

Les premiers âges du Système Solaire

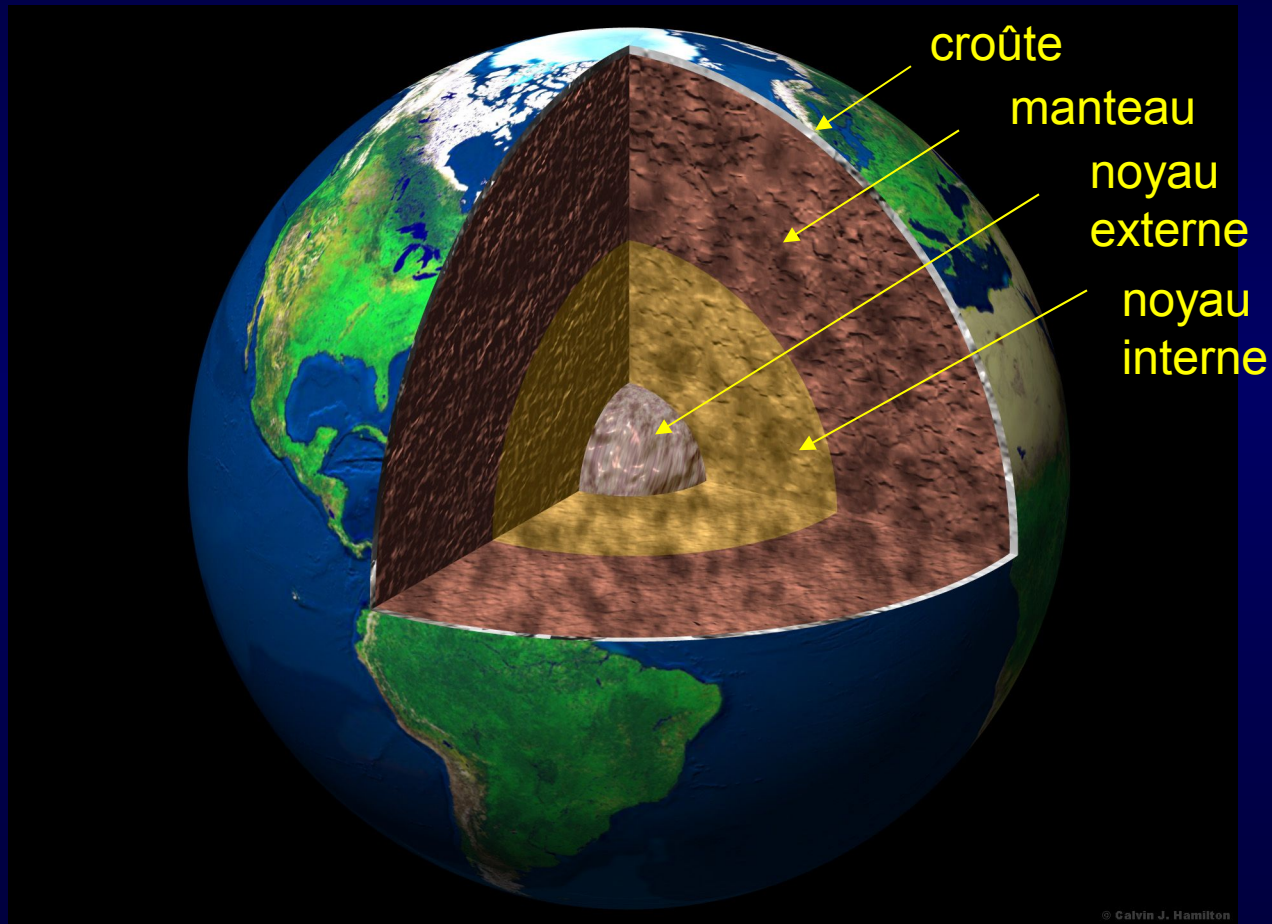
Francis Albarède
Ecole Normale Supérieure de Lyon



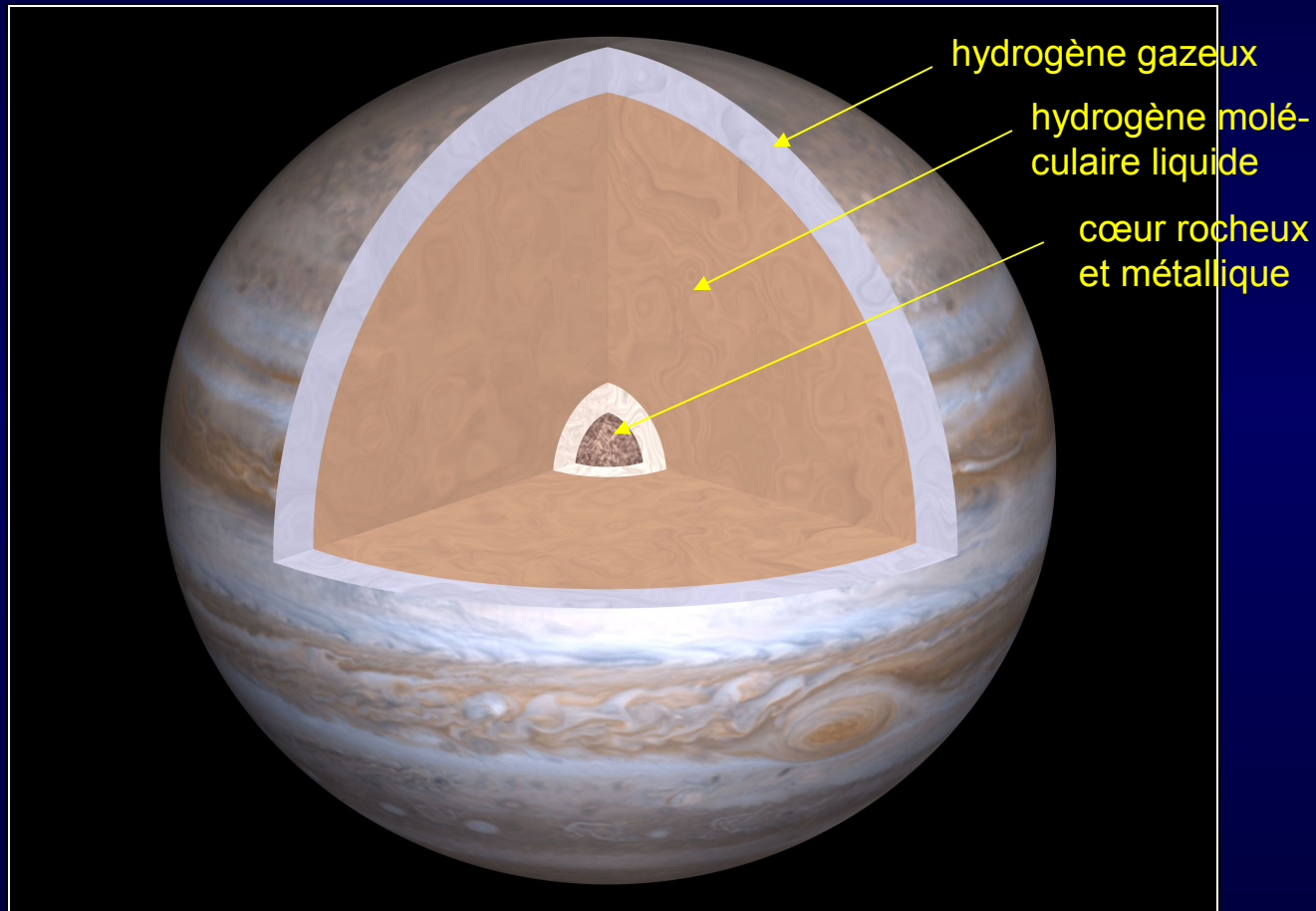


Et pourtant, ma chère,
je n'ai eu que sept jours pour
faire tout ce travail !

Une planète du Système Solaire interne: la Terre



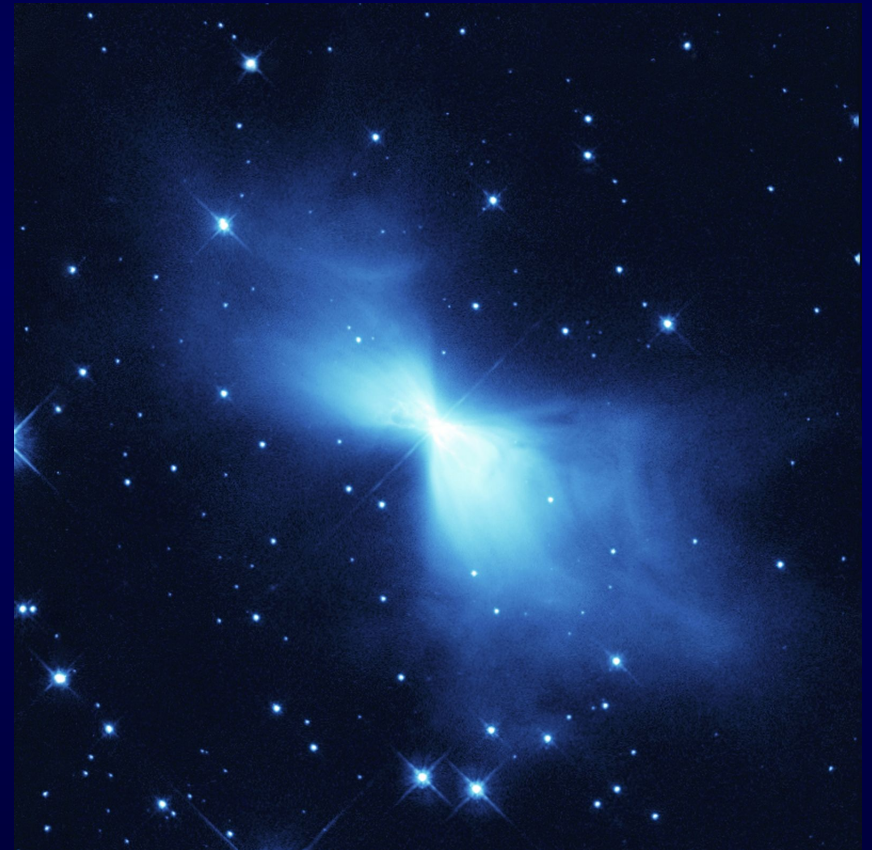
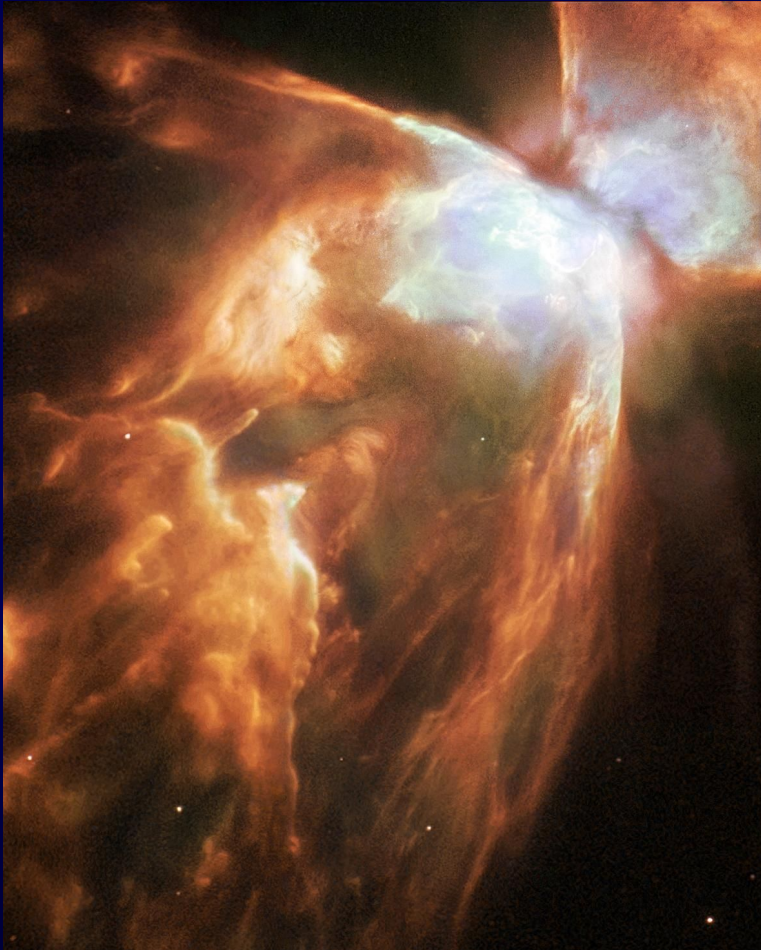
Une planète du Système Solaire externe: Jupiter



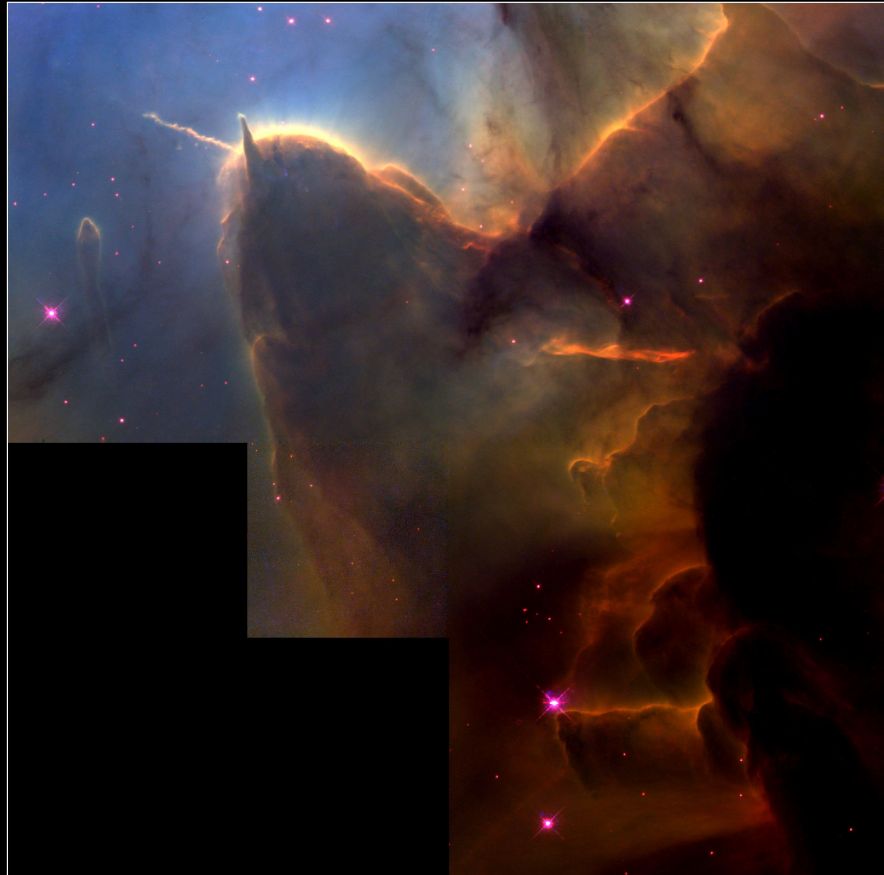
The Interior of Jupiter

© Copyright Calvin J. Hamilton

Tu enfanteras dans la douleur...
la naissance d'un Système Solaire



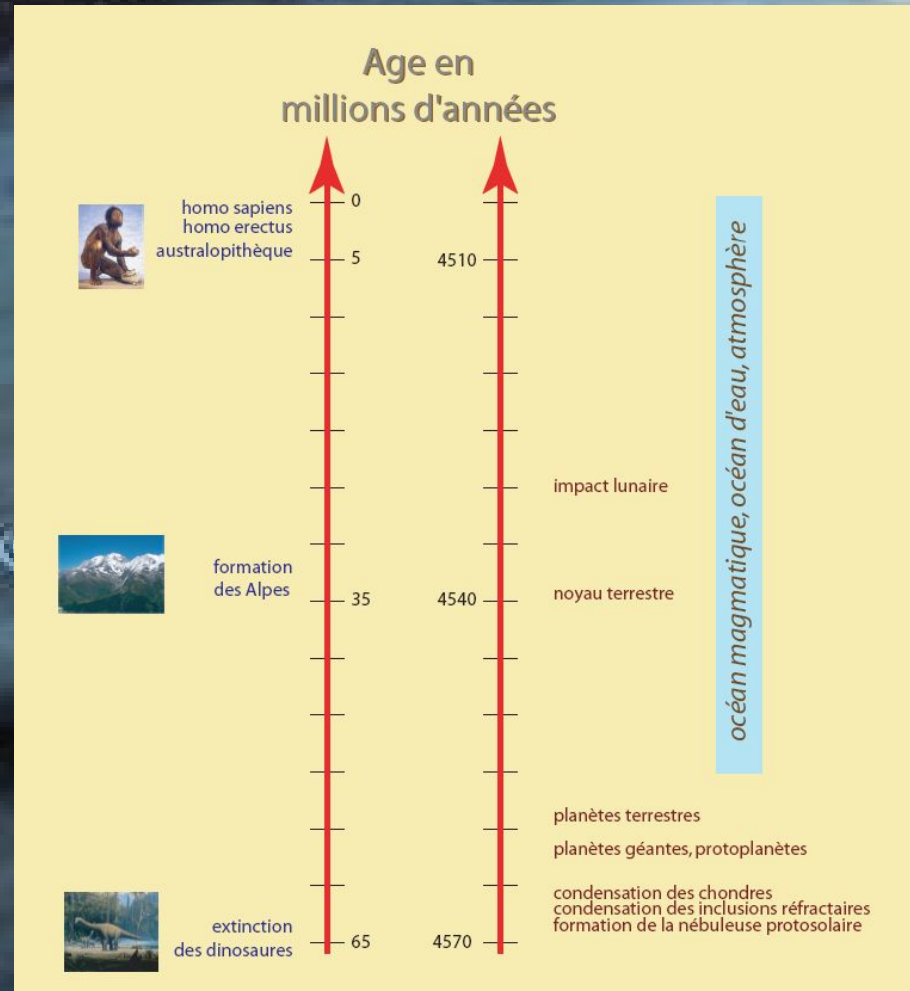
Une maternité d'étoiles

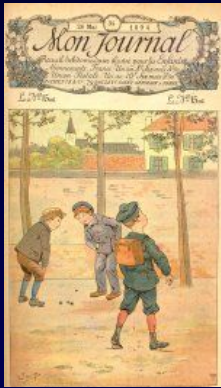


Trifid Nebula • M20
Hubble Space Telescope • WFPC2

NASA and J. Hester (Arizona State University) • STScI-PRC99-42

Les évènements qui ont conduit à la formation des planètes ont duré relativement peu de temps

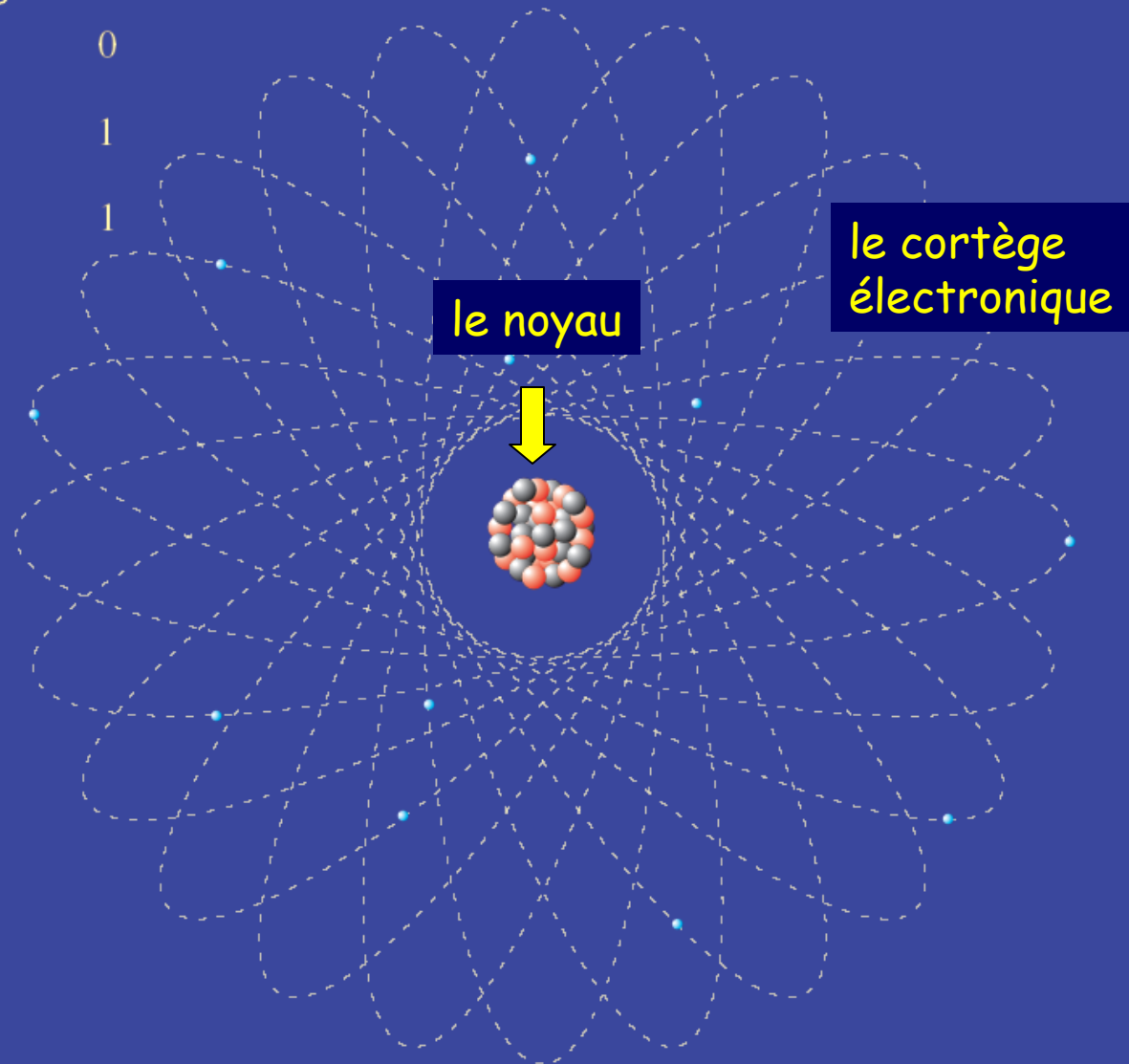




Retour à l'école
(pour quelques minutes ...)

La structure de l'atome

		charge	masse
electron		-	0
neutron		0	1
proton		+	1



Les Isotopes

hydrogène (H)



^1H



$^2\text{H} = \text{D}$



$^3\text{H} = \text{T}$

hélium (He)



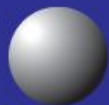
^3He



^4He

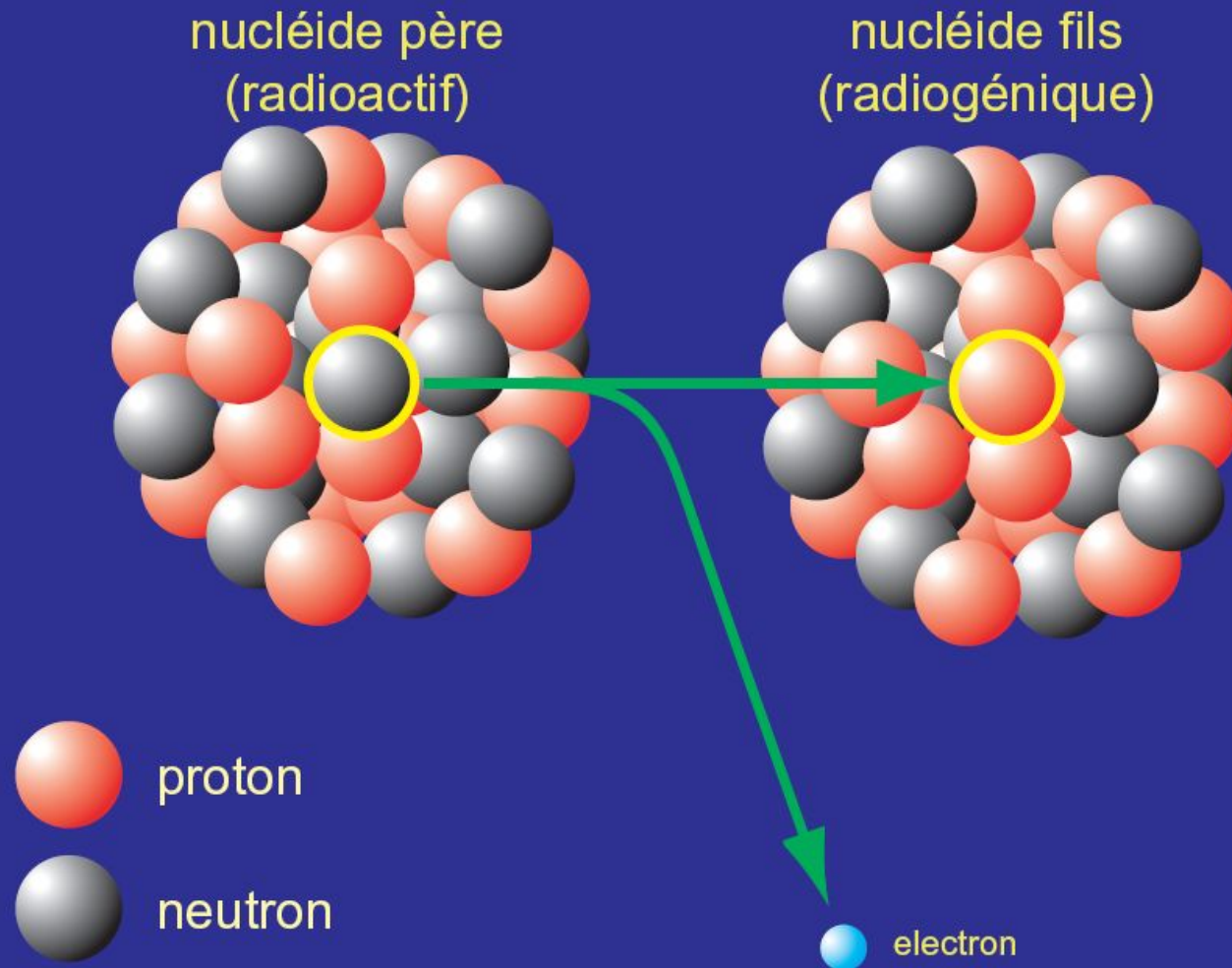


proton

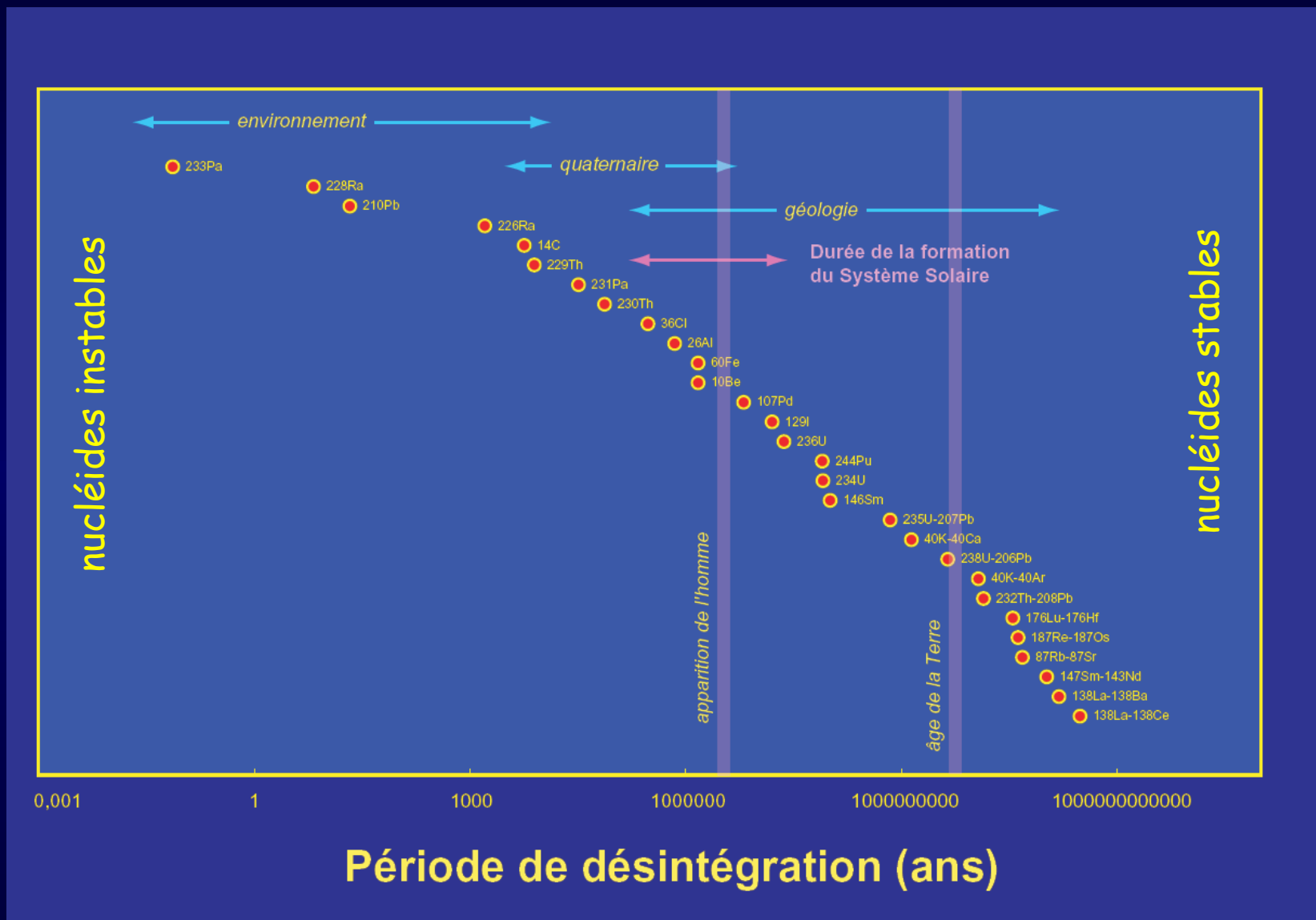


neutron

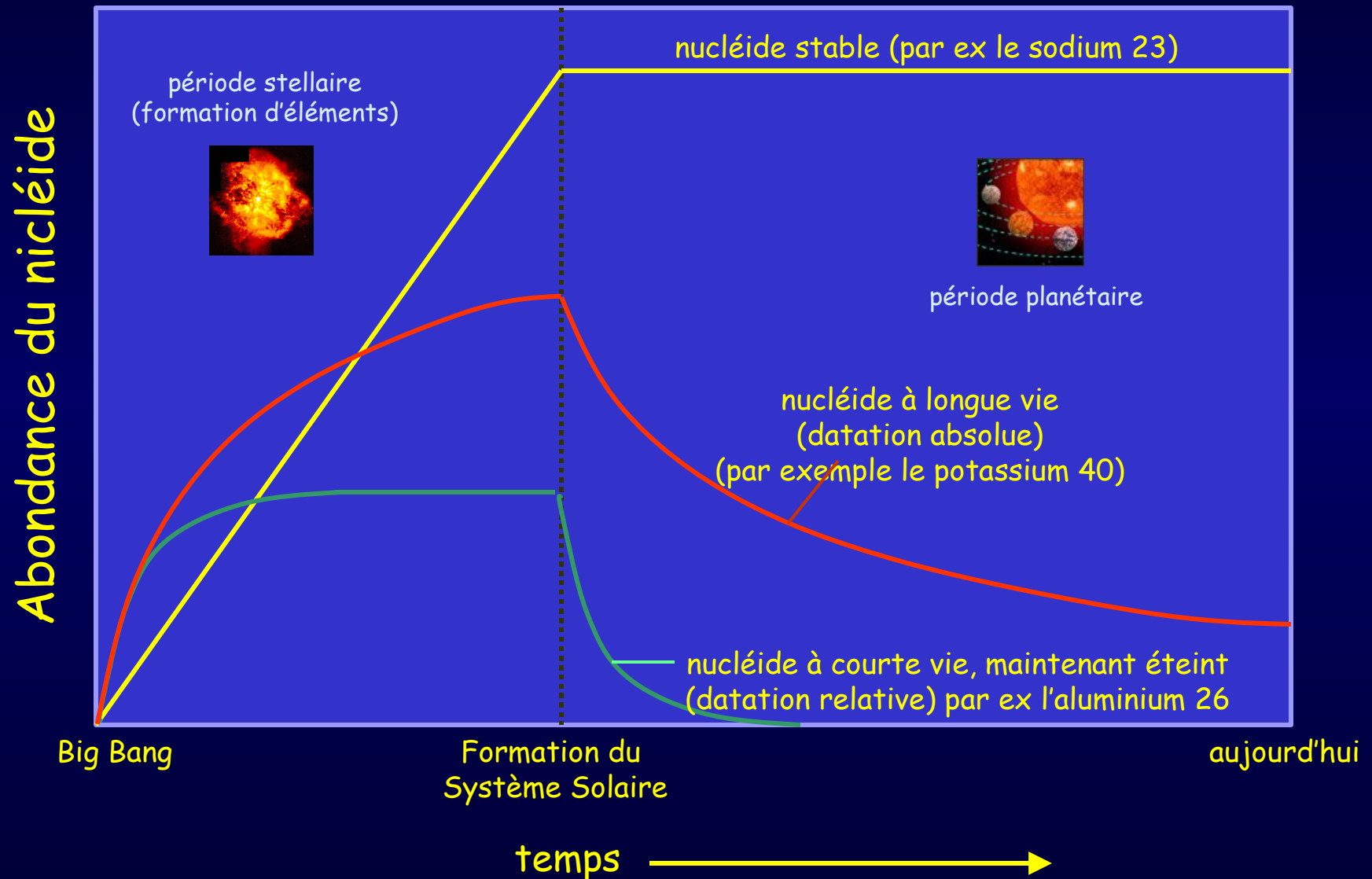
La Désintégration Radioactive β^-



Les chronomètres radioactifs et leur domaine d'utilisation



L'échelle des temps des processus planétaires



Une petite chronologie cosmique

- Big Bang: l'Univers apparaîtrait il y a 13 ± 3 milliards d'années
- Formation de la Voie Lactée (peu après)
- Formation de la Nébuleuse Solaire il y a $4568 \pm 0,5$ millions d'années
- Formation des petits corps planétaires en 3 millions d'années
- On fait le ménage! Formation des planètes en 10-30 millions d'années accompagnée par la ségrégation du noyau, du manteau et de la croûte

Une petite chronologie cosmique

- Big Bang: l'Univers apparaîtrait il y a 13 ± 3 milliards d'années
- Formation de la Voie Lactée (peu après) 
- Formation de la Nébuleuse Solaire il y a $4568 \pm 0,5$ millions d'années
- Formation des petits corps planétaires en 3 millions d'années
- On fait le ménage! Formation des planètes en 10-30 millions d'années accompagnée par la ségrégation du noyau, du manteau et de la croûte

Une petite chronologie cosmique

- Big Bang: l'Univers apparaîtrait il y a 13 ± 3 milliards d'années
- Formation de la Voie Lactée (peu après)
- Formation de la Nébuleuse Solaire il y a $4568 \pm 0,5$ millions d'années
- Formation des petits corps planétaires en 3 millions d'années
- On fait le ménage! Formation des planètes en 10-30 millions d'années accompagnée par la ségrégation du noyau, du manteau et de la croûte



Une petite chronologie cosmique

- Big Bang: l'Univers apparaîtrait il y a 13 ± 3 milliards d'années
- Formation de la Voie Lactée (peu après)
- Formation de la Nébuleuse Solaire il y a $4568 \pm 0,5$ millions d'années
- **Formation des petits corps planétaires en 3 millions d'années**
- On fait le ménage! Formation des planètes en 10-30 millions d'années accompagnée par la ségrégation du noyau, du manteau et de la croûte



La formation des petits corps
est rapide (<3 000 000 ans)



Patrick Michel, Obs. Nice

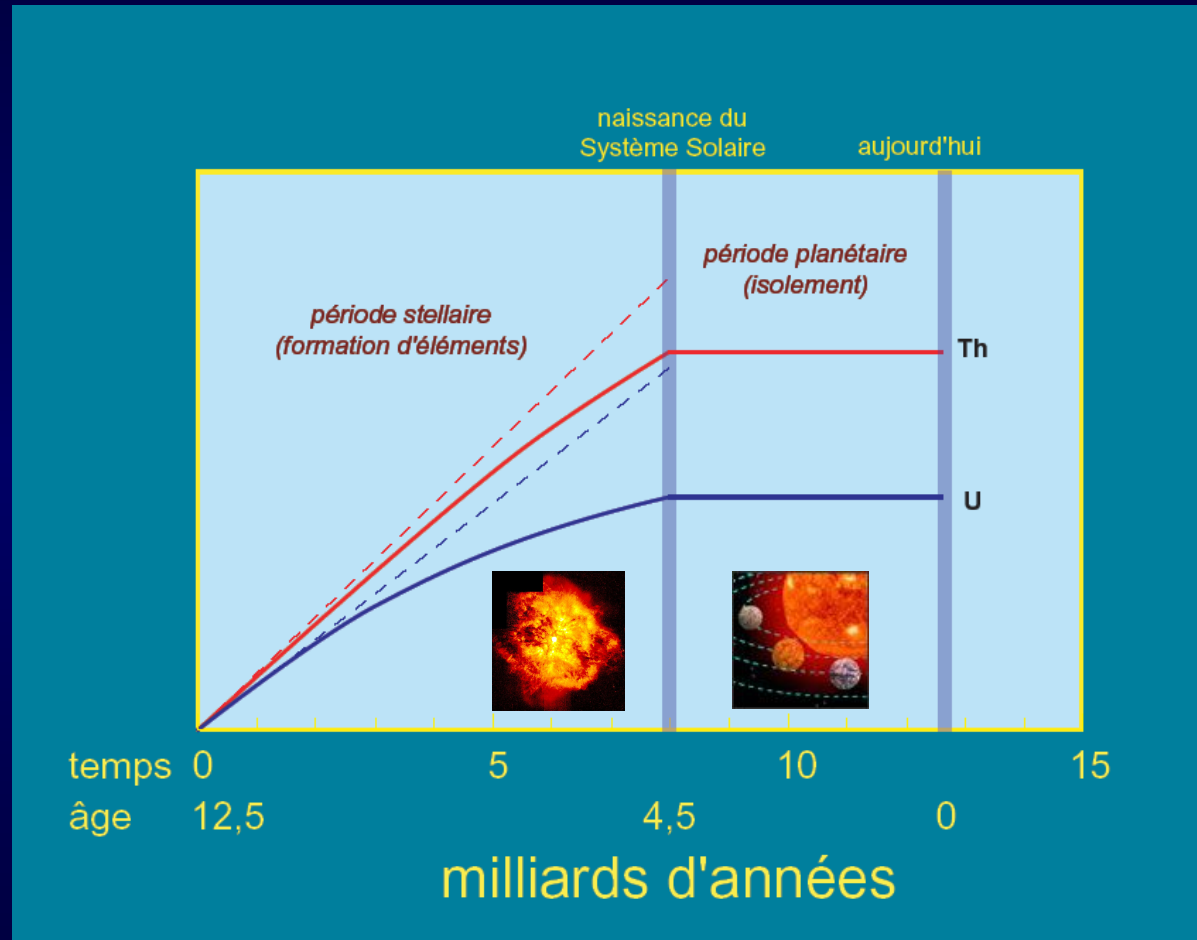
S'ils se forment assez vite
(10 km), ils sont largement fondus au cœur par les
éléments radioactifs à courte période (^{26}Al , ^{60}Fe).
Exemple: le corps parent des chondrites H.

Une petite chronologie cosmique

- Big Bang: l'Univers apparaîtrait il y a 13 ± 3 milliards d'années
- Formation de la Voie Lactée (peu après)
- Formation de la Nébuleuse Solaire il y a $4568 \pm 0,5$ millions d'années
- Formation des petits corps planétaires en 3 millions d'années
- On fait le ménage! Formation des planètes en 10-30 millions d'années accompagnée par la ségrégation du noyau, du manteau et de la croûte



L'âge de l'Univers: comparaison entre deux éléments radioactifs U et Th

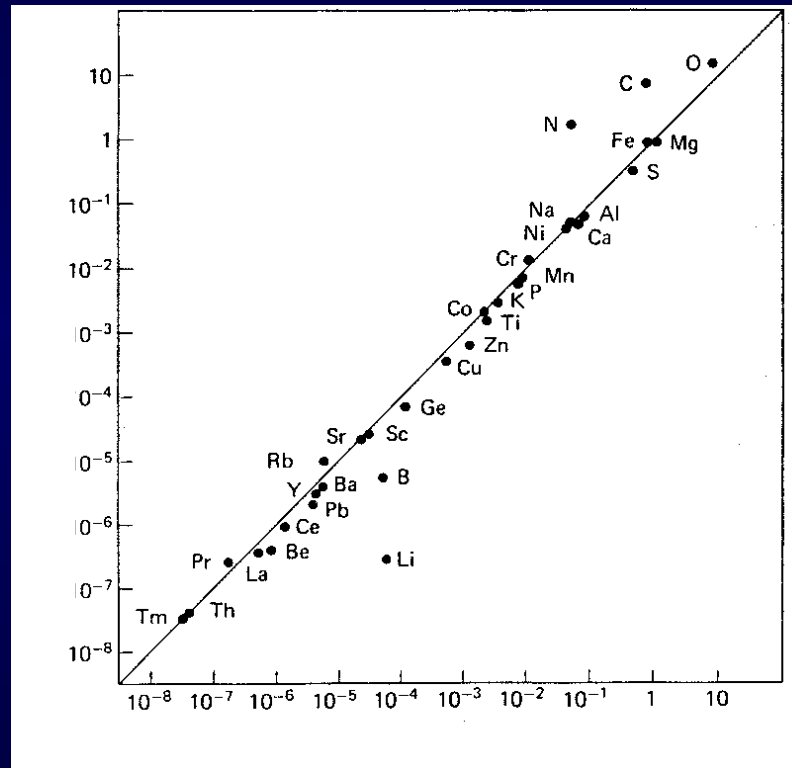


L'univers est apparu il y a 13 ± 3 milliards d'année!
De nombreux chronomètres donnent une réponse similaire

La composition du Système Solaire

Les météorites chondritiques ont une composition très proche de celle du Soleil

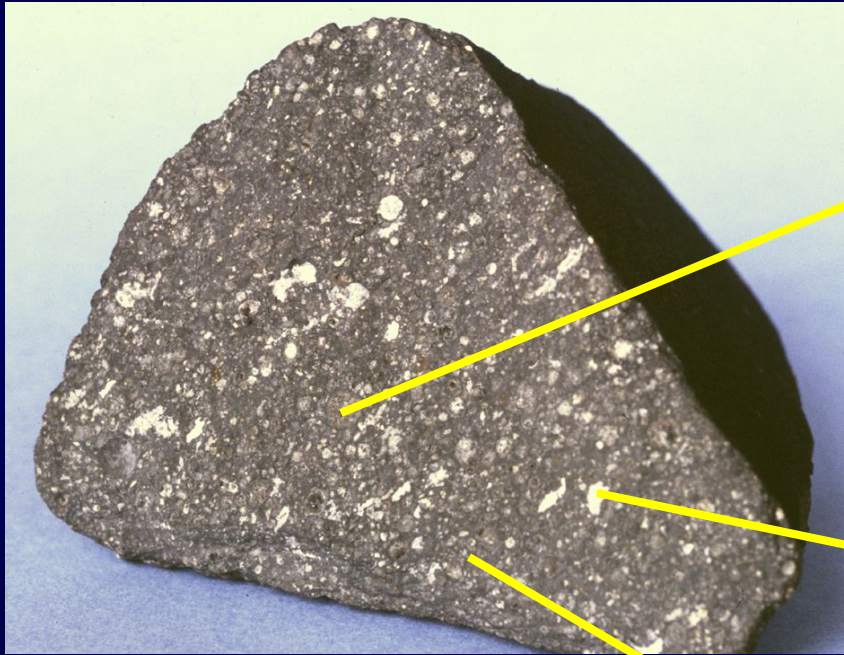
Concentration dans la photosphère solaire



Concentration dans les météorites carbonées

Les composants des chondrites

Chondrite Allende CV3



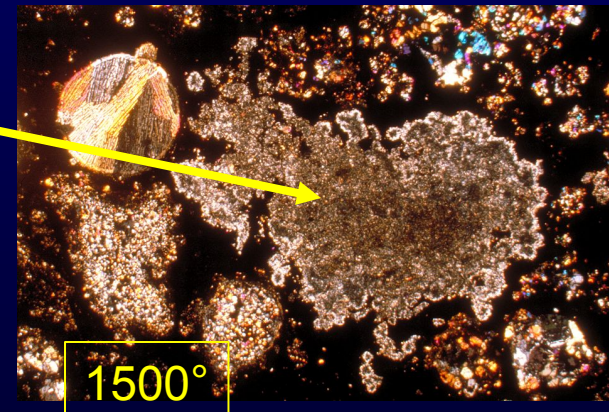
Mais aussi grains présolaires,
diamants, carbure de
silicium,... (2000°)

Matrice

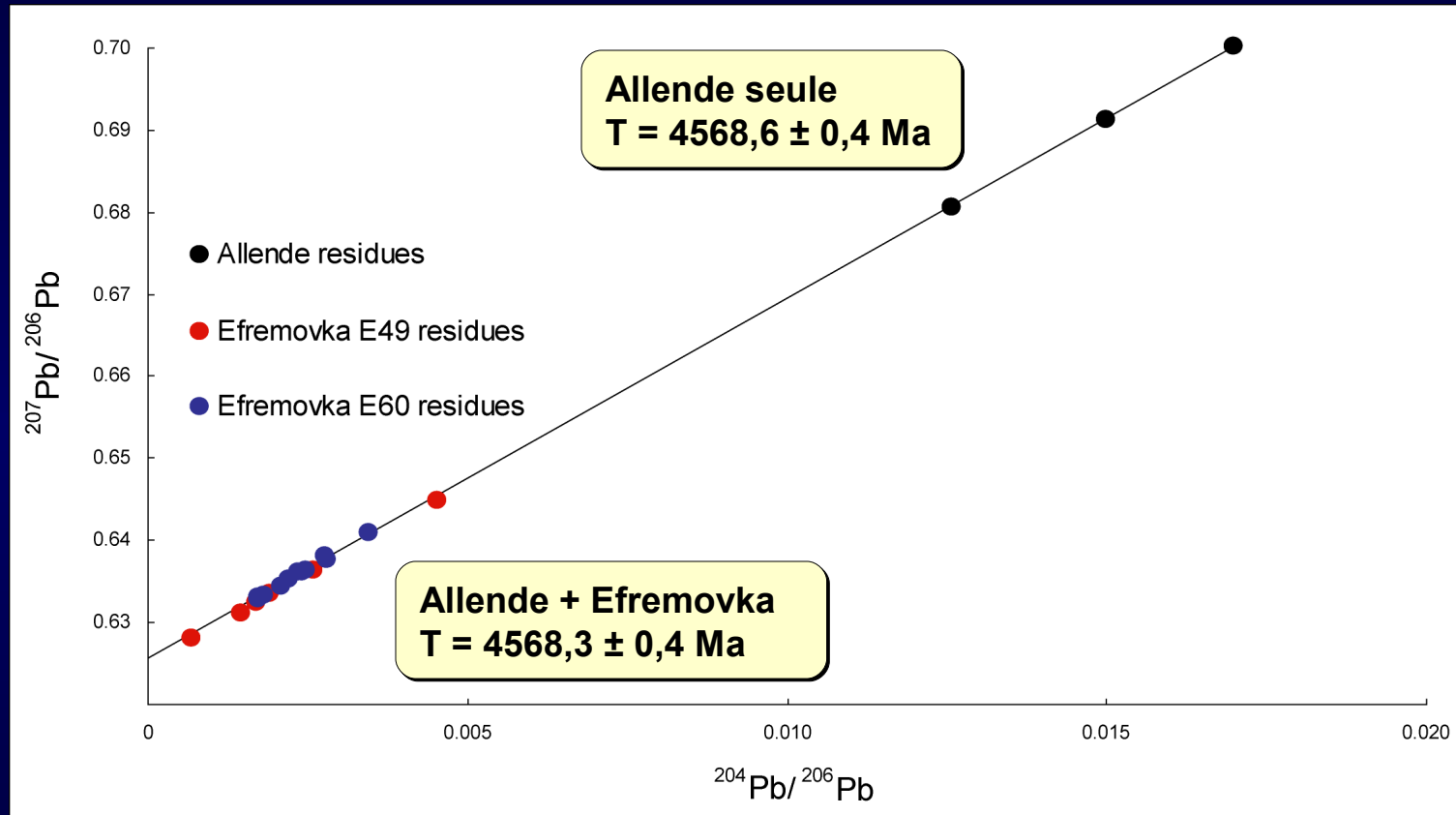
Chondre



Inclusion réfractaire (CAI)

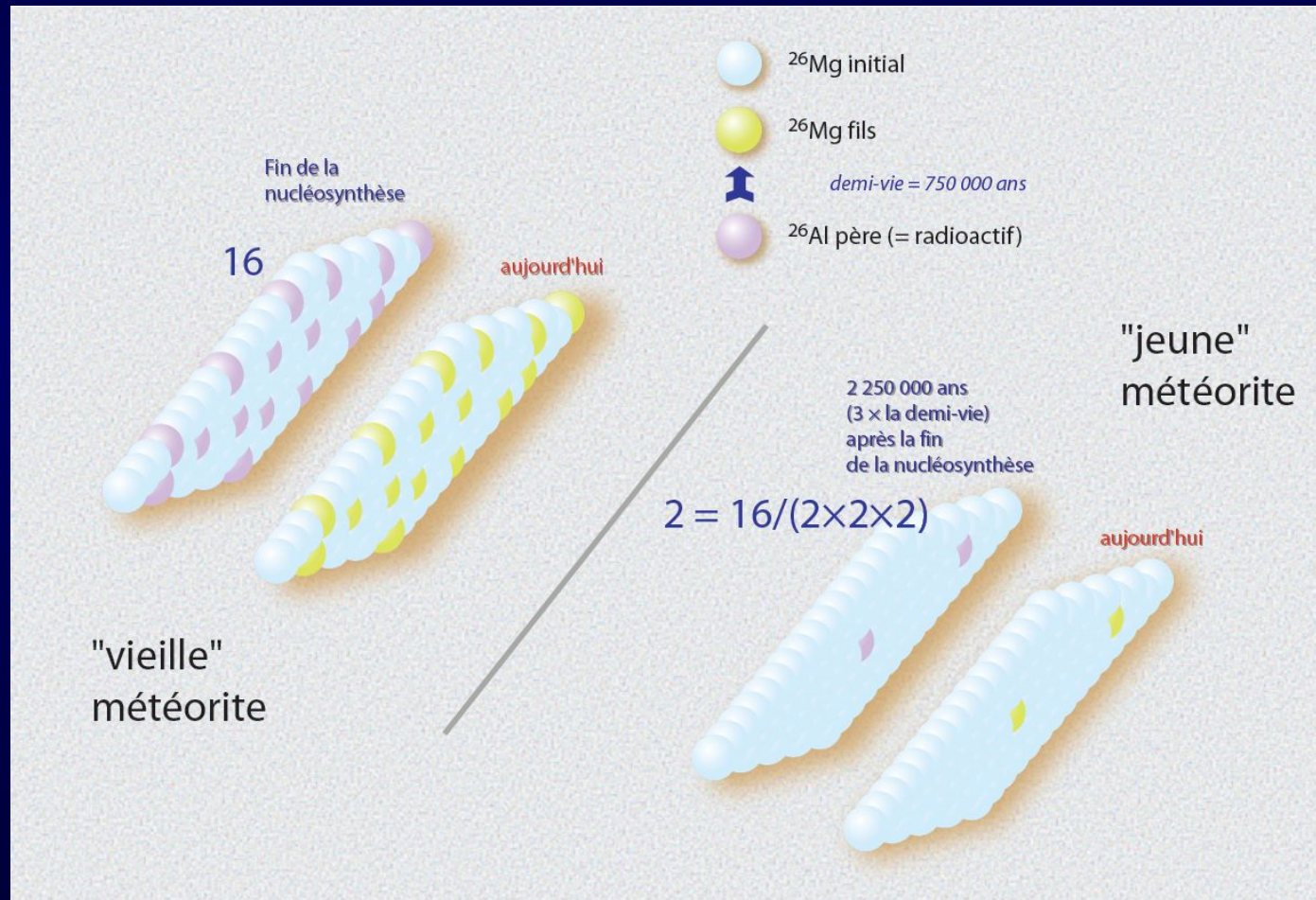


L'âge des inclusions réfractaires est maintenant bien déterminé

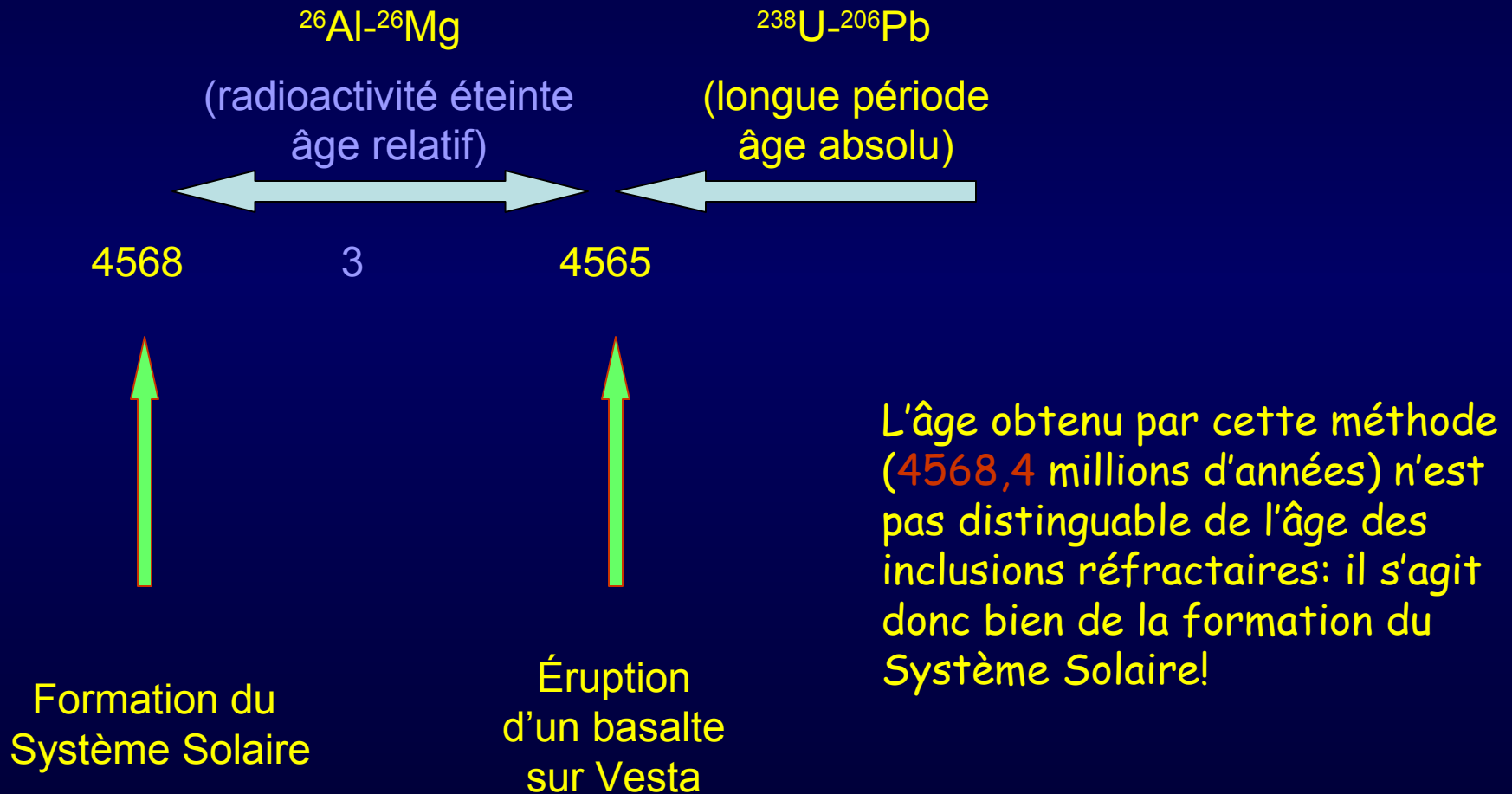


Autre étude d'Allende (Amelin, 2002): $4567,9 \pm 0,5 \text{ Ma}$

L'abondance des nucléides 'fils' issus des radioactivités éteintes donne un âge relatif des évènements



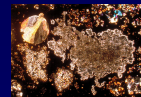
Datations du Système Solaire



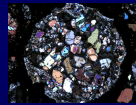
La datation de la condensation des premières gouttes de matériel planétaire

Matériel présolaire (diamant, carbure de silicium) mémoire stellaire

Inclusions réfractaires ($t > 1500^{\circ}\text{C}$)

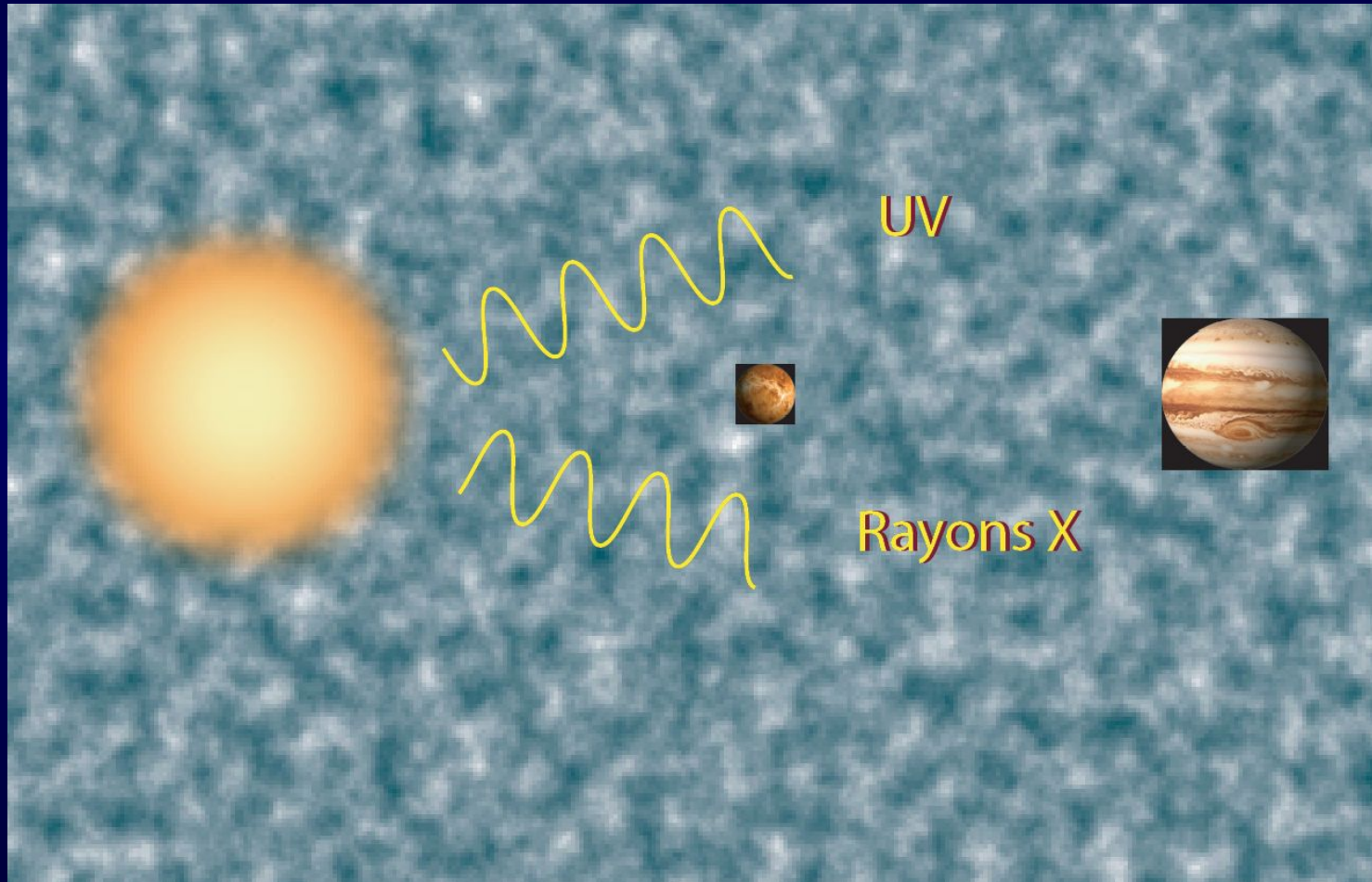


Chondres ($t \sim 1200^{\circ}\text{C}$)



*La radioactivité éteinte aluminium-magnesium
(^{26}Al - ^{26}Mg) de demi-vie 750 000 ans
montre que les inclusions réfractaires et les chondres
se sont formés en moins de 3 000 000 ans.*

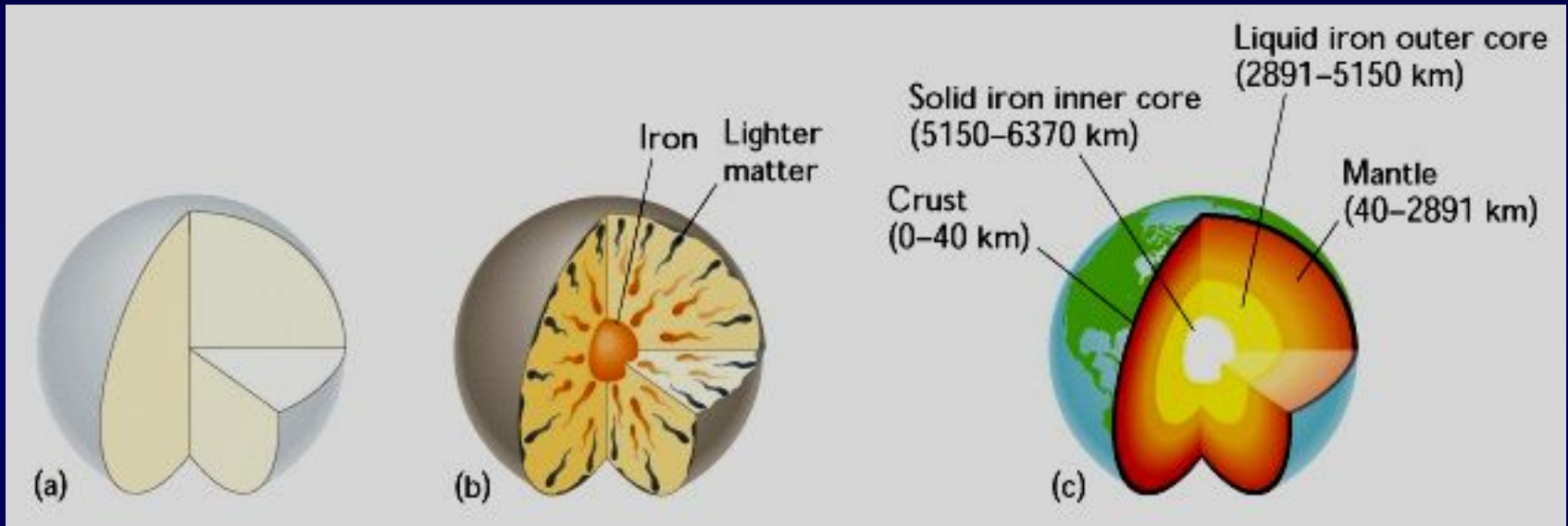
Vers 10 millions d'années, le grand typhon
electromagnétique: la phase T-Tauri du Soleil
balaye gaz et particules



L'enfer sur Terre



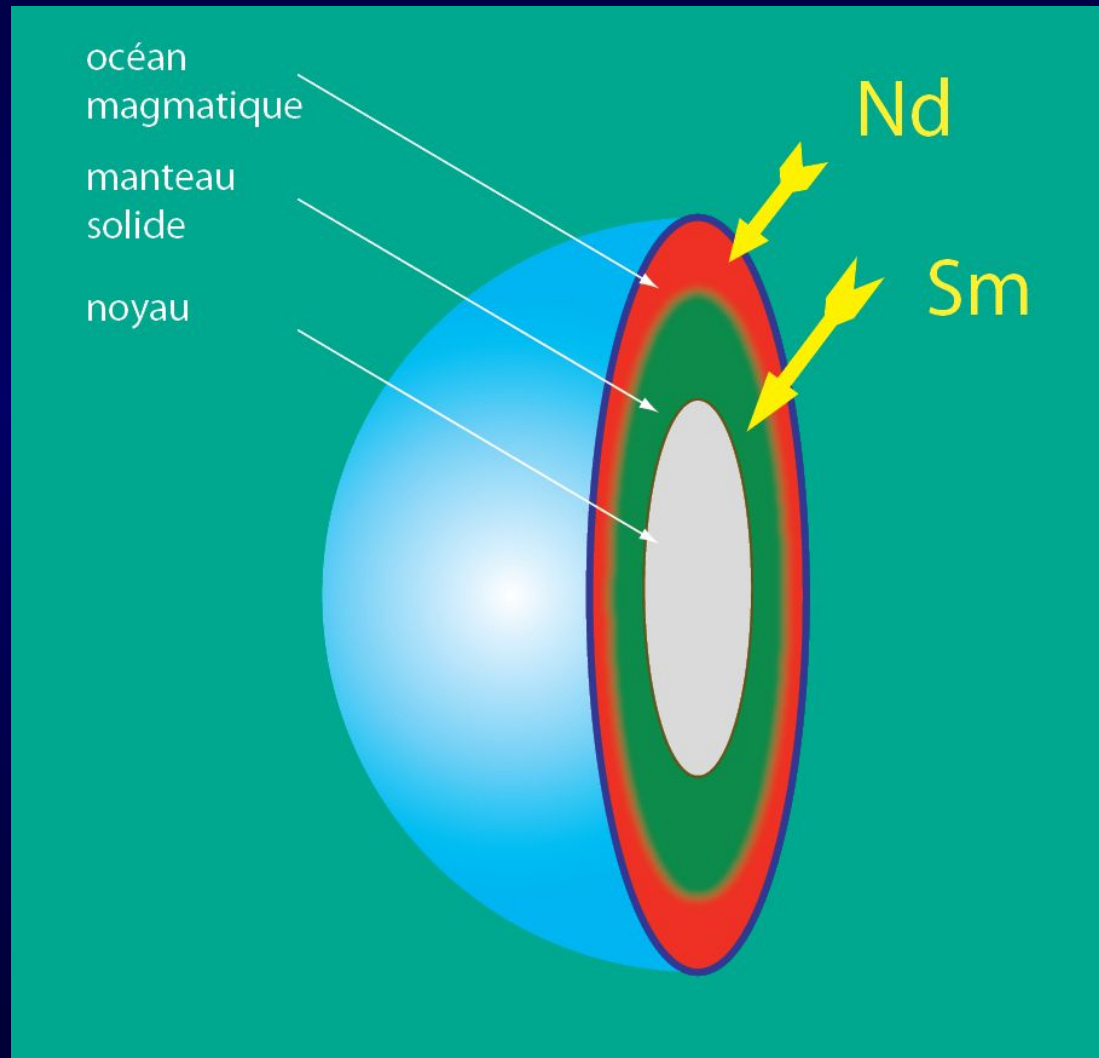
La différenciation interne des planètes terrestres



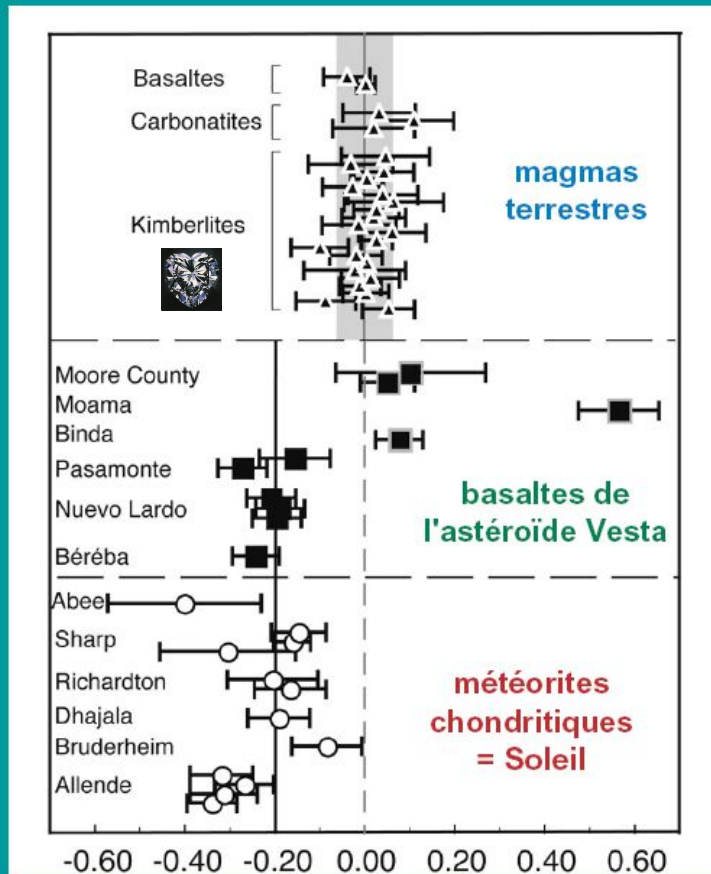
Les grosses planètes sont largement fondues: formation du noyau et solidification d'un océan magmatique

La datation de l'océan magmatique par la méthode samarium-néodyme

$^{146}\text{Sm} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$ (demi-vie de 103 000 000 ans)



Les planètes sont nées fondues



excès de néodyme 142 par
rapport à la Terre ($\times 10000$)

Boyet et Carlson (2005)

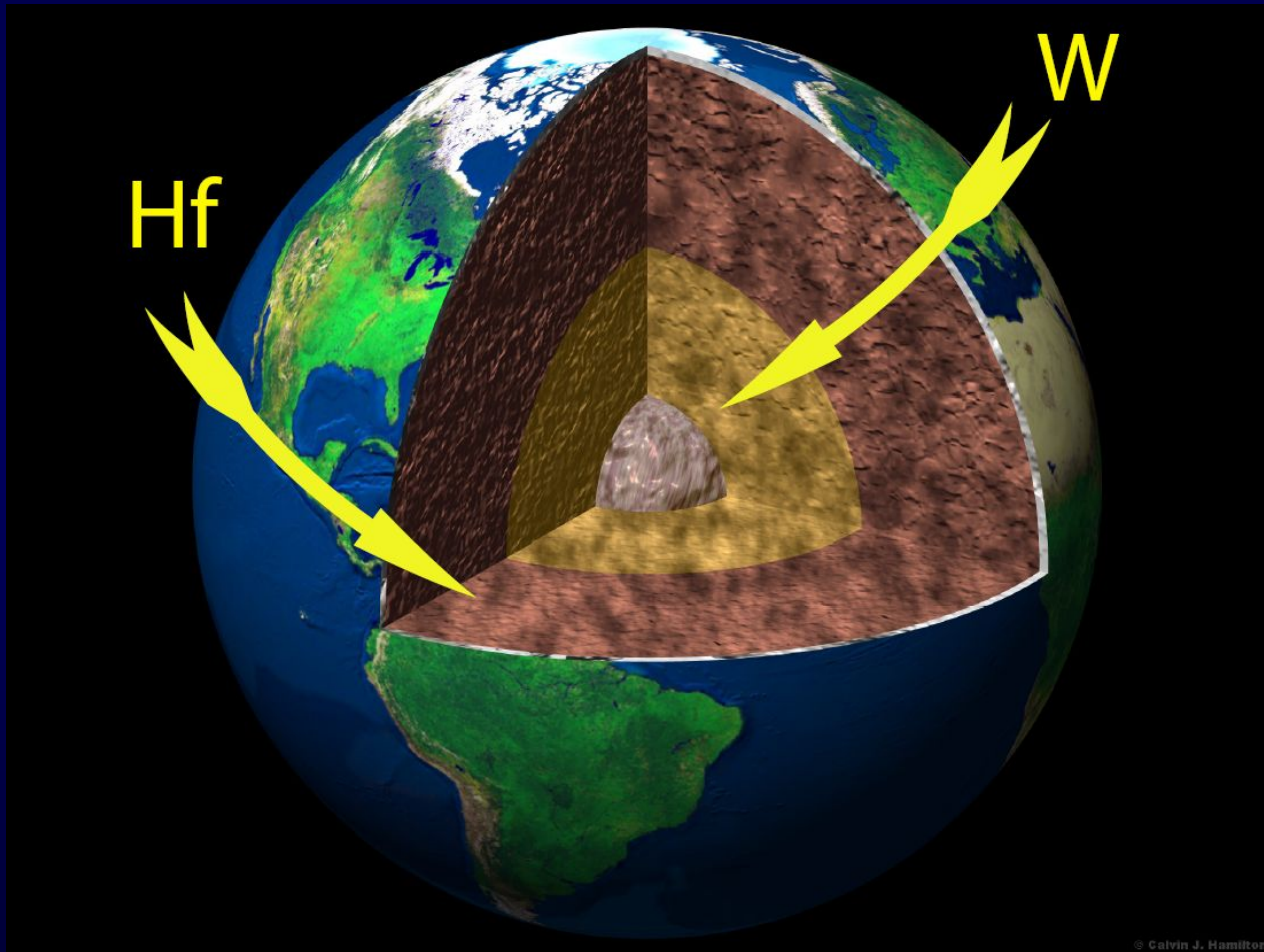
Le nucléide radioactif samarium 146 (père) décroît en néodyme 142 (fils) en 103 millions d'années.

L'existence d'excès de nucléide fils indique donc que le nucléide père était présent lors de la formation des planètes.

Ceci exige une fusion généralisée de la Terre (océan magmatique) que l'on peut placer entre 0 et 30 millions d'années après la formation du Système Solaire.

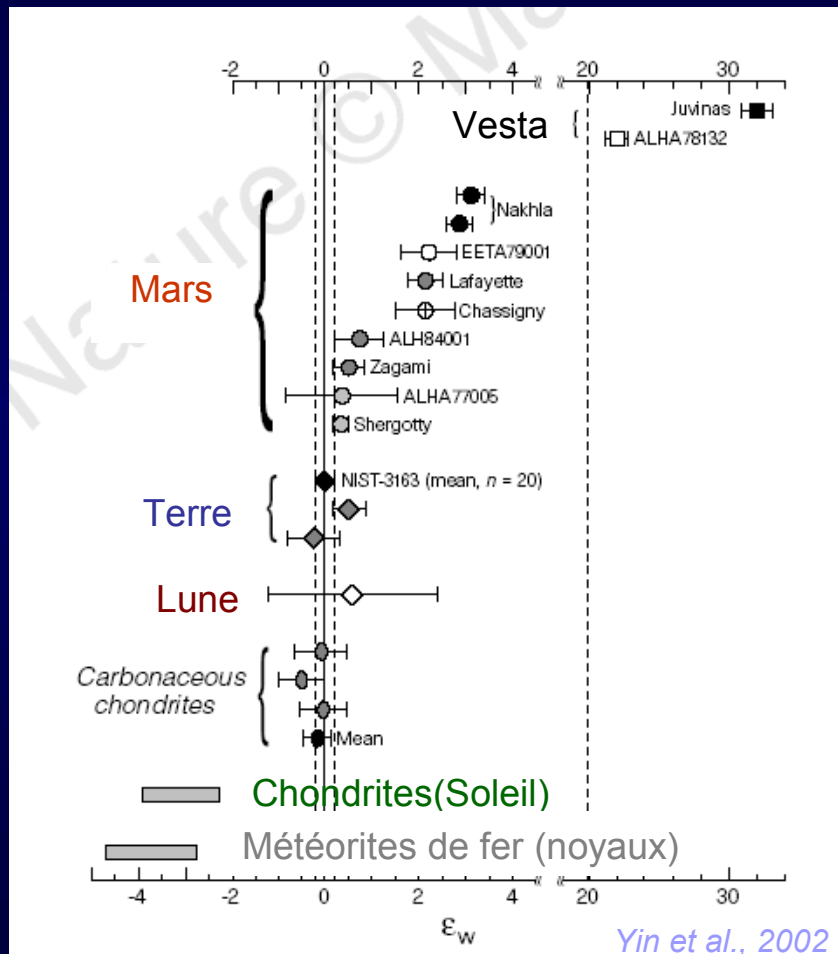
La datation du noyau par la méthode hafnium-tungstène

$^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$ (demi-vie de 8 900 000 ans)



Le noyau des planètes aussi!

Age relatif en millions d'années



L'hafnium 182 se désintègre en tungstène 182 avec une demi-vie de 8,5 millions d'années

L'élément père hafnium (Hf) se concentre dans le silicate et le tungstène (W) dans le métal.

Le chronomètre donne donc un âge de la séparation silicate-métal et donc de la formation du noyau.

Le noyau terrestre s'est formé en 30 millions d'années, au fond de l'océan magmatique!

excès de tungstène 182 ($\times 10000$)

L'origine de la chaleur de fusion

L'énergie gravitationnelle, qui ne devient importante que pour les planètes les plus grosses ($> \text{Mars}$). Cette énergie est identique à celle des impacts! Une forme particulière de cette énergie est la séparation du noyau des planètes (1500° de réchauffement pour toute la Terre).

Les radioactivités éteintes à courte période: l'aluminium 26, qui disparaît en 2-3 millions d'années et le fer 60 qui disparaît en 5-8 millions d'années. Si l'accrétion est trop lente (grains, petits objets), cette énergie est irradiée dans l'espace et ne sert pas à chauffer les planètes.

L'origine de la chaleur de fusion

L'énergie gravitationnelle, qui ne devient importante que pour les planètes les plus grosses ($> \text{Mars}$). Cette énergie est identique à celle des impacts! Une forme particulière de cette énergie est la séparation du noyau des planètes (1500° de réchauffement pour toute la Terre).

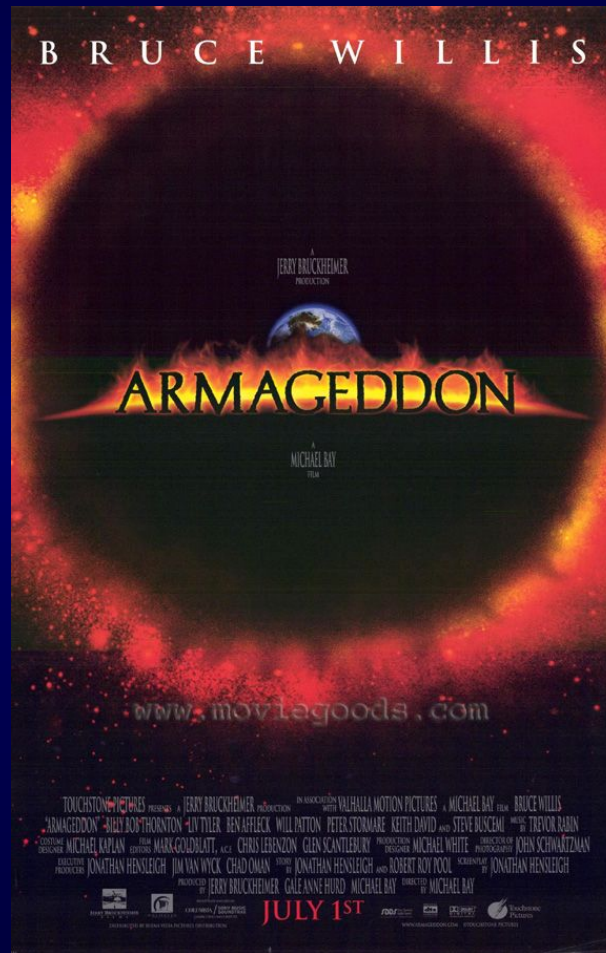
Les radioactivités éteintes à courte période: l'aluminium 26, qui disparaît en 2-3 millions d'années et le fer 60 qui disparaît en 5-8 millions d'années. Si l'accrétion est trop lente (grains, petits objets), cette énergie est irradiée dans l'espace et ne sert pas à chauffer les planètes.

L'origine de la Lune

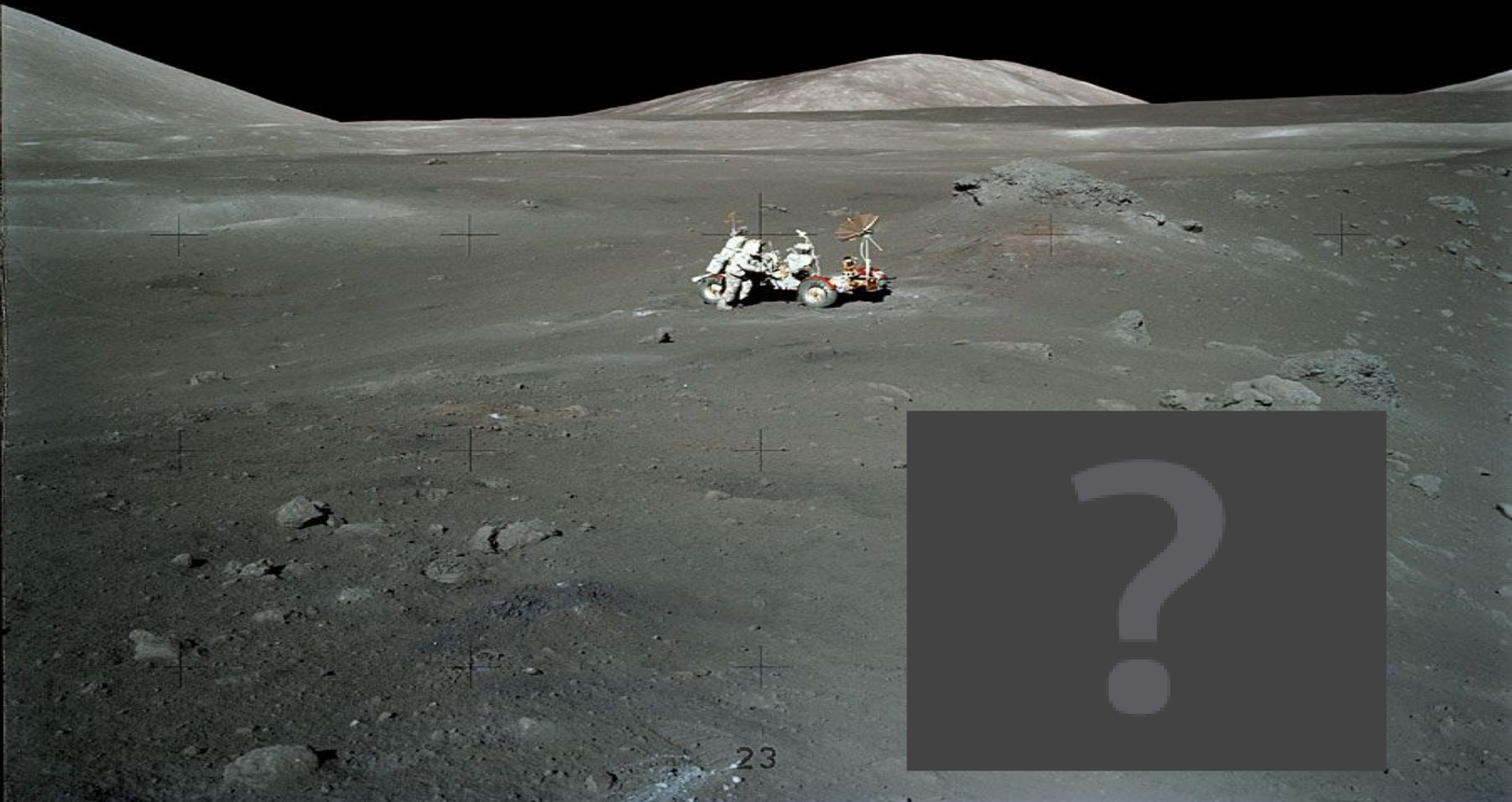


Le dernier des gros impacts

Un phénomène bien ordinaire...



L'impact géant qui forma la Lune



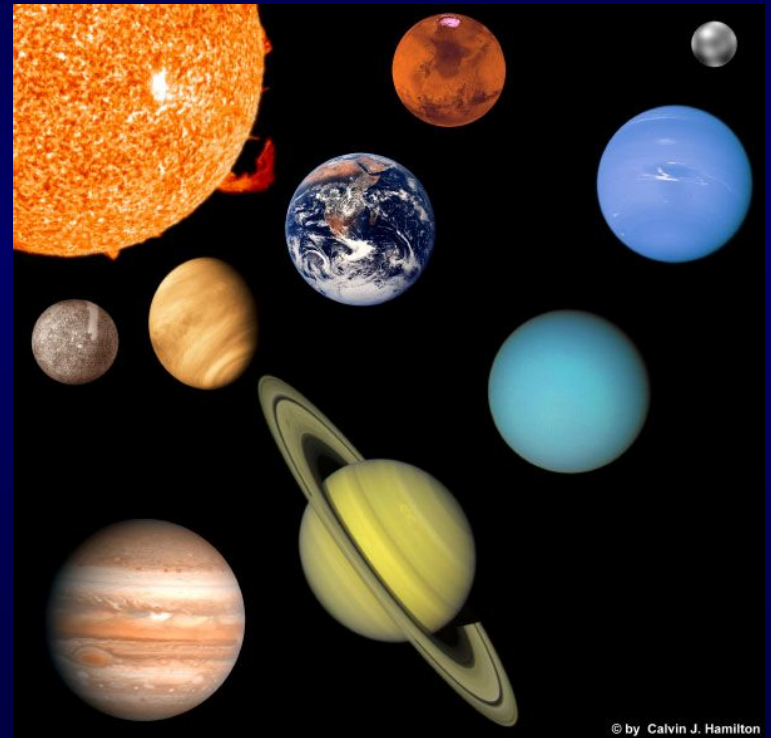
Datation de l'impact lunaire

La dernière séparation du tungstène (dans le noyau) et du hafnium (dans le liquide de l'océan magmatique) est datée par le chronomètre $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$ à 42 millions d'années après la formation du Système Solaire. Ceci doit dater l'impact lunaire avec une assez bonne précision.

Kleine et al. (2005)

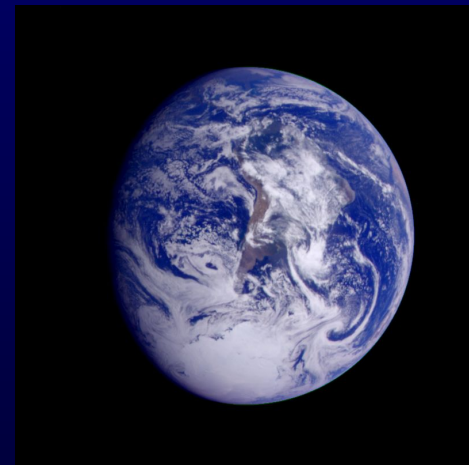
A quoi tient la différence entre les planètes ?

- La distance au Soleil (température): les planètes lointaines peuvent condenser les gaz (hydrogène, hélium)
- La gravité et donc la pression interne dépendent de la taille de la planète



A quoi tient la différence entre les planètes ?

- La distance au Soleil (température): les planètes lointaines peuvent condenser les gaz (hydrogène, hélium)
- La gravité et donc la pression interne dépendent de la taille de la planète



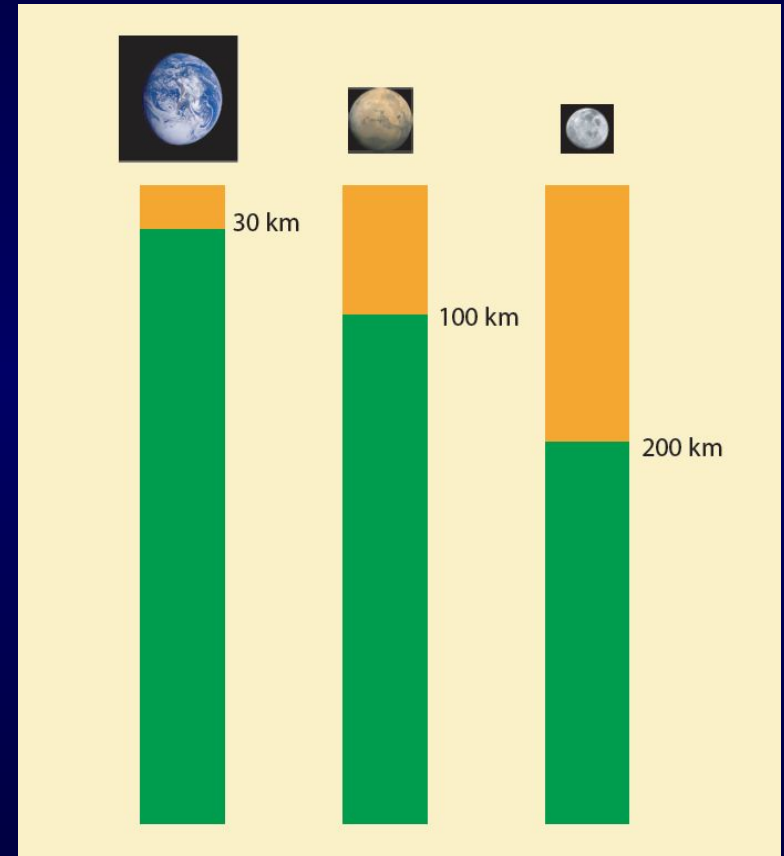
Pourquoi la gravité est-elle si importante ?

- Elle retient l'eau et les gaz atmosphériques
- Elle est le moteur de la *poussée d'Archimède* : les minéraux communs tombent dans le magma sauf le feldspath qui flotte; le feldspath est stable à 30 km sur la Terre, 100 km sur Mars, 200 km sur la Lune; la Lune est donc rapidement enveloppée d'une 'croûte' feldspathique (les montagnes lunaires) qui tiennent longtemps le magma au chaud!



Pourquoi la gravité est-elle si importante ?

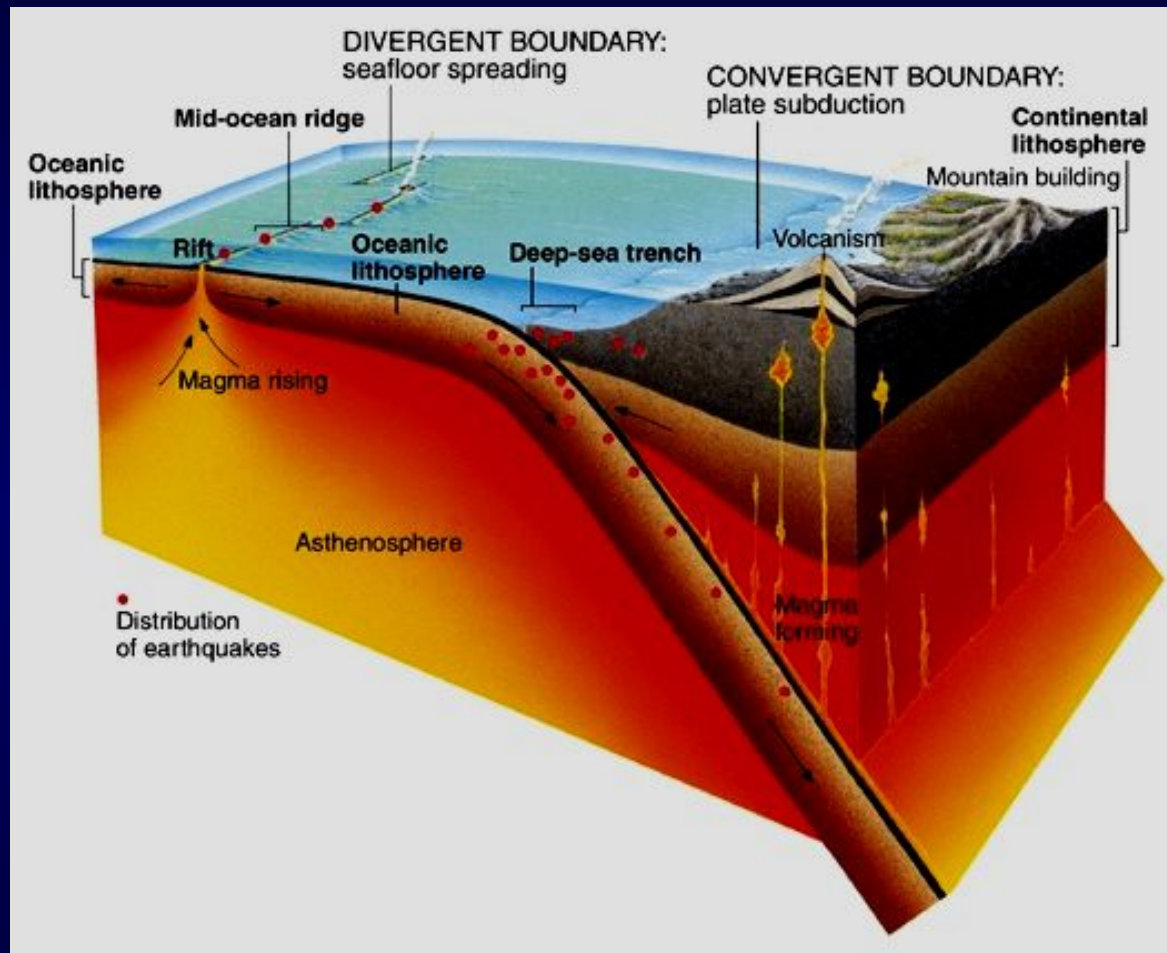
- Elle retient l'eau et les gaz atmosphériques
- Elle est le moteur de la *poussée d'Archimède* : les minéraux communs tombent dans le magma sauf le feldspath qui flotte; le feldspath est stable à 30 km sur la Terre, 100 km sur Mars, 200 km sur la Lune; la Lune est donc rapidement enveloppée d'une 'croûte' feldspathique (les montagnes lunaires) qui tient longtemps le magma bien au chaud!



Une roche feldspathique lunaire

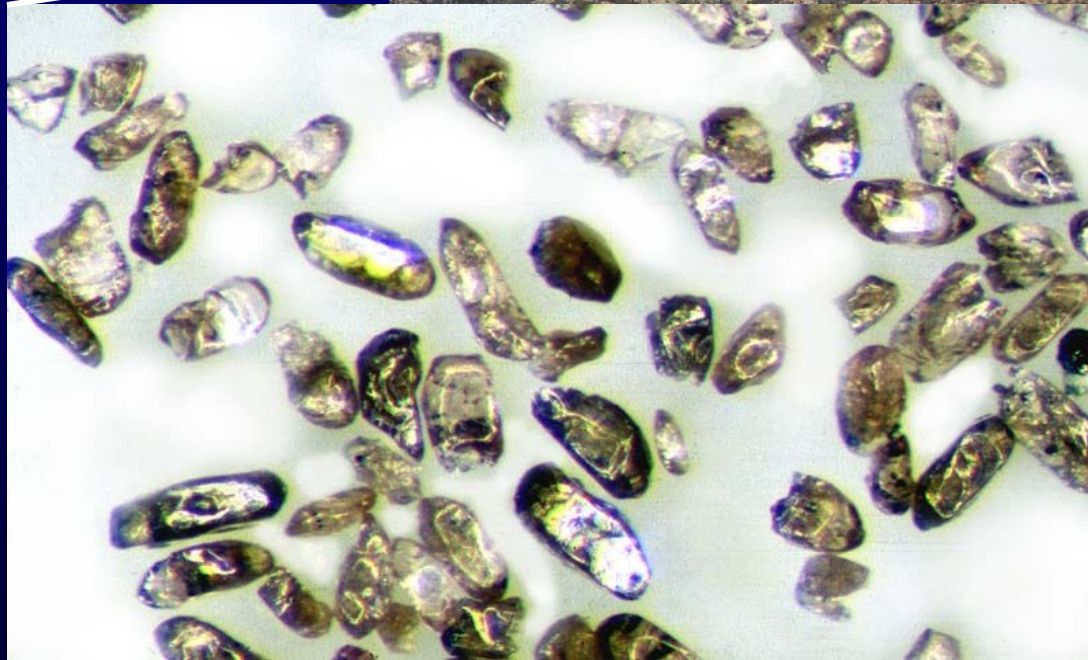
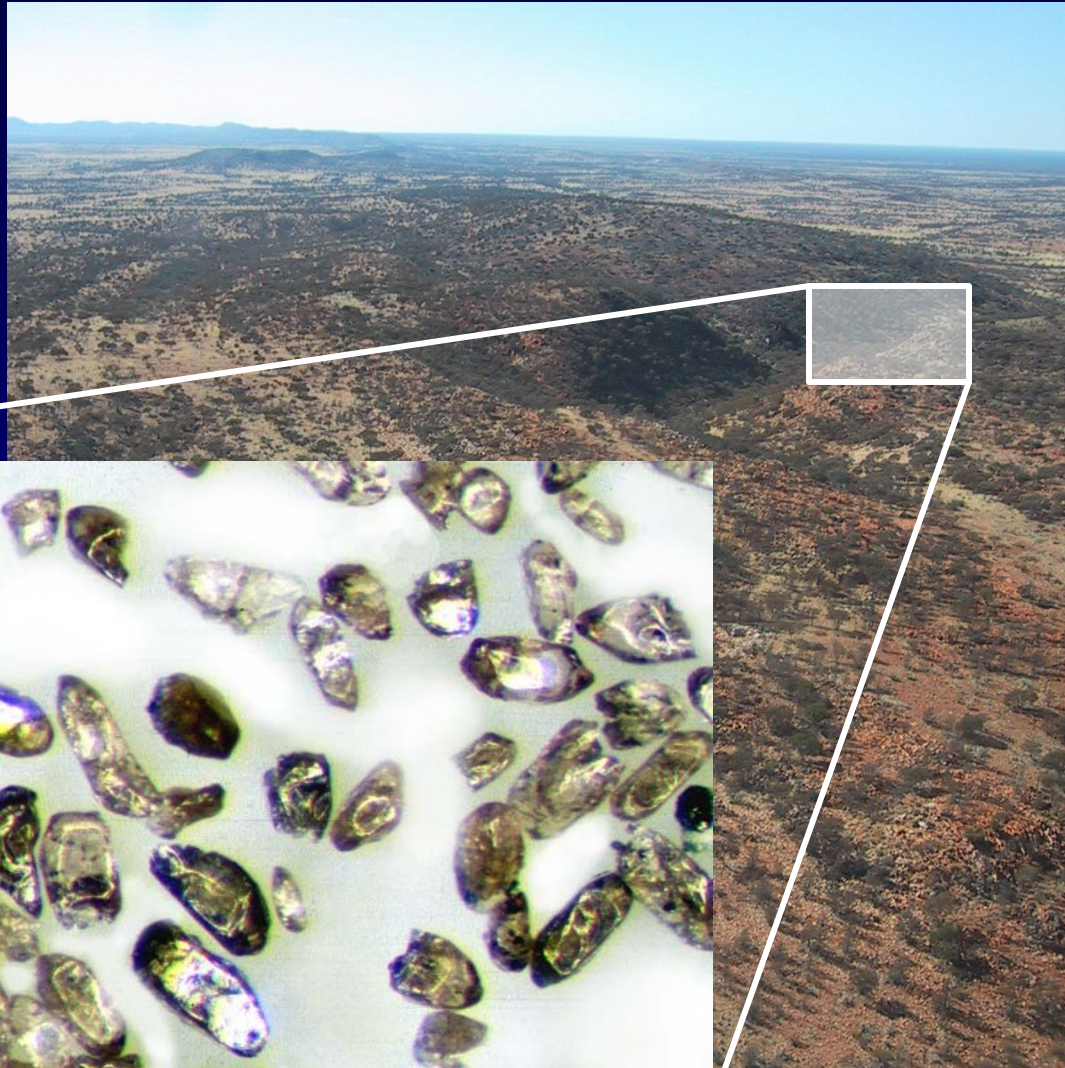


La Terre dynamique moderne

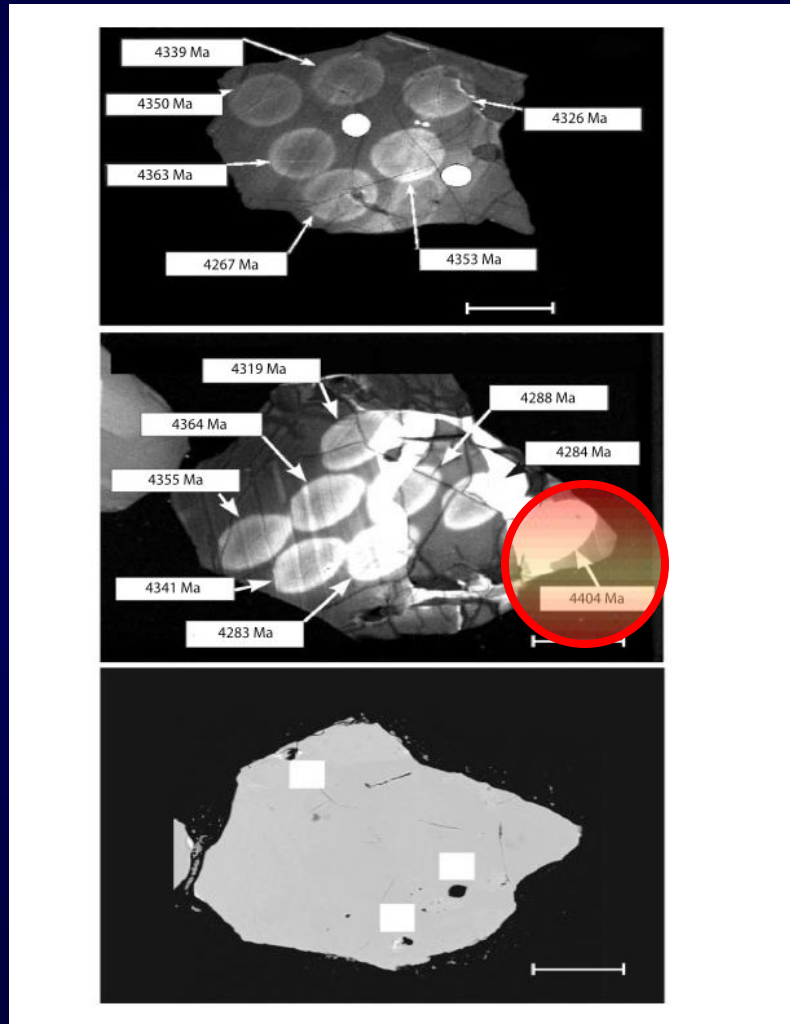


Depuis quand?

Les plus vieux minéraux : zircons de Jack Hills, Western Australia (4400 millions d'années)



Le premier minéral



- Un zircon ZrSiO_4 formé à partir d'un granite vieux de 4400 millions d'années atteste de la formation rapide de la croûte

Le plus vieux terrain: Isua, Groenland (3850 millions d'années)



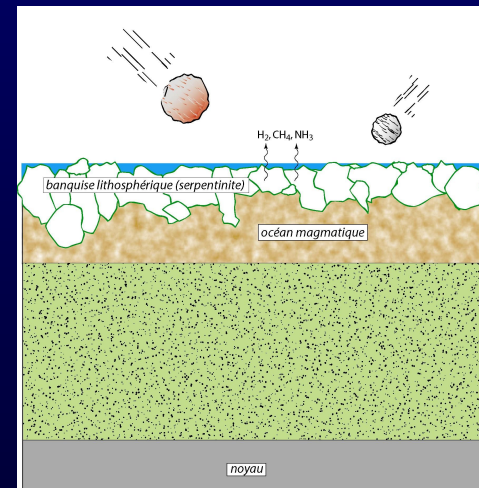
Les plus vieux sédiments



La couleur noire est due à la présence de graphite dont les isotopes du carbone suggèrent qu'il s'agit de matière organique

L'atmosphère primitive et l'apparition de la vie

- La réaction du magma chaud et de ses produits de cristallisation avec l'eau produit de l'hydrogène
- La réaction de l'hydrogène avec le gaz carbonique et l'azote atmosphériques produit du méthane et de l'ammoniac



Les plus vieux hobbits (3850 millions d'années) !





Merci à tous !