

*« Rien n'a de sens en biologie  
en dehors de l'évolution »*

Theodosius Dobzhansky

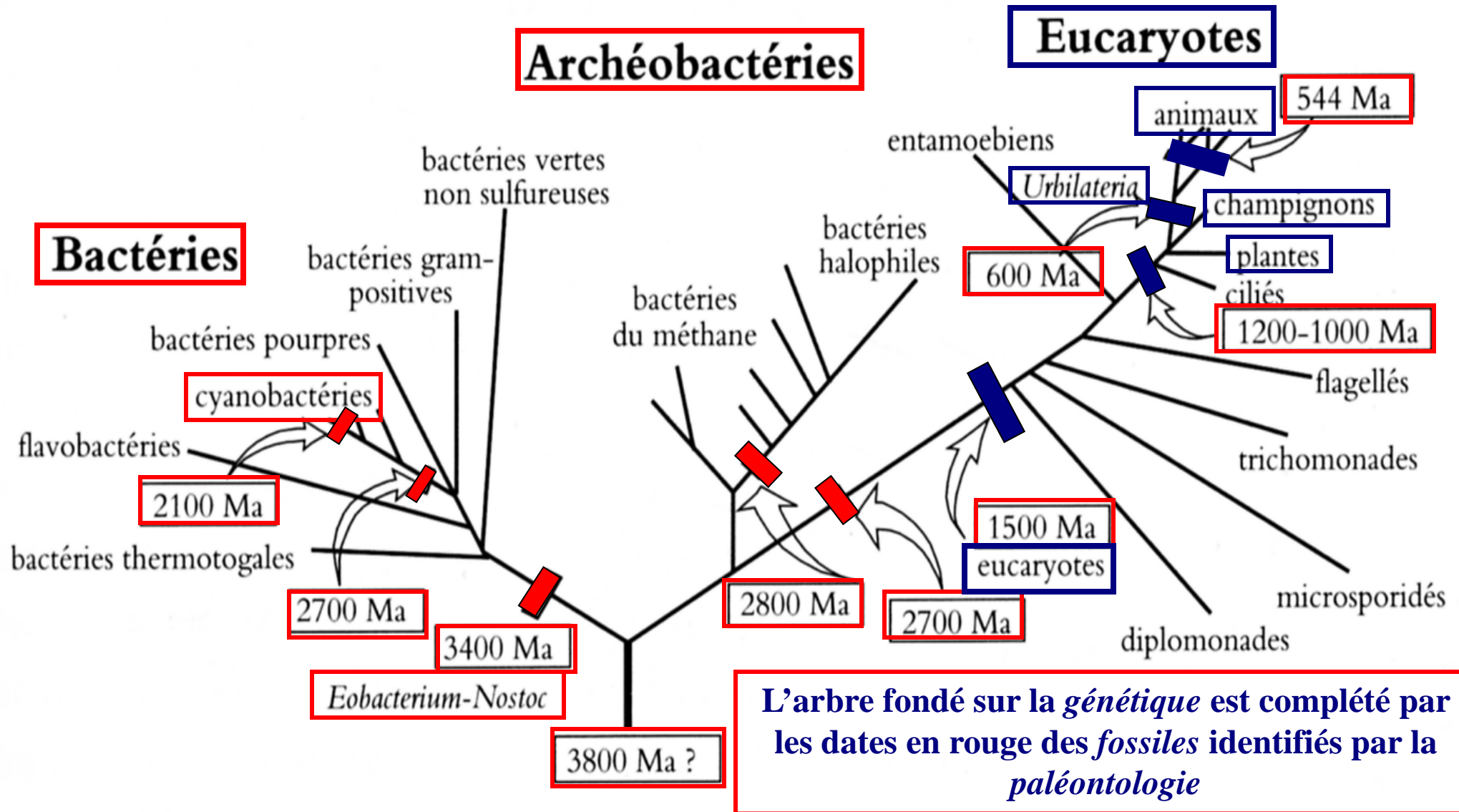
*L'histoire et l'évolution de la vie,  
le nouveau regard de la paléontologie  
de la biologie et de la physique*

Jean Chaline

1

**la paléontologie  
permet de reconstituer  
l'histoire de la vie  
et apporte les  
preuves de l'évolution**

# L'arbre du vivant à l'épreuve de la paléontologie



# Les plus anciens organismes ?

## Les *stromatolithes* de Warrawoona

Parmi les plus anciens organismes : les *Stromatolithes* ("tapis de pierre"), des structures formées de feuilles empilées constituées par les restes de cellules cylindriques arrangées en filaments à la manière des cyanobactéries actuelles (*Nostoc*).

**Âge: -3,5/-3,3 Ga.(milliards d'années), dans les couches de Warrawoona en Australie occidentale.**

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

# Nannofaune de Gunflint (Lac supérieur en Ontario, Canada): -2,1 Ga.

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (non compressé)  
sont requis pour visionner cette image.

*Eosphaera tyleri*

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (non compressé)  
sont requis pour visionner cette image.

Les **premiers véritables fossiles de cyanobactéries** furent retrouvés dans des roches vieilles de **-2,1 Ga**, dans les cherts, roches ressemblant au silex, du Gunflint sur les rives du Lac Supérieur en Ontario. On y trouve de **véritables filaments cyanobactériens**, **des sphéroïdes bactériens à membrane épaisse**, ainsi que des **spores**.

# L'EXPLOSION CAMBRIENNE : -542/-530 Ma

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

**L'explosion cambrienne** désigne l'apparition soudaine à l'échelle des temps géologiques (*faunes d'Ediacara, de Chengjiang et de Burgess*) d'anatomies entièrement nouvelles qui préfigurent déjà les **30 grands plans d'animaux actuels** (ex: les phylums tels que les arthropodes et les cordés). La mise en place des *plans d'organisation* correspond à la **macroévolution** ! Cet événement évolutif sans précédent, attesté par de nombreuses données paléontologiques et moléculaires, marque un tournant décisif dans l'évolution de la vie sur notre planète.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

**Métazoaire  
précambrien**

**Anomalocaris**

**Dinckinsonia**

**Lobopodes**

**Haikouella  
Céphalocordé ?**

**Arthropodes**

# Echinodermes

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

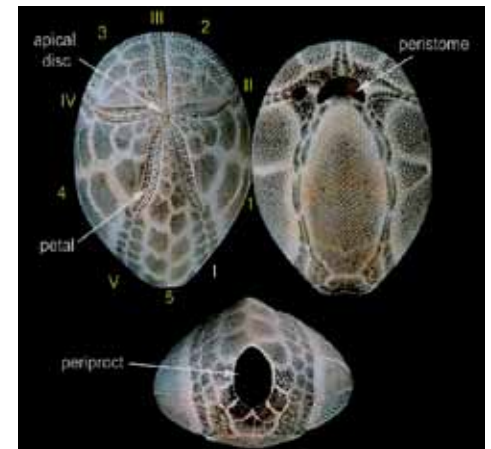
*Arkarua adami*  
(Vendian, Ediacara  
-565 Myrs)  
(after Lisa-Ann Gershin)

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

(d'après David & Mooi, 1999)

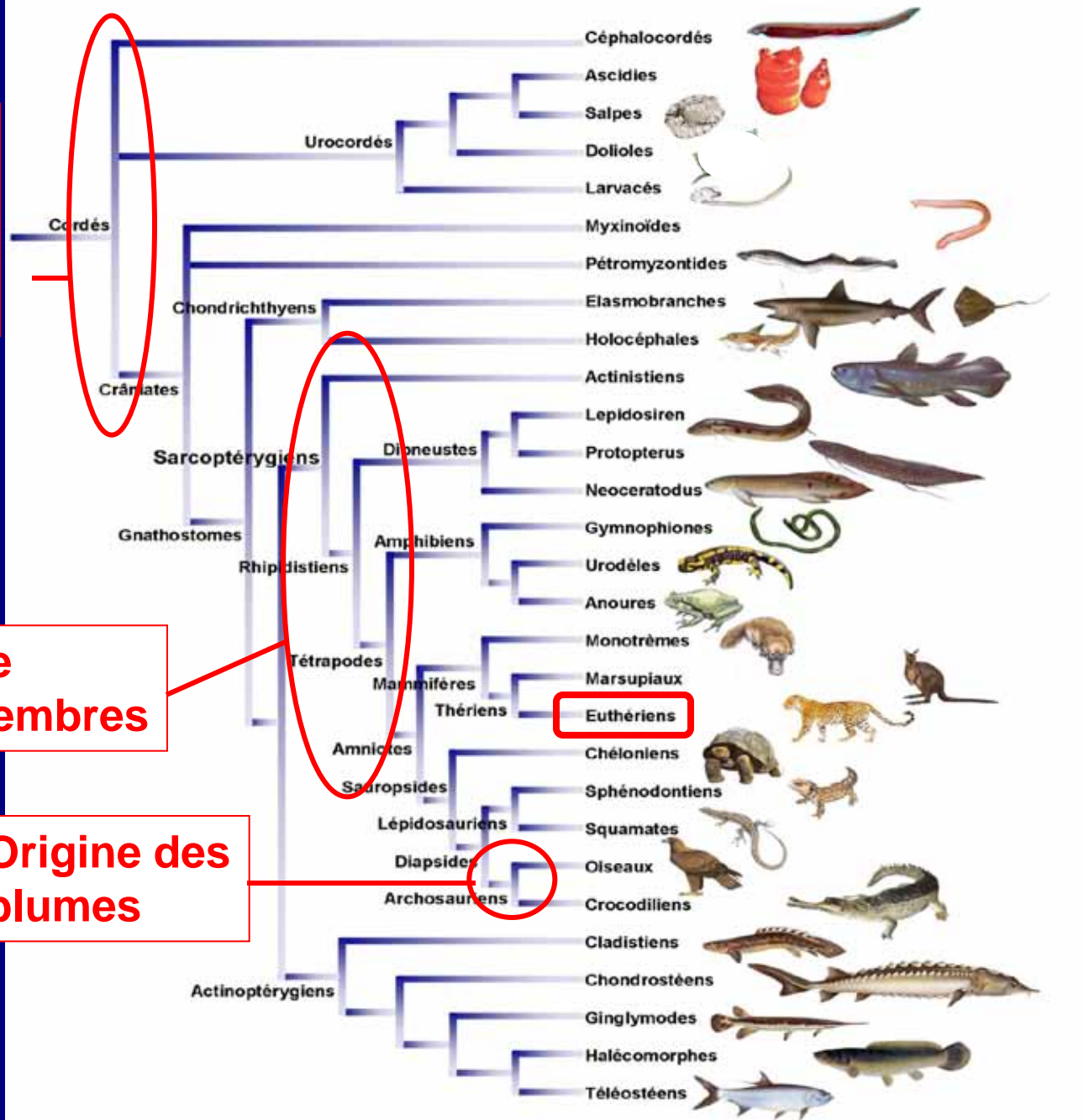


# Phylogénie des Cordés

**Les cordés:**  
Céphalocordés  
Urocordés  
Crâniates

**Origine Des membres**

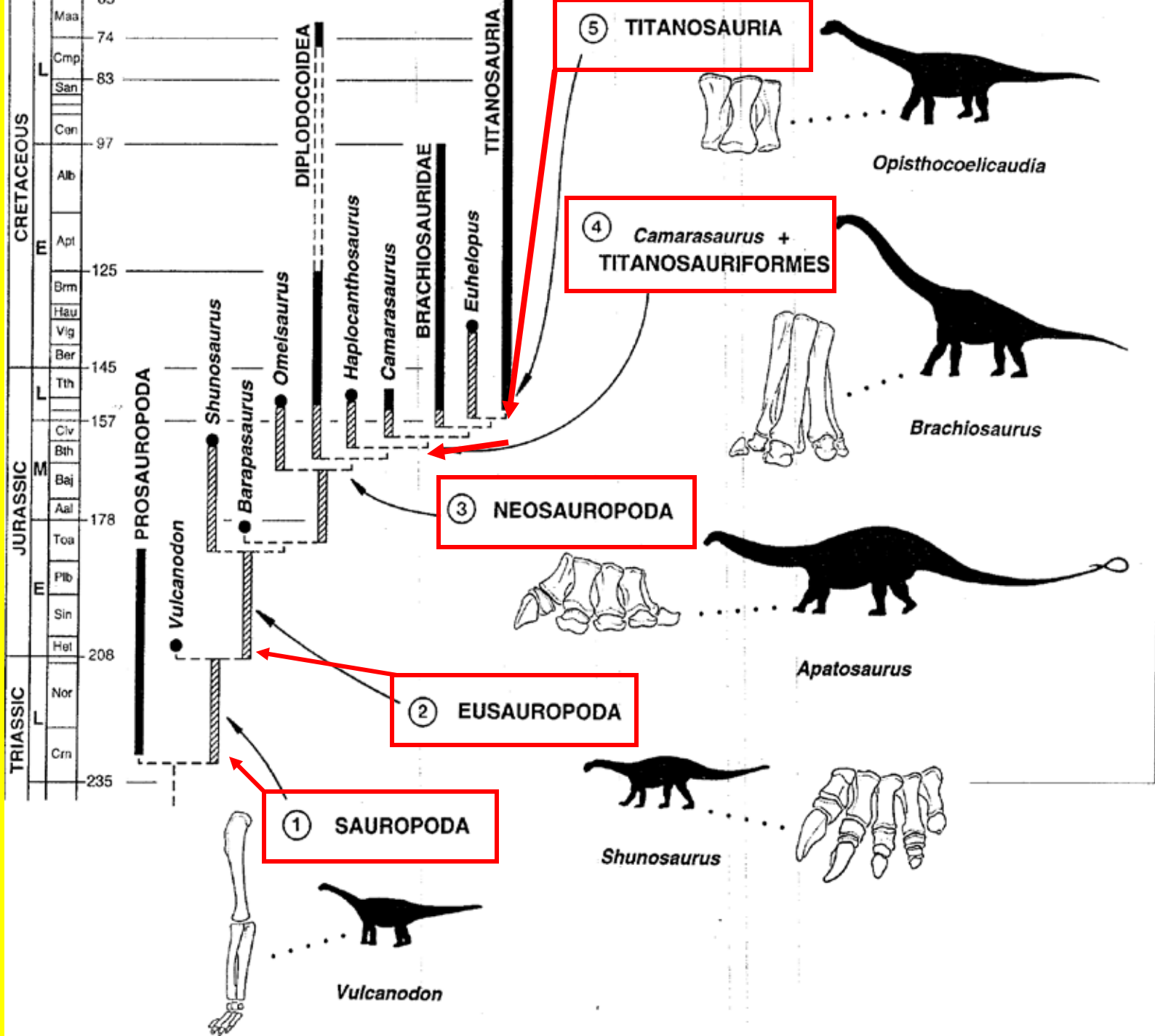
**Origine des plumes**



(D'après Nève & Mauffrey 2006)

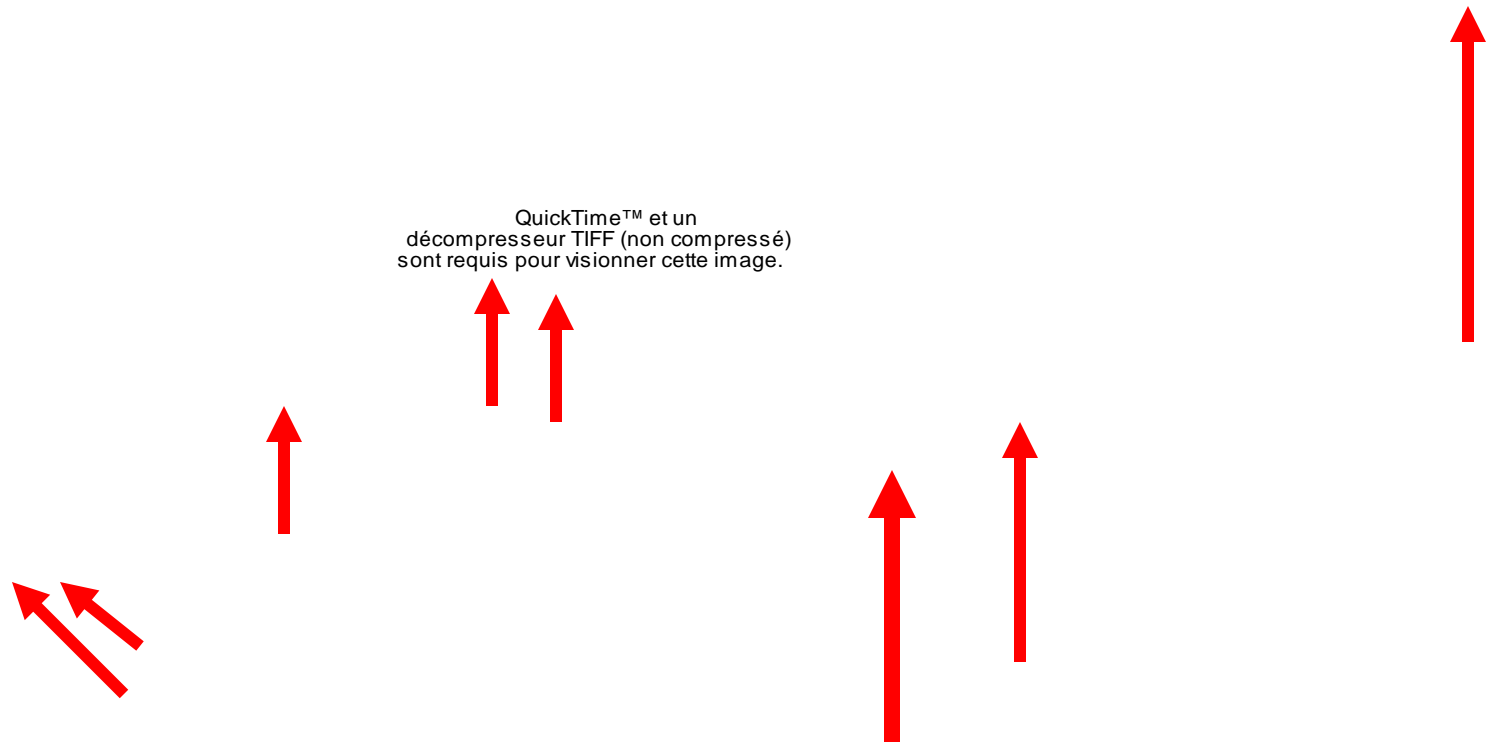


# Evolution des principales postures des Dinosaures Sauropodes



# Radiations et extinctions du vivant

Extinction  
holocène  
+ actuelle



2

# 2 *Les tendances évolutives*

L'action de la *sélection naturelle* favorise le développement de certains « *organes avantageux* » en une « *tendance évolutive* » !

# Une tendance évolutive: l'évolution des cornes des Titanothères

Il n'y a aucune finalité dans les tendances évolutives, simplement l'action des sélections naturelle et sexuelle.

(d'après Mc Kinney & Schoch, 1985)

Oligocène : -23 Ma.

La corne nasale prend de plus en plus d'importance, un phénomène lié à l'accroissement de la taille des animaux (allométrie: croissance rapide d'un organe par rapport aux autres).

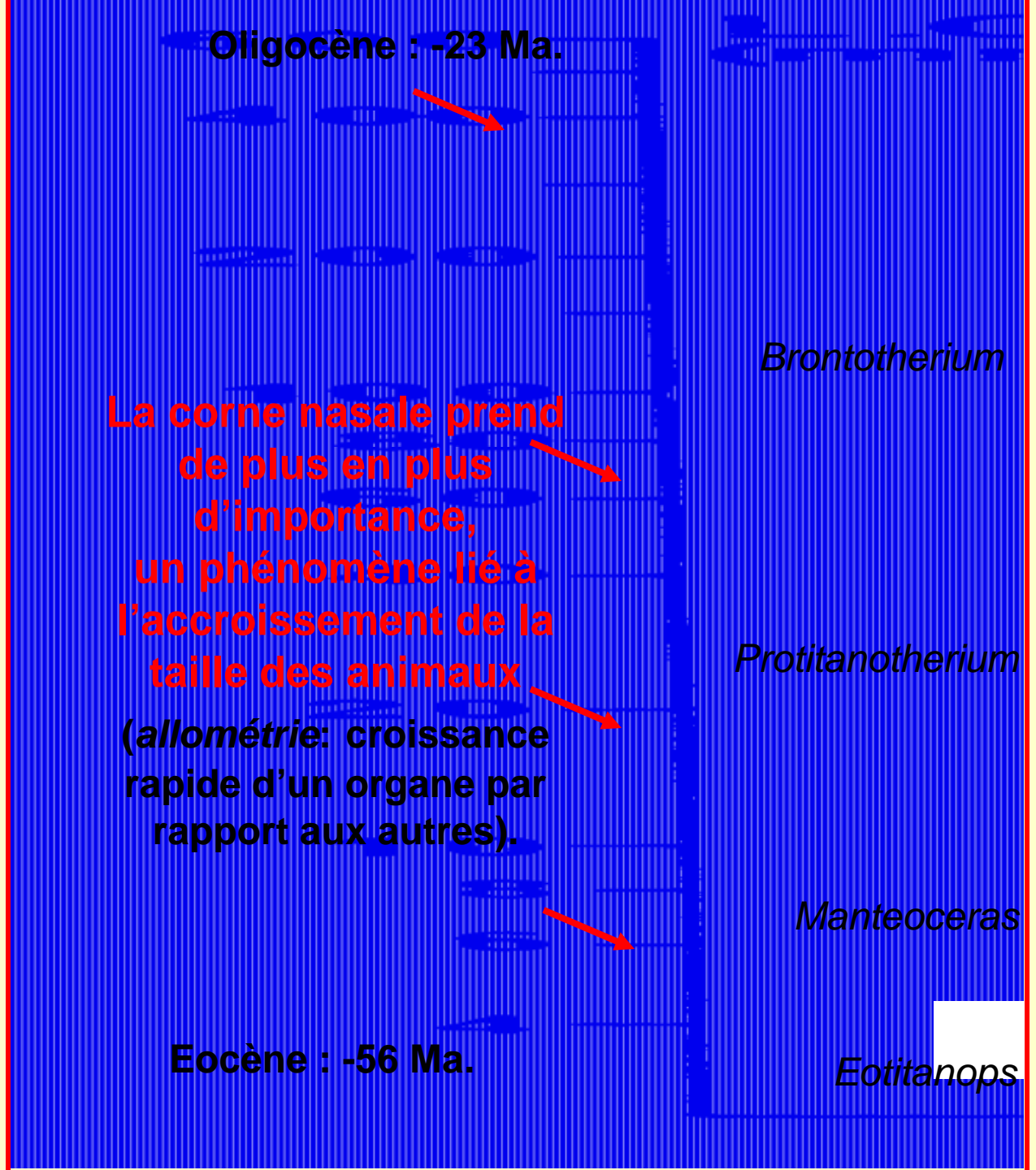
Eocène : -56 Ma.

*Brontotherium*

*Protitanotherium*

*Manteoceras*

*Eotitanops*



**Chez les Primates, la tendance évolutive est « l'accroissement de la capacité crânienne ».**

**Australopithèques**

**- 6 Ma.**

**Grands singes**

**- 20 Ma.**

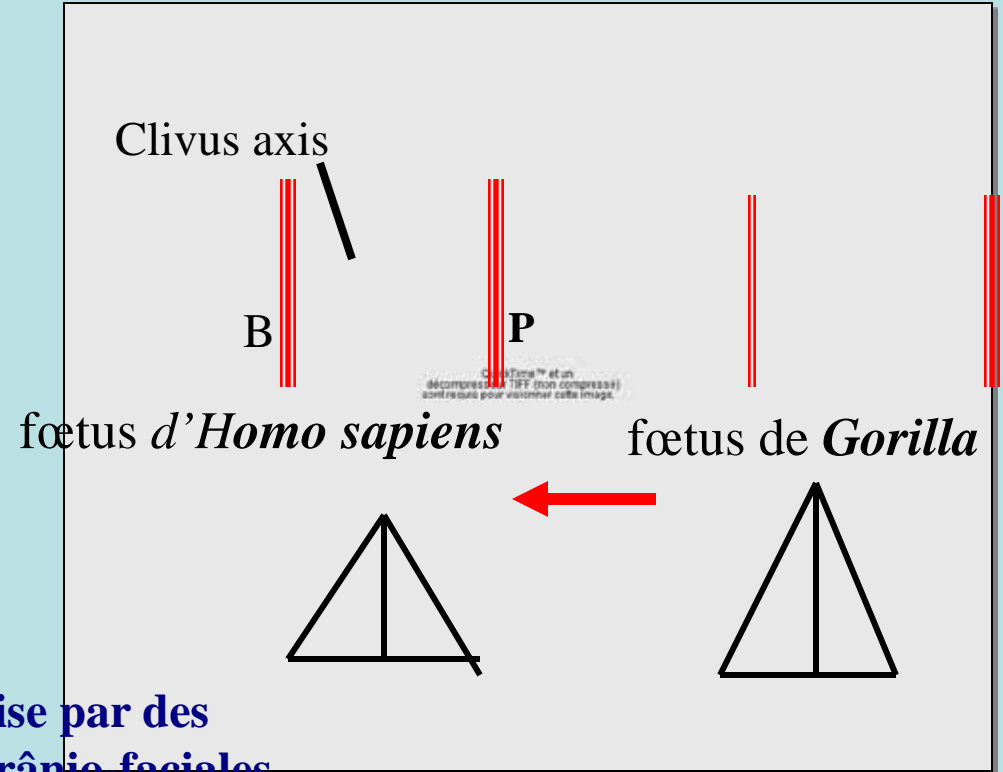
**Simiens/singes à queue**

**- 45 Ma. Elle se réalise par des contractions crânio-faciales cumulatives de plus en plus fortes qui accroissent la capacité crânienne.**

**Prosimiens**  
**- 65 Ma.**

**Homo ergaster**  
**- 2 Ma.**

**Homo sapiens ~ - 150.000 ans**



**Contractions crânio-faciales avec élargissement « mécanique » des branches de la mandibule (pantographe de Gudin) (d'après Dambricourt 1996, modifié)**

3

# *Les hétérochronies du développement*

**Les altérations du développement,  
d'ancêtres à descendants**

# Rappel



## Lois de puissance

Considérons la suite de nombres 2, 4, 8, 16, 32... c'est une suite de nombre qui sont appelés « *puissances successives de 2* ».

1 ère ligne	2
2 ème ligne	4
3 ème ligne	8
4 ème ligne	16
5 ème ligne	32
23 ème ligne	8 388 608...

*C'est une loi exponentielle de raison 2  
le nom du rang (1, 2, 3, 4, 5, ... 23)  
correspond au logarithme à base 2,  
l'inverse de la fonction exponentielle...*

« Supposons qu'un pin donne deux branches par an qui se divisent en deux chaque année, *le nombre de branches terminales correspond à des « puissances de 2 »* et l'âge de l'arbre correspond au rang, c'est-à-dire au « logarithme du nombre des branches terminales »...



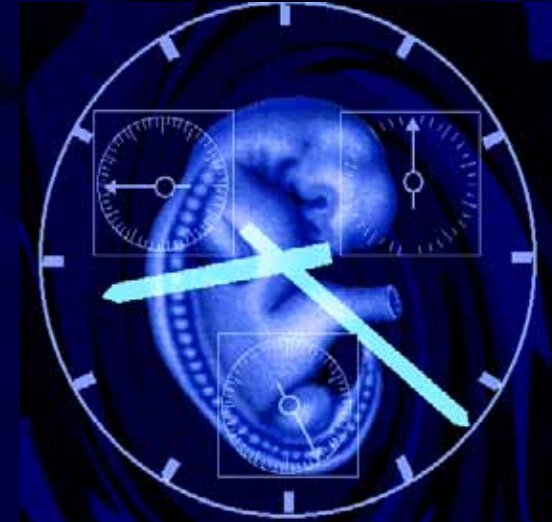
# Les altérations du développement ancêtre-descendant

**1- Le développement peut être ralenti (*décélération*) ou accéléré (*accélération*) ;**

Chez *Caenorhabditis elegans*, on a mis en évidence un gène *hétérochronique* : *Lin 14-gf* ou *pf*, qui *ralentit*, ou *accélère* le développement ;

**2- Le développement peut être, tronqué (*hypomorphose*), ou allongé (*hypermorphose*) ;**

**3- Un caractère peut apparaître plus tôt au cours du développement (*pré-déplacement*) ou plus tardivement (*post-déplacement*).**



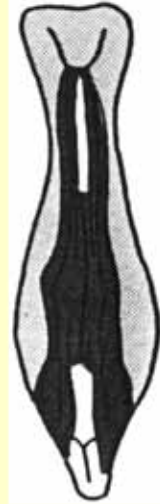
Horloges du vivant



# Hétérochronie : Accélération du développement chez les oursins

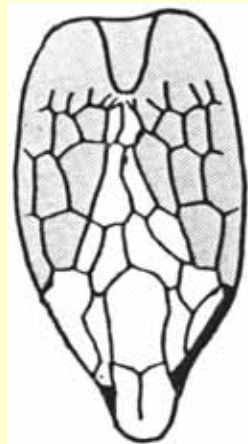
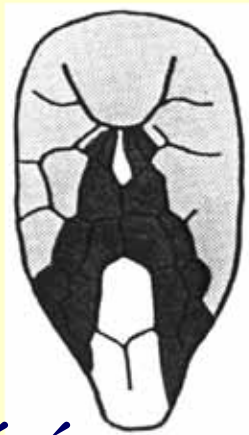
*très accéléré*

juvéniles  
identique



*Echinosigra*

(mutants de gènes  
hétérochroniques:  
*LIN 4*, *DAF 12*,  
*LIN 14*, *LIN 28*)



*L'accélération  
du développement  
change la forme  
de l'organisme !*

*Pourtalesia*

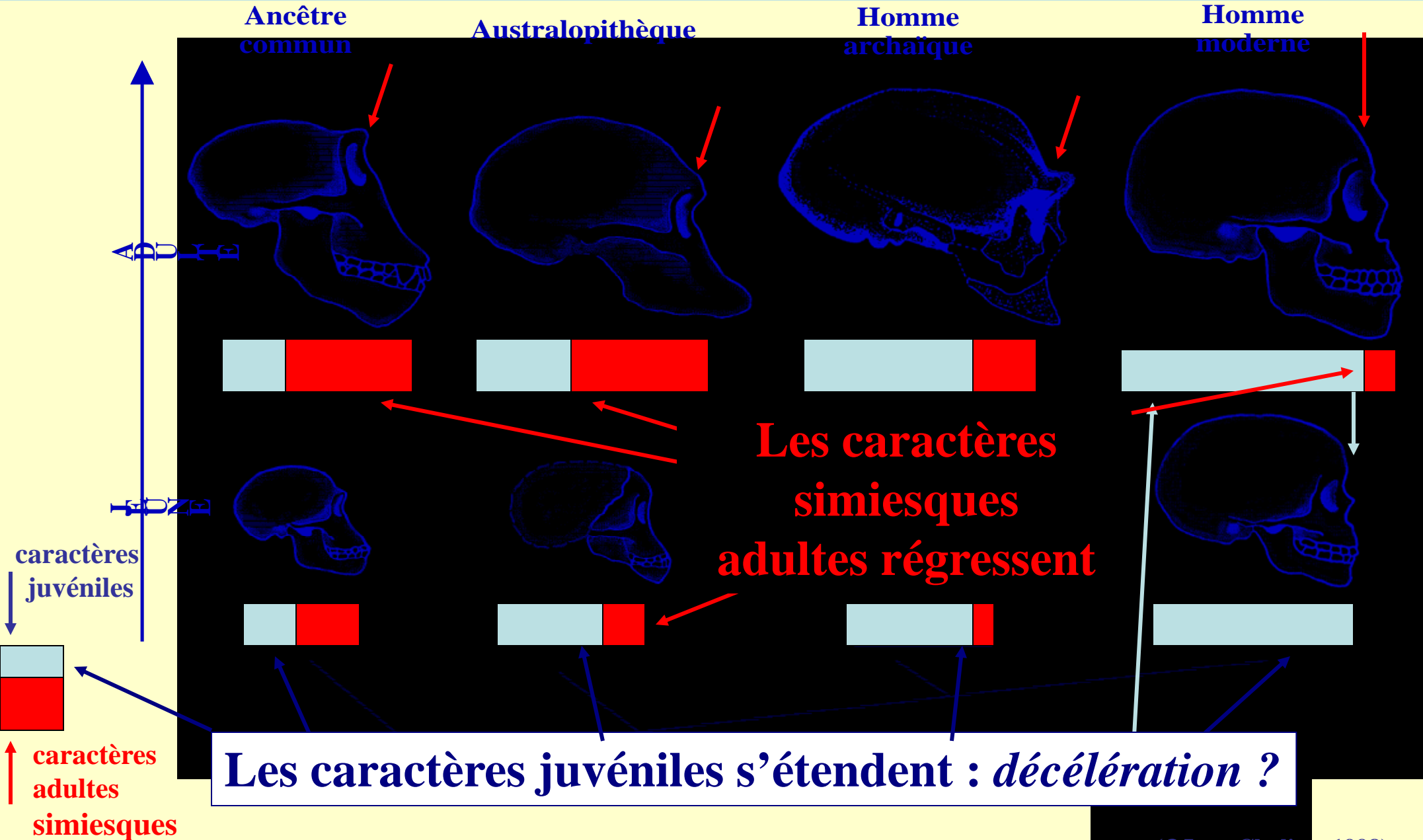
1 mm

*accéléré*

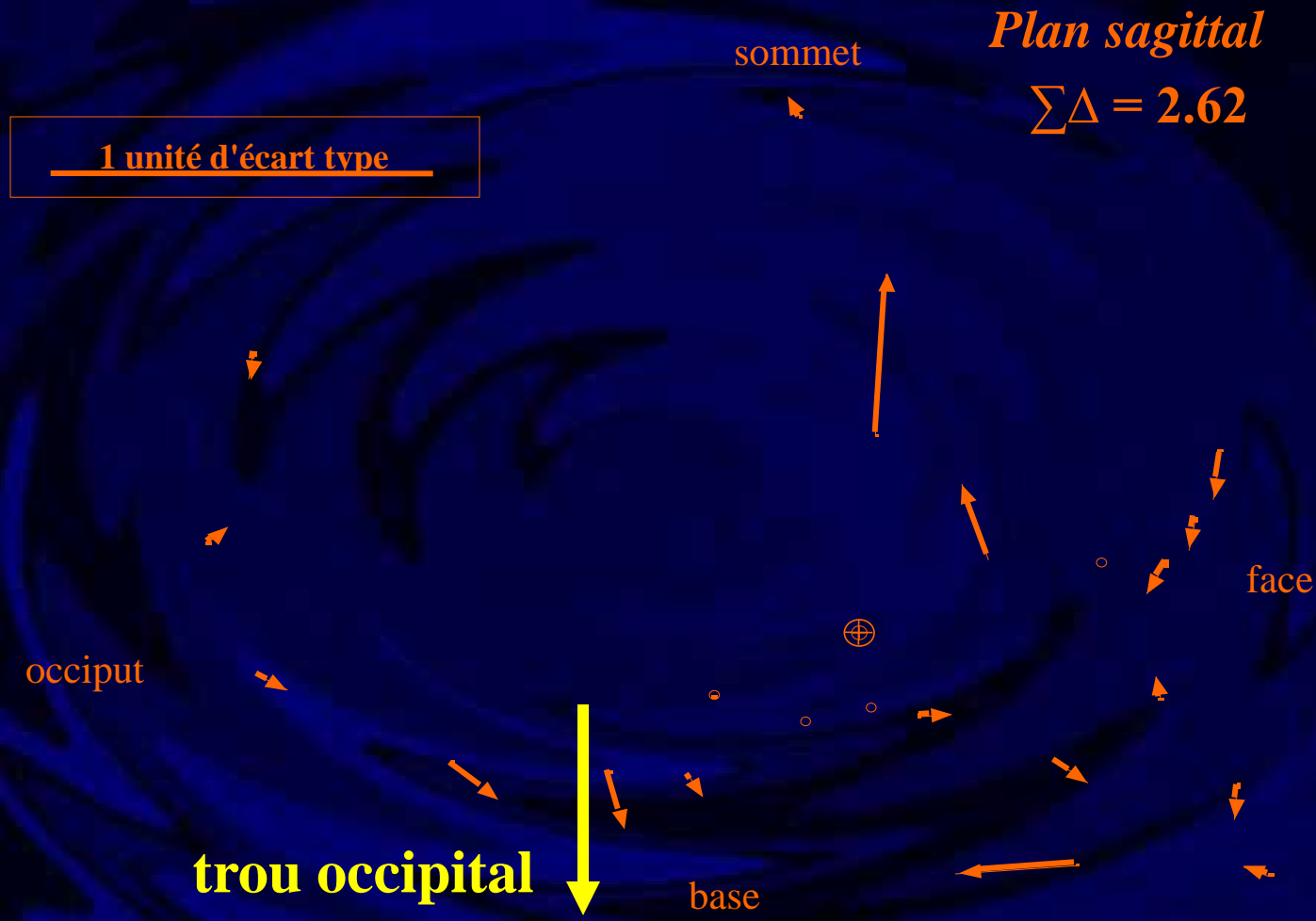
25 mm

(d'après B. David, 1986)

# Comparaison des développements du singe à l'homme



# *Pan troglodytes* juvénile versus *Homo sapiens* adulte



Le crâne de l'homme adulte a conservé la forme d'un singe juvénile ancestral commun et la bipédie à l'état permanent : *décélération* ?

4

*La mécanique de l'évolution :*

*L'approche Evolution-Développement  
(EVO-DEVO)*

*Les gènes *Hox* et les gènes ouvriers*

# La molécule de l'évolution : la double hélice de l'ADN

Les *'mutations'*, qui apparaissent au *'hasard'*, *par* erreurs, additions *ou* délétions des 4 bases (A, T, C, G), mais dans le cadre des contraintes de la molécule d'ADN, pendant la réplication de l'ADN, au moment de la division cellulaire, constituent la « mécanique de base de l'évolution ».

L'évolution est un véritable *'bricolage'* qui rénove et élargit sans cesse le programme génétique ancestral, grâce aux *'mutations'* (rayons ionisants).

Les *'mutations'* engendrent les *'variations individuelles'* (la *variabilité*), les *'innovations'* et les *'anomalies tératologiques'*, triées et optimisées ensuite par la « *sélection naturelle* »...

# LES GÈNES *HOX*:

Double mutant  
*antennapedia* -  
*proboscipedia*

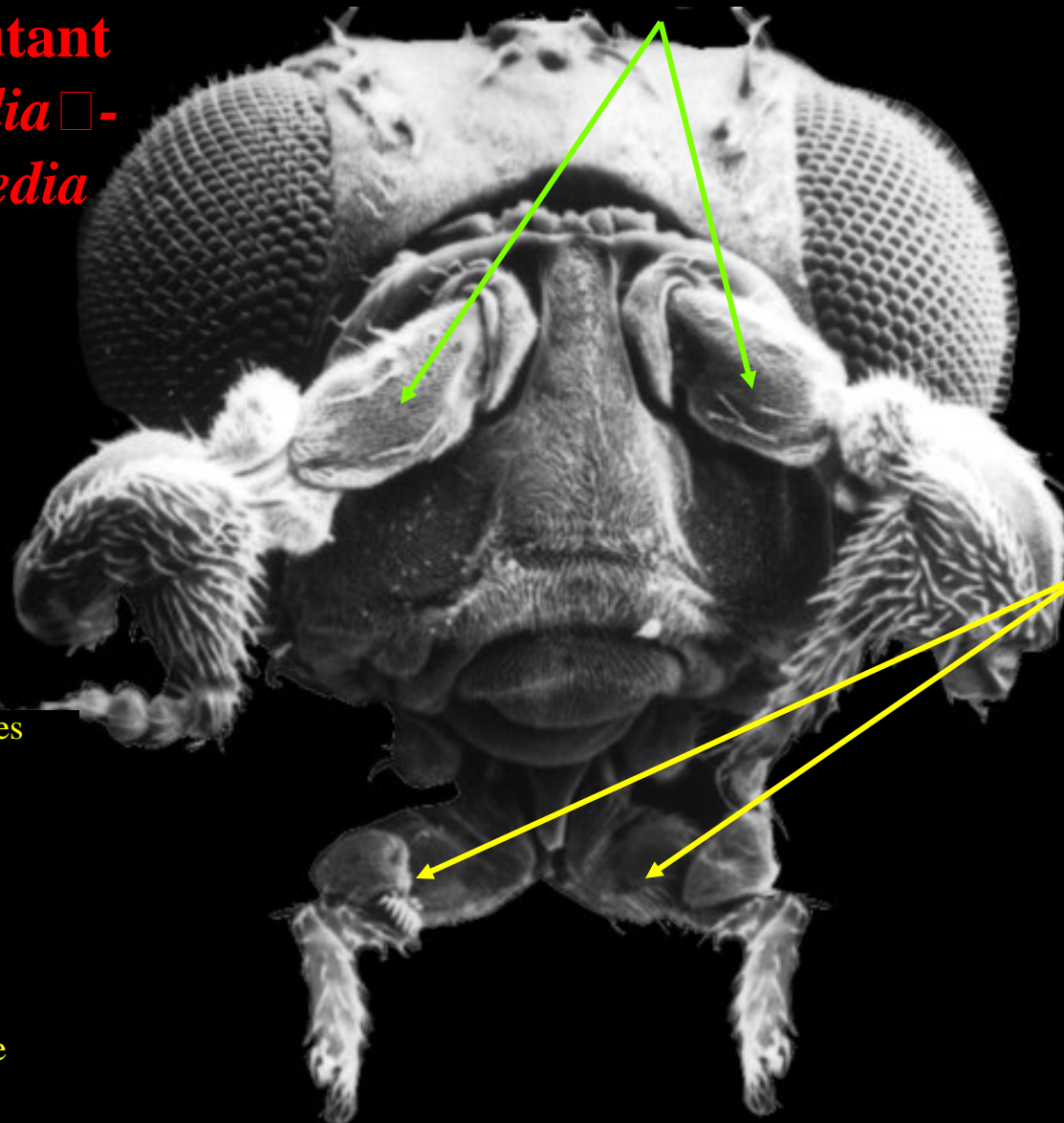
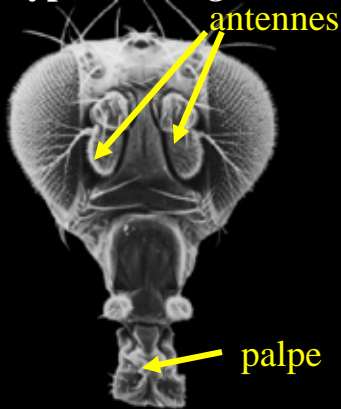
des pattes à la place  
des antennes

mutant  
*antennapedia*

+ mutant  
*proboscipedia*

et  
des pattes  
prothoraciques  
à la place  
du palpe

Drosophile normale  
de type « sauvage »



**Double mutant**  
*antennapedia* -  
*proboscipedia*

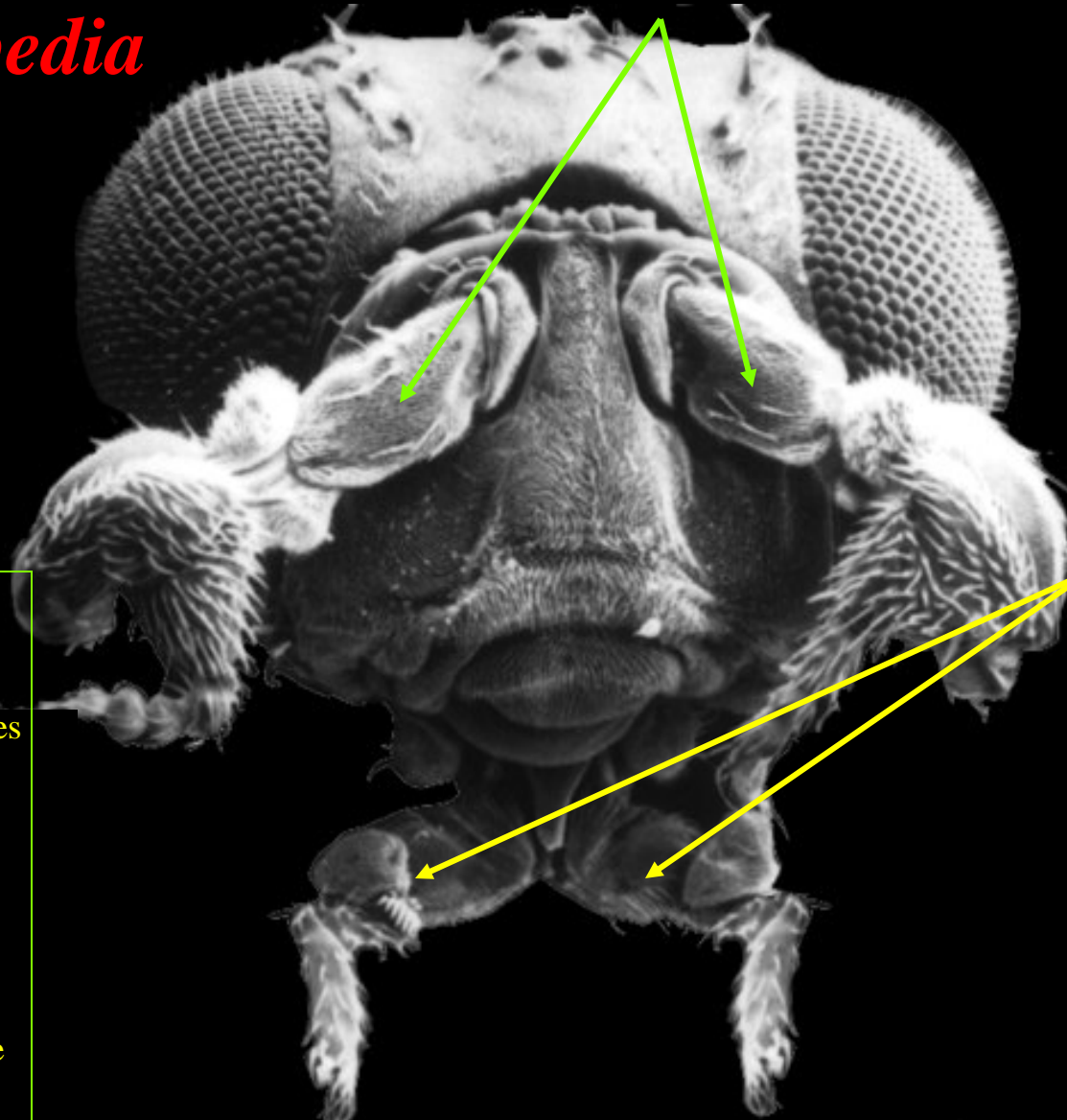
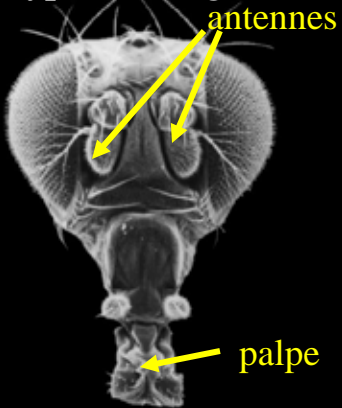
**des pattes à la place  
des antennes**

**mutant**  
*antennapedia*

**+ mutant**  
*proboscipedia*

**et**  
**des pattes**  
**prothoraciques**  
**à la place**  
**du palpe**

Drosophile normale  
de type « sauvage »

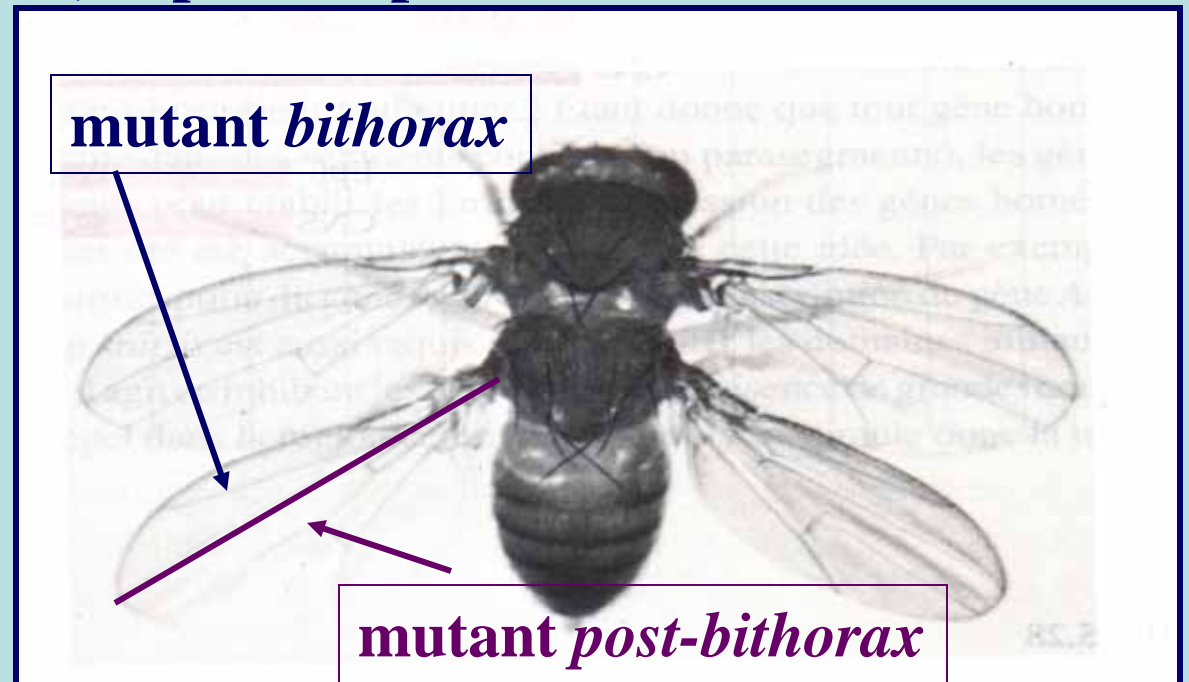


# La mouche à 4 ailes : mutations *bithorax* et *post-bithorax* du gène *Ubx*

Dans le type sauvage normal du gène « *Ubx* », le compartiment thoracique T2 produit une « aile » et le T3 une « haltère ».

Dans la mutation *bithorax*, le compartiment antérieur de T3 produit une demi-aile antérieure et la mutation *post-bithorax* forme dans le compartiment postérieur de T3, la portion postérieure de l'aile.

Les mouches à 4 ailes sont donc des bi-mutants *bithorax* et *post-bithorax* d'un diptère !

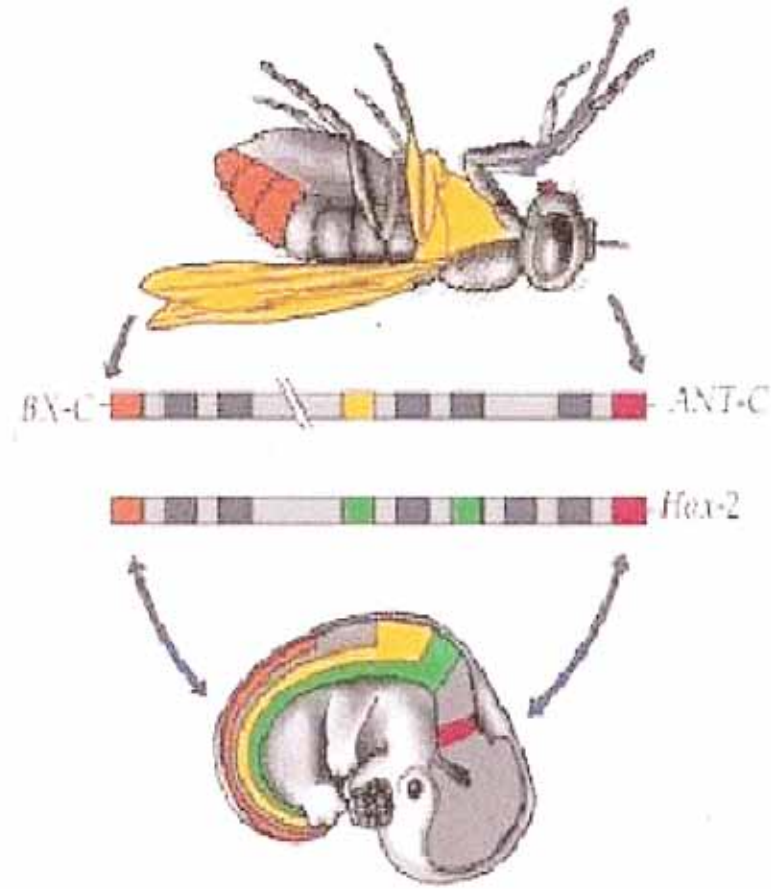




# Les mêmes homéogènes commandent le plan d'organisation du corps chez la Drosophile et chez la Souris

**L'inversion dorso-ventrale entre les invertébrés et les vertébrés, un changement de plan d'organisation, suggérée par Geoffroy Saint-Hilaire en 1796, est *une rupture de symétrie*, simplement contrôlée par un couple de gènes de régulation antagonistes : (*ddp/sog* et *chordin/BMP2-4*), qui s'expriment par des protéines antagonistes.**

(De Robertis & Sasai, 1996)



**Geoffroy Saint-Hilaire avait raison  
et Cuvier avait tort !**

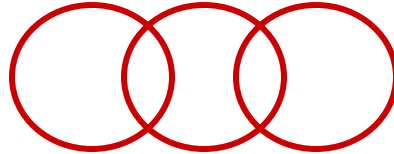
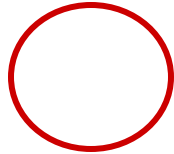
# Une énigme évolutive résolue : La formation des membres des tétrapodes

Les membres des tétrapodes se forment en une séquence de trois phases contrôlées par les gènes « *Hox a et d9-13* » (équipe Duboule).

- (1) humérus/fémur : *Hox d-9-10* ;
- (2) cubitus-radius/tibia-péroné : *Hox d-11-12* ;
- (3) poignet-main-pied-doigt : *Hox a-13* et *Hox d-12-13*.

*Un défaut de fonctionnement des gènes Hox a-d9-10-11-12 cause la phocomélie (absence de bras et avant-bras et implantation directe des mains et des pieds directement sur le tronc). Effet de la thalidomide (analgésique) dont la forme commercialisée était sous forme racémique, mais l'énantiomère censé être inactif s'est avéré provoquer des malformations (tératogène)...*

# EVOLUTION DES GENES *HOX*

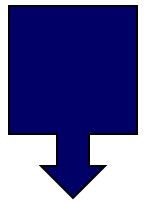


} Drosophile

lab = labial  
pd = proboscipedia  
dfd = déformé  
src = sex combs reduced  
antp = antennapedia  
ubx = ultrabithorax  
abd = abdominal

QuickTime™ et un décompresseur  
Photo - JPEG sont requis pour visualiser  
cette image.

deux  
duplications



} Homme

Les gènes *Hox* agissent selon leur séquence de répartition le long du corps  
comme des oiseaux sur un fil qui chantent les uns après les autres = *colinéarité*

# 5

## *Des contraintes physiques du vivant ?*

**Gould a écrit :** « *La vie exhibe une structure obéissant aux principes de la physique, mais tout dépend de l'échelle ou du niveau envisagé. Il y a des lois pour le cadre général (formes générales liées aux contraintes de construction et fonctions des organismes) et la contingence pour le détail* ».

# Dynamique non-linéaire

Depuis les années quatre-vingt on a commencé à prendre en compte un certain nombre de phénomènes physiques, comme les *tremblements de terre*, qui ne répondent pas aux « *lois de structuration linéaire* » (quand deux variables sont liées selon une ligne : pendule) de la physique classique, mais procèdent de « *lois* » particulières dites “*lois de puissance*”.

On regroupe ces phénomènes sous le titre de “*dynamique non-linéaire*” qui suivent des *lois de puissance en  $x^2$* , avec ajout de correctifs exprimant l’existence « *possible* » de « *structurations fractales* ”

# LES FRACTALES

En travaillant sur les bruits de fond du téléphone, le cours du coton et la longueur de la côte de Bretagne, Mandelbrot a découvert une structuration universelle qu'il a dénommée : « *fractale* » du latin « *fractus* » (*brisé, irrégulier*).

On dit d'un objet qu'il est « *fractal* » s'il possède une structure à toutes les échelles. Si elles sont identiques, « *le fractal est dit auto-similaire !* ».

1975 : Les objets fractals

Mais il n'a introduit ni théorie, ni de dynamique, le travail de Nottale

Benoît Mandelbrot

**80 ans**  
12/11/2004

# Poumons humains

$$D = 3$$

La notion « *d'autosimilarité* » qui régit *certaines fractales* signifie que tout morceau, en dehors de sa taille, a la même forme que le tout.

La *forme des branches ne dépend pas de l'échelle* à laquelle on les considère, d'où l'autre terme : « *d'invariance d'échelle* ».

Le gène *Hoxb-5* influence la morphogenèse des branchements !

Le motif « *bifurcation* » se retrouve 16 fois (bronches) ou 23 fois (veines) en échelles décroissantes

La trachée est divisée par 16 dichotomies successives en 60 000 branchioles conduisant aux 60 000 acinis contenant les alvéoles. L'arbre des veines et des artères dans les poumons contient un nombre de 23 dichotomies aboutissant aux 8 millions d'artérioles et veines terminales...

Clades	loi log-périodique d'évolution
Eco-systèmes	nombre d'apparitions et extinctions d'espèces
Communautés	(lois de puissance)
Espèces	oscillations &
Populations	déplacements de populations
Individus	morphologie : bactéries, algues, plantes
Organes	poumons, reins, vaisseaux sanguins, estomac, intestin
Cellules	neurones
Chromosomes	enroulement ADN
Gènes	régions non-codantes

Les structures fractales dans la hiérarchie du vivant



*Les structures fractales augmentent les surfaces et sont donc retenues par la sélection naturelle !*



6

**Peut-on expliquer ces  
structures fractales ?**

Par une nouvelle théorie, celle de la  
***RELATIVITE D'ECHELLE***  
de Laurent Nottale (1982)

# Théorie de la relativité d'échelle

(Laurent Nottale, 1982)

Le « *principe de relativité d'échelle* » postule que les lois fondamentales de la nature doivent être valides, quel que soit « *l'état d'échelle* » du système de référence.

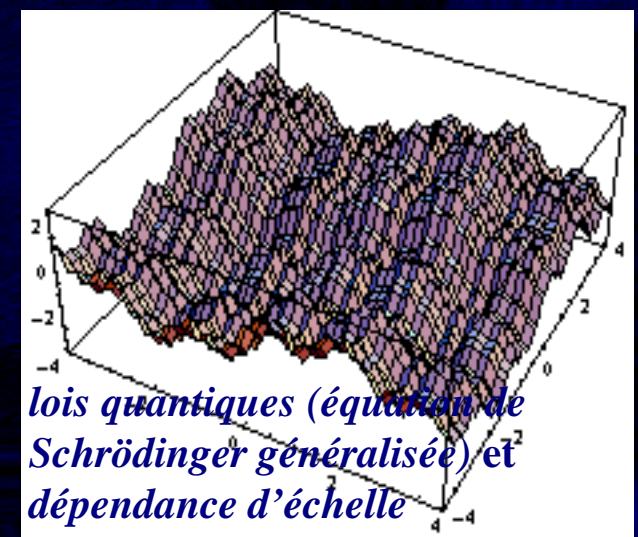
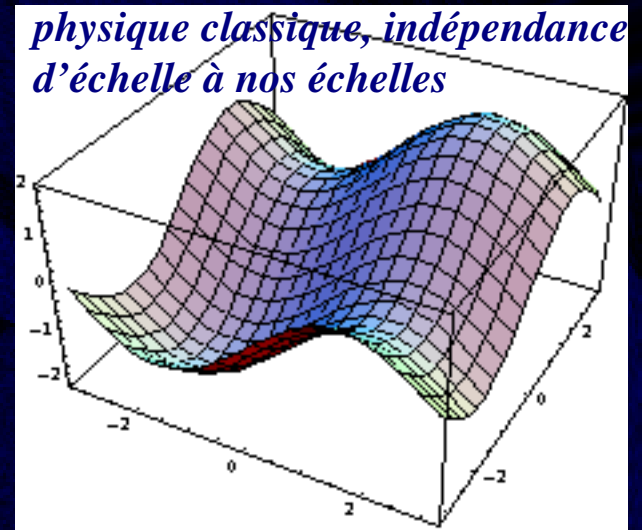
Le « *principe de relativité d'échelle* » complète le « *principe de relativité* » de Galilée, Poincaré et Einstein qui s'appliquait seulement aux états de position, d'orientation et de mouvement...

La théorie de « *la relativité d'échelle* » consiste à appliquer le principe de relativité aux transformations d'échelle.

*Seuls les rapports d'échelle ont un sens, jamais une échelle absolue !*

# Théorie de la relativité d'échelle

La géométrie « *courbe* » de l'espace-temps de la relativité d'Einstein devient « *fractale* » aux petites et aux grandes échelles cosmologiques (lois quantiques avec en particulier l'équation de Schrödinger généralisée et la dépendance d'échelle), mais n'est pas fractale à nos échelles (*physique classique et indépendance d'échelle*)

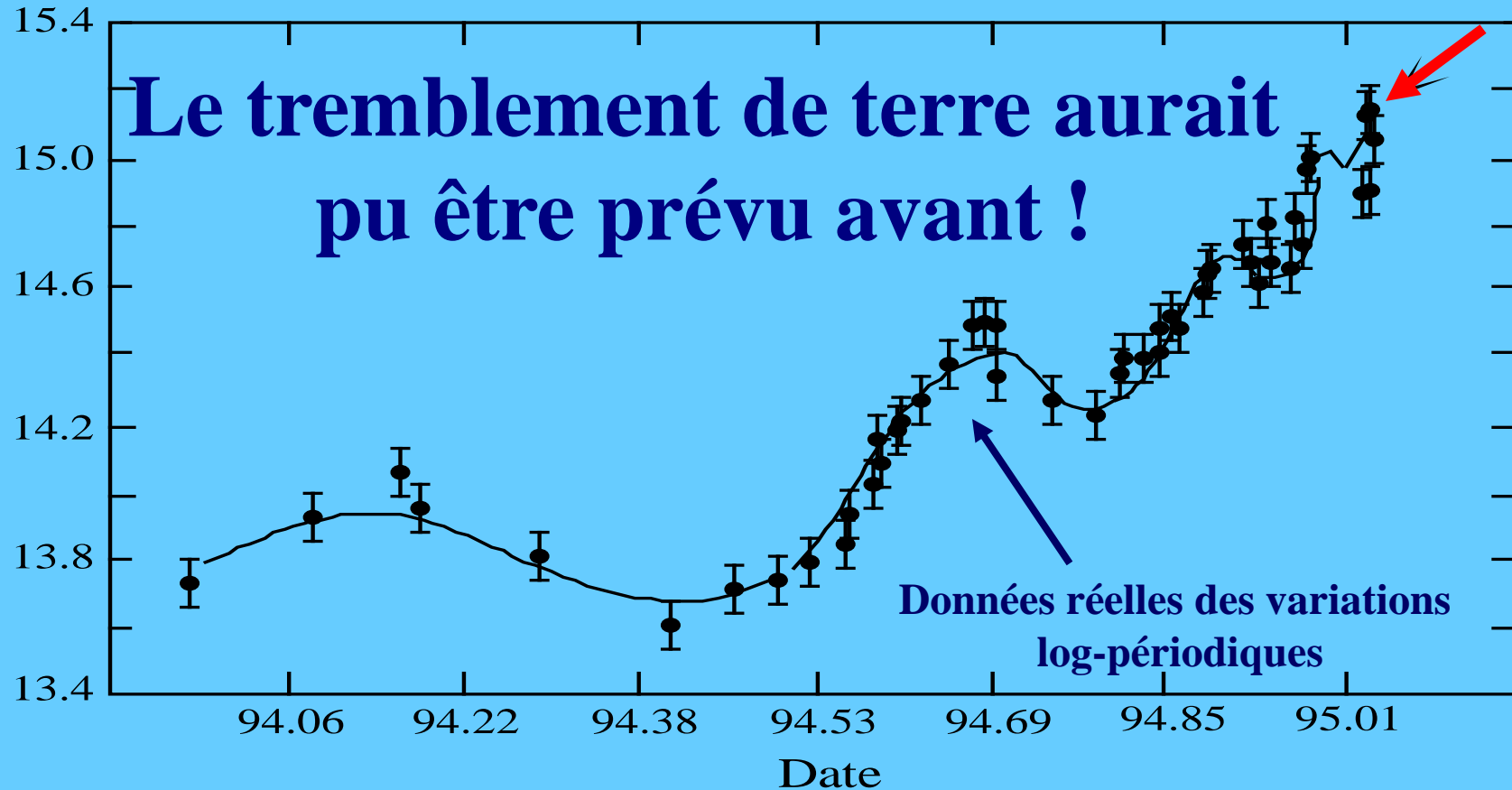




7

**Applications des  
lois log-périodiques  
de branchements  
en Géosciences**

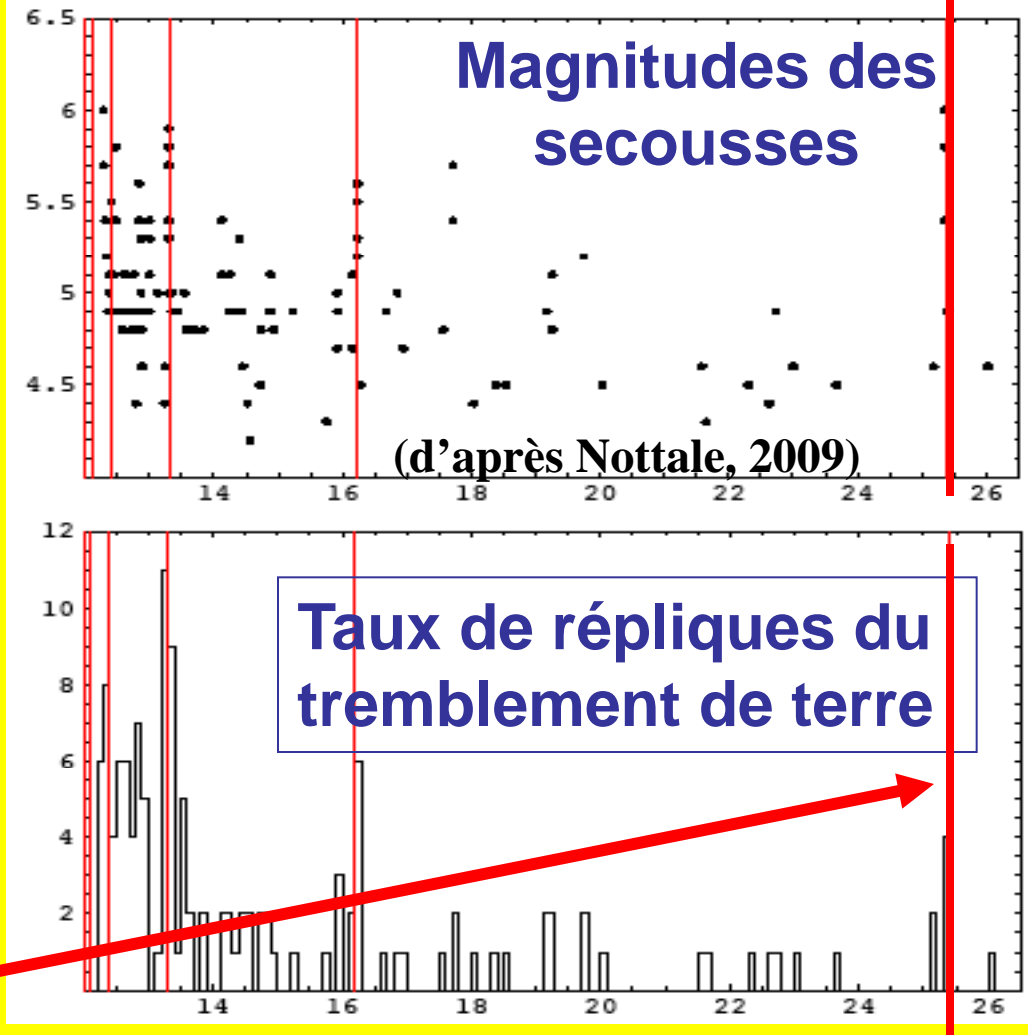
## Ex: Application des *lois log-périodiques* en Géosciences



**Concentration des ions -Cl à Kobe (Japon)**

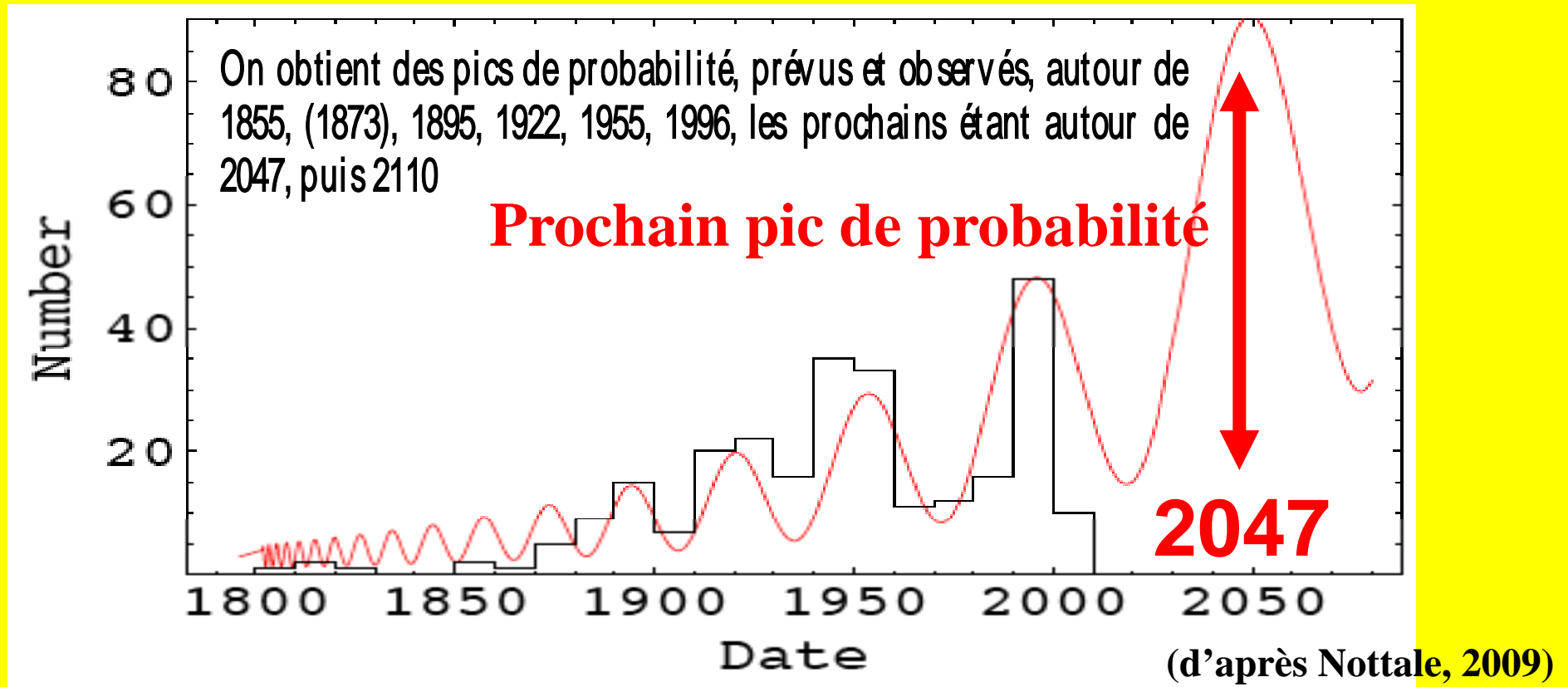
# Application en Géoscience: LE TREMBLEMENT DE TERRE DE 2008 DU SICHUAN (Chine)

Le tremblement de terre principal peut ainsi être rétroprédit, avec une précision de 6 h, et le *pic de répliques* du 25 mai pouvait ainsi être prédit avec une précision de 1,5 jour, à partir des dates précédentes.



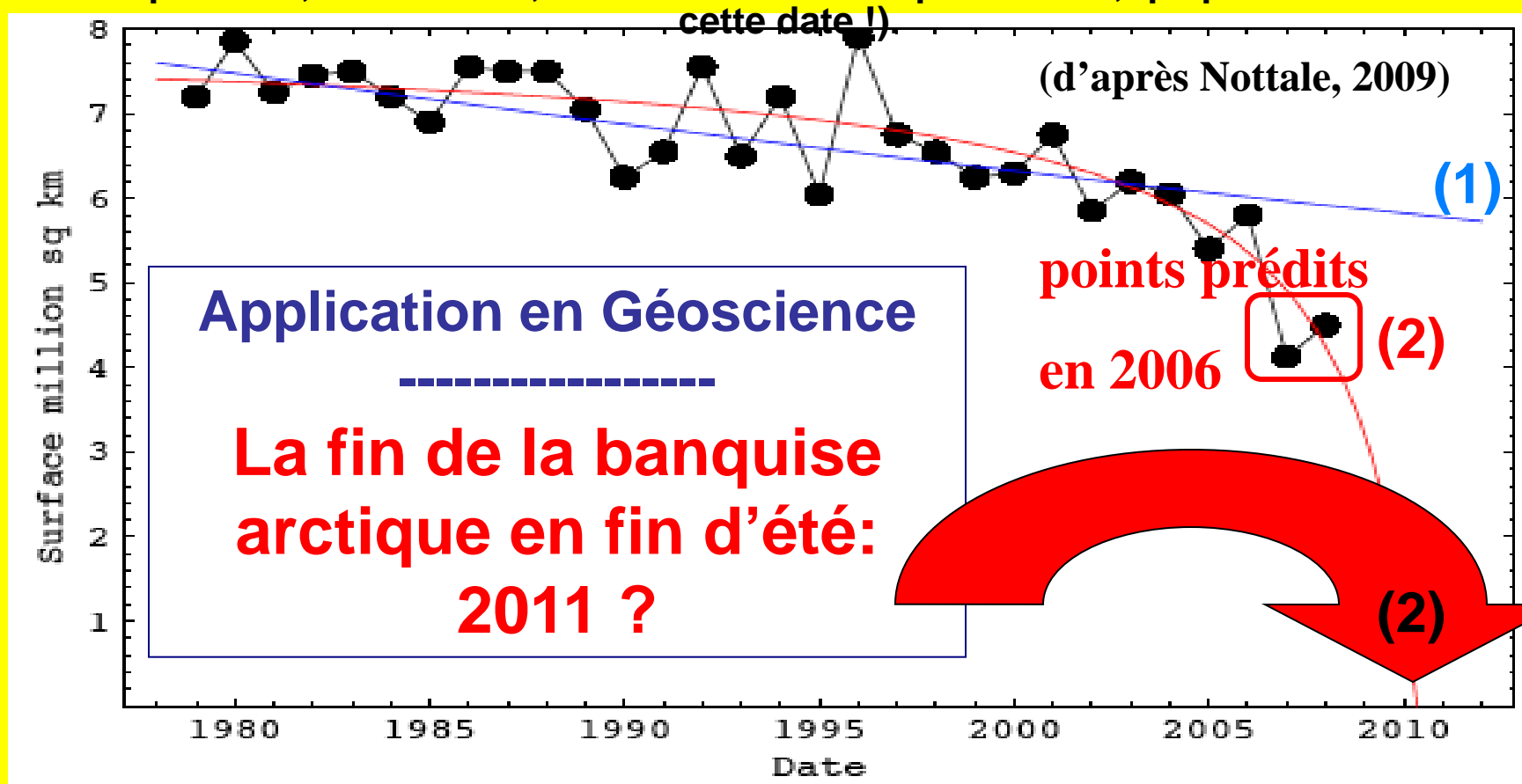
*Evolution temporelle observée pendant 14 jours (du 12 au 26 mai 2008) des magnitudes (figure du haut) et du taux (figure du bas) de répliques du tremblement de terre du Sichuan. Le tremblement de terre principal de magnitude de 7.9, est à l'origine des temps et dépasse du cadre de la figure. Les pics combinés de magnitude et de taux montrent une décélération log-périodique prédictible (à partir de la 4<sup>e</sup> date).*

# Application en Géoscience: Tremblements de terre en Californie



*Histogramme de la distribution des dates des tremblements de terre de magnitude supérieure à 5 en Californie du Sud (données US Geological Survey Earthquake Data Center pour les années 1932-2006 et Earth Quake Data Base pour les tremblements de terre historiques, années 1500-1932). La distribution observée est très bien ajustée par une loi de puissance soumise à une forte oscillation log-périodique décélérante depuis l'époque critique 1796. Le prochain pic de probabilité prévu est autour de 2047.*

C'est ainsi que la date estimée par les modèles linéaires (bleu) de la **disparition de la banquise arctique** est de 2080-2100. Mais un ajustement par une **loi critique** donne une valeur beaucoup plus rapprochée,  $T_c = 2011$  ! (sans prendre en compte la diminution d'épaisseur, mal connue, mais estimée à 15% par décade, qui pourrait encore rapprocher



Comparaison des données (issues du US National Snow and Ice Data Center) de 1979 à 2008 concernant la surface de banquise arctique restante (au 15 septembre de chaque année) à deux modèles : (1) diminution à taux constant (ligne droite); (2) diminution suivant une loi critique d'époque critique  $T_c = 2012$  (qui mène à une disparition totale en 2011).





8

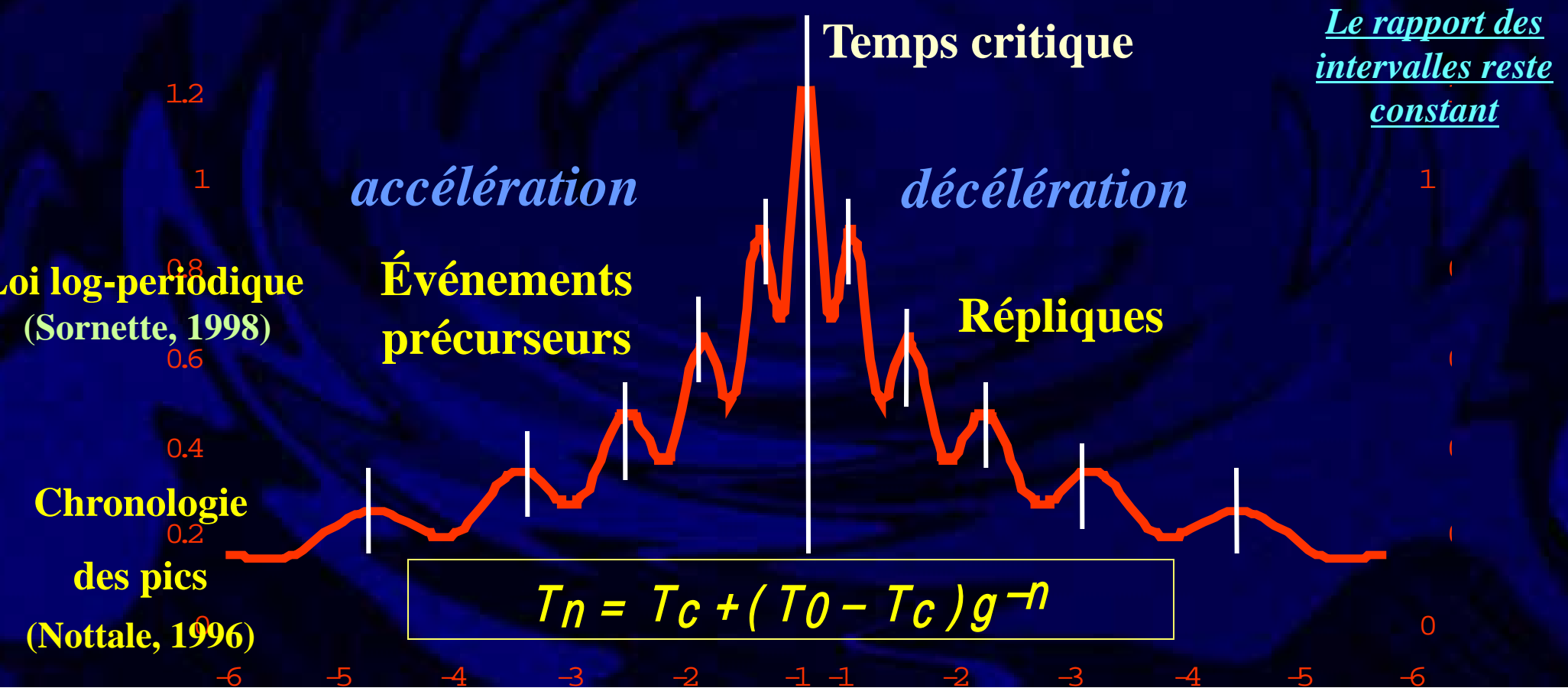
# L'arbre de la vie est-il fractal ?

Une des applications de la *théorie de la relativité d'échelle* de Laurent Nottale :

Les lois log-périodiques de branchements : *des lois de prédictibilité à caractère indéterministe - probabiliste*

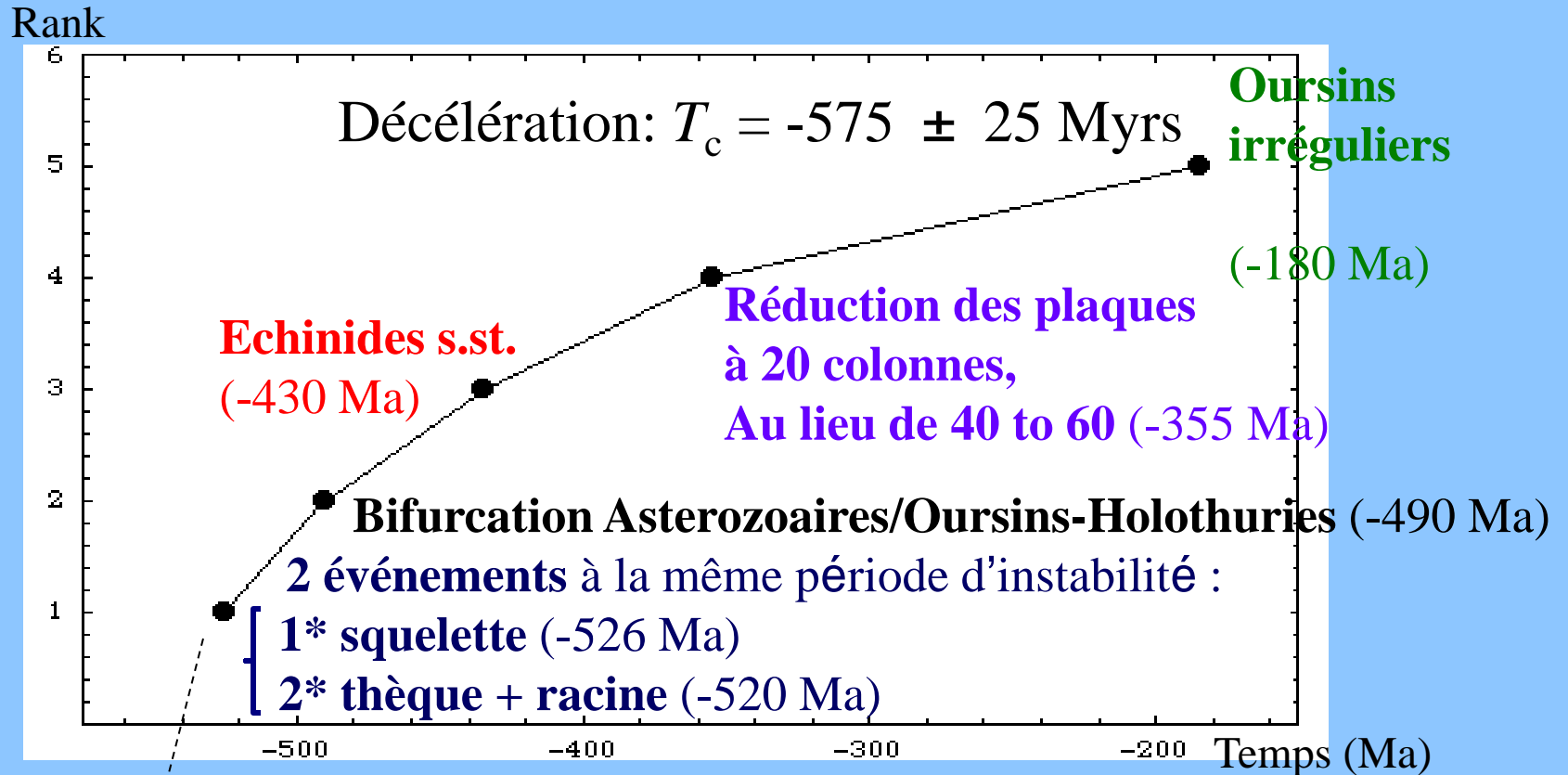
# Comportement fractal *log-périodique*

Une loi « *log-périodique* » montre une *périodicité dans les changements d'échelle, en fonction d'un logarithme de la variable, comme par exemple lorsque l'on fait un zoom en continu 2, 4, 8, 16, 32).*



# Application macroévolutive

Echinodermes  
en temps réel



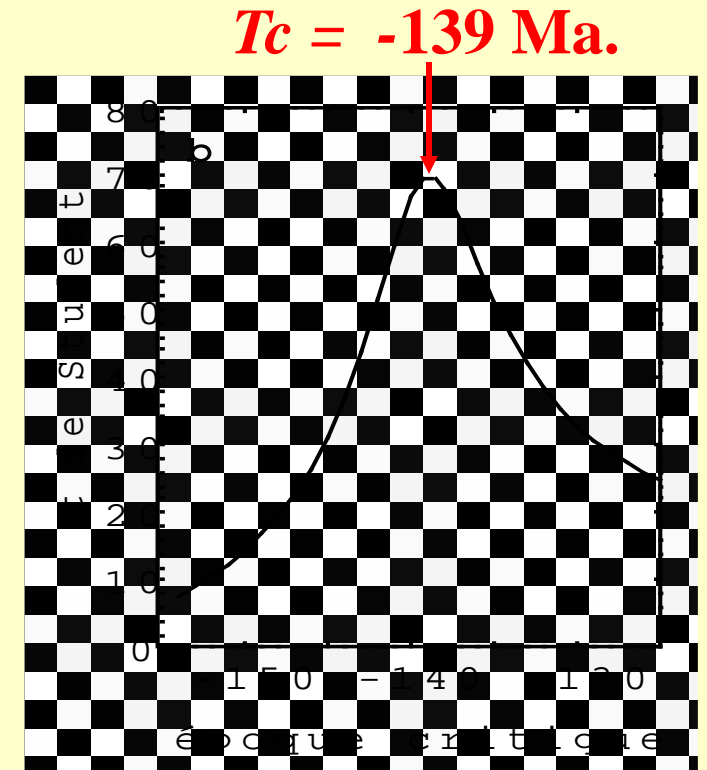
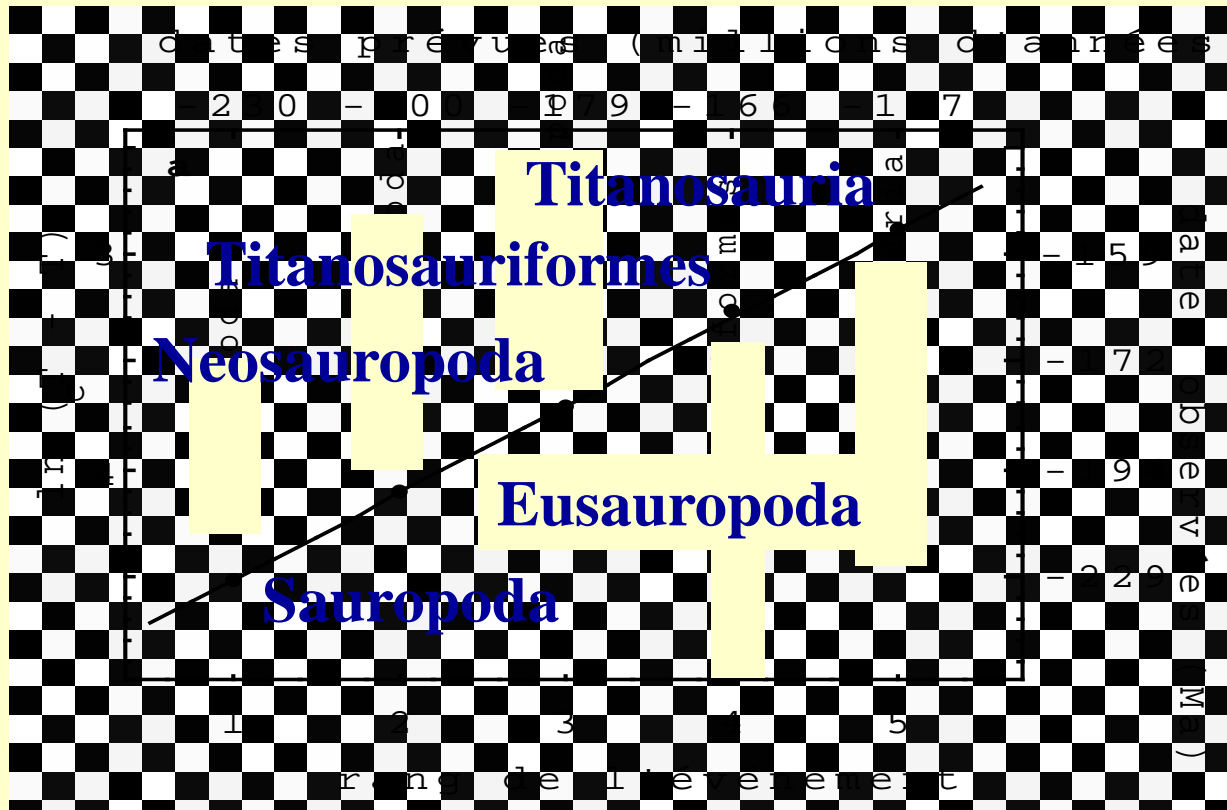
*Arkarua adami* : Apparition du plan Echinoderme

Une décélération commençant vers - 600 Ma.

(d'après David  
et Mooi, 1999)

# Application macroévolutive

## Système de locomotion des dinosaures sauropodes



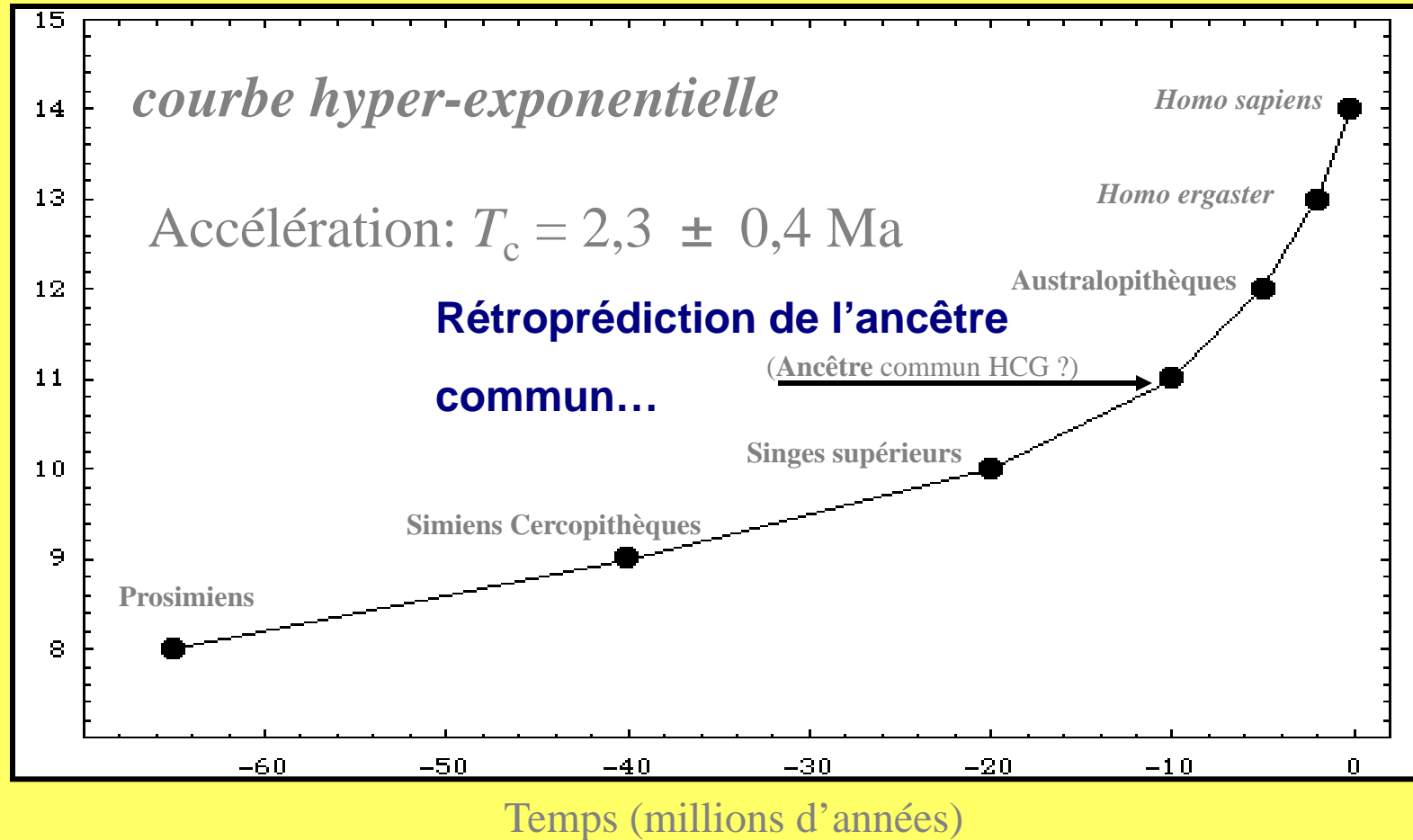
Le  $T_c$  pourrait correspondre à la perte des potentialités évolutives ?

**Une accélération évolutive !**

(données Wilson & Sereno, 1996)

# Application macroévolutive : *les clades des Primates*

Primates en  
temps réel



**Une accélération évolutive !**

9

APPLICATION

de la R.E. à

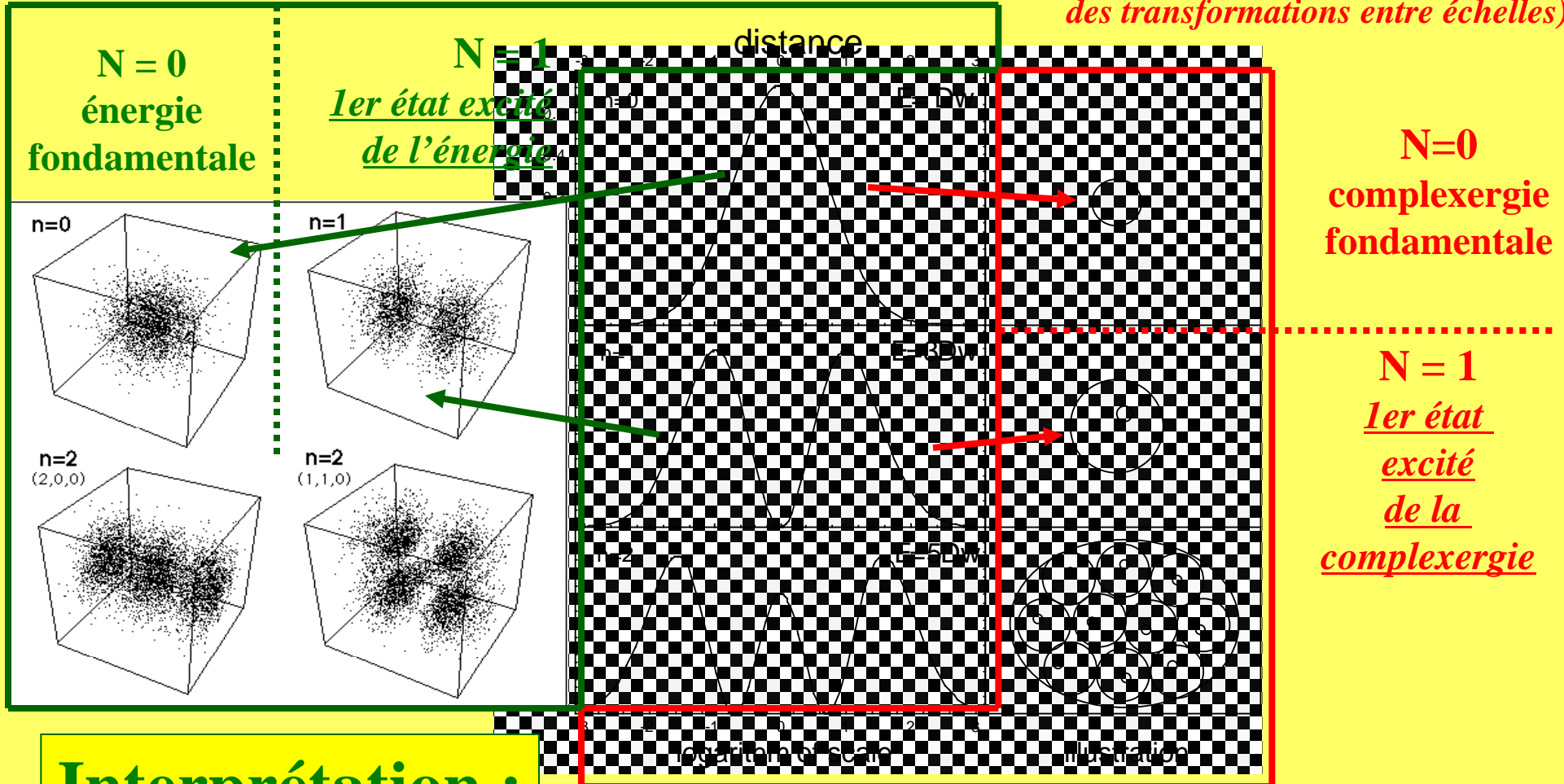
L'ORIGINE DE LA VIE ?

dans l'espace standard

# R.E. : Mécanique quantique

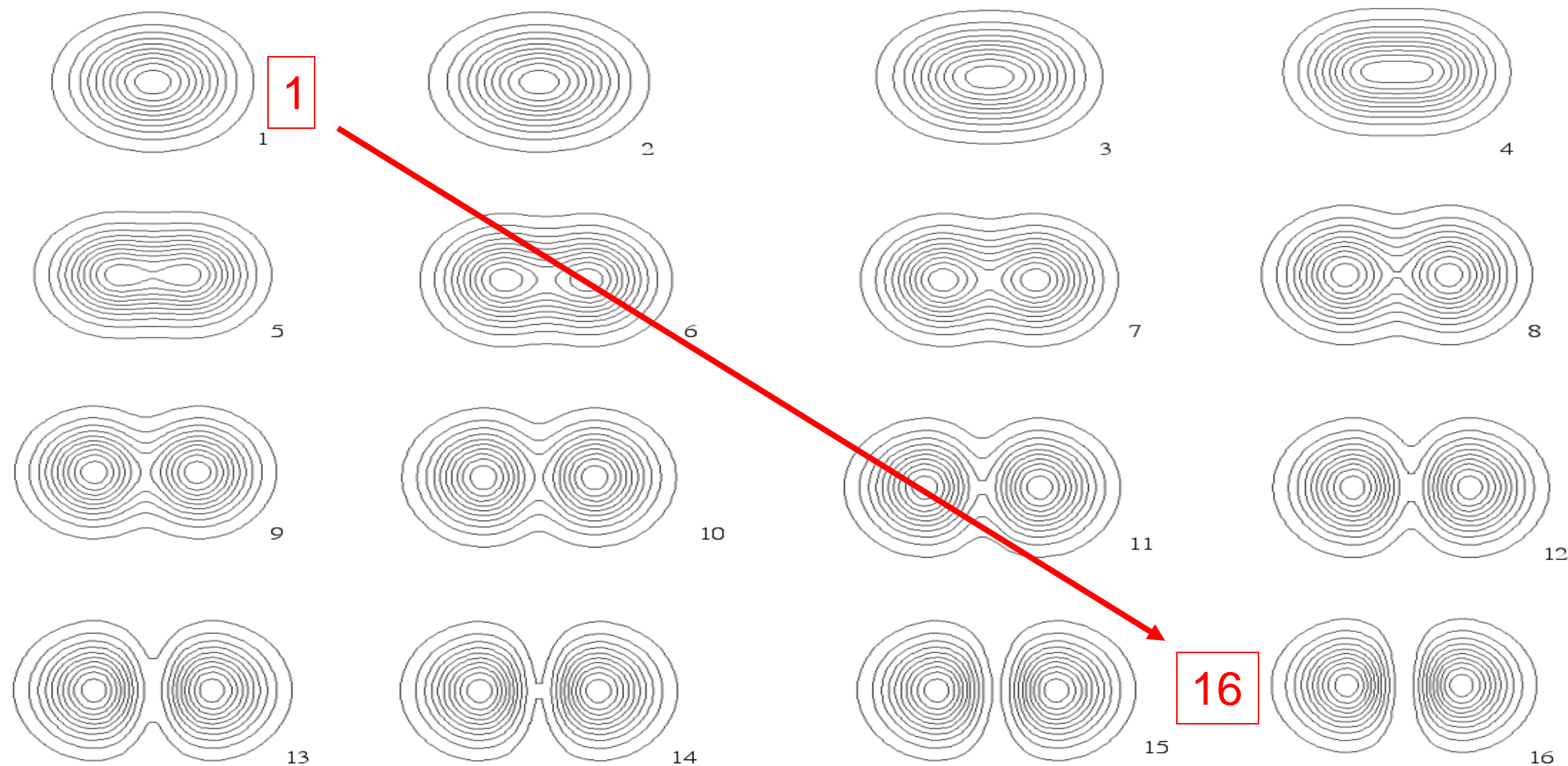
dans l'espace des échelles

(espace des résolutions ou zooms des transformations entre échelles)



**Interprétation :**  
*duplications*

**Interprétation :** *niveaux simultanés hiérarchiques emboîtés (fractals)*



Solution d'une équation de Schrödinger dépendante du temps ( $t = 1$  à  $16$ ), pour un saut d'énergie depuis l'état fondamental (un objet simple) jusqu'à un état dédoublé (premier niveau excité). Les niveaux initial ( $t = 1$ ) et final ( $t = 16$ ) sont stables (solutions de l'équation indépendante du temps), **mais il n'y a pas de solution stationnaire entre ces deux niveaux**, si bien que **le système est forcé de passer, spontanément, par un saut, du premier au second lorsque l'énergie augmente.**



## 2- Solution de « l'équation de Schrödinger généralisée »

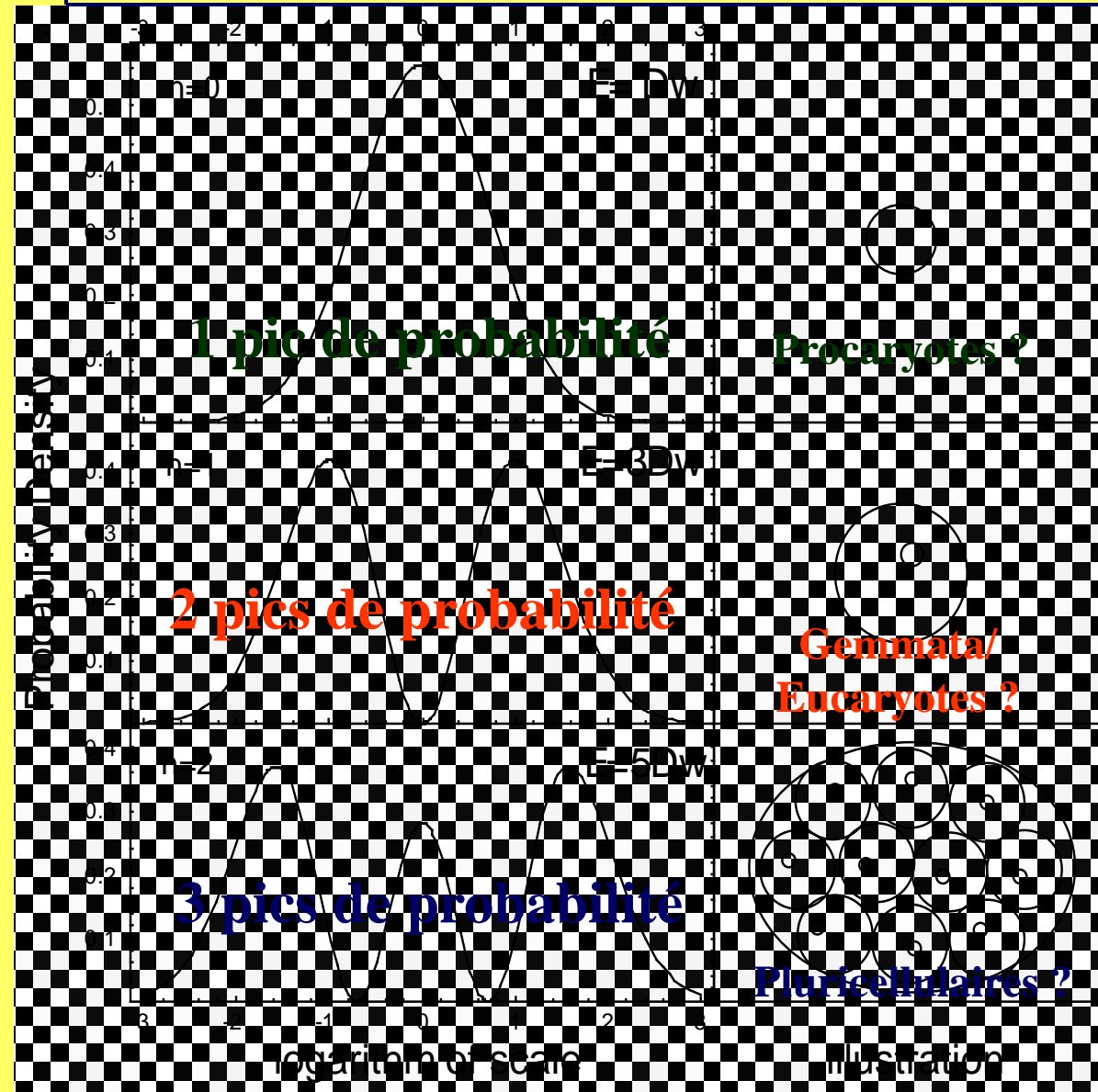
||  échelle (agissant dans l'espace des échelles),

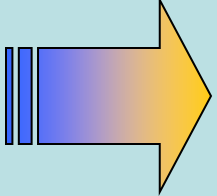
correspondant à un potentiel d'oscillateur harmonique.

Des systèmes de «*complexergie*» croissante correspondent à « un nombre croissant de niveaux hiérarchiques imbriqués » comme dans les premières étapes de l'évolution :

- 1- *procaryotes*,
- 2- *eucaryotes*,
- 3- *pluricellulaires* ...

(d'après Nottale, 2004)





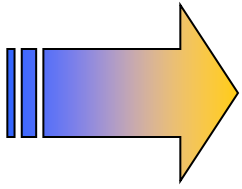
## Une autre application de l'équation de Schrödinger généralisée : *la morphogenèse d'une structure florale...*

Solution d'une « *équation de Schrödinger généralisée* » décrivant un *processus de croissance à partir d'un centre avec brisure de symétrie haut-bas et force constante vers le bas*. Les pétales, sépales et étamines émergent tous de la même solution et sont tracés suivant les *angles de probabilité maximale* (d'après Nottale, 2001).

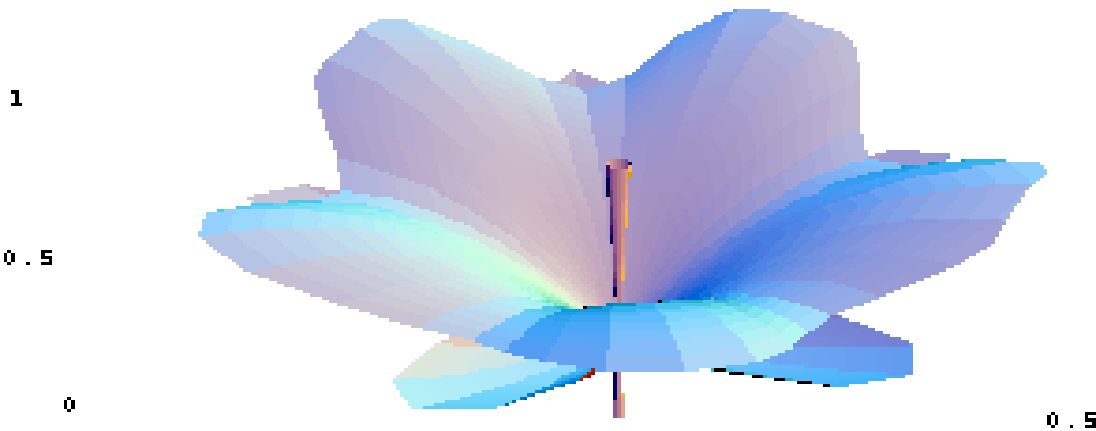


*La quantification des fleurs prend en compte les mouvements angulaires, un flot de rotations...*

identifiée comme *Liriodendron tulipifera* (le tulipier)



# Une autre solution de l'équation de Schrödinger généralisée...



*Mais ici, la force constante de tension  $\alpha$  a été inversée, déterminant une courbure...*



*Platycodon (Campanulacée)*

**Solution d'une « équation de Schrödinger » décrivant un processus de croissance à partir d'un centre avec brisure de symétrie haut-bas et force constante vers le bas. Les pétales, sépales et étamines émergent tous de la même solution et sont tracés suivant les angles de probabilité maximale.**

## 8, En conclusions,

1. La *paléontologie* permet de reconstituer, grâce aux *fossiles* découverts dans un *cadre stratigraphique* de mieux en mieux daté, et *environnemental* de plus en plus précis, *l'histoire de la vie* avec ses *événements contingents* :

- les *radiations*, dépendant des niches écologiques disponibles,
- les *extinctions en masse*, résultant de l'histoire de la Terre ;

2. La *paléontologie* apporte *les preuves concrètes de l'évolution des espèces* ;

3. La paléontologie permet d'évaluer les *relations de parenté* entre les organismes par la *cladistique* et d'analyser les *relations ancêtres-descendants* en terme *d'hétérochronies du développement* ;

4. Elle précise les modalités de l'évolution : *ponctualisme et gradualisme* ;

5. La paléontologie a permis de montrer *l'existence de contraintes et de lois physiques de structuration universelles insoupçonnées (des lois du hasard)*, celles de la *Relativité d'échelle* et *l'existence de structurations fractales à toutes les échelles retenues par la sélection naturelle...*

6. Elle a montré l'existence de répartitions log-périodiques des événements évolutifs majeurs: des lois de prédictibilité à caractère indéterministe-probabiliste, celles de la mécanique quantique macroscopique... ;

7. Mais la paléontologie n'apporte rien sur les mécanismes de l'évolution que seule la **biologie** peut dévoiler. Elle **participe** avec la *génétique* et la *biologie du développement*, à *EVO-DEVO*, le nouveau stade actuel de la théorie de l'évolution...

8. La paléontologie n'a identifiée aucune finalité, ni aucun dessein intelligent dans l'histoire évolutive de la vie, comme le confirment :

a. les « *extinctions massives* » liées à la *contingence* de l'histoire de la Terre.

b. les abominables « *anomalies du développement* » résultant des *mutations au hasard* :



Anencéphalie (*Clock, Otx1-2*)



Phocomélie (*Hoxa3-Hoxd3*)



Aniridia (*Pax 6*)

c. l'existence de la « *sélection naturelle, l'implacable loi du plus fort* » ou le *hasard* joue un grand rôle.

# La mécanique de l'évolution des espèces (*EVO-DEVO*) est démontrée par des milliers d'exemples

« *le génome propose, mais le milieu dispose...* »

*Génome*

*Développement : Hox connection*

*Interactions avec  
l'environnement*

mutations  
des gènes  
au hasard

gène architecte  
*Hox*  
gène ouvrier



changement de plan  
d'organisation  
changement de  
caractère



nouvelle (s)  
fonction (s)

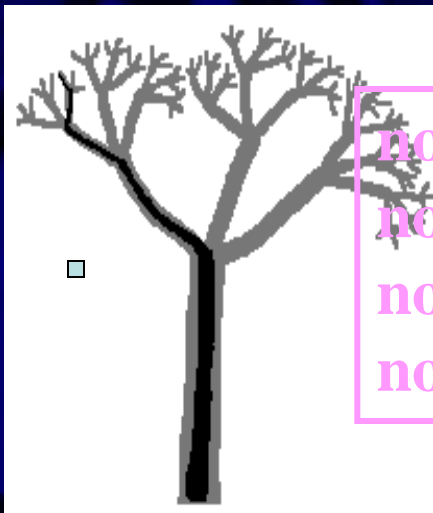


sélection  
naturelle

nouvel embranchement,  
nouvelle espèce,  
nouveau (x) caractère (s)  
nouvelle (s) adaptation (s)

résultat  
neutre, ou  
favorable  
= *survie*

résultat  
défavorable  
= *extinction*



# La mécanique de l'évolution des espèces (*EVO-DEVO*)

est démontrée par des milliers d'exemples

« *le génome propose, mais le milieu dispose...* »

*Génome*

*Développement : Hox connection*

*Interactions avec l'environnement*

mutations des gènes au hasard

gène architecte *Hox*  
gène ouvrier



changement de plan d'organisation  
changement de caractère



nouvelle (s) fonction (s)

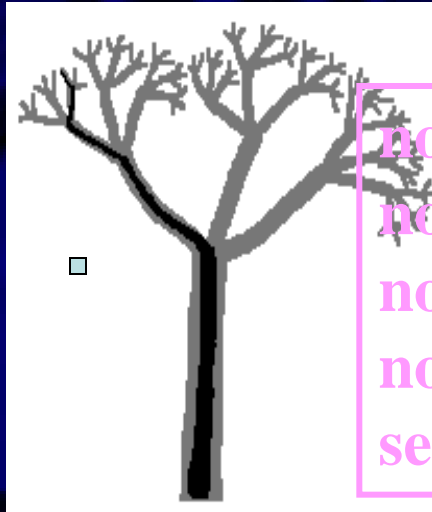


sélection naturelle

résultat défavorable = *extinction*

résultat neutre, ou favorable = *survie*

nouvel embranchement, nouvelle espèce, nouveau (x) caractère (s), nouvelle (s) adaptation (s) selon l'échelle...



Le seul « *dessin intelligent* » de l'Evolution,  
c'est celui de Pierre-Yves Trémois

QuickTime™ et un  
décompresseur TIFF (non compressé)  
sont requis pour visionner cette image.

**MERCI DE VOTRE  
MERCII DE VOTRE  
ATTENTION**



**BIOGEOSCIENCES**

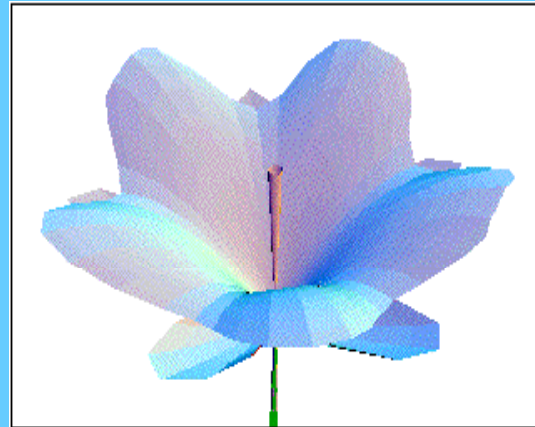


Pour en savoir plus

NOTTALE, CHALINE & GROU

## Des fleurs pour Schrödinger

La relativité d'Einstein  
et ses applications



ellipses