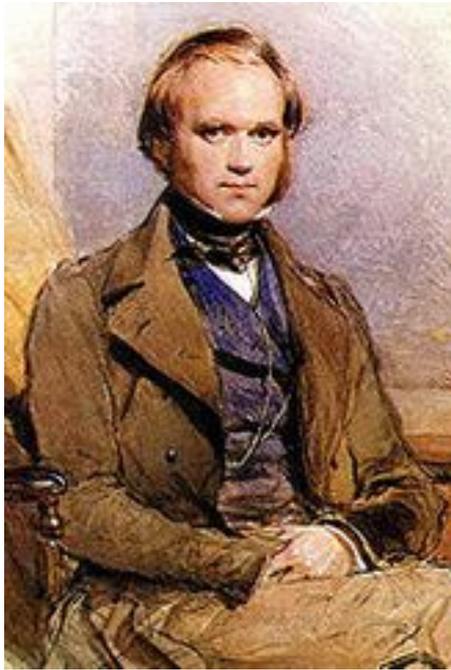
*De nombreuses possibilités non suivies*



Nausicaä de la vallée du vent - Miyazaki

# Charles Darwin énonce les mécanismes de base de l'évolution

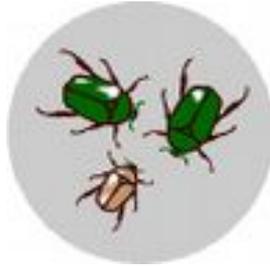
## L'origine des espèces (1859)



# Les mécanismes de base de l'évolution

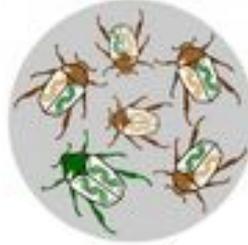
①

**Variation**



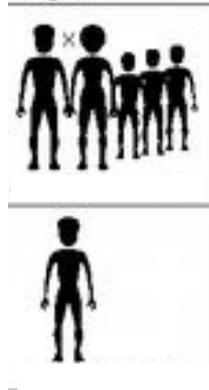
②

**Transmission  
à la génération  
suivante**



③

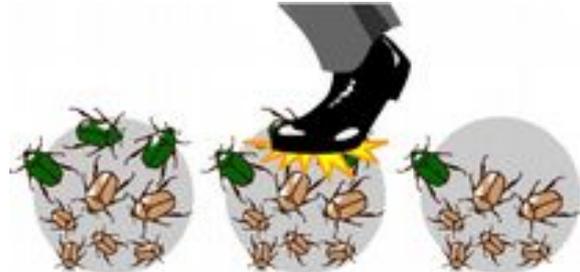
**Reproduction  
différente  
selon les individus**



**Sélection**



**Dérive génétique**



# Les mécanismes de base de l'évolution

①

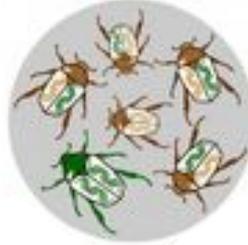
**Variation**



Mutations de l'ADN

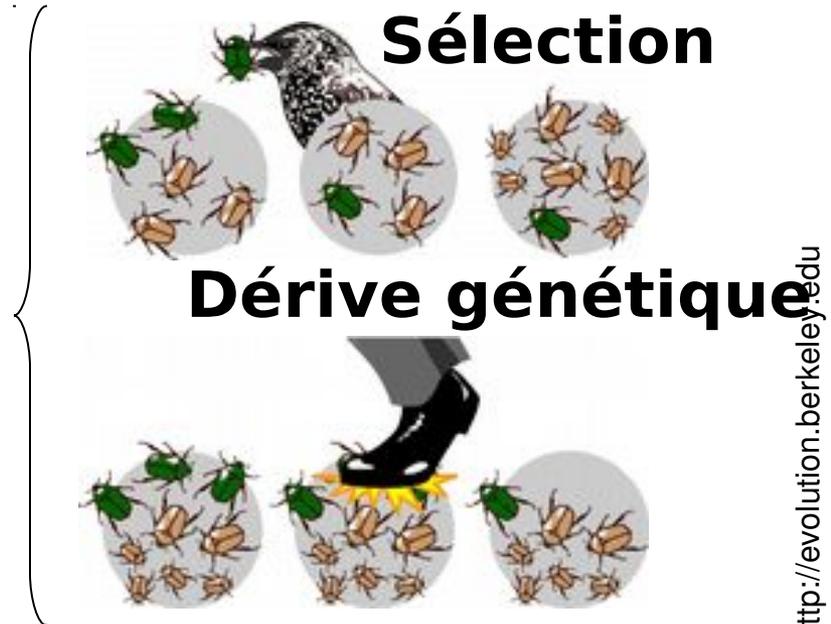
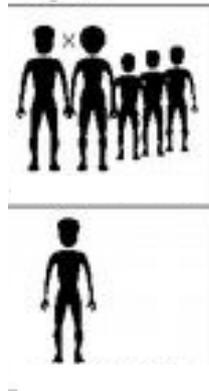
②

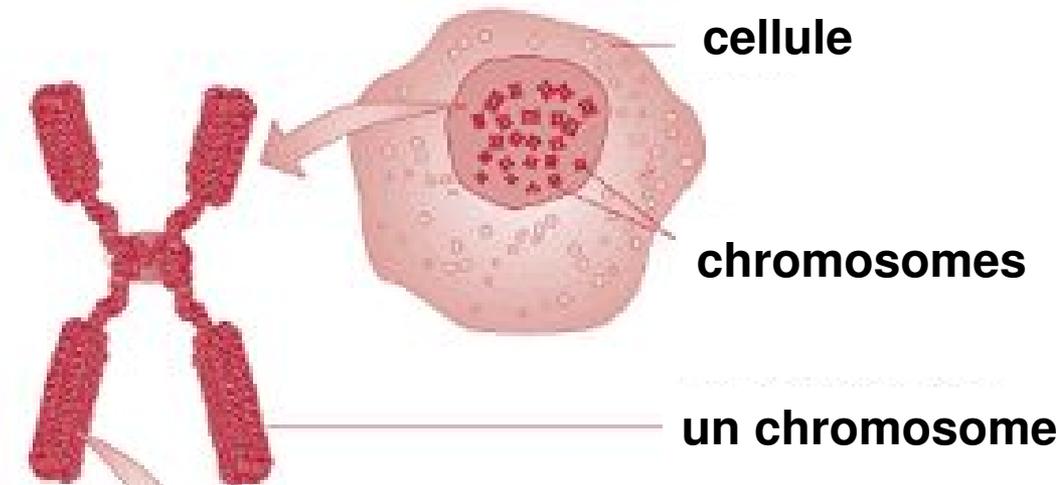
**Transmission  
à la génération  
suivante**



③

**Reproduction  
différente  
selon les individus**





ADN

ADN codant



protéines

un acide aminé

↑

3 lettres

ADN

ADN non codant

# Le code génétique

première lettre

deuxième lettre

	U	C	A	G	
U	UUU } Phe UUC } UUA } Leu UUG }	UCU } UCC } Ser UCA } UCG }	UAU } Tyr UAC } UAA Stop UAG Stop	UGU } Cys UGC } UGA Stop UGG Trp	U C A G
C	CUU } CUC } Leu CUA } CUG }	CCU } CCC } Pro CCA } CCG }	CAU } His CAC } CAA } Gln CAG }	CGU } CGC } Arg CGA } CGG }	U C A G
A	AUU } AUC } Ile AUA } AUG Met	ACU } ACC } Thr ACA } ACG }	AAU } Asn AAC } AAA } Lys AAG }	AGU } Ser AGC } AGA } Arg AGG }	U C A G
G	GUU } GUC } Val GUA } GUG }	GCU } GCC } Ala GCA } GCG }	GAU } Asp GAC } GAA } Glu GAG }	GGU } GGC } Gly GGA } GGG }	U C A G

troisième lettre

**ADN codant**



**protéines**

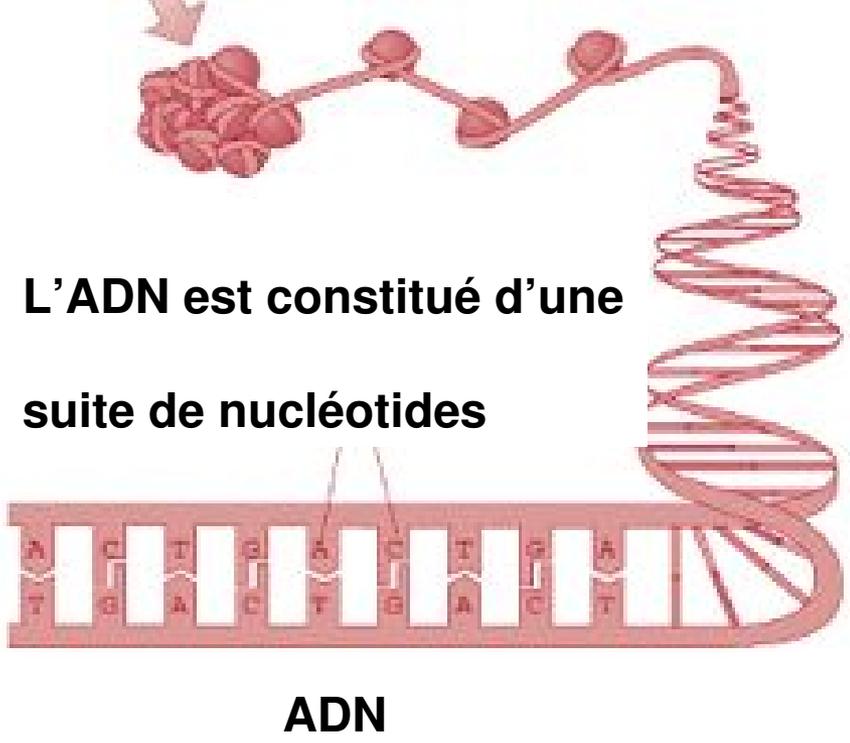
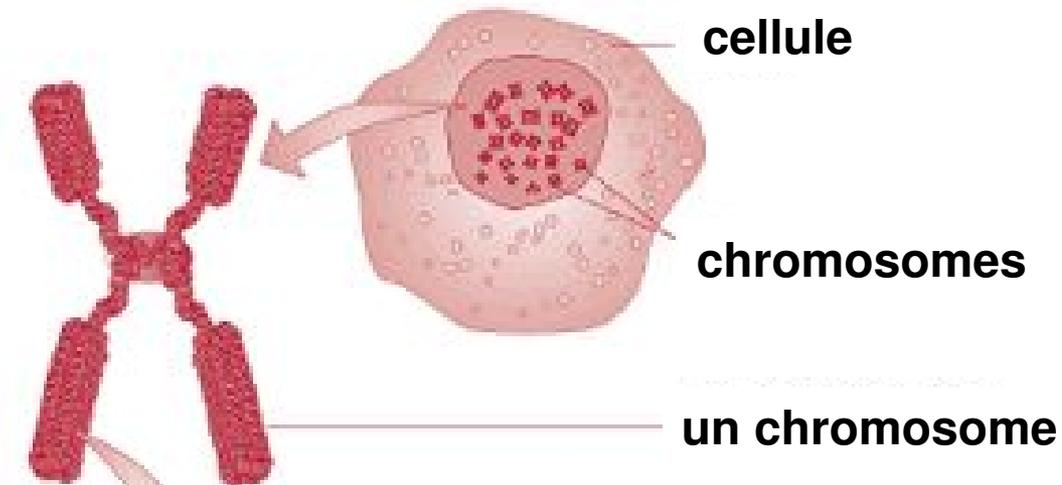
un acide aminé



3 lettres

**ADN**

**ADN non codant**



**ADN codant**



**protéines**

un acide aminé

↑

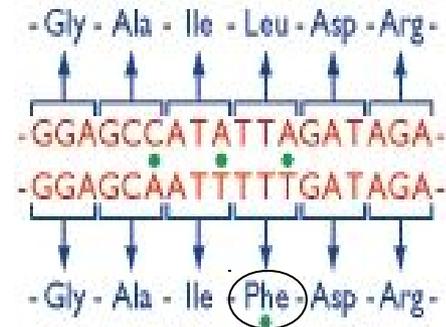
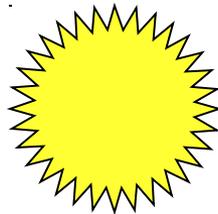
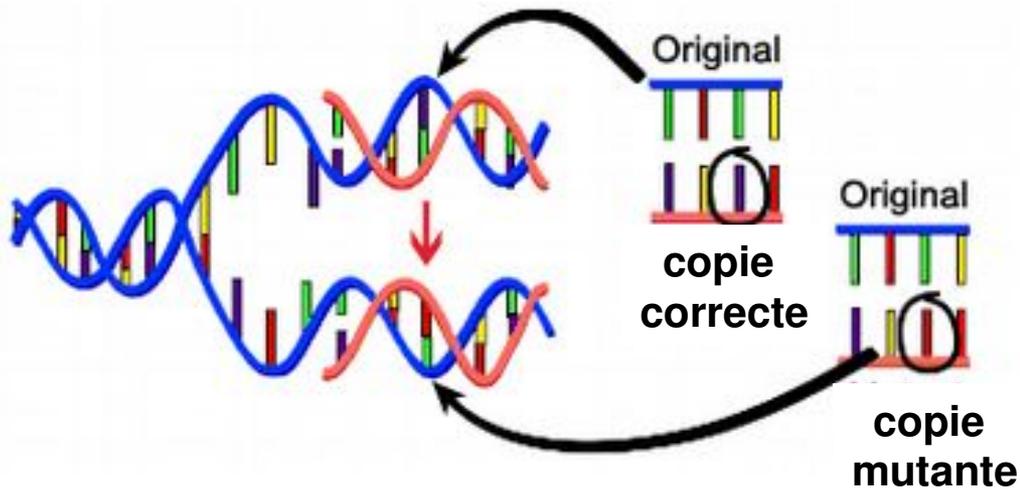
3 lettres

**ADN**

**ADN non codant**

contrôle de la formation des protéines  
 maintien de la structure de l'ADN  
 réplication de l'ADN

# Les mutations



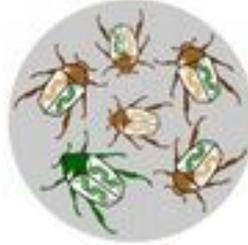
①  
**Variation**



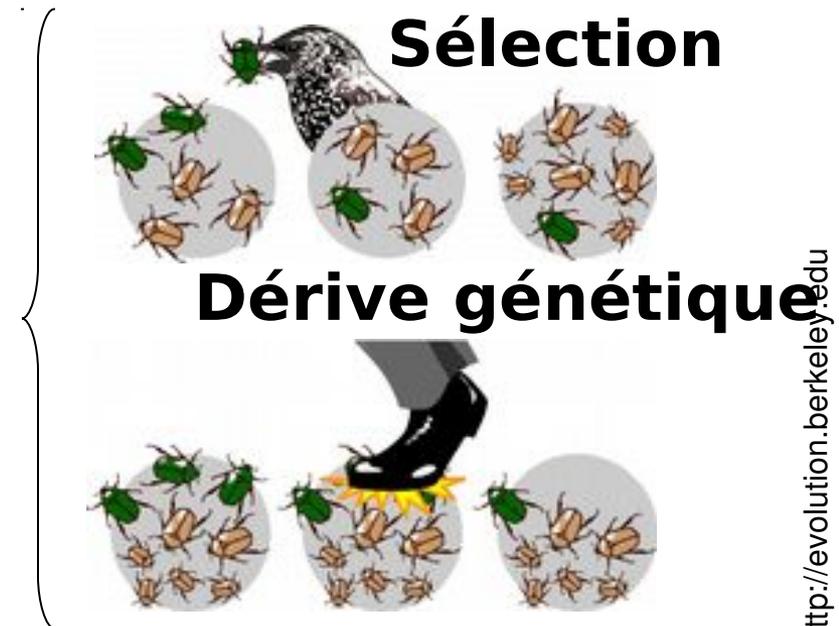
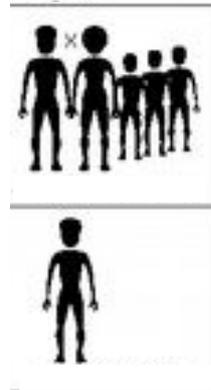
**IMPRÉVISIBLE**

Mutations de l'ADN

②  
**Transmission  
à la génération  
suivante**



③  
**Reproduction  
différente  
selon les individus**



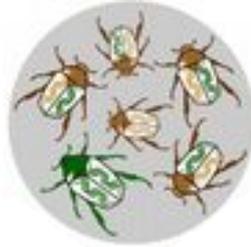
①  
**Variation**



**IMPRÉVISIBLE**

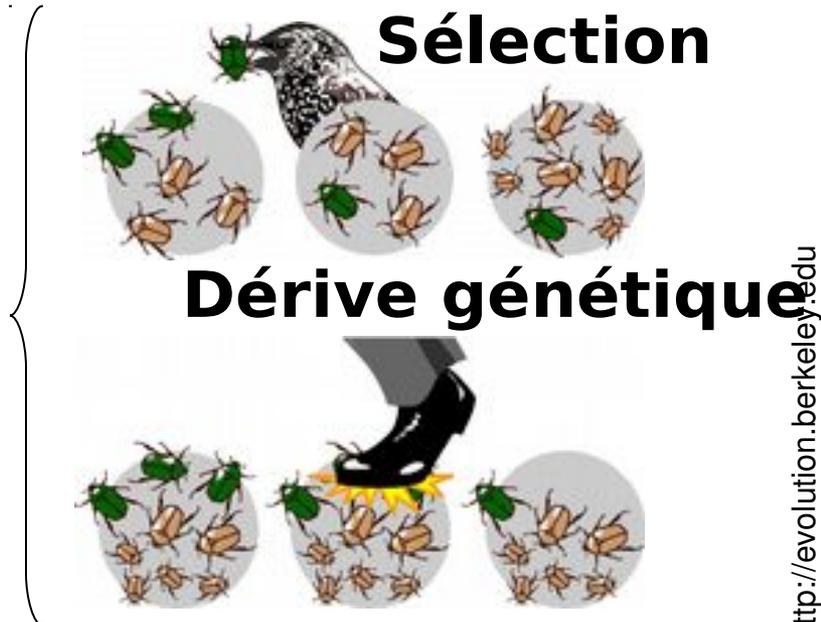
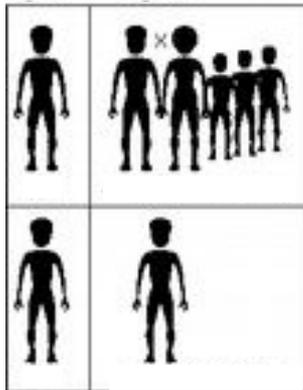
Mutations de l'ADN

②  
**Transmission  
à la génération  
suivante**

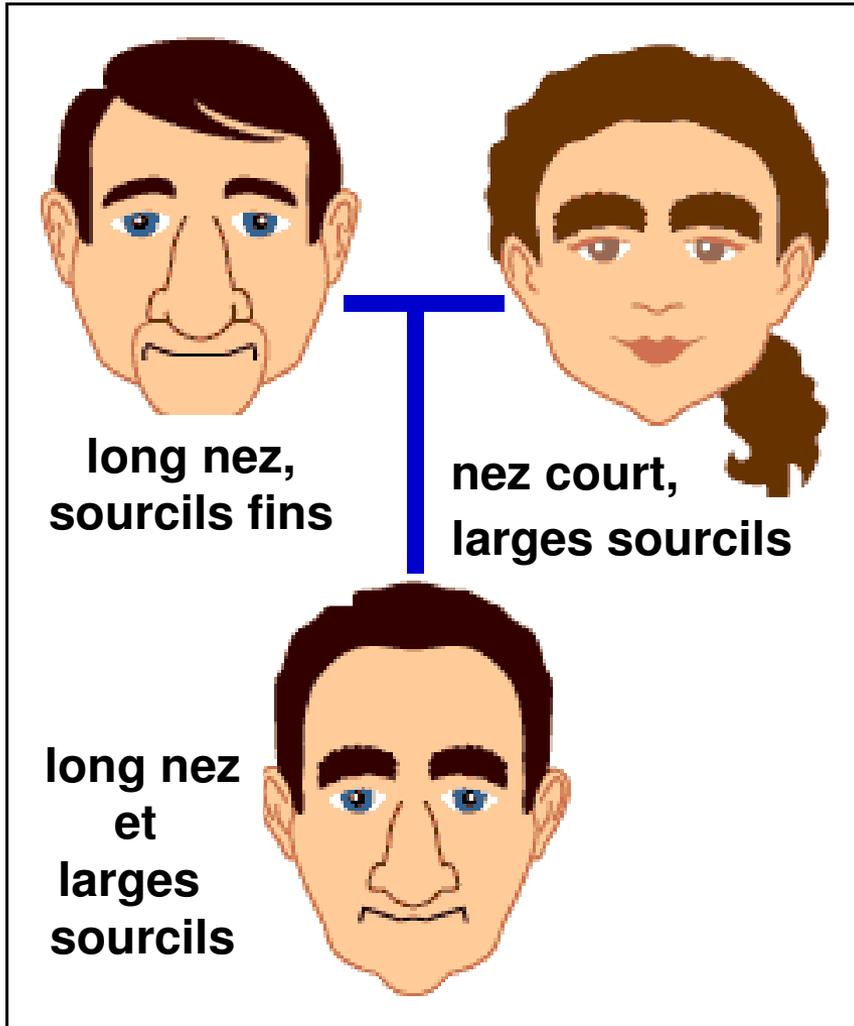


Hérédité

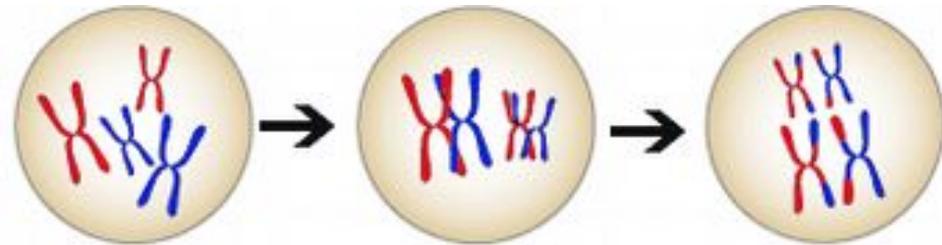
③  
**Reproduction  
différente  
selon les individus**



# Assortiment des chromosomes du père et de la mère



## Mélange des chromosomes



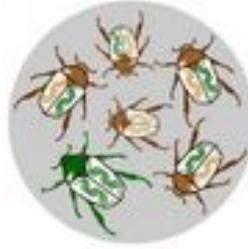
①

**Variation**



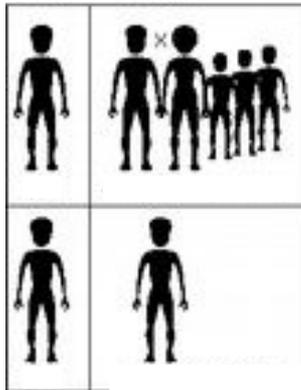
②

**Transmission  
à la génération  
suivante**



③

**Reproduction  
différente  
selon les individus**



**IMPRÉVISIBLE**

Mutations de l'ADN

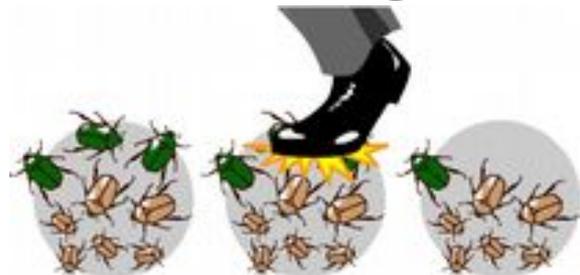
**IMPRÉVISIBLE**

Hérédité

**Sélection**



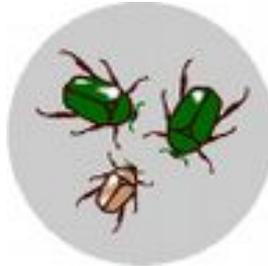
**Dérive génétique**



*La plupart des mécanismes de base de l'évolution sont aléatoires*

①

**Variation**

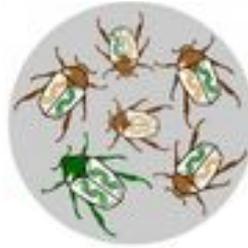


**IMPRÉVISIBLE**

Mutations de l'ADN

②

**Transmission à la génération suivante**

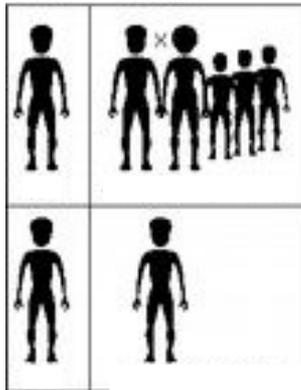


**IMPRÉVISIBLE**

Hérédité

③

**Reproduction différente selon les individus**



**Sélection**



**IMPRÉVISIBLE**  
**Dérive génétique**



IMPRÉVISIBLE ?

## L'évolution

PRÉVISIBLE ?

*Des événements rares  
aux conséquences majeures*

*La plupart des mécanismes  
de base de l'évolution  
sont aléatoires*

*De nombreuses possibilités  
non explorées*

Et pourtant...

Il semble exister des tendances évolutives

PRÉVISIBLE ?

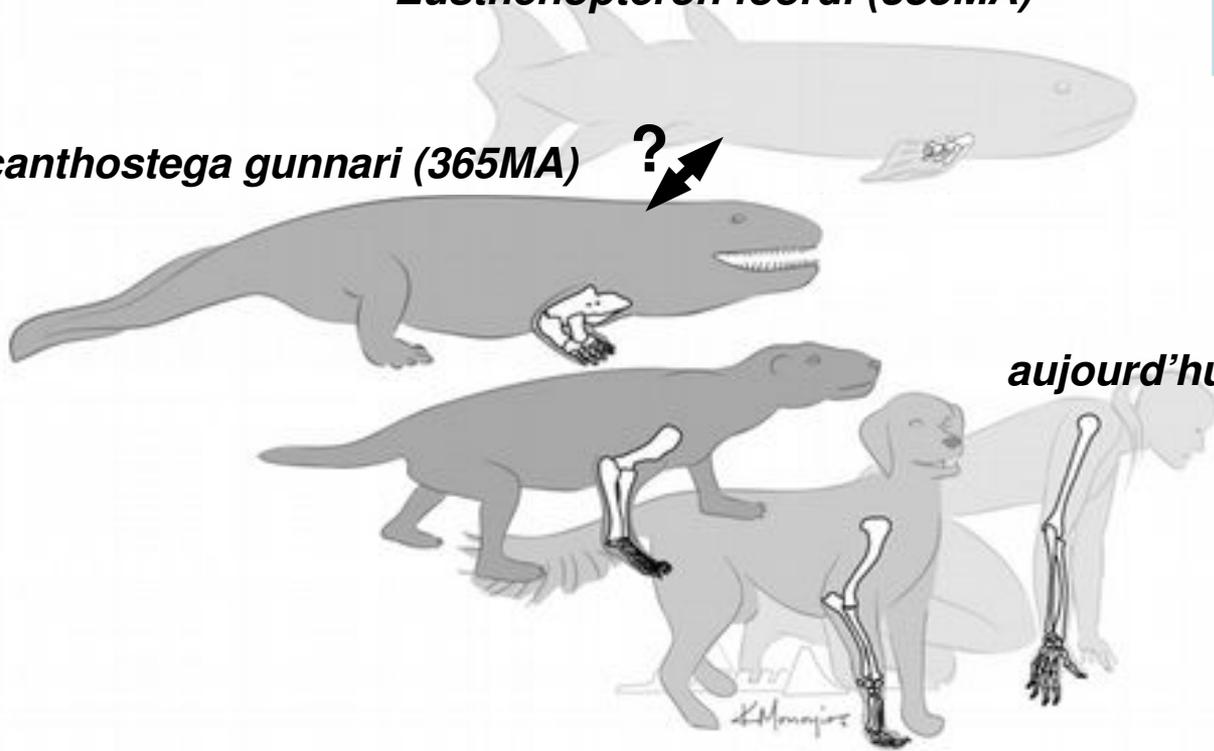
Changement  
progressif

*Eusthenopteron foordi* (385MA)

*Acanthostega gunnari* (365MA)



aujourd'hui





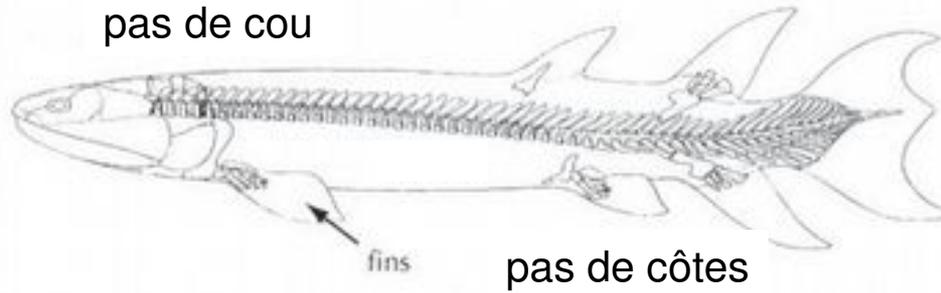
**375MA**





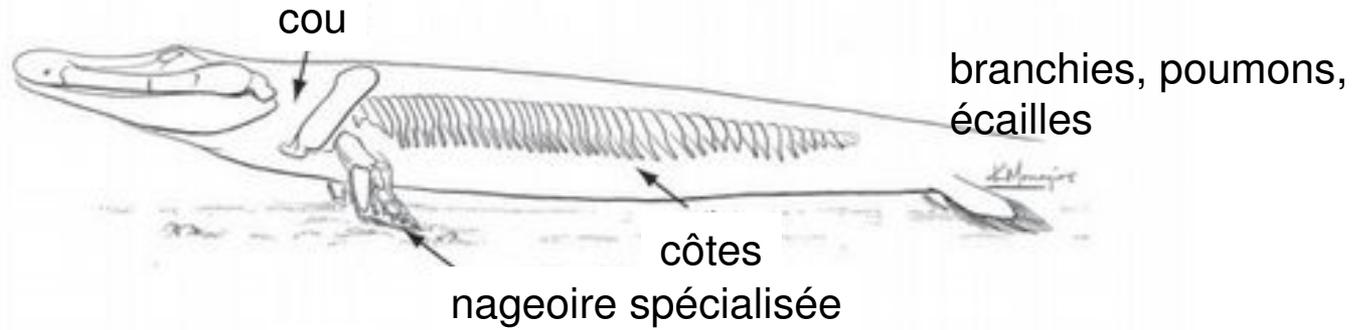
## POISSON

385MA



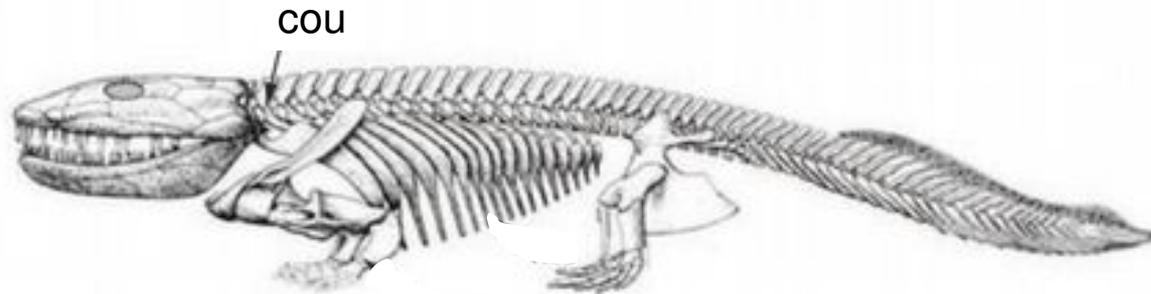
## TIKTAALIK

375MA

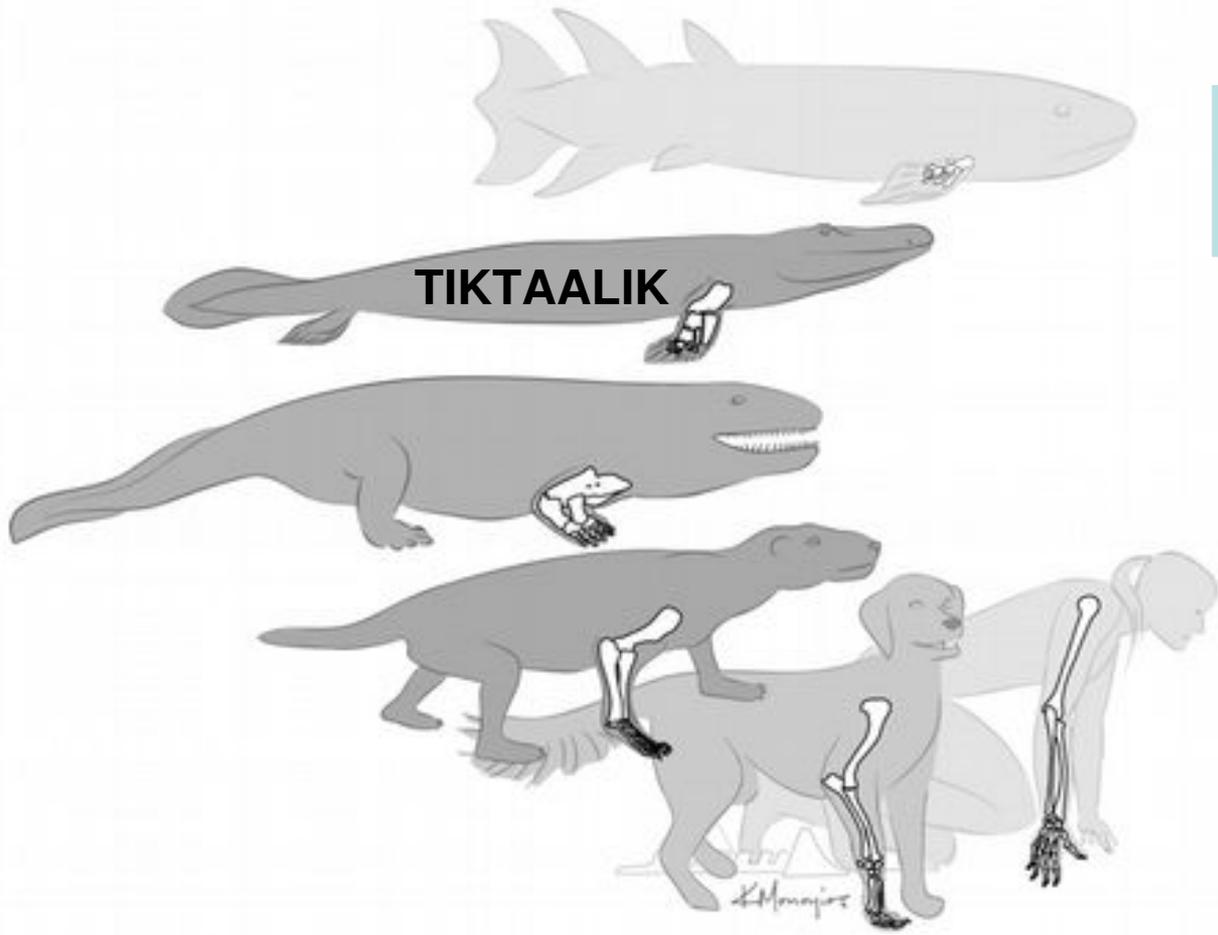


## TÉTRAPODE

365MA



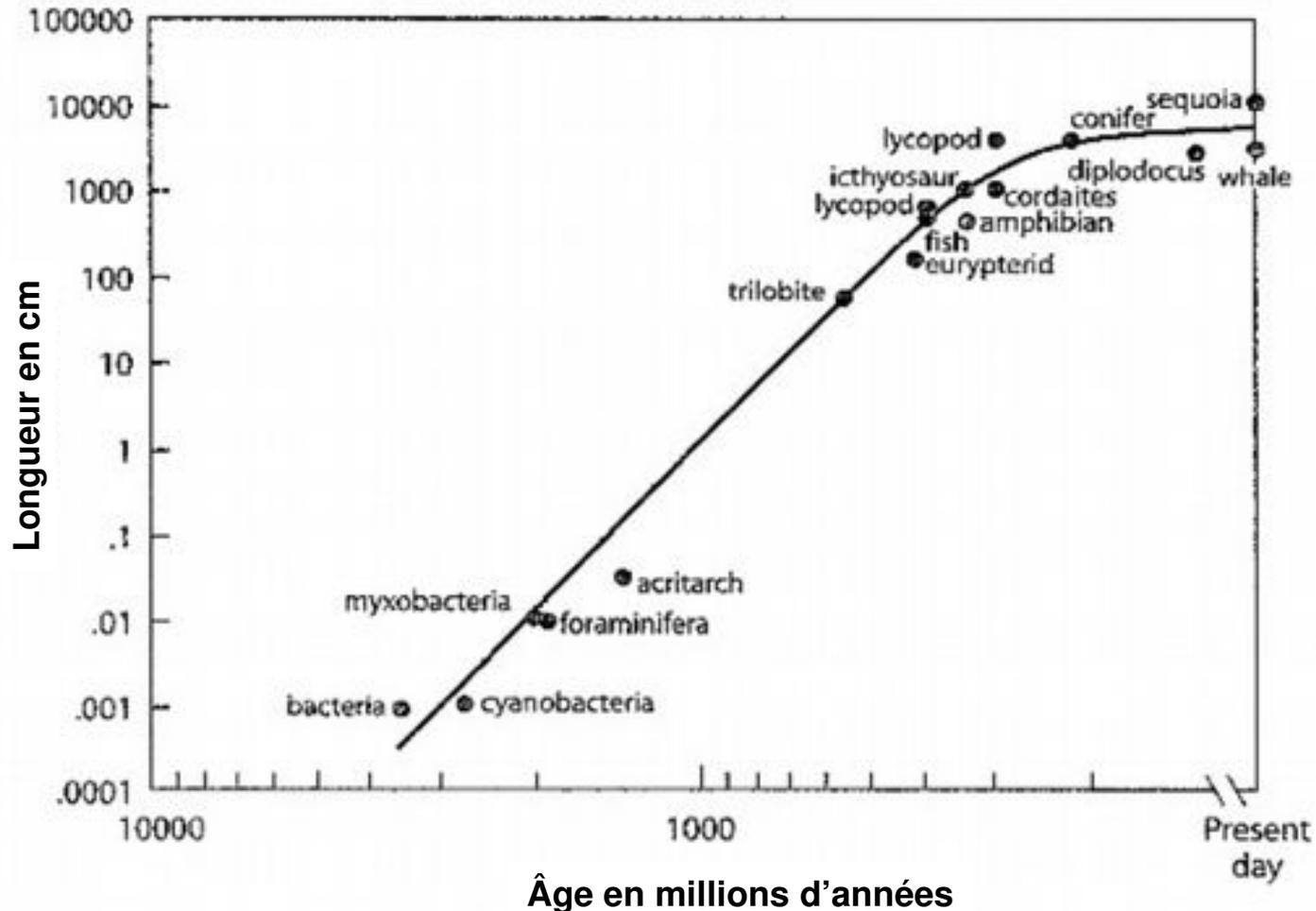
**Changement  
progressif**



# Il semble exister des tendances évolutives

PRÉVISIBLE ?

## Augmentation générale de la taille des espèces



# Même évolution dans les mêmes conditions

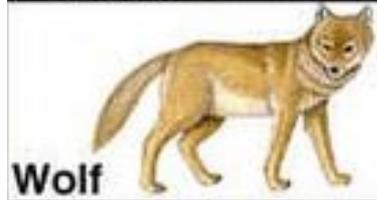
PRÉVISIBLE ?

## Placentaires

Amérique du Nord et du Sud

## Marsupiaux

Australie



## Euphorbes

Asie, Australie, Afrique



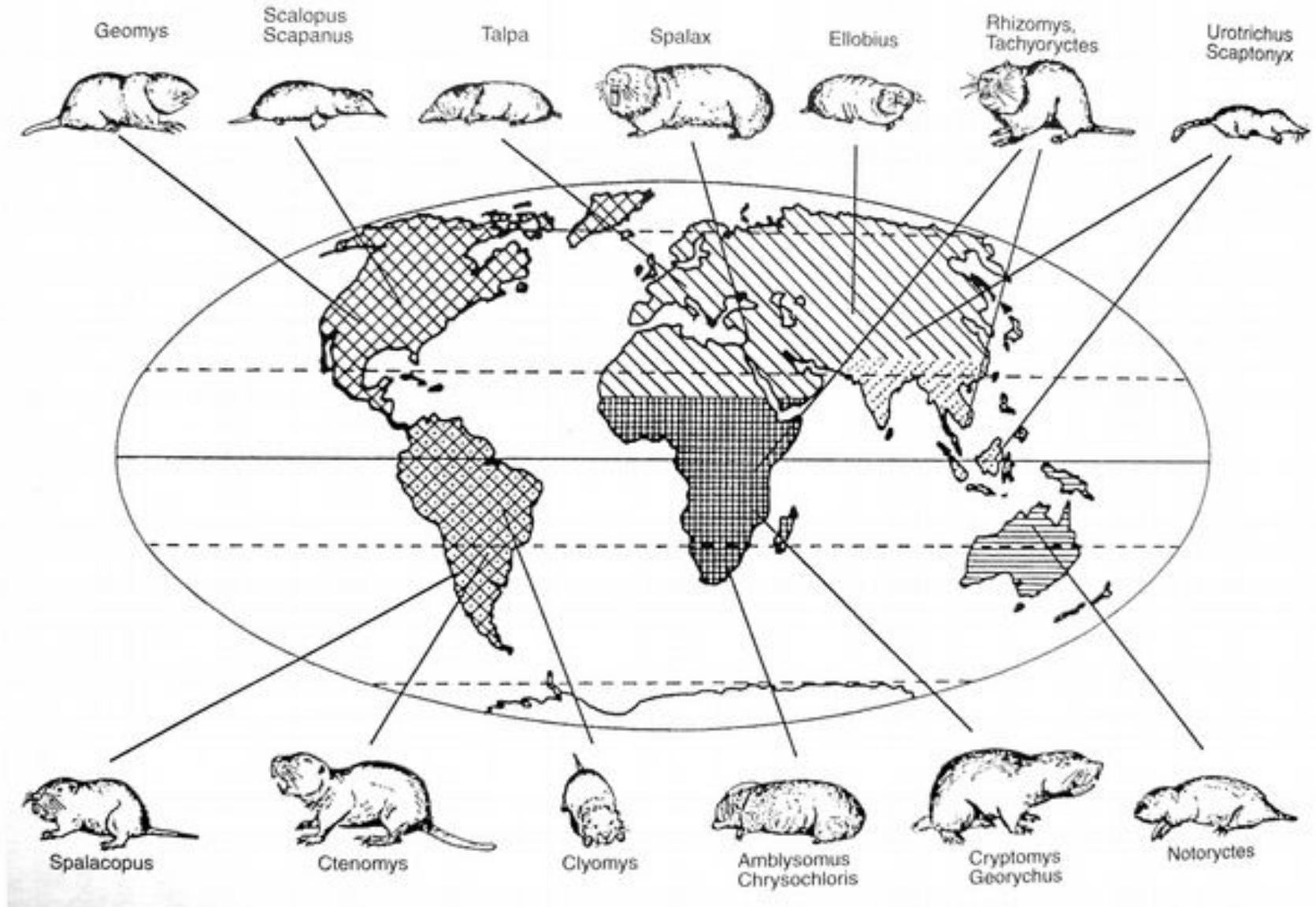
## Cactées

Amérique du Nord et du Sud



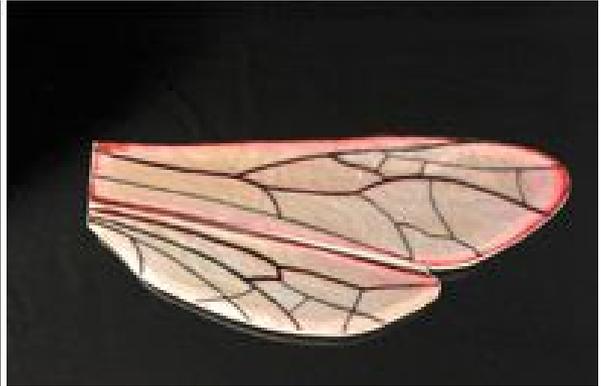
# Même évolution dans les mêmes conditions

PRÉVISIBLE ?



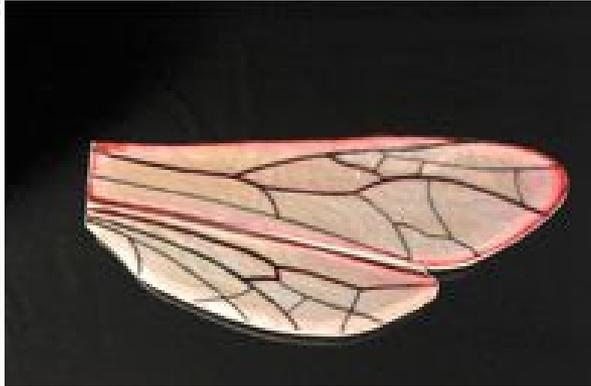
# Convergence d'organes complexes

PRÉVISIBLE ?



# Convergence d'organes complexes

PRÉVISIBLE ?



**IMPRÉVISIBLE ?**

# L'évolution

**PRÉVISIBLE ?**

*Des événements rares  
aux conséquences majeures*

*La plupart des mécanismes  
de base de l'évolution  
sont aléatoires*

*De nombreuses possibilités  
non explorées*

*Il semble exister  
des tendances évolutives*

*Multiples convergences*

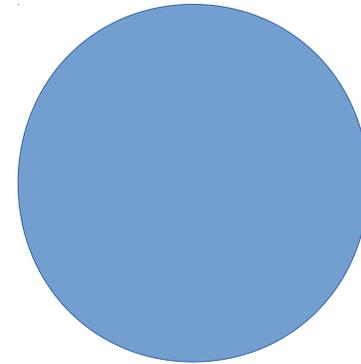
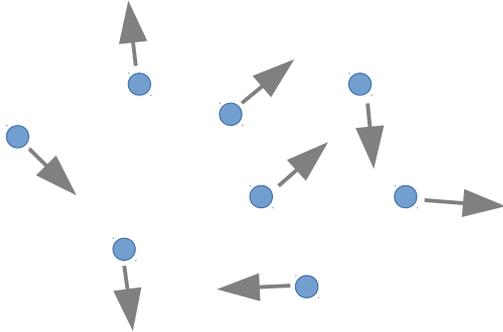


# Des phénomènes prévisibles peuvent émerger de mécanismes aléatoires

**Monde microscopique**

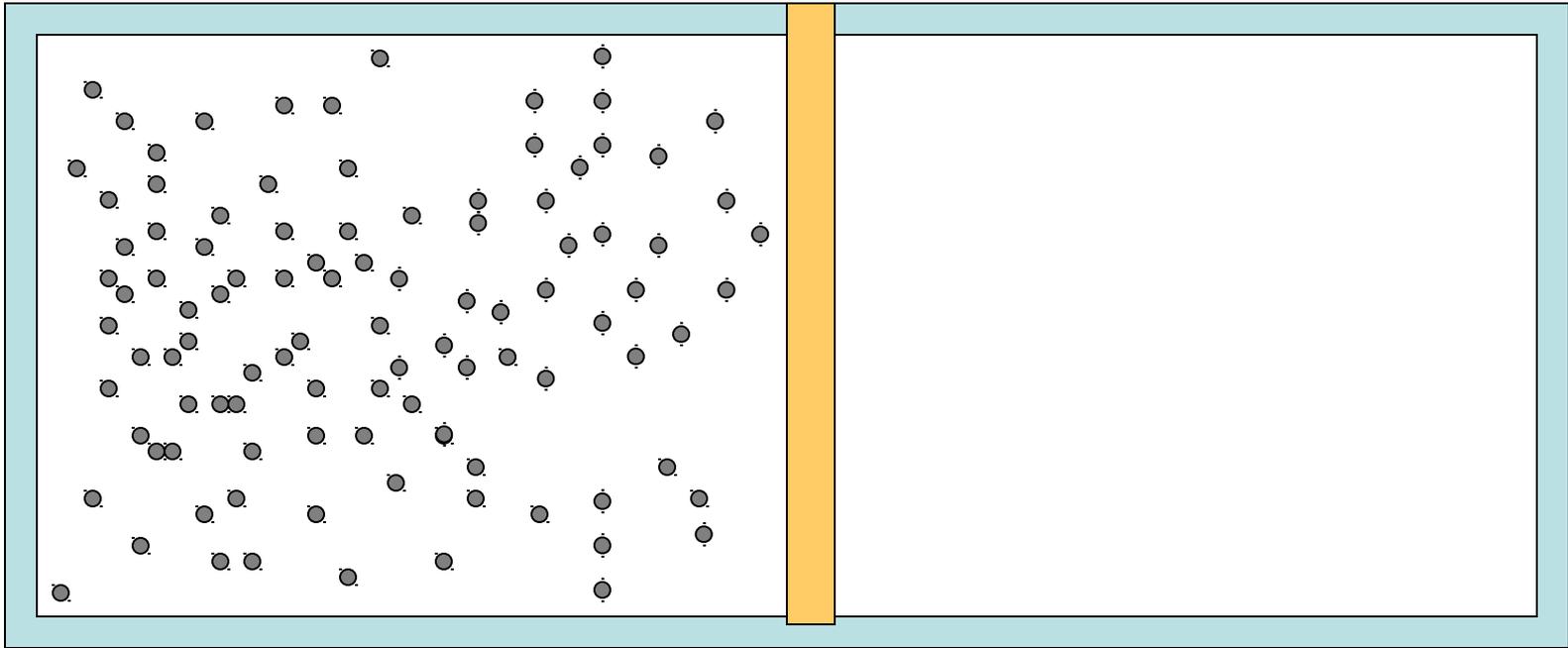


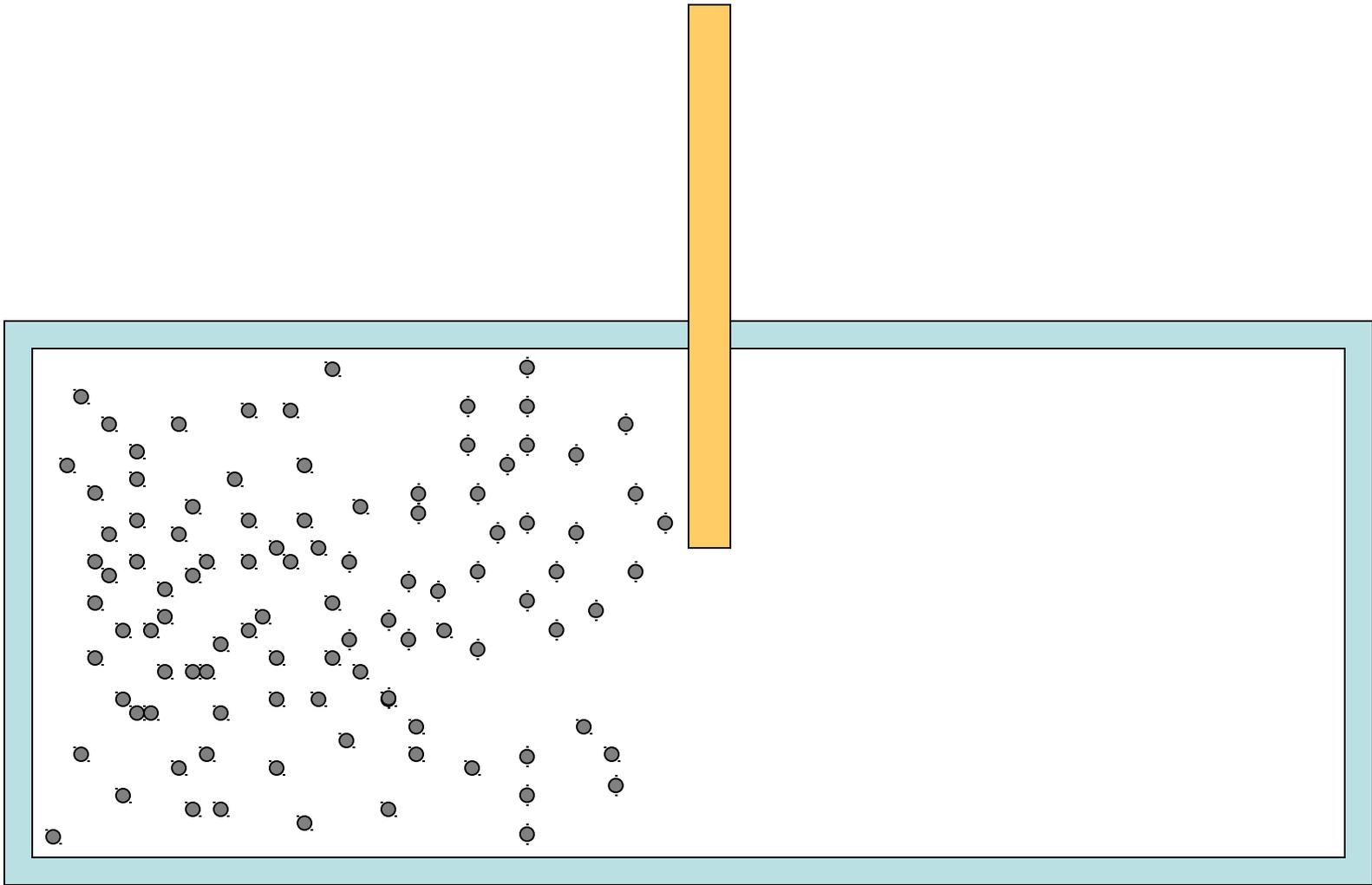
**Monde macroscopique**

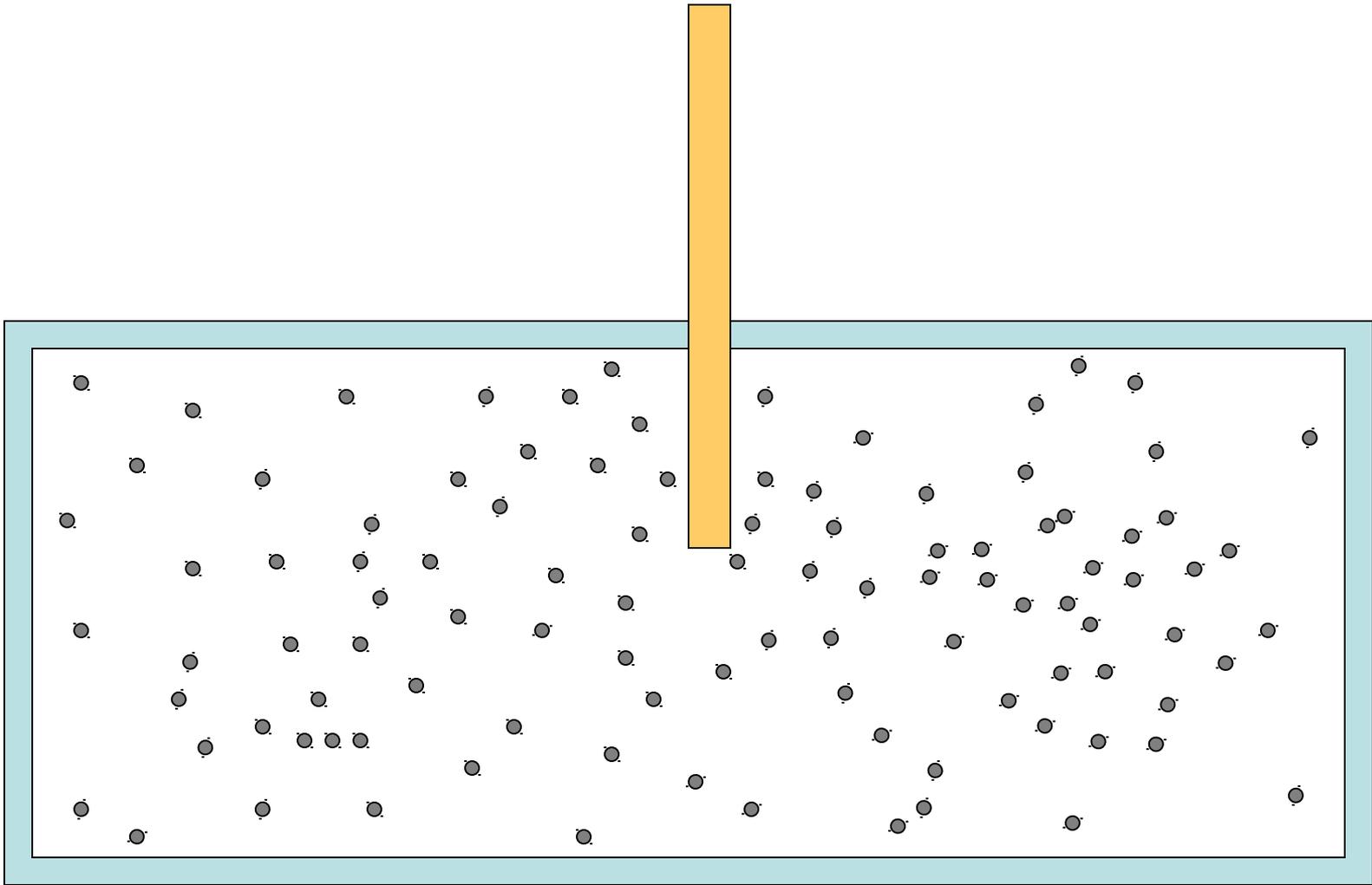


position, masse,  
vitesse de chaque particule

pression, volume, température,  
nombre de moles





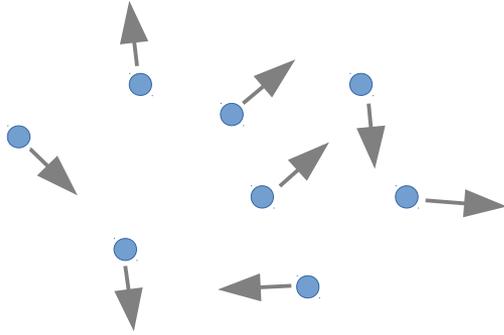


Après quelques secondes

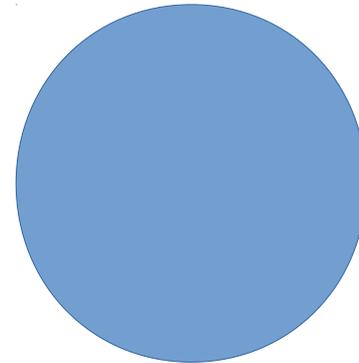
# Phénomènes aléatoires

# Phénomènes prévisibles

## Monde microscopique



## Monde macroscopique



position, masse,  
vitesse de chaque particule

pression, volume, température,  
nombre de moles

## Évolution à courte échelle

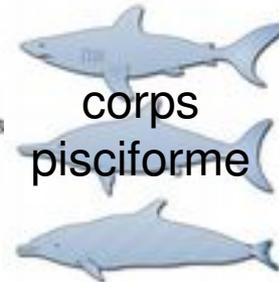
Mutations  
Hérédité  
Dérive génétique  
etc.



## Évolution à longue échelle



forme  
arbre



corps  
pisciforme



aile

**IMPRÉVISIBLE ?**

## L'évolution

**PRÉVISIBLE ?**

*Des événements rares  
aux conséquences majeures*

*La plupart des mécanismes  
de base de l'évolution  
sont aléatoires*

*De nombreuses possibilités  
non explorées*

*Il semble exister  
des tendances évolutives*

*Multiples convergences*

# Convergence moléculaire

PRÉVISIBLE ?

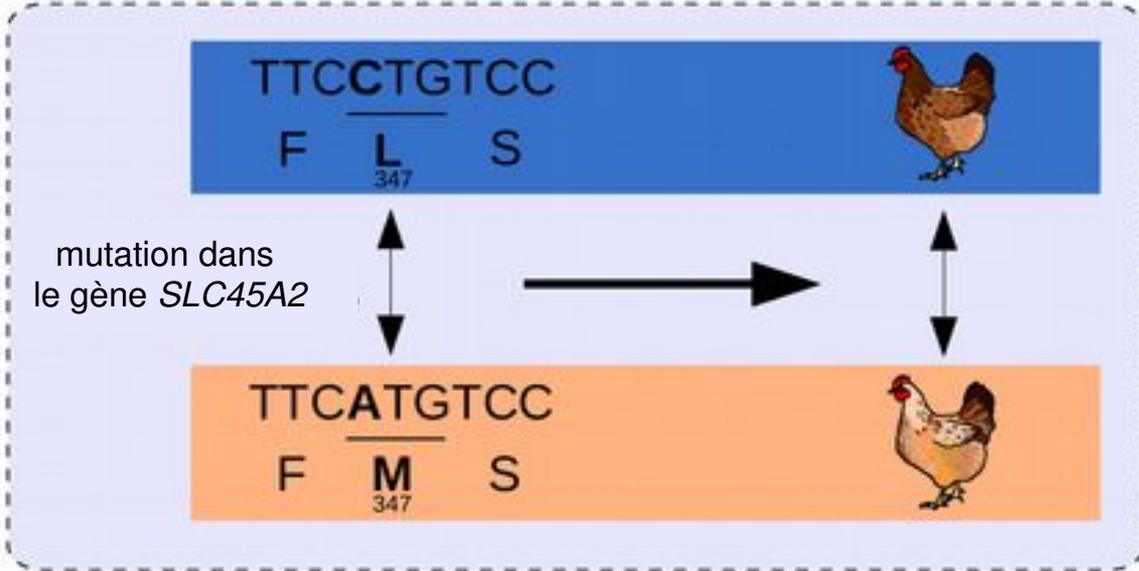
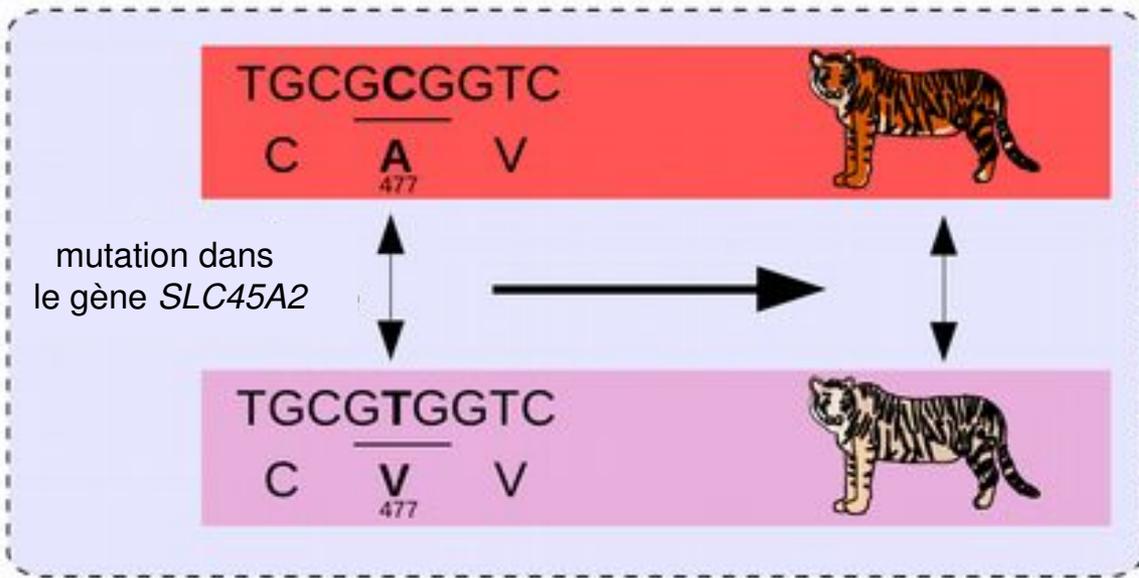


Mutation dans le gène *VKORC1*



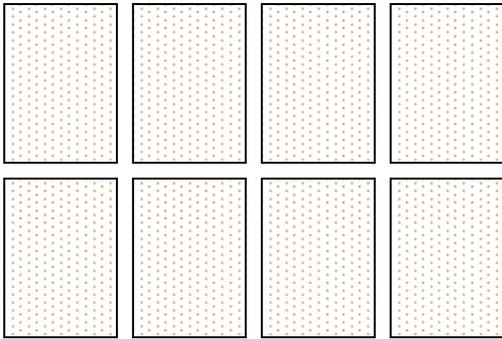
# Convergence moléculaire

PRÉVISIBLE ?

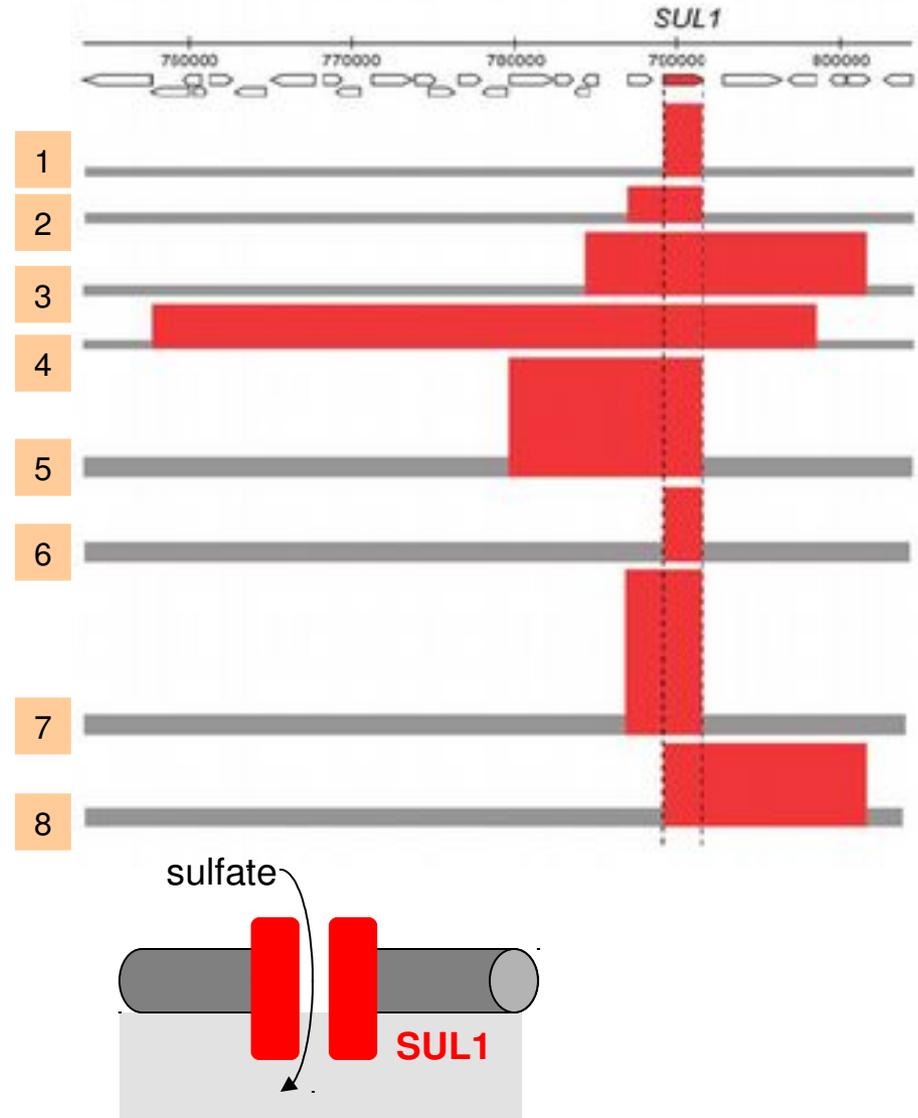
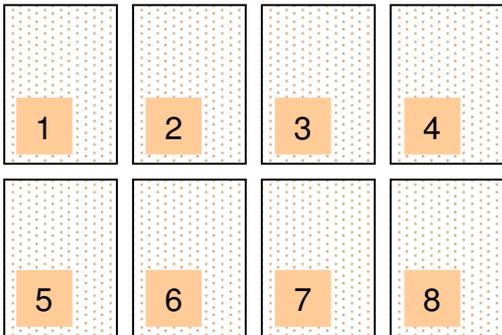


# Évolution artificielle répétée

8 récipients **indépendants**  
contenant 10 milliards de levures



évolution  
sur milieu pauvre en sulfates  
pendant 240 générations





IMPRÉVISIBLE ?

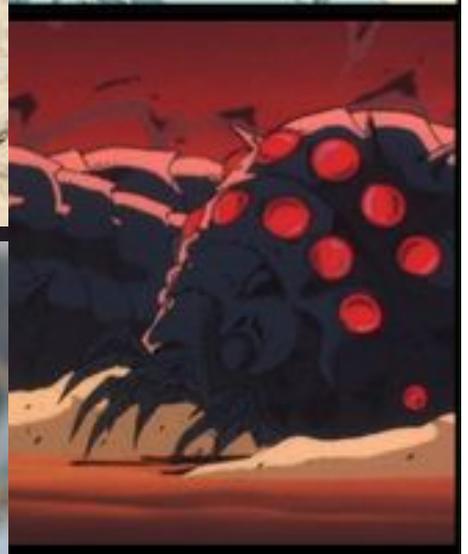
De nombreuses possibilités non **suivies**



[anceps.canalblog.com](http://anceps.canalblog.com)



[tegenarius.chez.com/saltiques.htm](http://tegenarius.chez.com/saltiques.htm)



Nausicaä de la vallée du vent - Miyazaki

# Exploration de toutes les possibilités

## Le code génétique...

		première lettre					
		U	C	A	G		
deuxième lettre	U	UUU } Phe UUC } UUA } Leu UUG }	UCU } UCC } Ser UCA } UCG }	UAU } Tyr UAC } UAA Stop UAG Stop	UGU } Cys UGC } UGA Stop UGG Trp	U C A G	
	C	CUU } CUC } Leu CUA } CUG }	CCU } CCC } Pro CCA } CCG }	CAU } His CAC } CAA } Gln CAG }	CGU } CGC } Arg CGA } CGG }	U C A G	
	A	AUU } AUC } Ile AUA } AUG Met	ACU } ACC } Thr ACA } ACG }	AAU } Asn AAC } AAA } Lys AAG }	AGU } Ser AGC } AGA } Arg AGG }	U C A G	
	G	GUU } GUC } Val GUA } GUG }	GCU } GCC } Ala GCA } GCG }	GAU } Asp GAC } GAA } Glu GAG }	GGU } GGC } Gly GGA } GGG }	U C A G	

troisième lettre

**... est le meilleur code  
qui minimise  
les effets des erreurs**

Freeland et al. 2000 MBE

# Comment imaginer d'autres possibilités?

1. combiner des caractères

2. faire varier un paramètre  
nombre d'yeux, gravité, etc.



3. analogie avec des objets non vivants



Takeshi Kitano

*Nous imaginons  
toujours à partir de ce  
que nous connaissons.*

**IMPRÉVISIBLE ?**

## L'évolution

**PRÉVISIBLE ?**

*Des événements rares  
aux conséquences majeures*

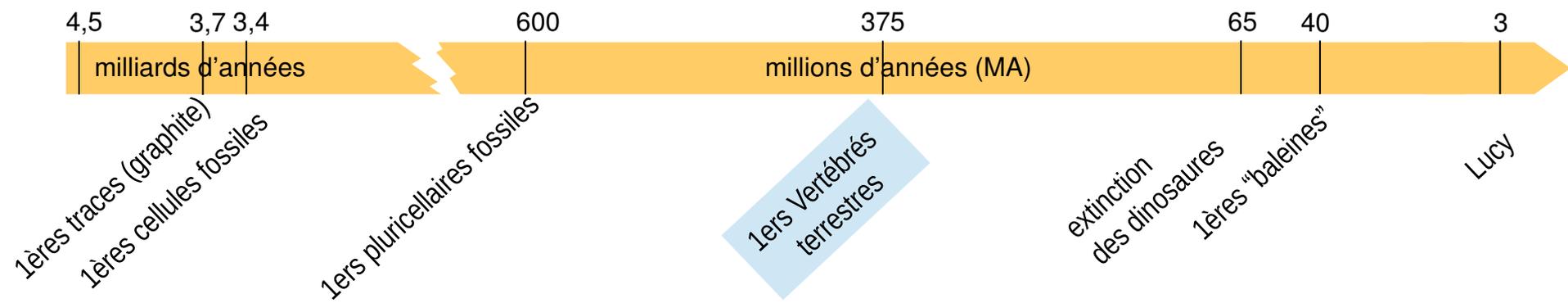
*La plupart des mécanismes  
de base de l'évolution  
sont aléatoires*

*De nombreuses possibilités  
non explorées*

*Multiplés convergences*

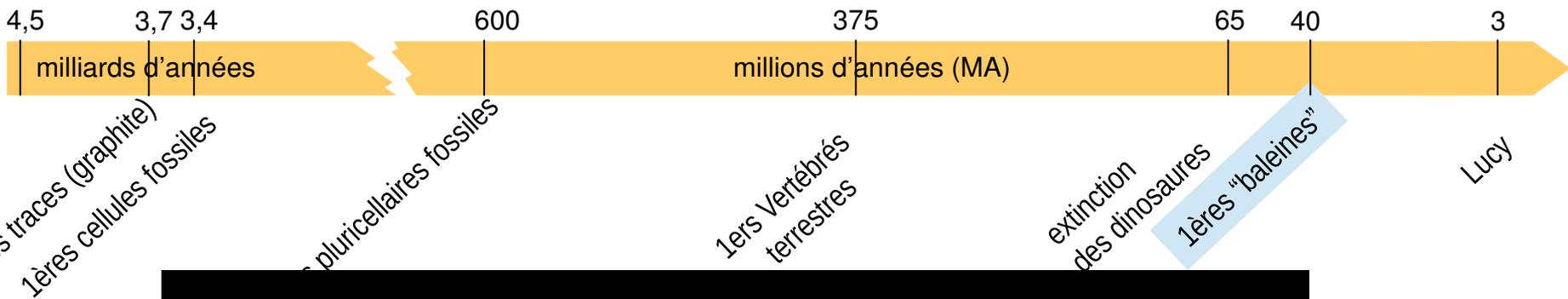
*Il semble exister  
des tendances évolutives*

*Exploration de la plupart  
des possibilités?*



## Des événements pas si rares ?





## Des événements pas si rares ?



IMPRÉVISIBLE ?

## L'évolution

PRÉVISIBLE ?

**Stephen Jay Gould**  
(1941-2002)



**Simon  
Conway Morris**

*Des événements rares  
aux conséquences majeures*

*La plupart des mécanismes  
de base de l'évolution  
sont aléatoires*

*De nombreuses possibilités  
non explorées*

*Des événements pas  
si rares*

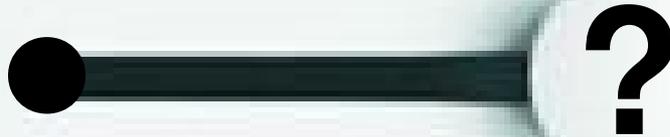
*Multiplés convergences*

*Il semble exister  
des tendances évolutives*

*Exploration de presque  
toutes les possibilités*

# Quels êtres vivants

..sur une autre planète ?  
..sur la terre si on recommençait à zéro?



Monde vivant  
très différent



Monde vivant  
très semblable

# Pour approfondir

Au commencement était le poisson (Neil Shubin)

Why evolution is true (Jerry Coyne)

Life's Solution: Inevitable Humans in a Lonely Universe  
(Simon Conway Morris)

La vie est belle : Les surprises de l'évolution  
(Stephen Jay Gould)

<http://www.mapoflife.org>

