

Les origines de la vie sur terre et l'évolution?

Philippe Gonzalo
 Université de Saint-Etienne
 Conférence Université pour Tous
 21 novembre 2019

L'unité du monde vivant

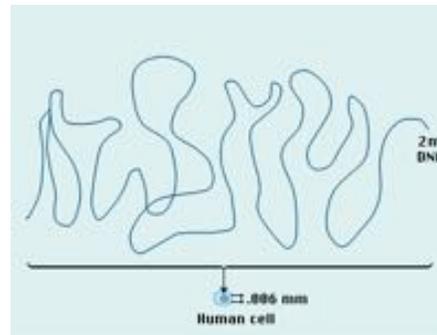
- Origine et évolution de la vie: témoignages géologiques
- Origine commune et évolution de la vie:
 - attestée par l'arbre phylogénétique
 - explique la similarité de tous les grands processus biologiques (les « dogmes »).

Une question: qu'est-ce qu'être vivant ?

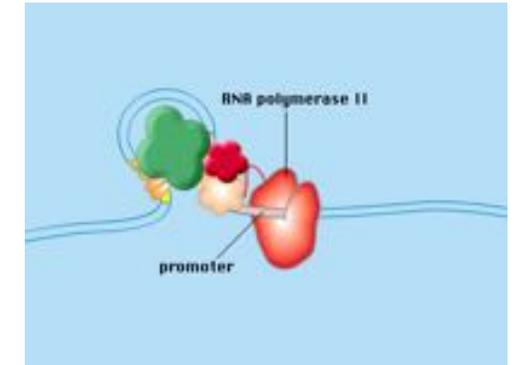
- Réaliser des réactions chimiques avec une grande vitesse et une grande efficacité: catalyse biologique = enzymes
- Etre capable de se reproduire (diviser) de façon autonome: dogme transmission information génétique (ADN -> ARN -> protéines)
- (Les enzymes sont des protéines)

Enzyme	1/2 vie	(k_{cat}) (s^{-1})	(ms)	(k_{cat}/k_{un})
OrotidineMP-DC	78 000 000 ans	39	25,6	$1,4 \cdot 10^{17}$
C-peptidase A	7,3 ans	578	1,7	$1,9 \cdot 10^{11}$
Cétostéroïde isomérase	7 sem.	66 000	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{11}$
Trisose P isomérase	1,9 jrs	4 300	0,2	$1,0 \cdot 10^9$
Chorismate mutase	7,4 h	50	20	$1,9 \cdot 10^6$
Anhydrase carbonique	5 s	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^6$

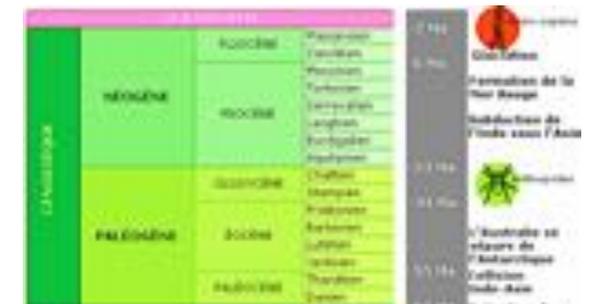
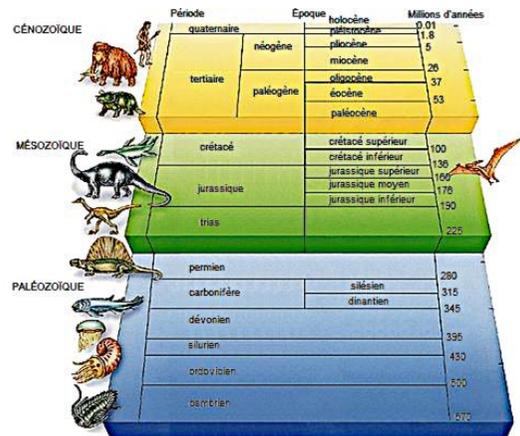
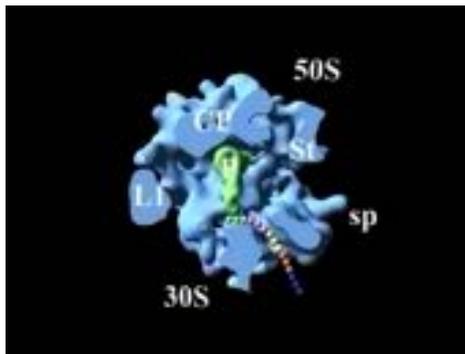
L'ADN, le livre dans lesquels sont écrits nos gènes

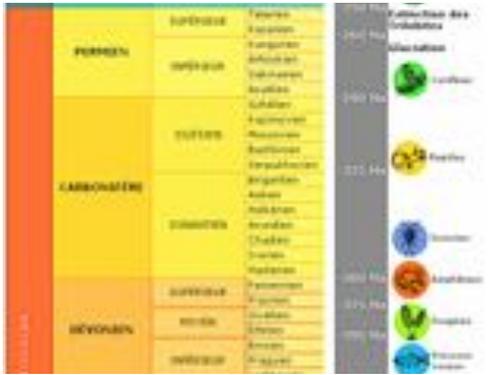


La transcription, la lecture des gènes



La traduction: la synthèse des protéines

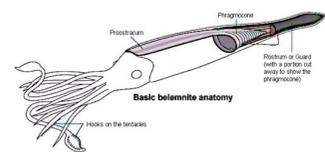




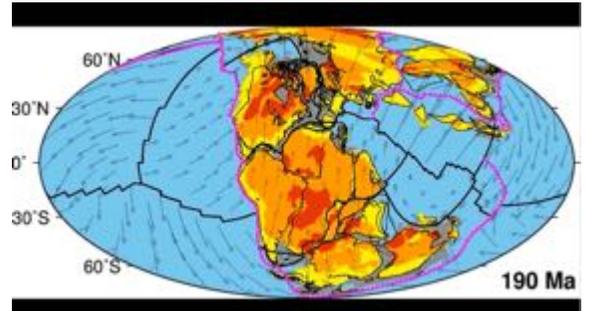
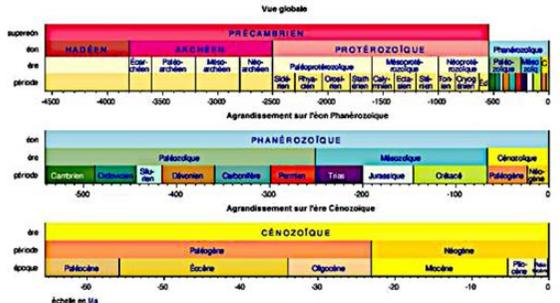
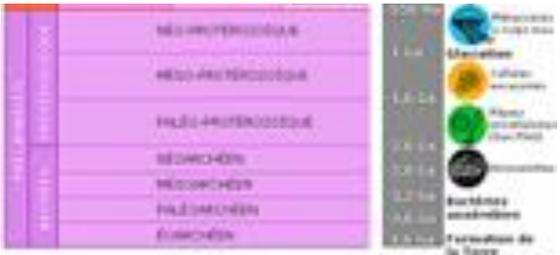
Cambrien: trilobites
Groupe d'Arthropodes éteints



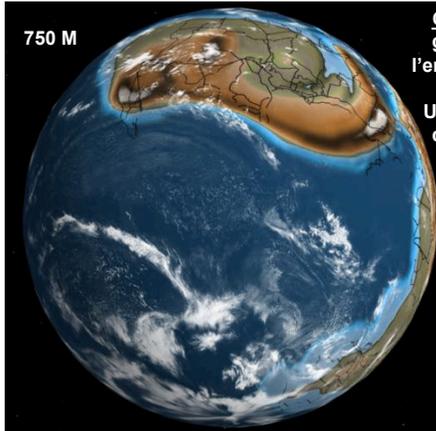
Belemnites → Calamars



450 Ma : limules (horse-shoe crabs) : arthropodes



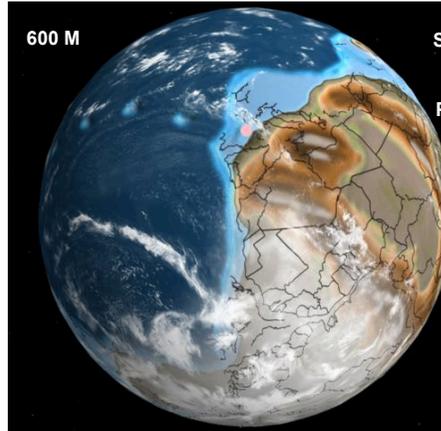
Du milieu de l'aire secondaire jusqu'à maintenant
(4% de l'histoire terrestre)



750 M

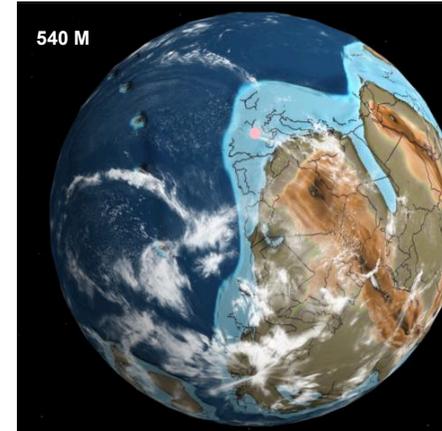
Cryoqénien:
glaciers sur
l'ensemble de la
planète.
Unicellulaires
dont algues
vertes.

Fin du
précambrien



600 M

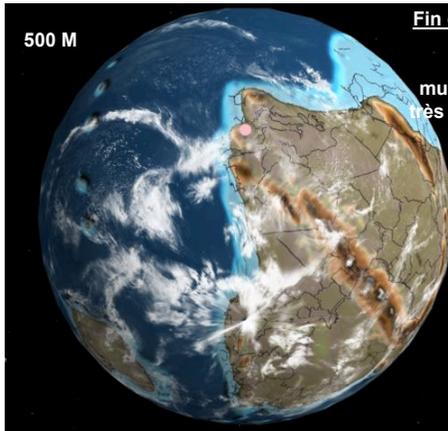
Ediacarien:
Supercontinent
Pannotia
Premiers multi-
cellulaires à
corps mou



540 M

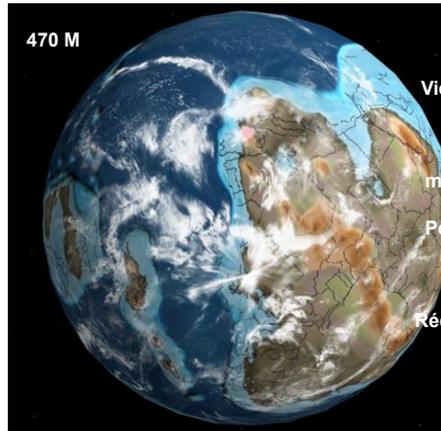
Début du
Cambrien:
après une
extinction de
masse,
explosion de
formes de vie:
Premiers
coquillages et
animaux à
exosquelettes.

Début Ère
primaire



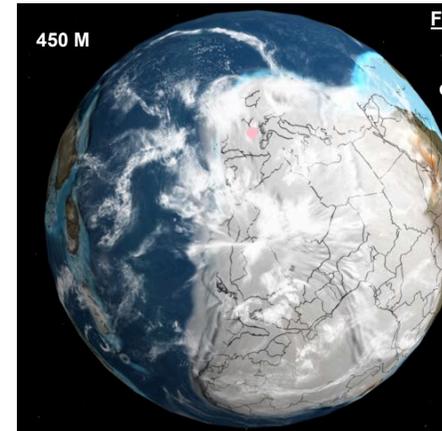
500 M

Fin du Cambrien:
Vie
multicellulaires
très abondante et
variée.



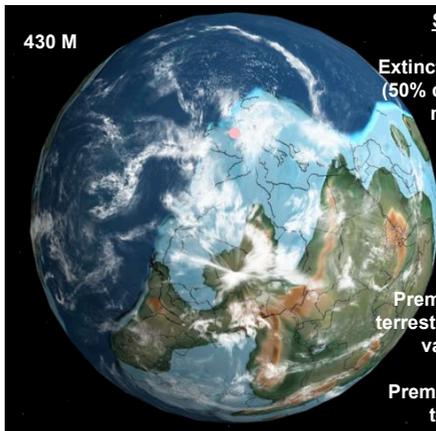
470 M

Ordovicien:
Vie uniquement
marine.
Algues
multicellulaires
Poissons sans
mâchoire
(vertébrés).
Récifs corraliens.



450 M

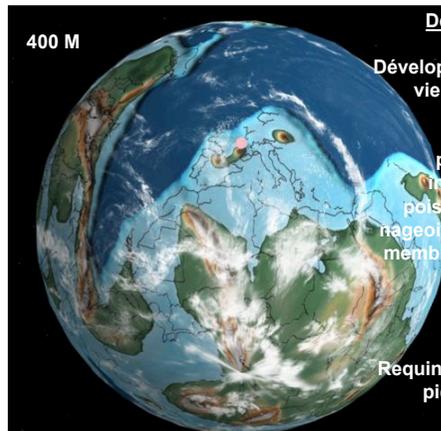
Fin Ordovicien:
Début d'une
extinction de
masse



430 M

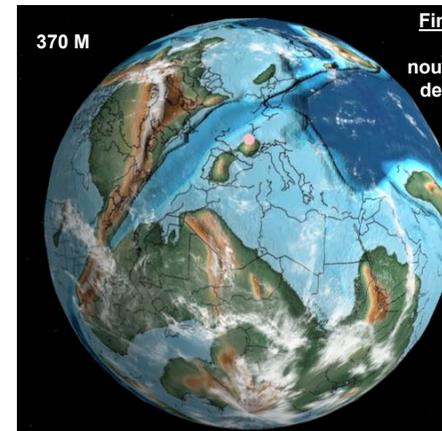
Silurien :
Extinction de masse
(50% de la diversité
naturelle)

Première plantes
terrestres (racines et
vaisseaux!)
Premiers animaux
terrestres



400 M

Devonien:
Développement de la
vie terrestre:
plantes,
insectes,
poissons avec
nageoires devenant
membres (marche).
Requins, scorpions,
pieuvres...



370 M

Fin du Devonien:
nouvelle extinction
de masse en vue

340 M

Carbonifère:

Extinction de masse dans la vie marine.

Mais les organismes terrestres s'adaptent. Racines plus fortes, plantes plus hautes: la concentration d'oxygène augmente.

Premiers reptiles.

300 M

Fin du Carbonifère:

Concentration d'oxygène maximum (> 30%)

Insectes géants

Meganeura : empreinte fossile C'est dans une mine de charbon de l'Allier, en France, que ce spécimen de libellule géante fossile a été découvert au XIXe siècle. Il fait partie des insectes gigantesques qui peuplaient la Terre durant le Carbonifère, il y a 300 Ma. Sur l'illustration, le bloc de schiste dévoile l'empreinte bien conservée d'un méganeura dont l'envergure est de 75 centimètres. Ce spécimen est apparenté aux libellules et aux demoiselles actuelles.

280 M

Permien:

Formation du supercontinent Pangée

Amphibiens et tétrapodes se développent avec plantes terrestres.

Vie marine luxuriante

260 M

Fin du Permien:

Début de la plus grande extinction de la vie (90% des espèces)

Disparition des plantes
-> fin des grands reptiles herbivores + nombreux insectes.

240 M

Début du Trias:

Baisse de l'oxygène avec disparition de nombreuses plantes.

Destruction des récifs coralliens qui mettront plusieurs millions d'années à se reformer

Survie des ancêtres (petits) des oiseaux, mammifères et dinosaures.

220 M

Milieu du Trias:

Redémarrage de la vie :

petits dinosaures + premiers vertébrés volants

200 M

Fin du Trias:

Préparation d'une nouvelle extinction de masse (76% espèces terrestres et marines).

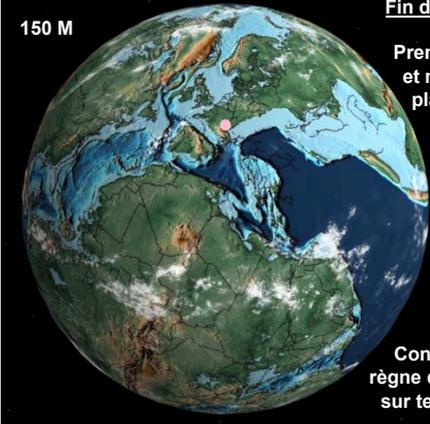
Survie des ptérosaures, crocodiles, mammifères et poissons.

170 M

Jurassique:

Règnes des dinosaures

150 M

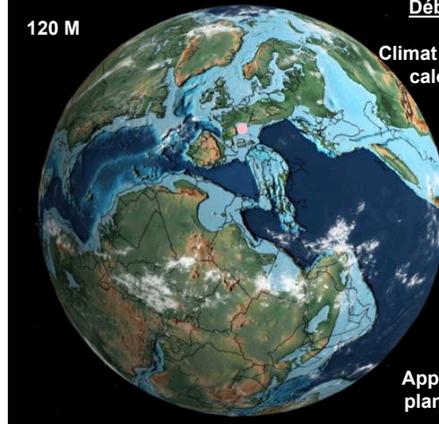


Fin du Jurassique:

Premiers lézards
et mammifères
placentaires.

Continuation du
règne des dinosaures
sur terre, mer et air.

120 M

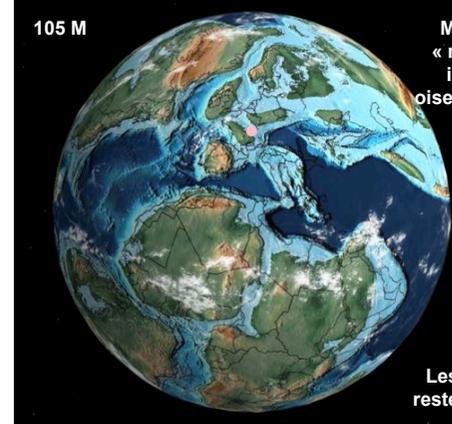


Début Crétacé:

Climat chaud et sans
calotte polaire.

Apparitions des
plantes à fleurs.

105 M

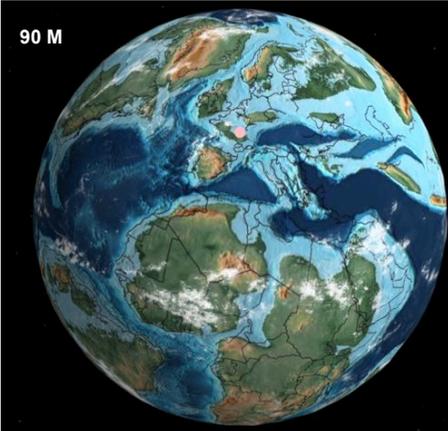


Crétacé:

Mammifères
« modernes »,
insectes et
oiseaux émergent.

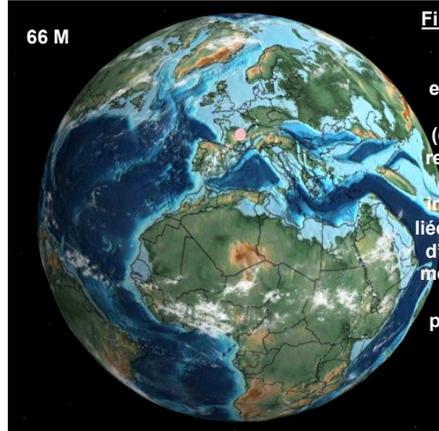
Les dinosaures
restent dominants.

90 M



Crétacé:

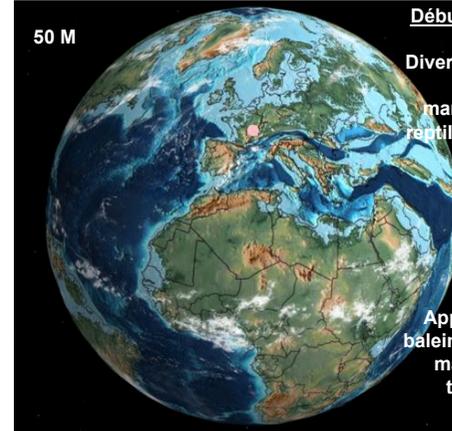
66 M



Fin du Crétacé:

Nouvelle
extinction de
masse
(dinosaures,
reptiles marin
et volants,
invertébrés...)
liée à la collision
d'une énorme
météorite dans
l'actuelle
péninsule du
Yucatan.

50 M

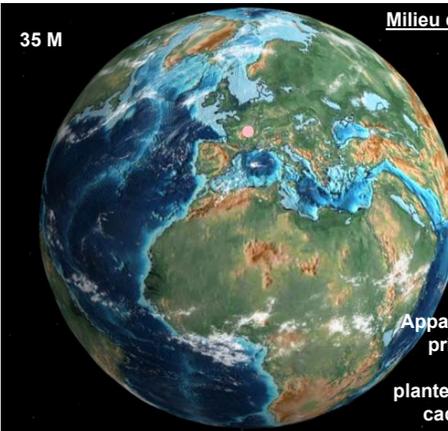


Début du tertiaire:

Diversification des
oiseaux,
mammifères et
reptiles survivants.

Apparition des
baleines à partir de
mammifères
terrestres.

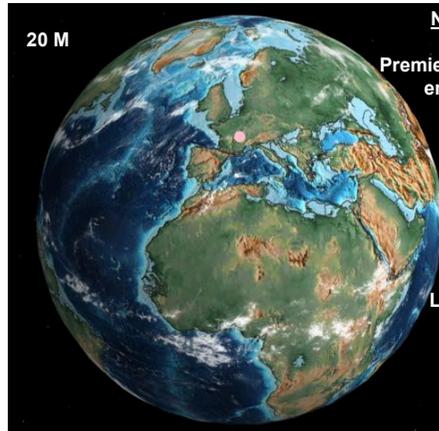
35 M



Milieu du Tertiaire:

Apparition des
primates
Et
plantes à feuilles
caduques.

20 M

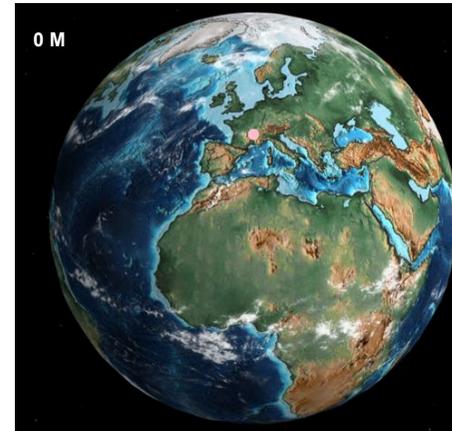


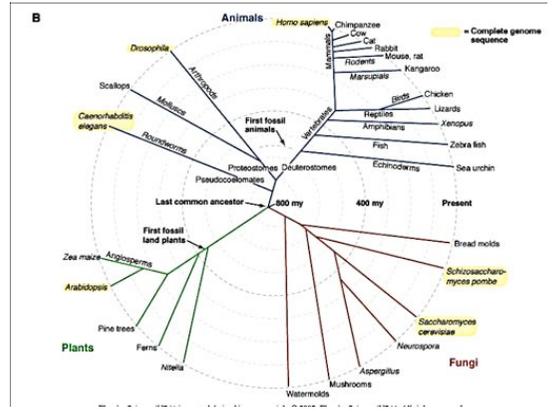
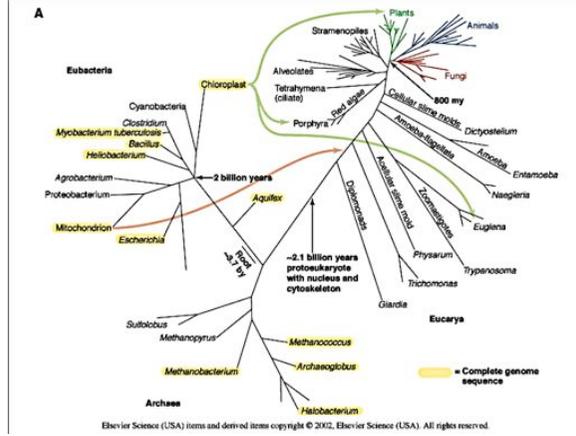
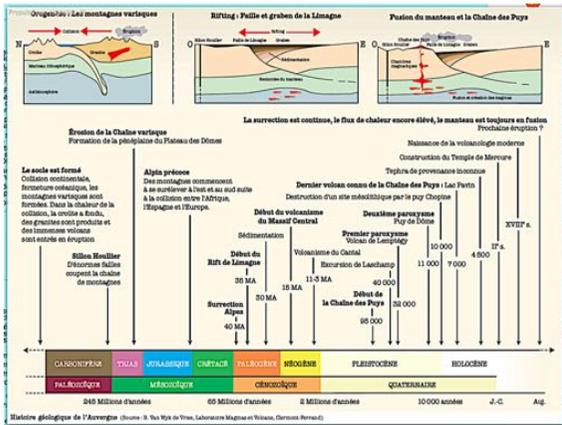
Néocène:

Premiers hominidés
en Afrique

Les Alpes sont
présentes
mais pas les
volcans
d'Auvergne

0 M





Origine et évolution de la vie

- unité profonde des mécanismes fondamentaux (les dogmes): un ancêtre commun disparu (Luca)
- Terre 4,6 Ga – Vie ≈ 4 Ga
- 1^{er} micro-organismes: # 1000 gènes => familles de gènes apparentés en commun
- 3 règnes (Eubact – Archaeabact - Eucaryotes) ayant des membres vivant dans des conditions extrêmes (113°C --> -2°C)
- Evolution: duplication + mutation + sélection +perte de gènes non nécessaires
- Mycoplasma genitalum: 470 gènes (parasite)
- Levure: 6144 (400 de moins que son prédécesseur)
- Homme: perte gènes synthèse aa essentiels (gardés 3 Ma)

Uri Alon, Nature (29 March 2007) Simplicity in biology

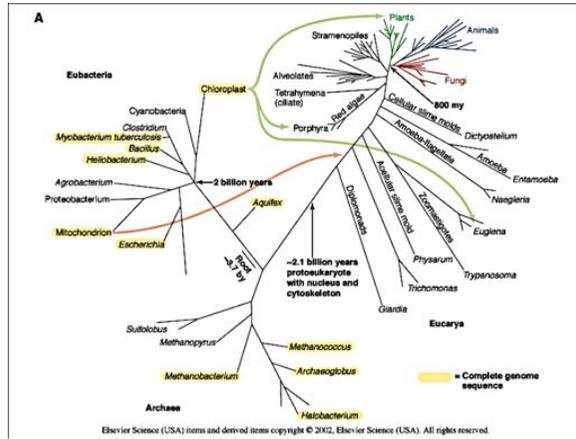
“The point I wish to make is not that biology is simple, but that biological networks of interactions are simpler than they might have been. There seems to be a degree of simplicity in several aspects of these networks, which is intriguing given that cells evolved to survive, and not for scientists to understand.”

Éléments principaux tous conservés

- Info génétique = ADN
- Gènes codent des protéines
- ARN intermédiaires entre les 2
- Catalyseurs = protéines (ARN)
- Protéines produites / ribosomes
- ATP = transporteur universel d'énergie
- Cellule isolée par membrane de phospholipides. contenant des pompes, canaux et transporteurs.

Eu- et Archae -bactéries

- Divergence précoce
- Apparue dans un monde avec atmosphère riche en CO₂, sans O₂ et soumise à des rayons ionisants
- Vie en eaux chaudes et utilisation H₂ comme source d'énergie (vie primitive ?)
- Archae proches Eucaryotes pour transcription et traduction
- Autres caractéristiques: Archae proches des bactéries
- Eubactéries: origine photosynthèse / chlorophylle → production O₂
- Eubactéries: origine phosphorylation oxydative → utilisation O₂ pour produire ATP.



L'Hadéen

- Période de la formation et à la stabilisation de la Terre primitive.
- 4,568 à 4,4 Ga, la période de l'océan magmatique et de la différenciation du noyau métallique.
- 4,4 à 4,00 Ga, proto-croûte continentale.
- Les océans ont commencé à se former dès que la température de surface est devenue inférieure à 350 °C. Cette opération était terminée à - 4 300 Ma.
- À - 4 300 Ma, la présence d'eau dans les magmas basaltiques a fait apparaître des roches de type granitique.

Origine de la vie: l'Archéen

- Éoarchéen (-3800 à -3600 Ma) : apparition supposée des procaryotes
- Paléoarchéen (-3600 à -3200 Ma) : plus ancienne forme de vie connue (bactérie de 3460 Ma d'âge)
- Mésoarchéen (-3200 à -2800 Ma): existence avérée de stromatolithes;
- Néoarchéen (de -2800 à -2500 Ma).

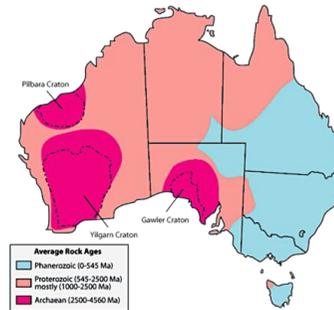
En fait, une origine de la vie qui ne fait que reculer: stromatolithe du Groenland - 3,7 milliards d'années

Nature 537, 535–538 (22 September 2016). Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures

La difficulté: trouver des sols aussi anciens que la date d'apparition de la vie (Groenland, Bouclier canadien, Australie et Afrique du sud)



Stromatolithe fossile



Stromatolithes actuels



Les stromatolithes se forment en eaux peu profondes. Ces roches sont construites par des bactéries qui se protègent des agressions et de la dessiccation via un biofilm qui fixe des sédiments minéraux. Leur existence démontre des formes de vie très sophistiquée: résistances aux UV notamment. Les stromatolithes ont piégés des quantités considérables de CO₂. Les stromatolithes actuels sont devenus rares (bactéries extrémophiles).

- Avant -3 500 Ma, le relargage d'oxygène libre (O₂) n'a initialement eu qu'un impact limité sur l'écologie des océans et de l'atmosphère.
- Suite de la photosynthèse cyanobactérienne, il y a eu une augmentation de la concentration d'oxygène libre dans l'océan.
- Le fer ferreux (Fe²⁺) et métallique (Fe₀) ont pu être oxydés en fer ferrique (Fe³⁺) et précipiter sous forme de magnétite et d'hématite jusque vers -2400 Ma environ.
- La concentration en O₂ a alors augmenté dans les océans, puis dans l'atmosphère.

Les gisements de fer rubané: témoins de "la grande oxydation"

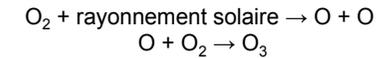
- Les gisements de fer rubané = roches sédimentaires très riches en fer (au moins 15 %).
- 90 % du minerai de fer exploité dans le monde.
- Majoritairement archéen: **de -3,8 à -2,0 Ga**.
- Formés partout dans le monde au même moment

Bloc de fer rubané daté de -2,1 milliards d'années
Amérique du Nord



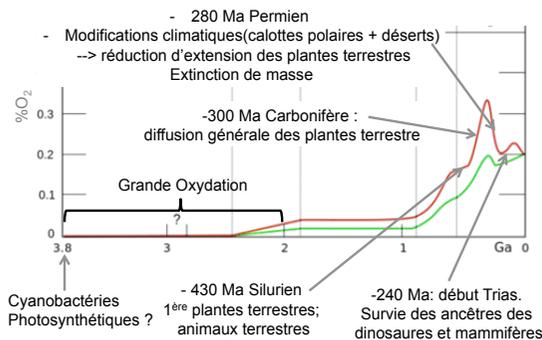
Création de la couche d'ozone par l'oxygène atmosphérique

- Au delà de quelques % d' O₂ atmosphérique, il se forme de l'ozone:



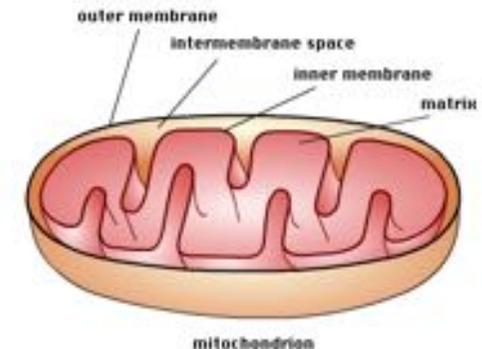
- Cette réaction de formation est en équilibre avec la destruction spontanée de O₃
- Ainsi, la présence d'oxygène dans l'atmosphère génère de l'ozone qui filtre UV et rayons ionisants, ce qui permet le développement des formes de vie en surface de la terre.

Evolution [O₂] dans l'atmosphère



Les cyanobactéries à l'origine de la vie moderne

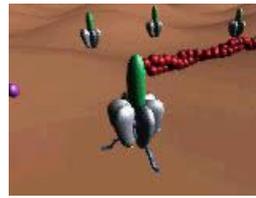
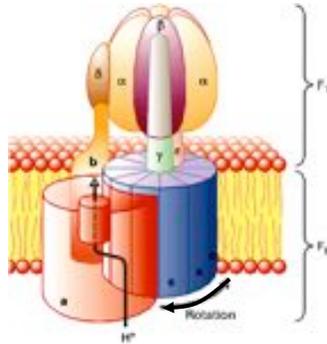
- Cyanobactéries: production de sucres et d'oxygène / photosynthèse;
 $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$
- Fixation du CO₂ et fabrication de biomasse.
- Fabrication d'O₂, puis O₃ -> filtration des rayons ionisants -> vie en surface -> utilisation des sucres pour produire de l'ATP (glycolyse anaérobie à bas rendement).
- Création des mécanismes de lutte contre le stress oxydatif
- Utilisation de l'oxygène pour produire de l'ATP à haut rendement (phosphorylation oxydative: bactéries aérobies)



Turbine à protons: l'ATP synthase (ATPase F0/F1)

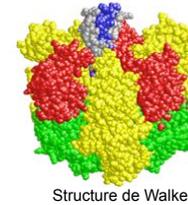
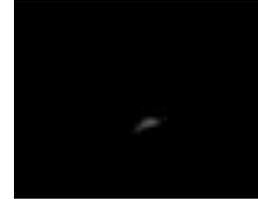
F1: matrice
 $\alpha_3\beta_3\gamma\delta\epsilon$
 $c\gamma\epsilon$ = rotor
 $\alpha_3\beta_3\delta ba$ = stator

F0: canal à H⁺
 = a, b, c + 2-5 peptides (couplage avec F1)
 c contient ASP (transporte H⁺)



Expérience de Yoshida

Production d'ATP en présence d'oxygène
 Un processus à haut rendement



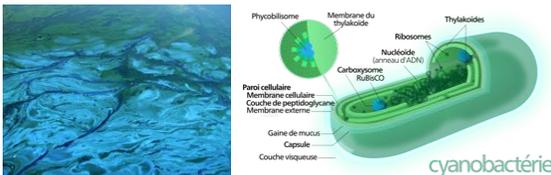
Structure de Walker

Accès à la lumière nécessite survie en présence de rayons ionisants

- Les rayonnements sont très mutagènes.
- L'ADN est très fragile pendant la réplication (division cellulaire).
- Solution trouvée = horloge circadienne:
 - couplage de la réplication et de la division cellulaire avec la nuit / transformation d'une protéine de réparation de l'ADN en facteur de transcription
 - Croissance et production d'énergie pendant le jour

Les cyanobactéries

- Eubactéries ayant -3,8 milliards d'années
- Responsables de l'apparition de l'oxygène atmosphérique par photosynthèse, du piégage du CO₂ sous forme matières organiques, de carbonate de calcium, et de la désacidification des océans.



Film d'«Algues» vertes vivantes + bleues (mortes)

CRY (Cryptochrome) : la protéine qui nous a donné la lumière

- Les radiations induisent des lésions de l'ADN d'autant plus complexes à réparer qu'elles surviennent pendant la réplication.
- Les cyanobactéries ont développé CRY, une protéine bi-fonctionnelle **qui utilise la lumière bleue** (300-500 nm) pour réparer les lésions à l'ADN photo-induites par les UV autour de 200 à 300 nm (dimères de thymines): **activité DNA photolyase**.
- Cette flavoprotéine a aussi évolué pour devenir un **répresseur transcriptionnel** qui, entre autres, synchronise le cycle cellulaire pour bloquer la réplication durant le jour.
- C'est aussi le **photorécepteur de l'horloge circadienne**.

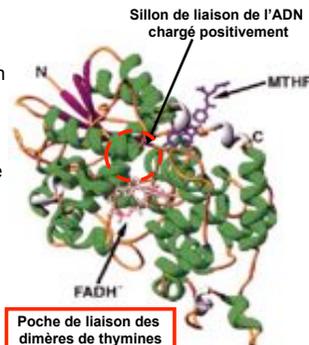
Cry est une protéine conservée des eubactéries aux animaux et aux plantes.



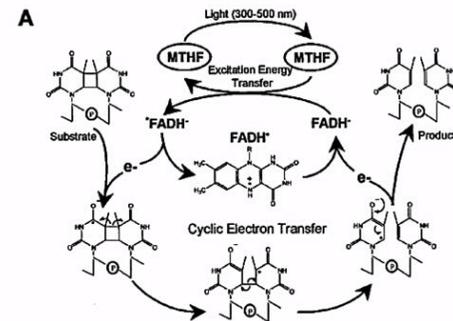
Figure 1. Sequence alignment of Type I photolyase family members. Cry1 and Cry2 from mouse, (6-4) photolyase from *Drosophila melanogaster*, *E. coli* photolyase, and *Arabidopsis* Cry2 are shown. Colors: yellow, identical; blue, most frequent; pink, strongly similar; green, weakly similar.

CRY est une flavoprotéine très originale comportant 2 groupements de capture de la lumière

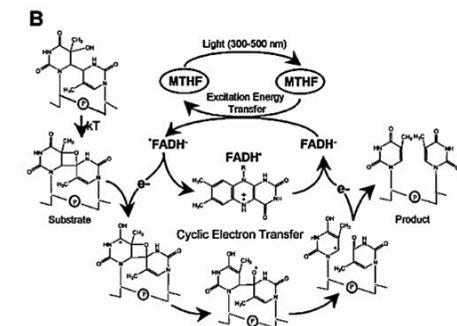
- FADH: Flavine Adenosine Nucléotide = **donneur d'électron** dans la réaction de photo-réparation
- Une Pterine, comme le Méthylène Tétrahydrofolate, un dérivé de l'acide folique (vit B9), qui **absorbe la lumière bleue** et excite le FADH par un transfert non radiatif d'énergie de fluorescence (FRET).



Réparation par photolyse des dimères de thymines type cyclobutane (70 -80% des produits de réaction avec UV)

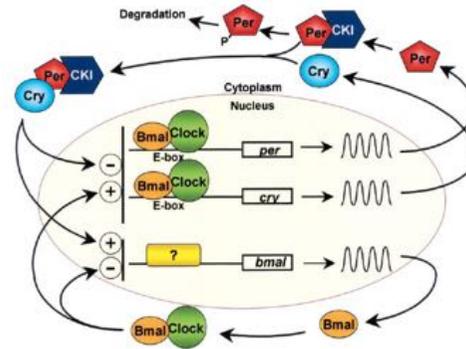


Réparation par photolyse des dimères de thymines de type pyrimidone-pyrimidine [6-4] (20 -30% des produits de réaction avec UV)



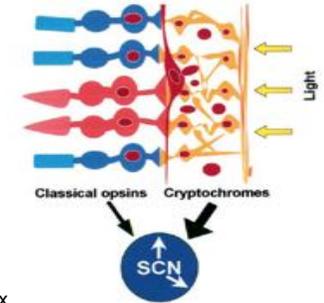
CRY et le fonctionnement de l'horloge circadienne

- Les gènes de réponse à l'horloge circadienne comportent une **E-Box** qui est:
 - activée par le dimère **Bmal / Clock**
 - réprimée par le dimère **Cry / Per** (period).
- L'expression de ces gènes est elle-même régulée par la même boucle de régulation transcriptionnelle.
- La **dégradation de Cry est directement induite par l'exposition à la lumière** chez les bactéries
- Parmi les gènes de réponse chez l'homme, l'ADH qui régule le volume urinaire, ou la mélatonine qui régulerait le sommeil, ou le cortisol qui régule le métabolisme énergétique ...



Remise à l'heure de notre horloge circadienne

- Les cryptochromes situés dans la **rétilne** transmettent une signalisation jour /nuit au **noyau supra chiasmatic** (partie de l'hypothalamus et siège de l'horloge centrale) et participent à son recalage.
- Ils ne **sont pas impliqués dans la vision** et la signalisation ne transite pas par les mêmes faisceaux nerveux



Conclusions

- La vie sur Terre est très ancienne.
- Moins de 500 Ma après la formation des océans, il y avait déjà des bactéries photosynthétiques suffisamment sophistiquées pour survivre dans un milieu très hostile.
- Elles ont converti le CO₂ en oxygène, lequel a créé la couche d'ozone, rendant la surface de la Terre habitable.
- L'oxygène était un toxique contre lequel les êtres vivants ont appris à lutter (stress oxydatif).
- L'oxygène est ensuite devenu un composé essentiel pour la production d'ATP (OXPHOS).
- On trouve des témoignages géologiques de ces processus.
- On en trouve aussi des traces biologiques dans la descendance de ces gènes, dont le gène CRY de l'horloge biologique, tout à la fois gène de réparation de l'ADN et facteur de transcription.