

LE GRAND ROMAN DE LA TERRE



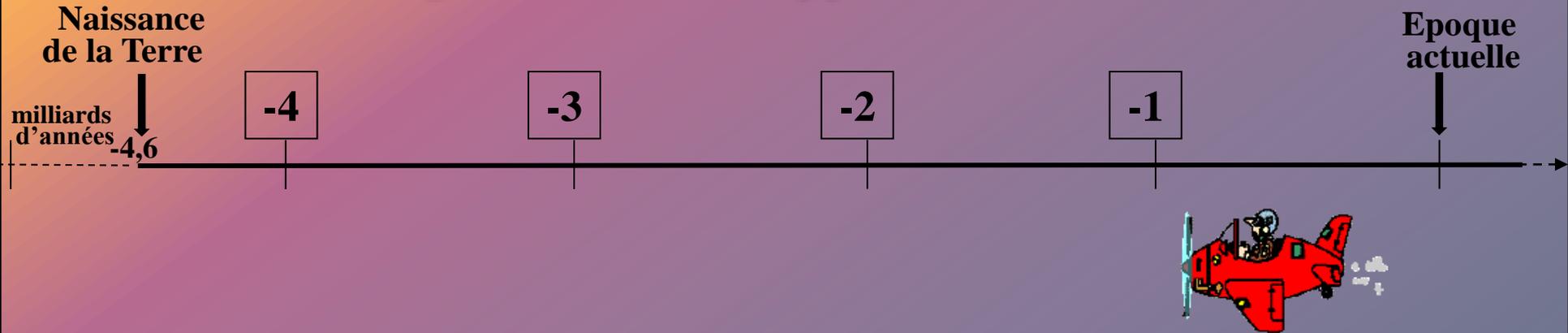
Origine de l'eau et apparition de la vie

16 janvier 2023

Jean-Luc BOISSEL

LE GRAND ROMAN DE LA TERRE

Origine de l'eau et apparition de la vie



Une naissance violente → Une lente transformation → Un équilibre fragile

1. Une naissance violente

L'origine de la Terre : les poussières d'étoiles

Où se situe l'histoire ?

Nous sommes ici (Voreppe)

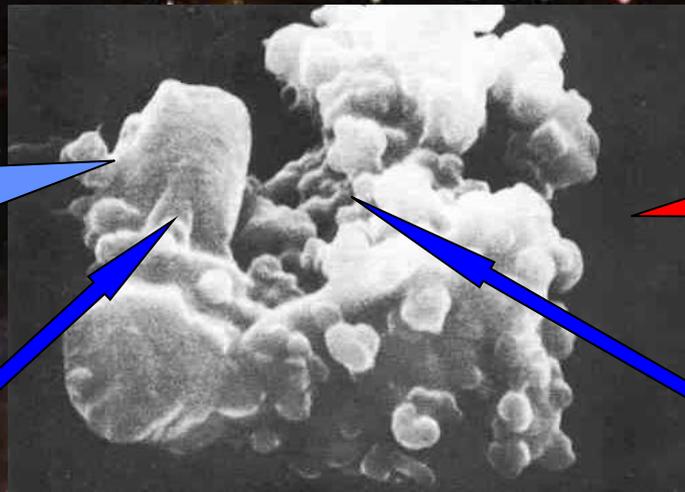
**Dès la création de l'Univers
des milliards de galaxies se forment**

Dans chaque galaxie : en moyenne 200 milliards d'étoiles
Les premières générations sont faites des seuls éléments chimiques présents :
l'Hydrogène et l'Hélium créés lors du « Big Bang »



Pendant des milliards d'années et encore actuellement,
les étoiles fabriquent tous les autres atomes : carbone, oxygène, azote, fer...
Elles les dispersent dans la galaxie en explosant en fin de vie

Les atomes créés par les étoiles se rencontrent et forment d'immenses « nuages » de gaz et de poussières dans les galaxies



Atomes légers : carbone hydrogène oxygène
associée en molécules simples
eau (H_2O) gaz carbonique (CO_2) méthane (CH_4)

Atomes lourds :
silicium (Si) fer (Fe)
aluminium (Al) ...

Action du rayonnement

Formation de molécules complexes
méthyle (CH_3SH) formol (H_2CO) alcool éthylique (CH_3CH_2OH) ...

1

4

La naissance de la Terre

Quelque part , dans une galaxie, autour d'une étoile (Soleil) en train de naître...



Ici Gaz (hydrogène, hélium...) et poussières

Pour le système solaire cela s'est passé il y a 4,6 milliards d'années

La naissance de la Terre

Formation d'un système planétaire

Détachement d'un fragment de nébuleuse : gaz + poussières

Effondrement gravitationnel de son centre : proto étoile

Rotation globale et aplatissement de l'ensemble

Formation d'un disque de matière de densité décroissante

Allumage des réactions thermonucléaires de l'étoile centrale

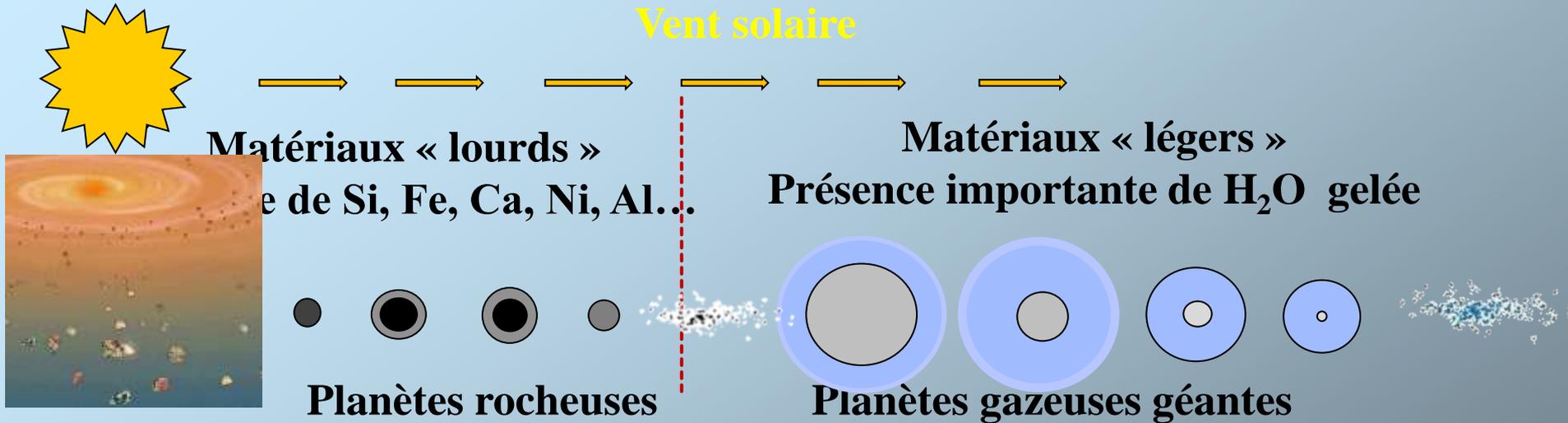
Accrétion des poussières en petits corps et planétésimales

Chocs, décalage, fusion des planétésimales en protoplanètes

Migration et stabilisation des planètes

La naissance de la Terre

- Accrétion des poussières autour de l'étoile Soleil



La Terre se forme dans cette zone sèche
Que l'on supposait dépourvue d'H₂O

Etude de 2020 des météorites (chondrites enstatites) à l'origine
de la matière terrestre : elles contiennent beaucoup d'eau !
Celle-ci était donc présente, à l'intérieur des roches
(à pression élevée) dès le début de la formation



La naissance de la Terre

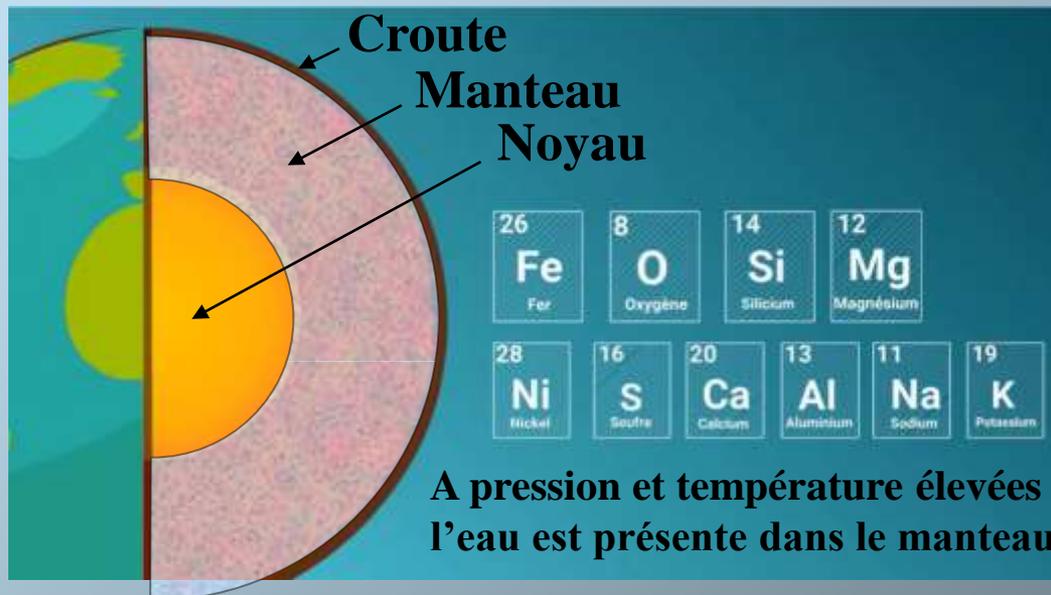
- Différenciation des éléments

A cause des chocs durant l'accrétion
les planètes rocheuses naissent chaudes
La Terre primitive est liquide, sphérique

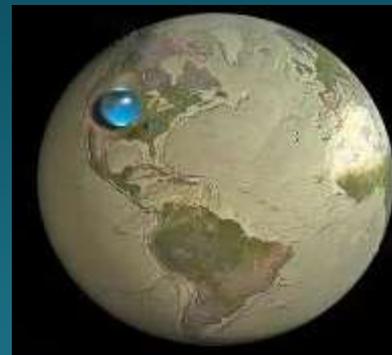
A l'intérieur, les éléments migrent :

les lourds tombent au centre (noyau ferreux)

les légers restent en surface (manteau, croute : silicates, roches...)

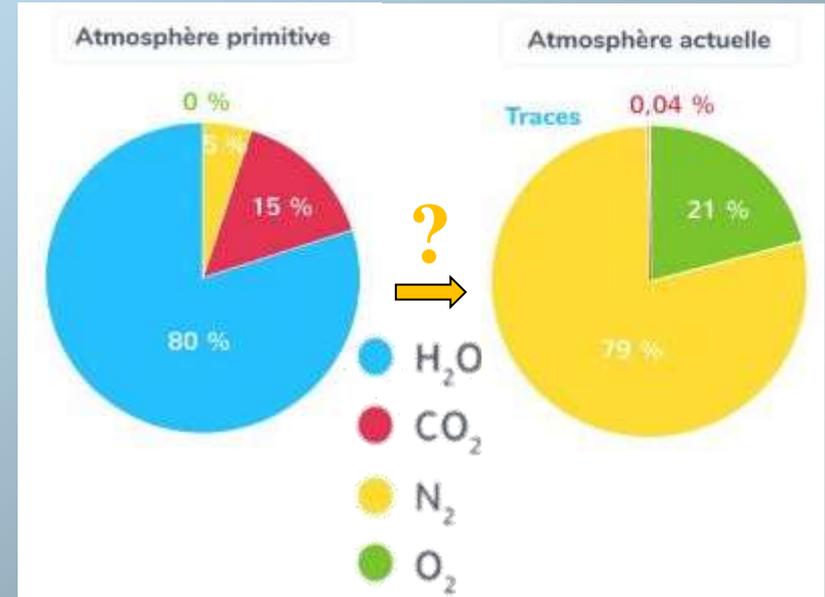


L'eau actuelle en surface
0,02% de la masse de la Terre



L'eau du manteau
1 à 10 fois l'eau en surface

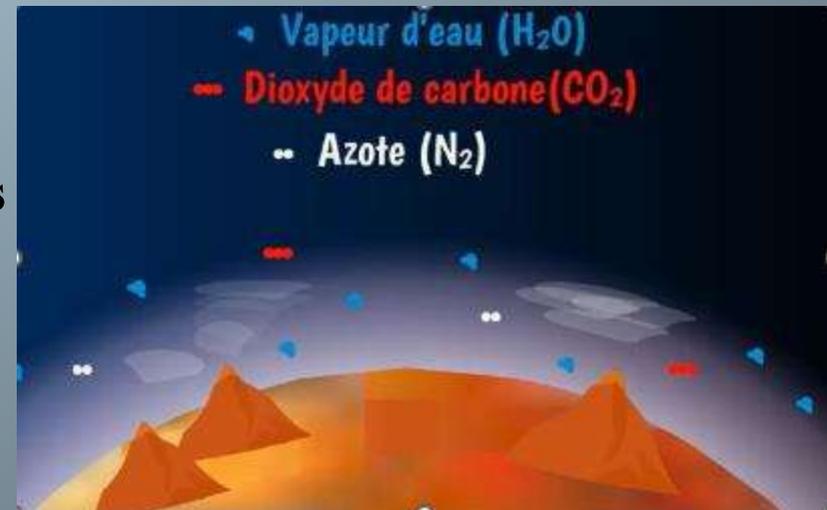
2. Une lente transformation



Formation d'une atmosphère primitive

La surface de la Terre se refroidit (croûte)

A l'intérieur (manteau) les éléments volatiles restent piégés. Le volcanisme les libère, en particulier l'eau sous forme de vapeur



Formation de l'océan primitif

- La condensation en pluies diluviennes

La surface continue de se refroidir

La vapeur d'eau de l'atmosphère
se condense en pluies intenses

Un océan primitif se forme rapidement
et couvre toute la surface de la planète

Température : 200° Pression : 100 atm





Formation de l'océan primitif

- L'apport des astéroïdes

Après la formation de la Terre il reste encore beaucoup d'astéroïdes à proximité de la trajectoire de la Terre

L'analyse chimique des astéroïdes (chondrites) et des gaz volcaniques venant du manteau montre une composition semblable, donc :

Les astéroïdes : accrétion, formation de la Terre
→ atmosphère chargée en vapeur d'eau
→ condensation en océan primitif

Les astéroïdes : après formation de la Terre
→ chute intense, grand bombardement tardif
→ nouvel apport d'eau dans l'océan primitif



Gaz chondritiques (en %)	
H ₂ O	80 ± 10
CO ₂	20 ± 10
N ₂	1 ± 5
O ₂	0

Gaz volcaniques (en %)	
H ₂ O	83 ± 3
CO ₂	12 ± 4
N ₂	5 ± 3
O ₂	0

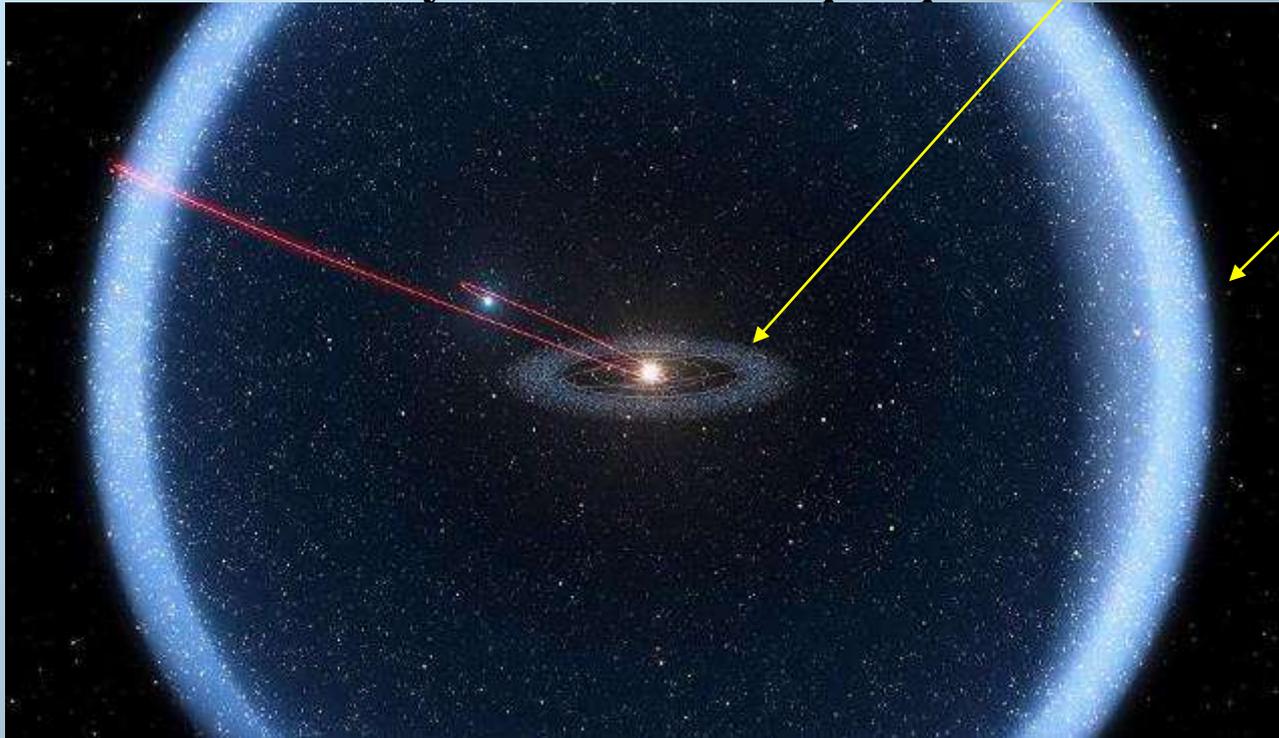




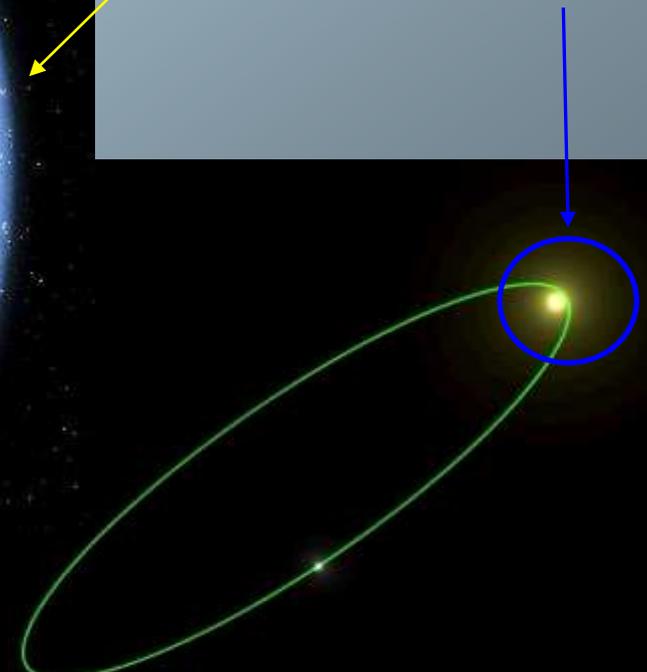
- L'apport des comètes... Une théorie contestée

Origine : Reste de la nébuleuse (des poussières) à l'origine du système solaire
La périphérie du système solaire : ceinture de Kuiper, nuage de Oort

Aspect : trajectoire très elliptique, invisible sauf à l'approche du soleil
une queue (chevelure) formée par vaporisation de la matière
le noyau solide est de quelques kilomètres de diamètre



Trajectoire
de la Terre



Composition : poussières + molécules + 80% d'eau gelée

Mais l'eau terrestre semble différente de l'eau des comètes



Les analyses de Rosetta (son module Philae 2014), de Hyakutake 1995, Hale bopp 1998 montrent cette différence :

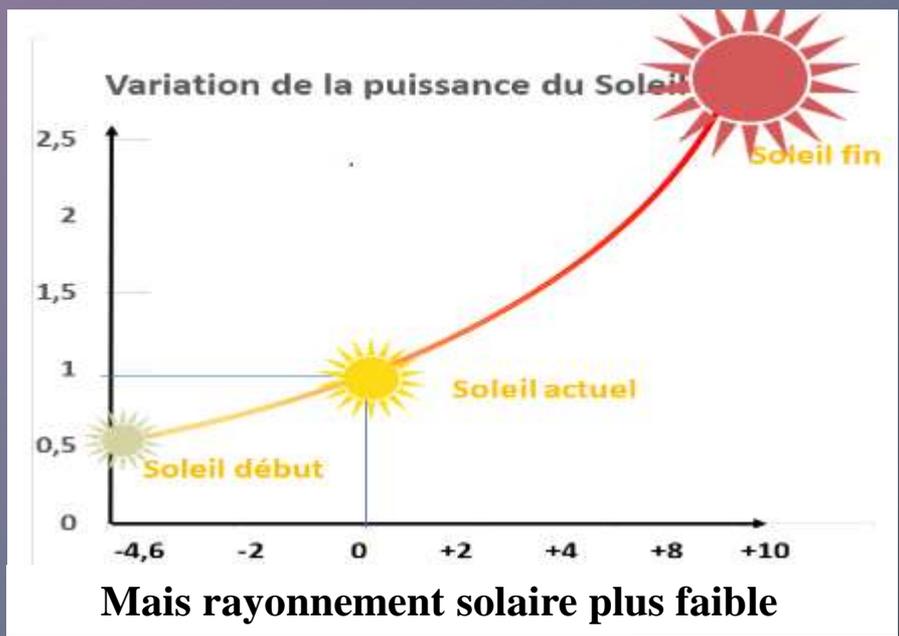
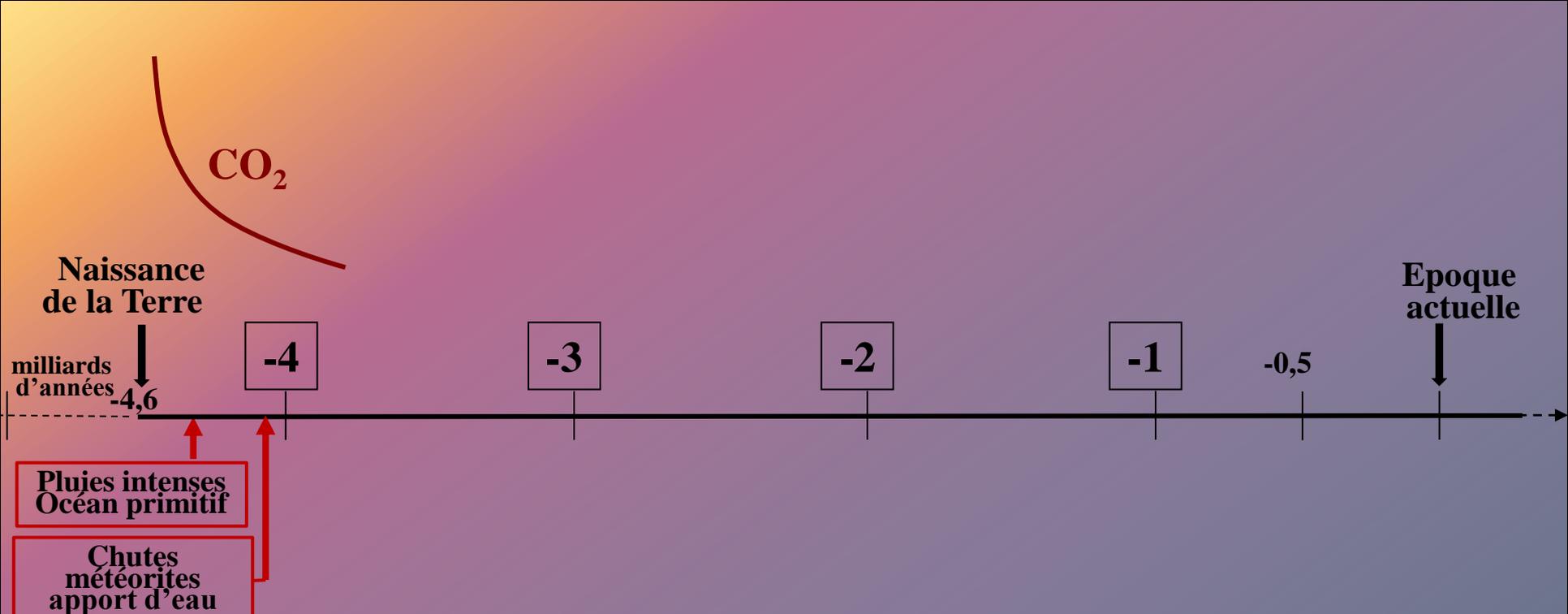
On trouve **D (comètes) 2 à 3 fois plus important **D** (terre) désaccord avec l'hypothèse de l'origine de l'eau sur Terre**

Mais on mesure un % de **D identique sur Wirtanen 2018 et d'autres comètes « actives » à courte période**

On trouve aussi des molécules à base de C H N O : acides aminés (protéines), bases azotées (ARN)... matière organique nécessaire à l'apparition de la vie

?

Des études supplémentaires sont nécessaires



L'apparition du vivant

Notre Terre il y a 3,8 milliards d'années...

Une atmosphère primitive dense (gaz carbonique, hydrogène, vapeur d'eau...)

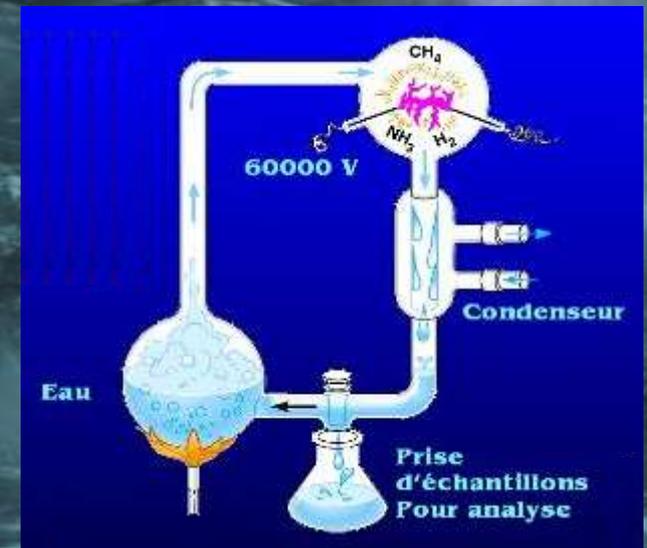
Des éclairs permanents (orages en continu)

Un volcanisme actif, un océan en ébullition (chaleur de l'accrétion)

Un brassage intense par les marées (une lune très proche)

Des chutes de météorites encore très fréquentes (fin de l'accrétion)

Dans cette « soupe primitive » ...



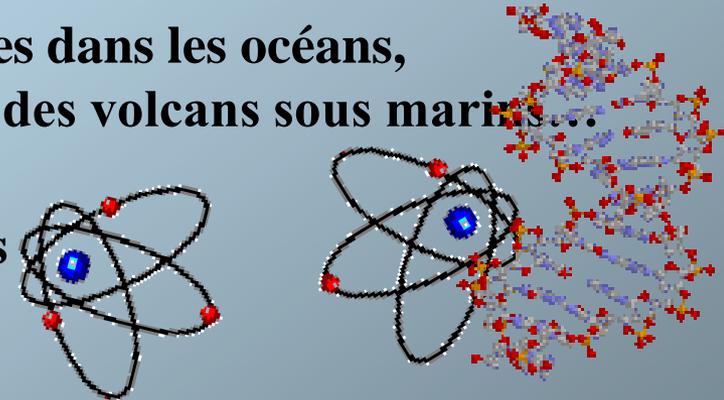
La fabrication des molécules complexes et des premières cellules

Présence de molécules élémentaires
à base de C H N O

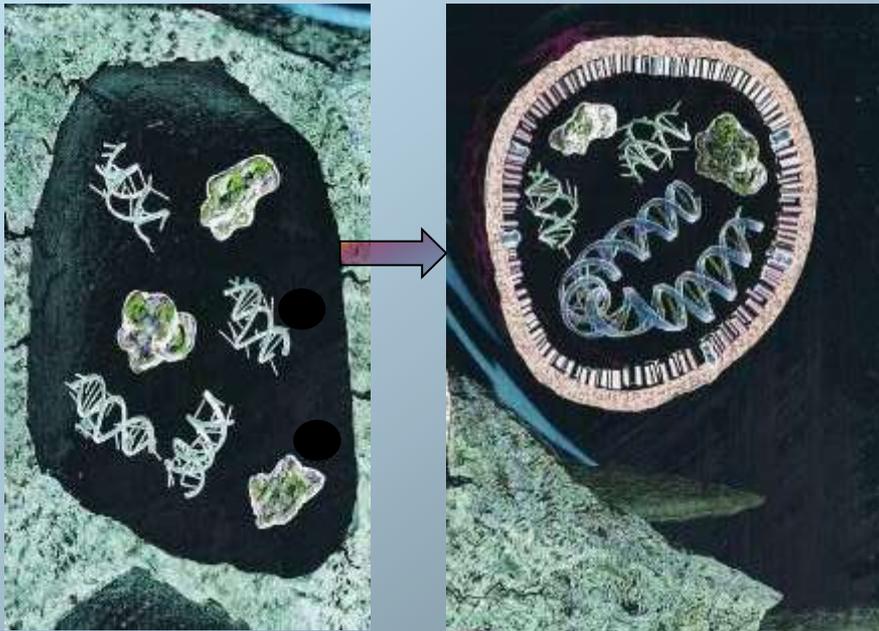
} Issues des poussières initiales
Issues des comètes et les astéroïdes

Assemblage des atomes en molécules organiques dans les océans,
dans des alvéoles rocheuses, dans l'argile, près des volcans sous marins...

Avec les acides aminés, formation des protéines
Avec les nucléotides, formation de l'ARN



Avec les acides gras, formation d'une membrane, paroi cellulaire protectrice :



Apparition de 2 types de cellules simples
les **bactéries** et les **archées**

Apparition des **cyanobactéries** :
utilisation d'énergie lumineuse

Apparition des cellules **eucaryotes**
cellules complexes à noyau (les nôtres)

Ces cellules inventent la reproduction

Conséquence

Evolution de l'atmosphère primitive car...

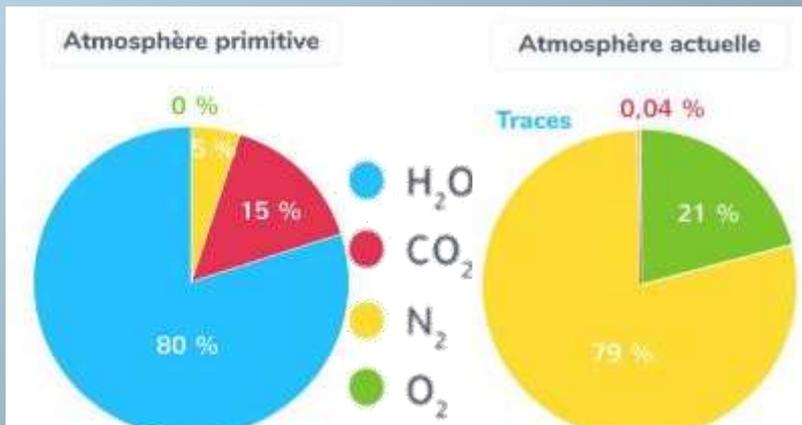
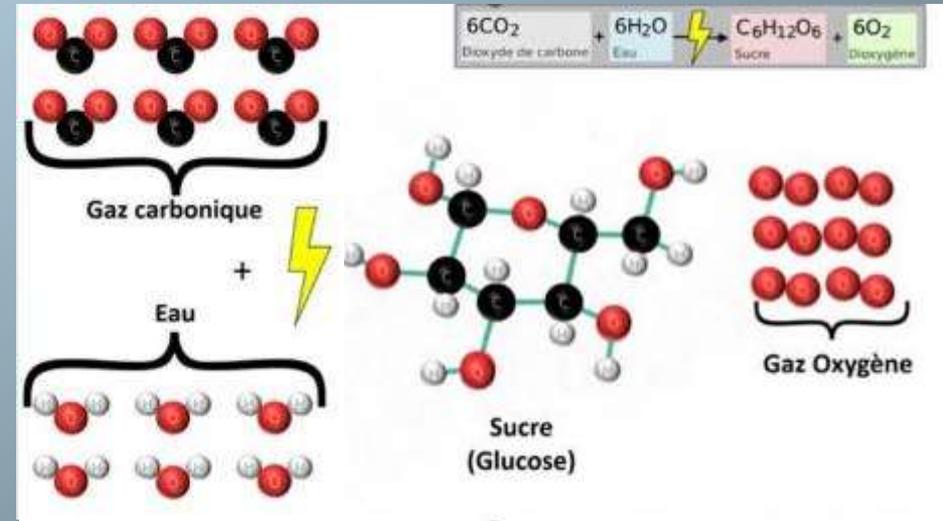
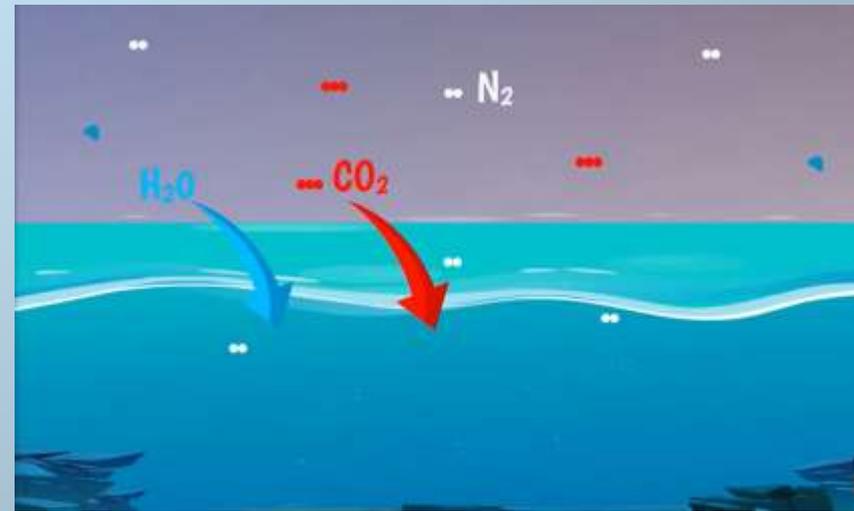
Le gaz carbonique diminue rapidement

→ Par pluies intenses, réactions chimiques

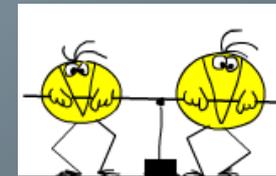
→ Par apparition de nouvelles formes de vie :

les **cyanobactéries** et la photosynthèse

↓
Consommation du CO₂
dégagement d'oxygène
dans l'océan, puis l'atmosphère



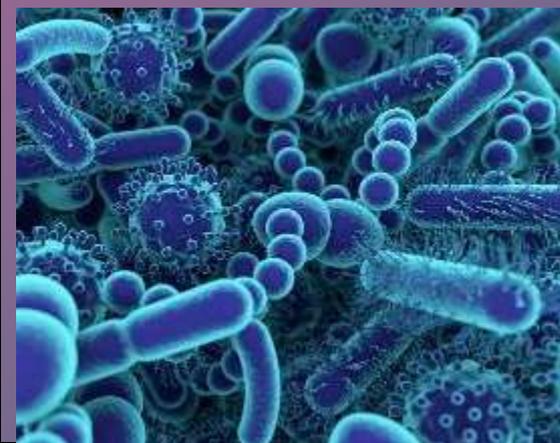
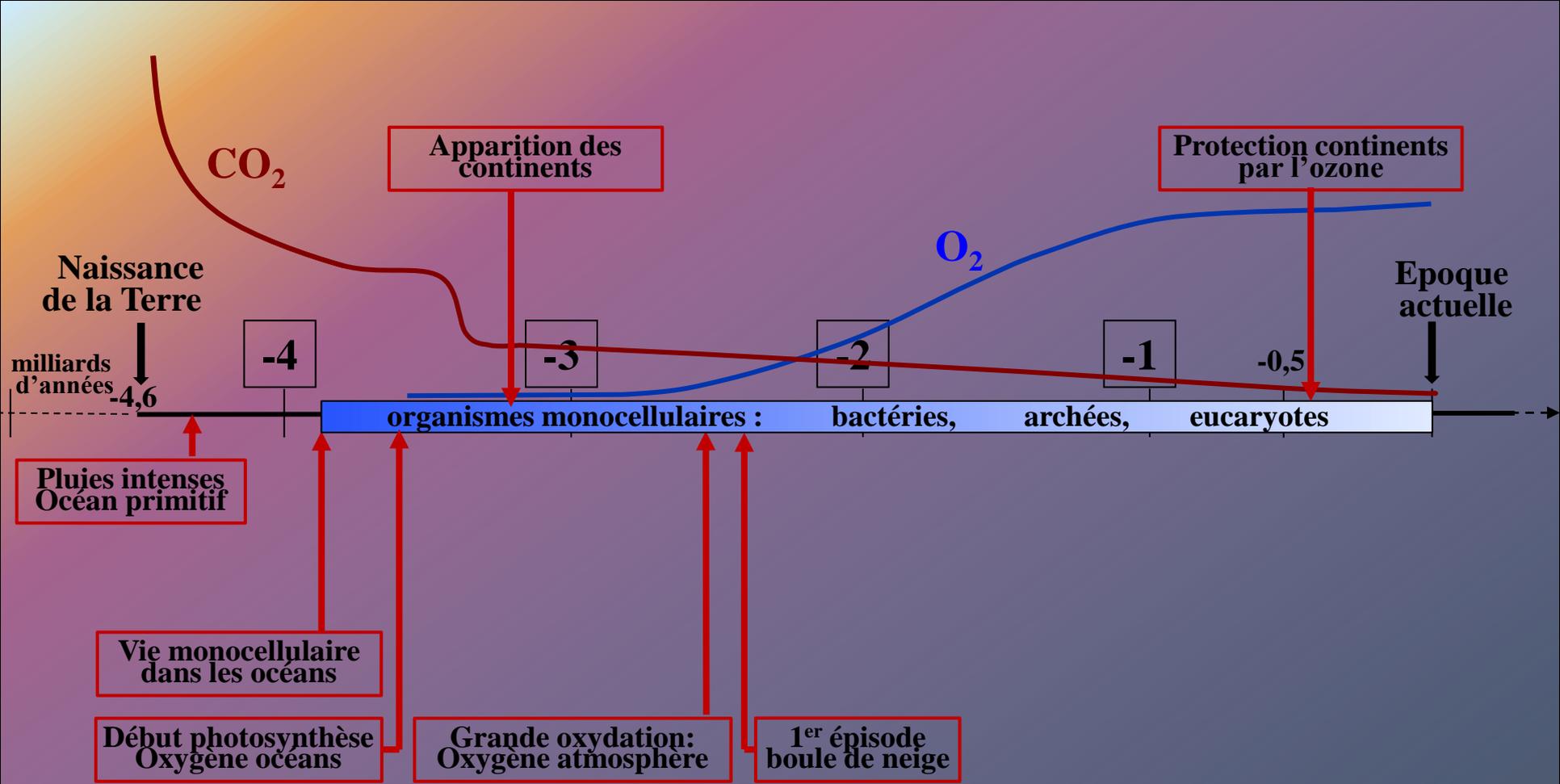
CO₂



Les premières cyanobactéries ont laissé des traces : les stromatolites

Une forme de vie apparue il y a -3,8 milliards d'années





3. Un équilibre fragile

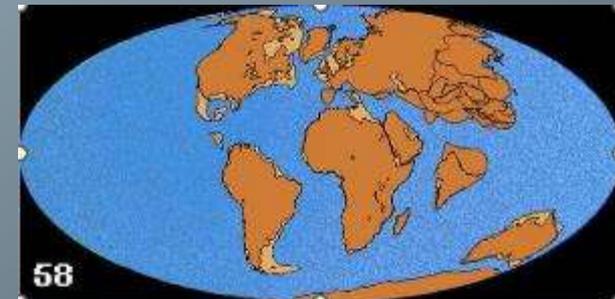
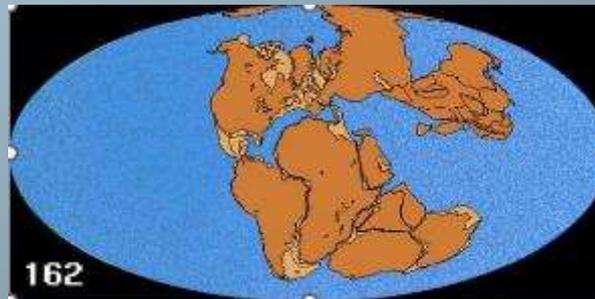
Des mouvements continus des continents

Depuis l'émergence des continents (-3,5 à 3,1 milliards d'années ?) les plaques tectoniques ont sans cesse évolué : succession de quatre « super continents »

Vers -500 millions d'années : tectonique des plaques + couche d'ozone :

→ Variation des courants marins, variations des contacts entre les plaques

→ Développement et diversification de la vie dans les océans, sur les continents :
« L'explosion du Cambrien »

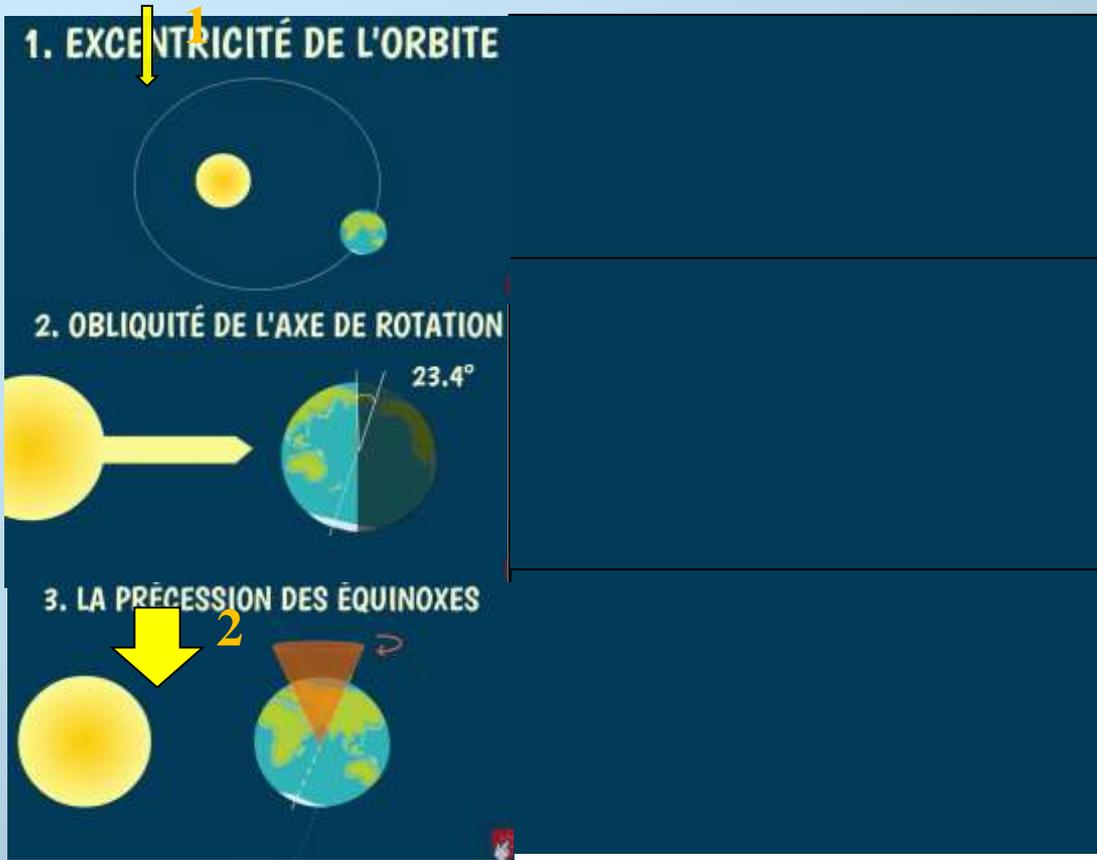


Des variations cycliques du climat

Les cycles de Milankovitch

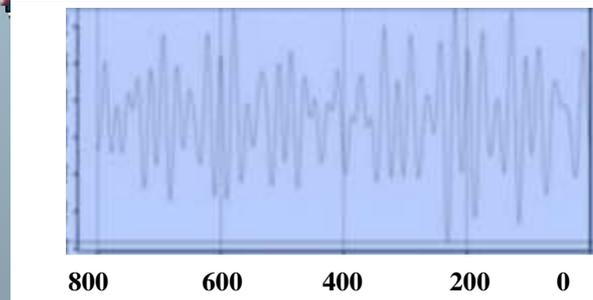
Variations dues à des perturbations de la position Terre – Soleil

Étudiées sur -1 millions d'a



Ces variations infimes d'**ensoleillement** ont des conséquences importantes dans l'hémisphère nord (65°)

Superposition des 3 perturbations pour l'hémisphère nord



Des variations cycliques du climat

Les cycles de Milankovitch

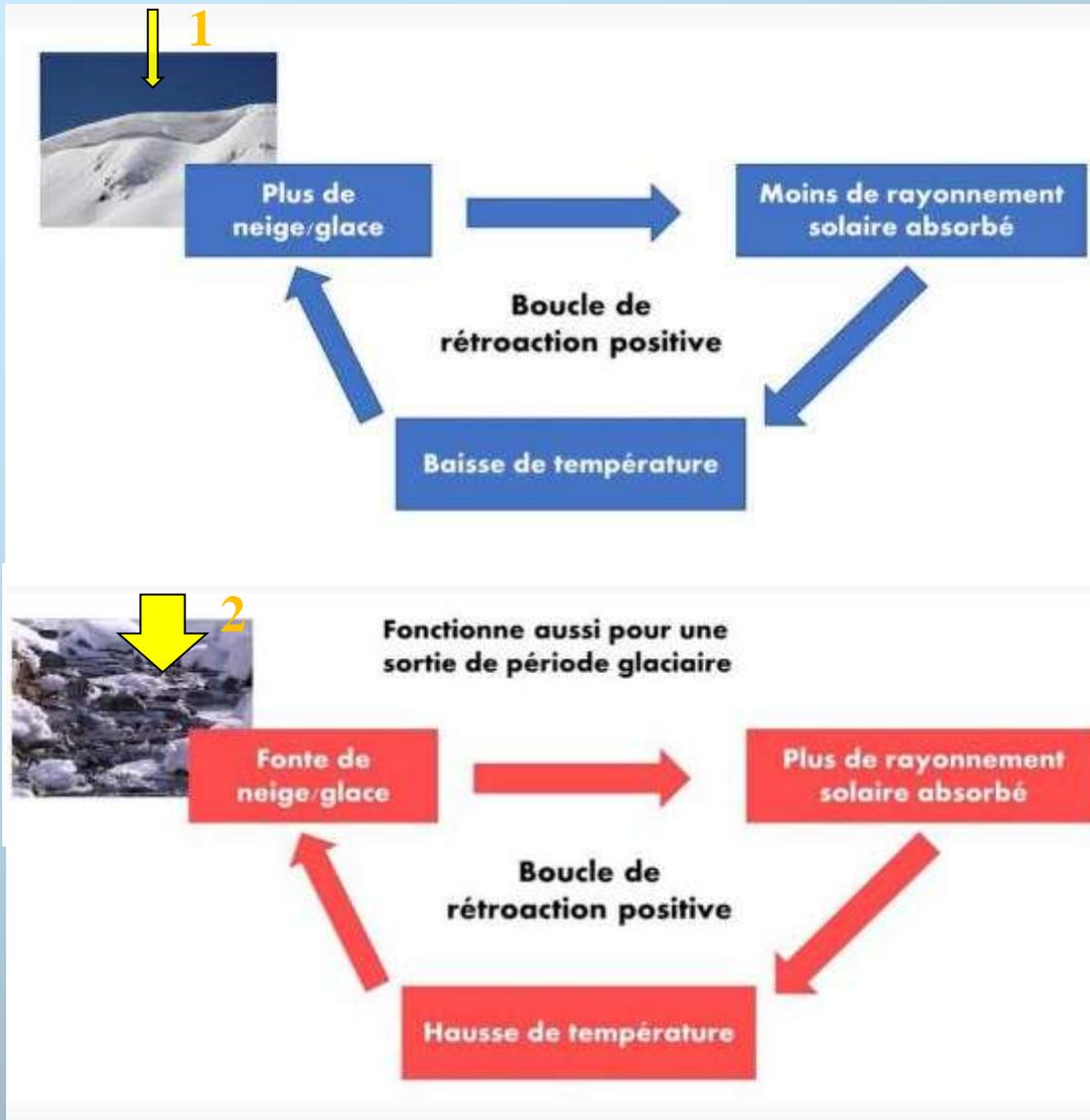
Variations dues à des perturbations de la position Terre – Soleil

Étudiées sur -1 millions d'a

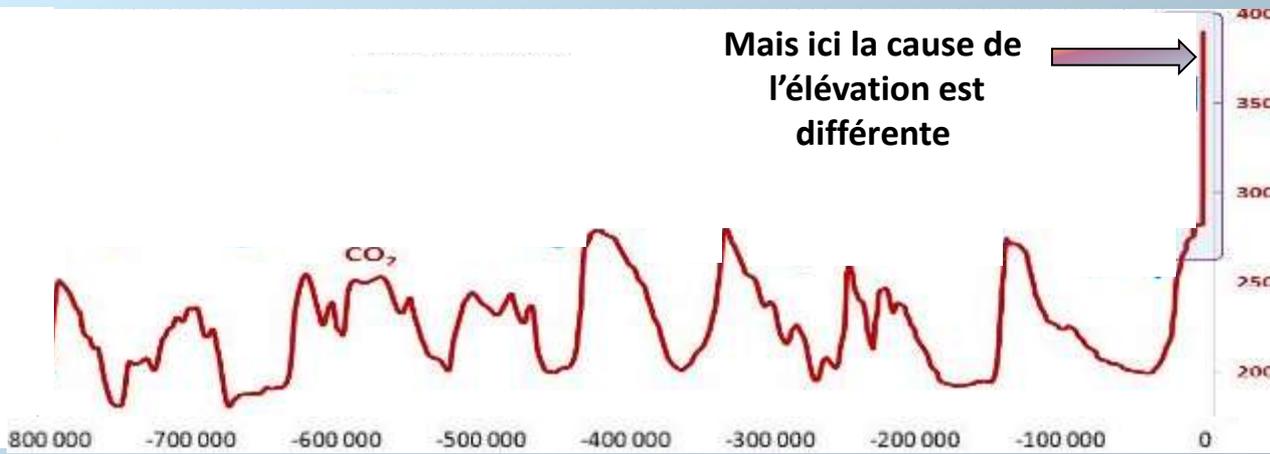
Ces variations infimes d'**ensoleillement** ont des conséquences importantes dans l'hémisphère nord (65°)

1 . Moins d'ensoleillement :
La glace va s'accumuler le phénomène s'amplifier et entrainer le début d'une période glaciaire

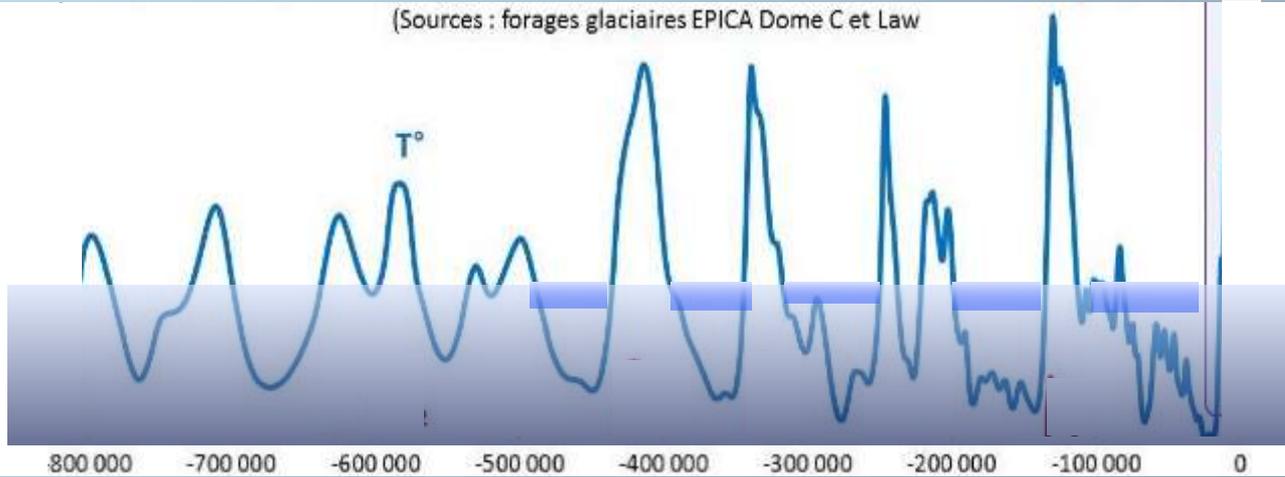
2 . Plus d'ensoleillement :
La glace va fondre le phénomène s'amplifier et entrainer le début d'une période de réchauffement



Mais ici la cause de l'élévation est différente



(Sources : forages glaciaires EPICA Dome C et Law)

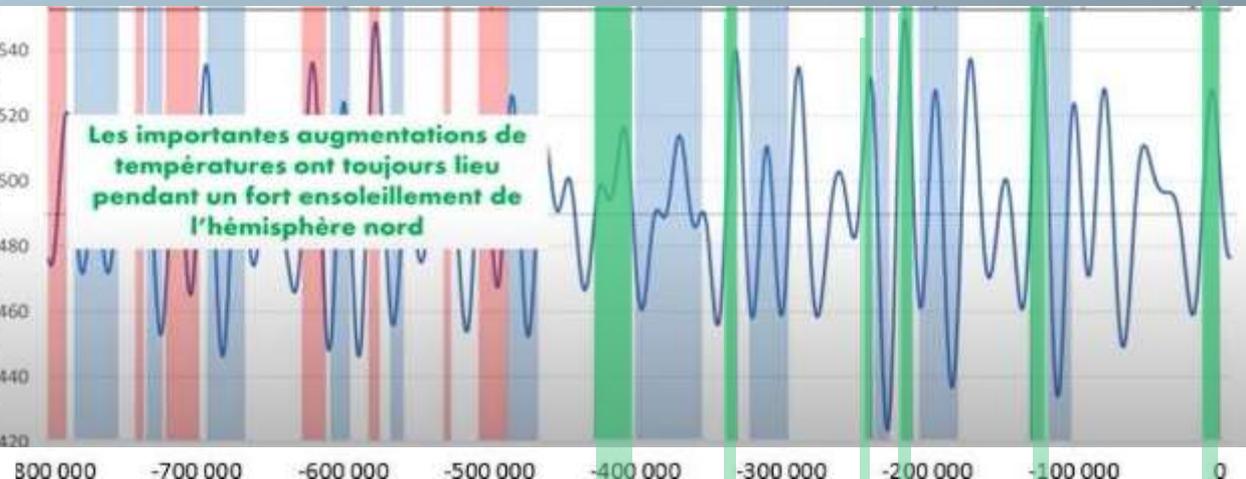


Les périodes glaciaires déclenchent une élévation du % de gaz carbonique

Ce qui entraîne une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires tous les 100 000 ans environ

Puissance moyenne reçue au solstice d'été au niveau du 65^{ème} parallèle nord (W/m²)

Les importantes augmentations de températures ont toujours lieu pendant un fort ensoleillement de l'hémisphère nord



Les variations des paramètres orbitaux de la Terre entraînent d'importantes variations d'ensoleillement dans l'hémisphère nord

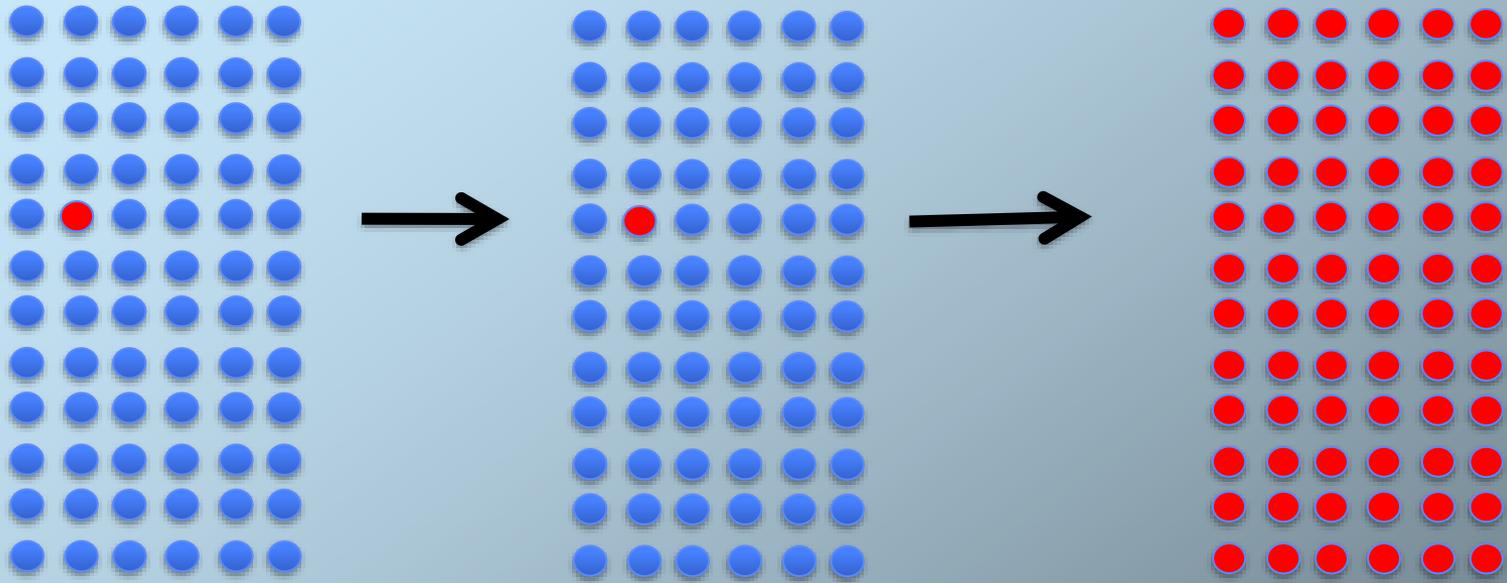
Pendant cette période de 500 000 ans, malgré ces variations climatiques...



... le vivant continue son évolution !

L'évolution permanente du vivant

- Les bases de l'évolution : mutation et sélection

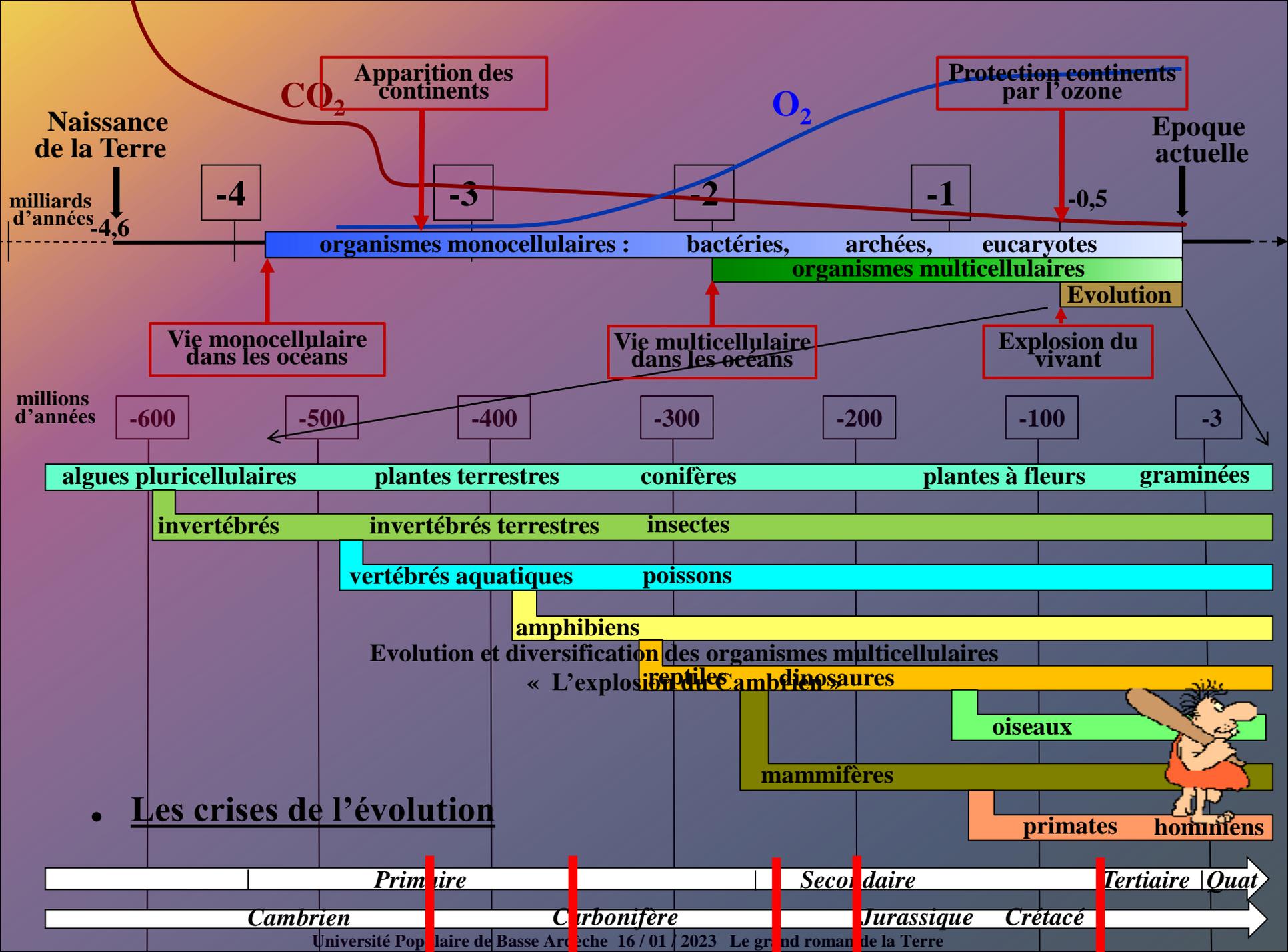


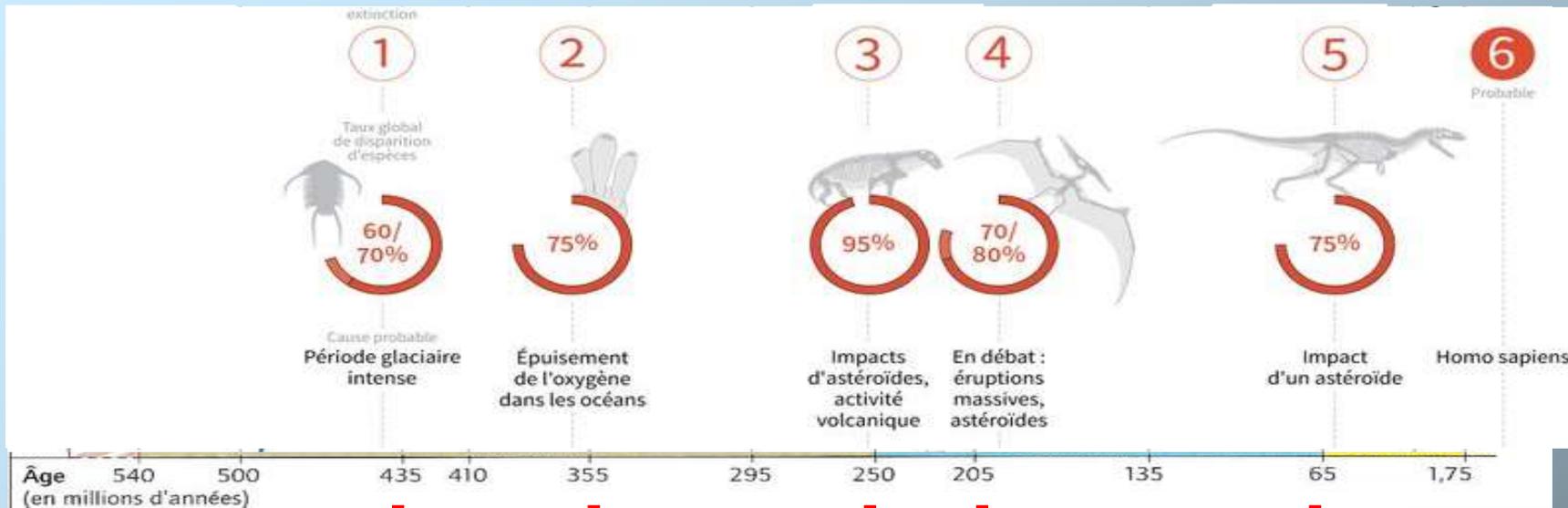
Une population de bactéries identiques. Seule une d'elles porte une mutation apparue par hasard

Après un changement environnemental, seule cette bactérie mutée survit.

Dans la nouvelle population, toutes les bactéries sont adaptées au nouvel environnement

- Les grandes étapes de l'évolution





millions d'années



• Les crises de l'évolution



La suite de l'histoire

• L'évolution très rapide du climat

La concentration en CO₂ augmente

Interglaciaires : 280 ppm

Il y a 200 ans : 300

Aujourd'hui → 410

Dans 50 ans → 500

Conséquences sur :

Le climat : hausse des températures, désertification...

Les océans : hausse du niveau, acidification, biodiversité...

Les populations : déplacement, nourriture...

Réponses :

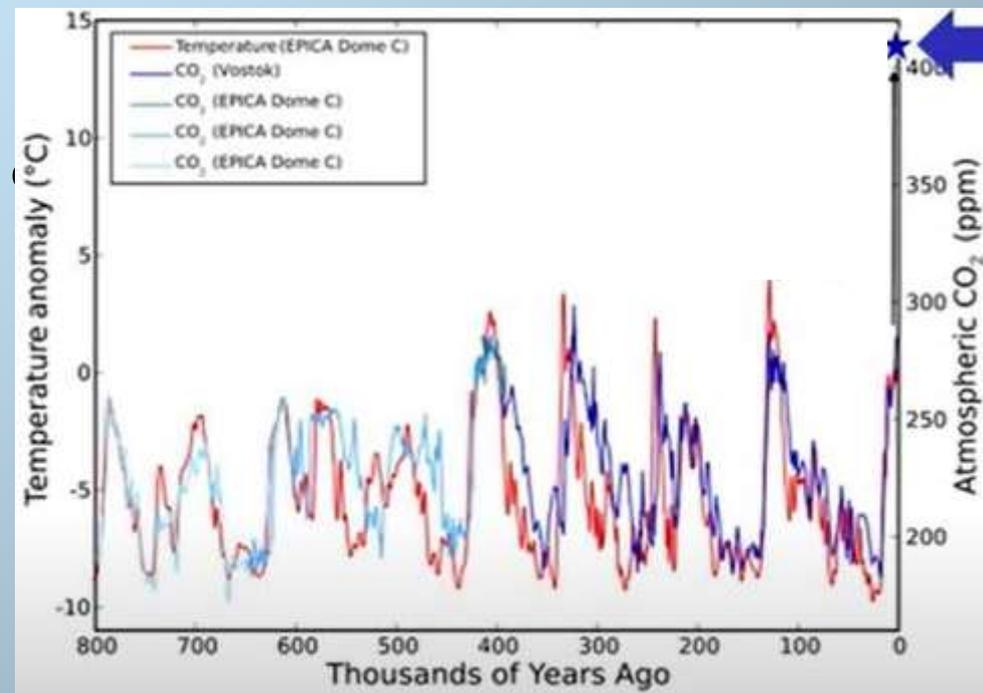
Attention : prise de conscience (GIEC), réponses aux climatosceptiques

Atténuation : limitation de consommation, énergies renouvelables

Adaptation : nouvelles habitudes de vie, nouveaux lieux de vie

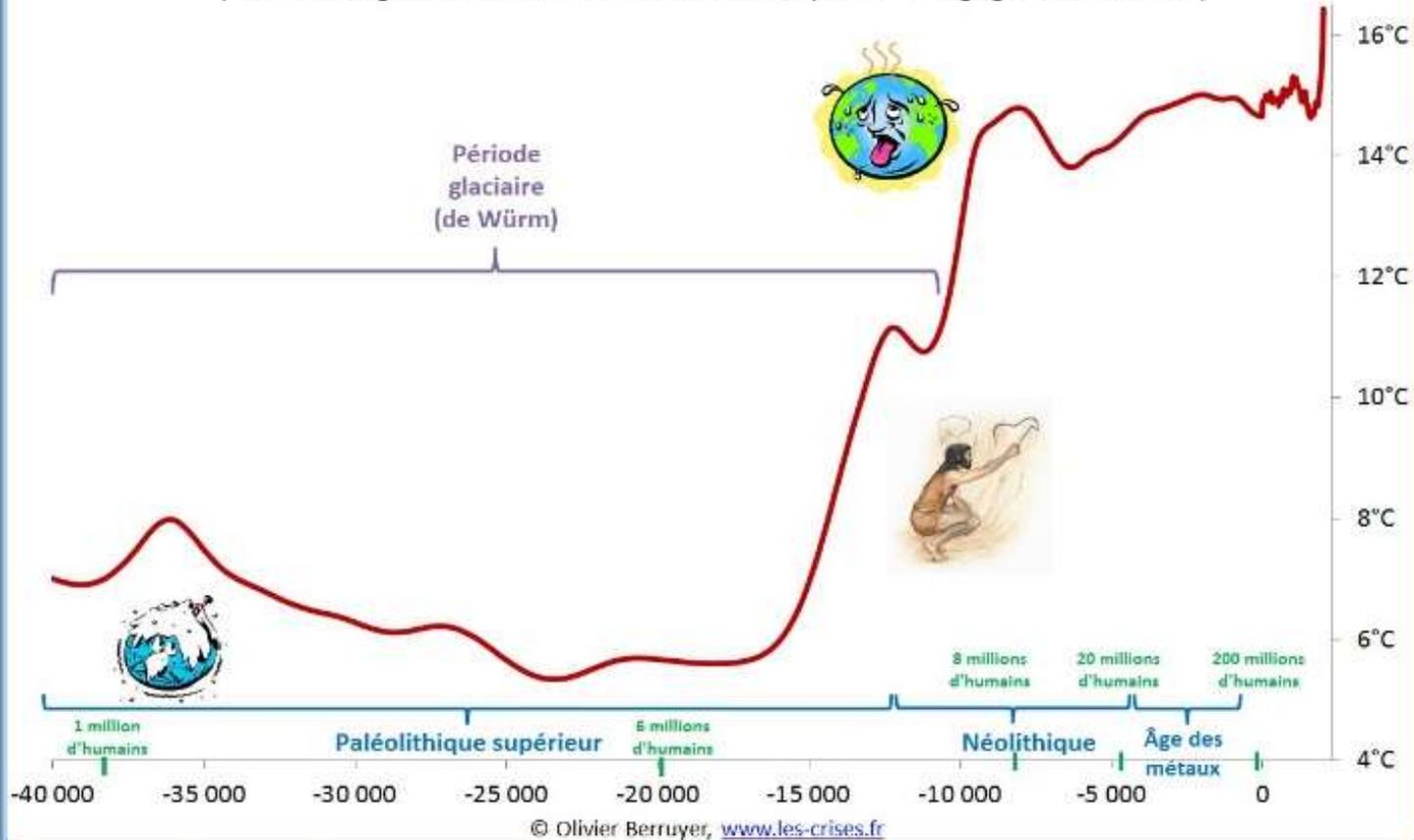
Remarque :

Ce sera peut être la fin pour une partie du vivant mais
la planète Terre et la vie poursuivront leur histoire



Évolution de la température de la planète depuis 40 000 ans

(Sources : forages EPICA et Université de Californie, à partir du forage glaciaire de Vostok)



De grands cycles glaciaires tous les 100 000 ans

La dernière glaciation a débuté il y a 115 000 ans

Son maximum était il y a 22 000 ans

Un lent réchauffement depuis le néolithique

La prochaine glaciation arrivera peut être dans 50 000 ans

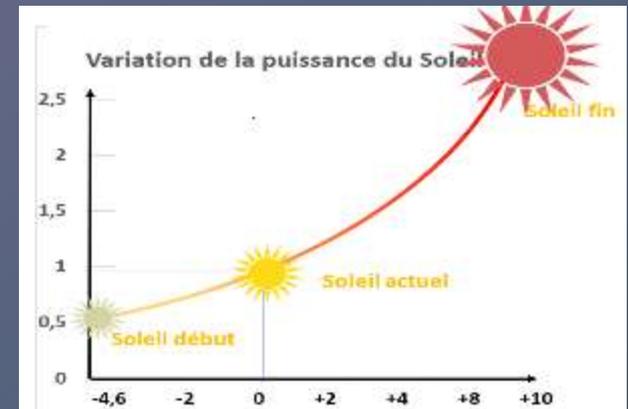
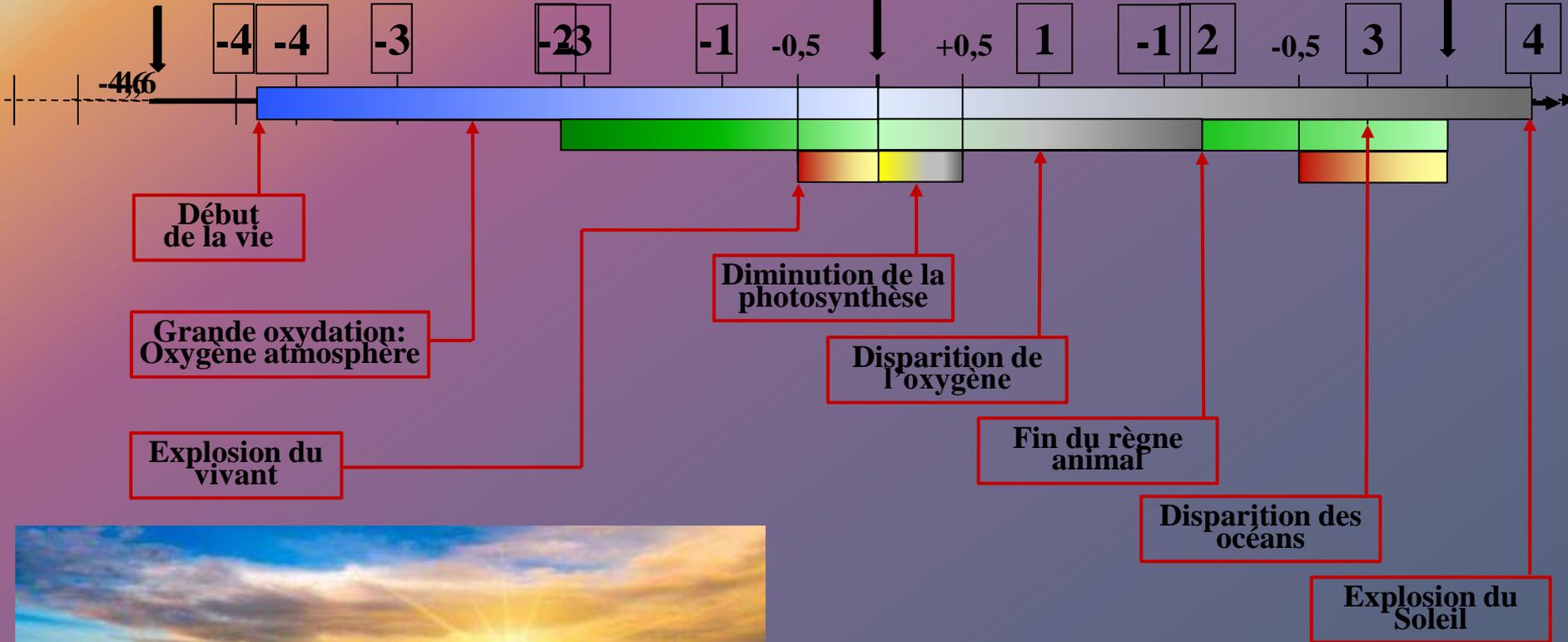
Elle sera repoussée par le réchauffement climatique dû à l'homme

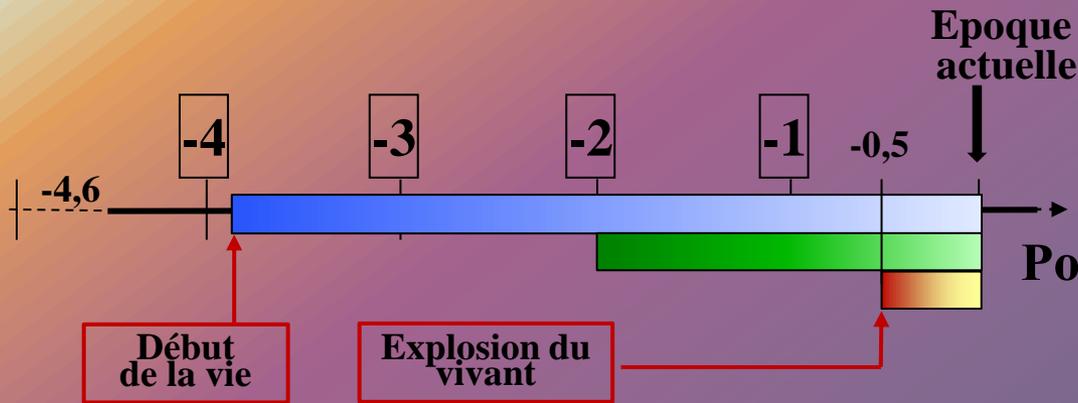
Un cataclysme inévitable : la fin du Soleil

Naissance de la Terre

Epoque actuelle

Epoque actuelle





Pour l'instant, nous sommes ici



« Nous n'héritons pas de la Terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants »

Antoine de Saint Exupéry

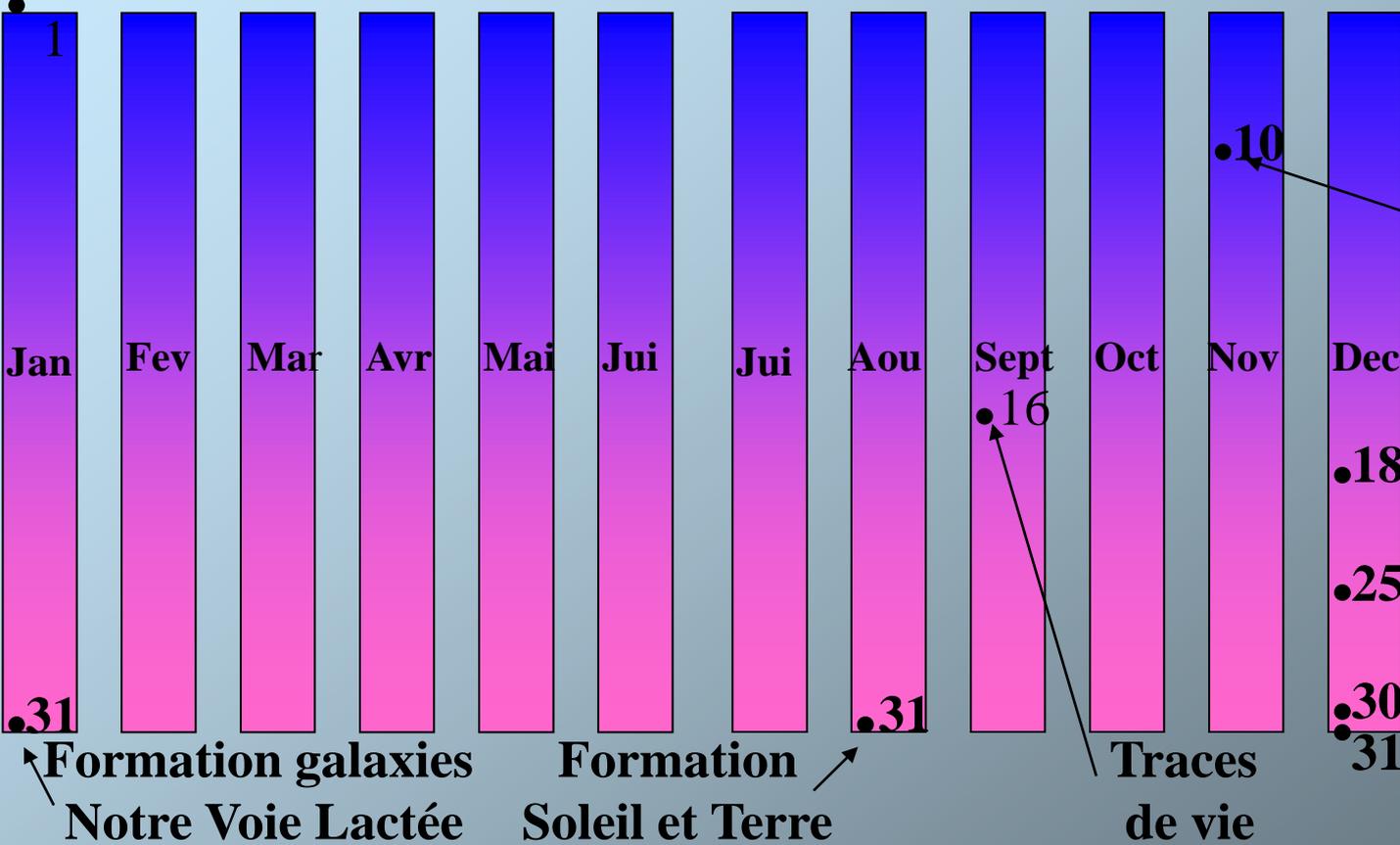
FIN

Chronologie

1 an = 14 milliards d'années
1 milliard d'années = 24 jours
1 seconde = 500 ans

L'histoire de l'Univers ramenée à une année

BB



Oxygène
dans atmosphère

Évolution
du cambrien

Apparition des
dinosauriens

Fin des dinosauriens

Lucie
23h45

Caverne du
Pont d'Arc
23h59

En mai prochain : vaporisation de la Terre

Documentation

Le climat en 100 questions
Sylvestre Huet Gilles Ramstein

ed. Texto

Les planètes et la vie
Thérèse Encrenaz James Lequeux Fabienne Casoli

ed. EDP Sciences

De l'inerte au vivant
Patrick Forterre Louis d'Hendeecourt Christophe Malaterre Marie Christine Maurel ed. La ville brule

ENFANTS DU SOLEIL Histoire de nos origines
André Brahic

ed. ODILE JACOB

DISCOUS SUR L'ORIGINE DE L'UNIVERS
Etienne Klein

ed. FLAMMARION

PETITE HISTOIRE DE LA MATIERE ET DE L'UNIVERS
Hubert Reeves

ed. LE POMMIER

LA PLUS BELLE HISTOIRE DU MONDE
Hubert Reeves Joël De Rosnay Yves Coppens Dominique Simonnet

ed. SEUIL

[Quelle est l'origine de l'eau sur Terre ? \(theconversation.com\)](http://theconversation.com)

[Les grandes étapes de l'évolution de la Terre et de la vie \(astrosurf.com\)](http://astrosurf.com)

[Sciences Claires - Une brève histoire de la vie sur Terre \(vulgarisation-scientifique.com\)](http://vulgarisation-scientifique.com)

[Quand la Terre était une boule de neige | CNRS Le journal](http://cnrs-lejournal.fr)

[Climat : Historique long et analyse du réchauffement climatique \(les-crises.fr\)](http://les-crises.fr)