



La séparation de GEB (la Terre) et NOUT (le Ciel)

Comment sommes-nous parvenus à déterminer l'âge de la Terre ?

4 milliards 567 millions et 300 000 ans \pm 160 000 ans

52 millions 778 mille 250 h \pm 1h

Le début ?



Peinture W.K. Hartmann – La nébuleuse solaire (Laplace, 1796)

Quelle méthode pour mesurer l'âge de la Terre ?

- À l'antiquité
- Au Moyen-Âge
- Les premiers balbutiements de la science naturaliste
- L'entrée en scène de la physique
- Et maintenant

Dater par la stratigraphie

Water is the primary agent of crustal weathering



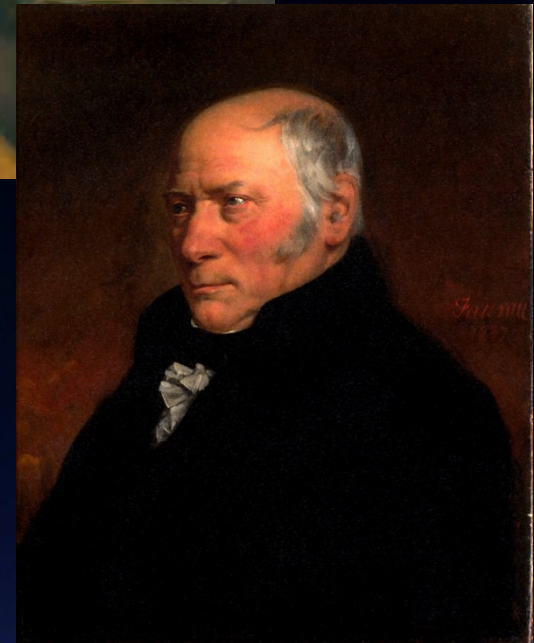
« Principe » de superposition

« Principe » d'actualisme implique la proportionnalité, laquelle permet de déterminer un âge

Baron Georges Cuvier, 1769-1832
Assistant professeur au Muséum <1795



Georges Louis Leclerc, comte de
Buffon, 1707-1788
Intendant du Jardin du Roi <1739



William Smith, 1769-1839

Dater par la stratigraphie

Water is the primary agent of crustal weathering



Buffon obtient des âges se chiffrant en millions d'années

Cuvier et Smith (1816) réalisent qu'il faut y ajouter le temps de creusement des vallées

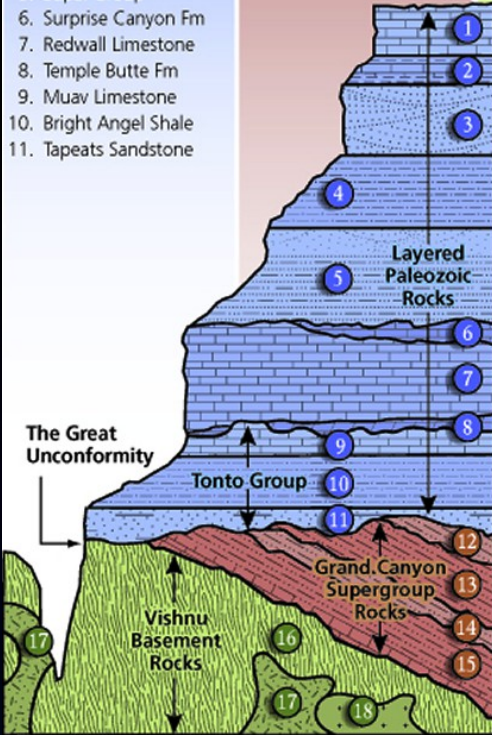
Dater par la stratigraphie


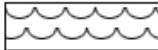






Mais la situation est rarement aussi ouverte et aussi « simple » qu'au Grand Canyon...

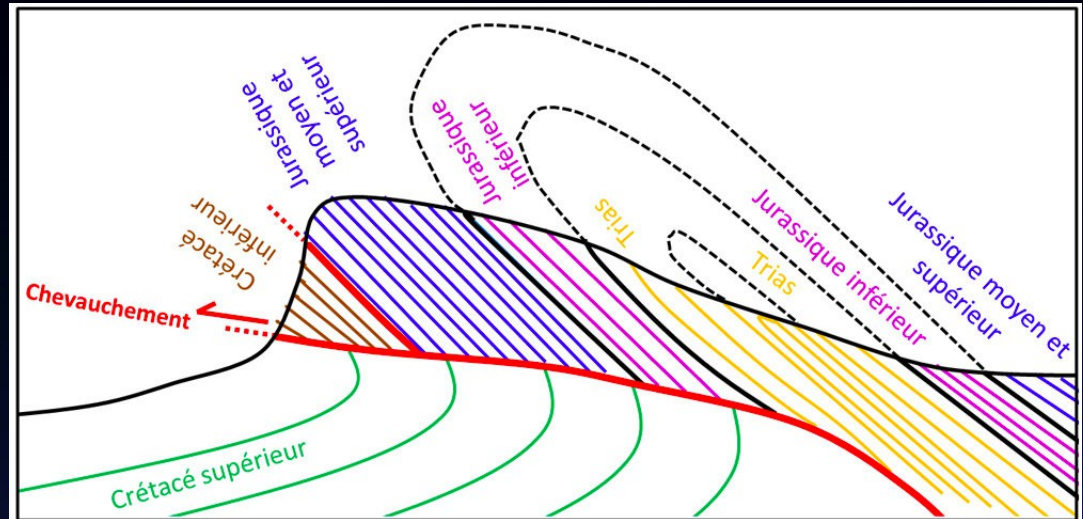
Grand Canyon's Three Sets of Rocks

Layered Paleozoic Rocks	Grand Canyon Supergroup Rocks	Vishnu Basement Rocks
1. Kaibab Formation (Fm)	12. Sixtymile Formation	16. Schists
2. Toroweap Formation	13. Chuar Group	17. Granites
3. Coconino Sandstone	14. Nankoweap Fm	18. Elves Chasm Gneiss
4. Hermit Formation	15. Unkar Group	Layer age in millions of years
5. Supai Group		Layer thickness in feet
6. Surprise Canyon Fm		
7. Redwall Limestone		
8. Temple Butte Fm		
9. Muav Limestone		
10. Bright Angel Shale		
11. Tapeats Sandstone		



-  **graded bedding**
-  **ripple marks**
-  **raindrop impressions**
-  **clam shells**
-  **tree root system**
-  **vesicles**

Examples of Primary Structures in original orientation. (Not to scale.)



Représentation schématique théorique d'une « montagne inversée » du type du Puech de Bugarach

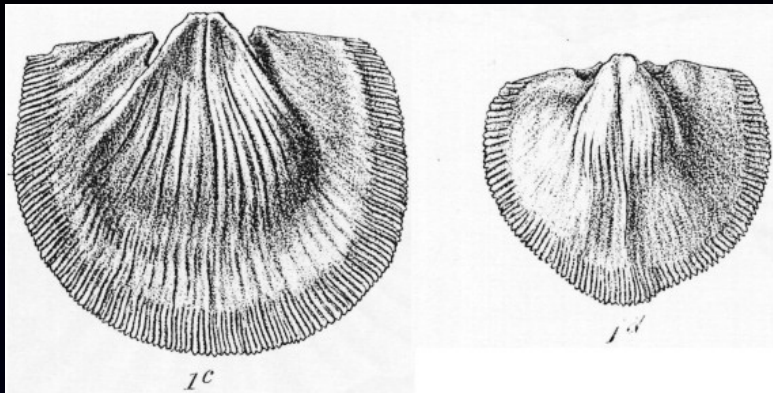
Schéma : Pierre Thomas



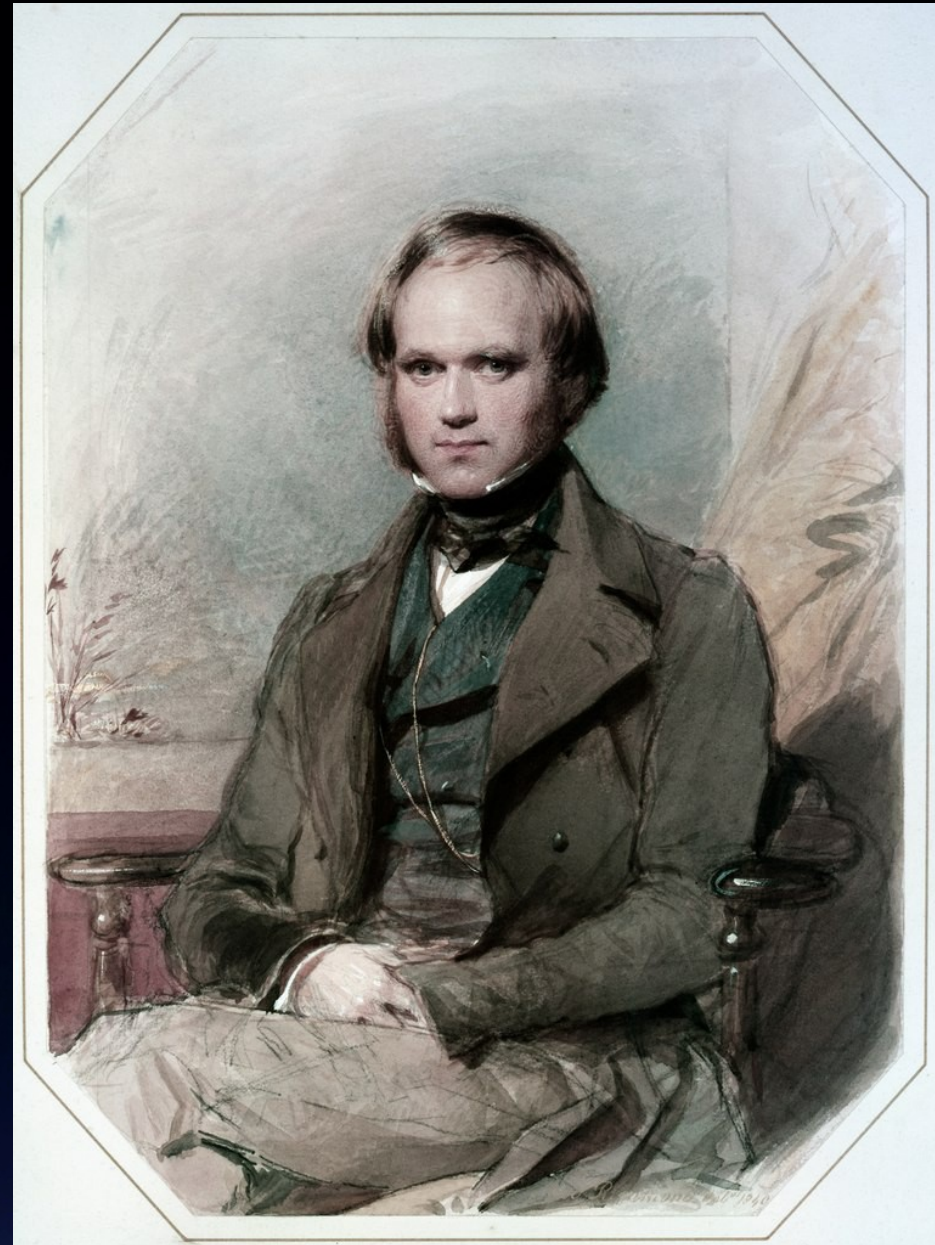
*Professeur d'Histoire naturelle des
Insectes et des Vers au Jardin du Roi
(Muséum) <1790*

« Oh ! qu'elle est grande,
l'antiquité du globe terrestre ! et
combien sont petites les idées de
ceux qui attribuent à l'existence
de ce globe une durée de six mille
et quelque cent ans, depuis son
origine jusqu'à nos jours ! »
(Hydrogéologie, 1802)

Jean-Baptiste de Monet, chevalier de
Lamarck, 1744-1829

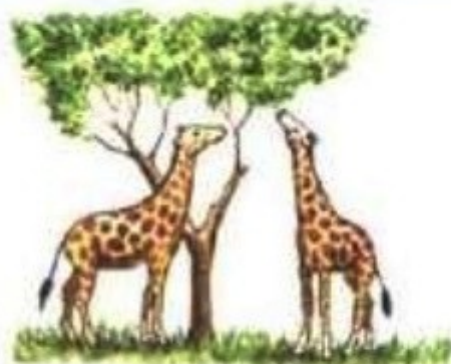
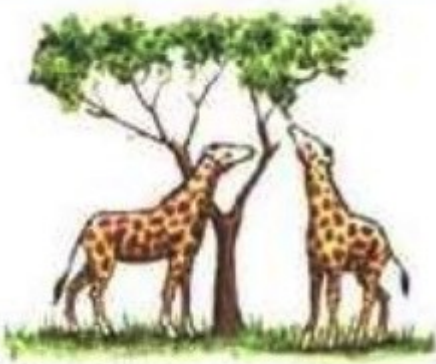


*Fossiles collectés à la Malouine orientale
le 22 mars 1833*

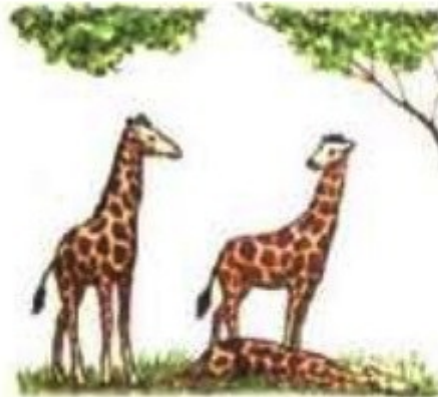
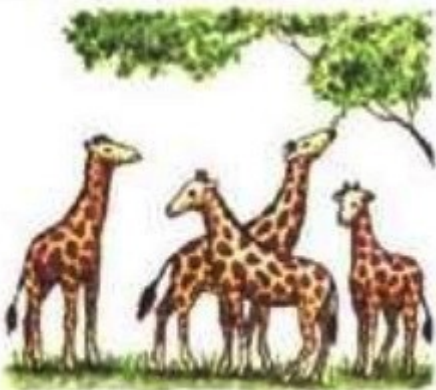


Charles Robert Darwin, 1809-1882

LAMARCK



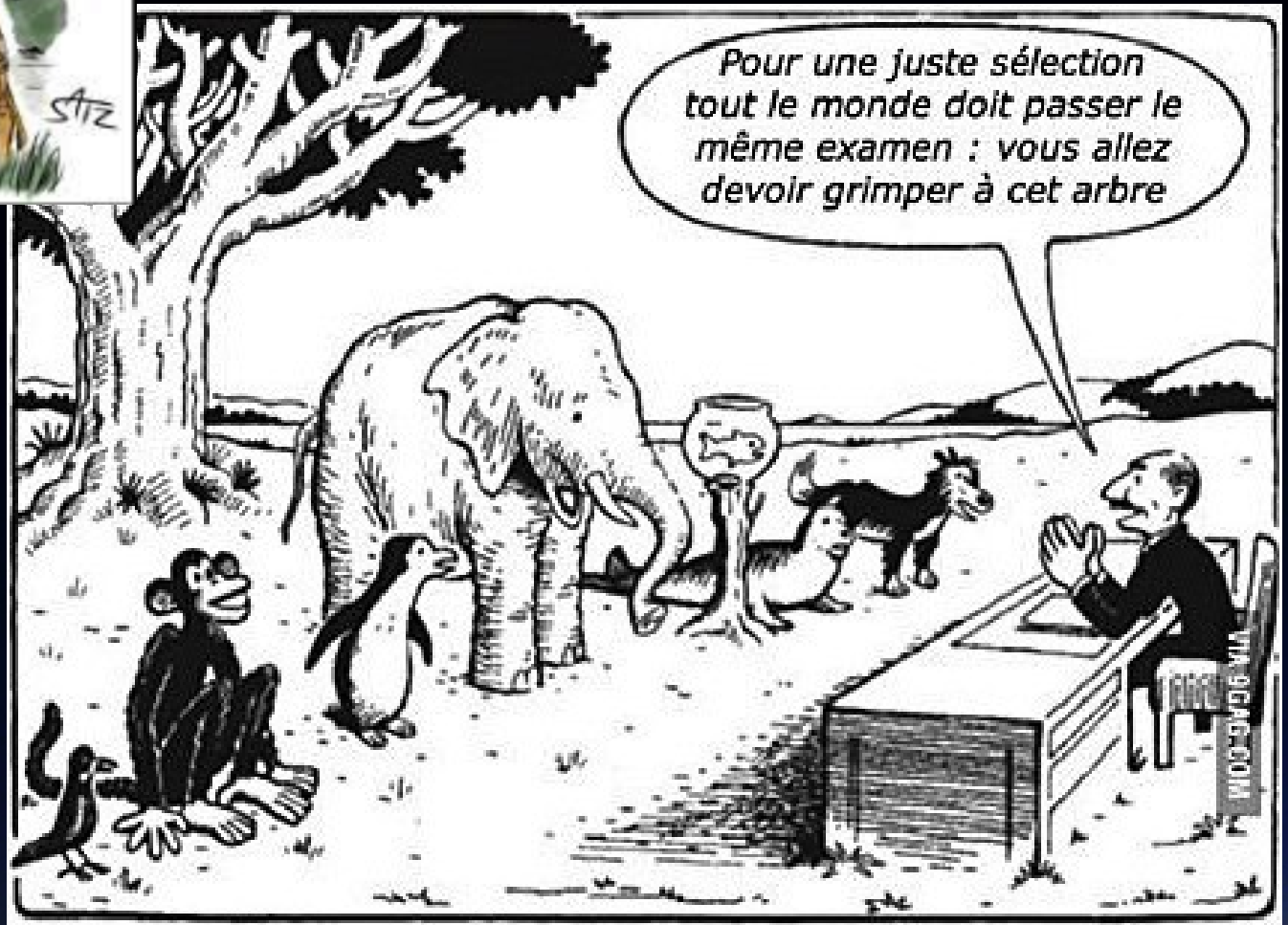
DARWIN

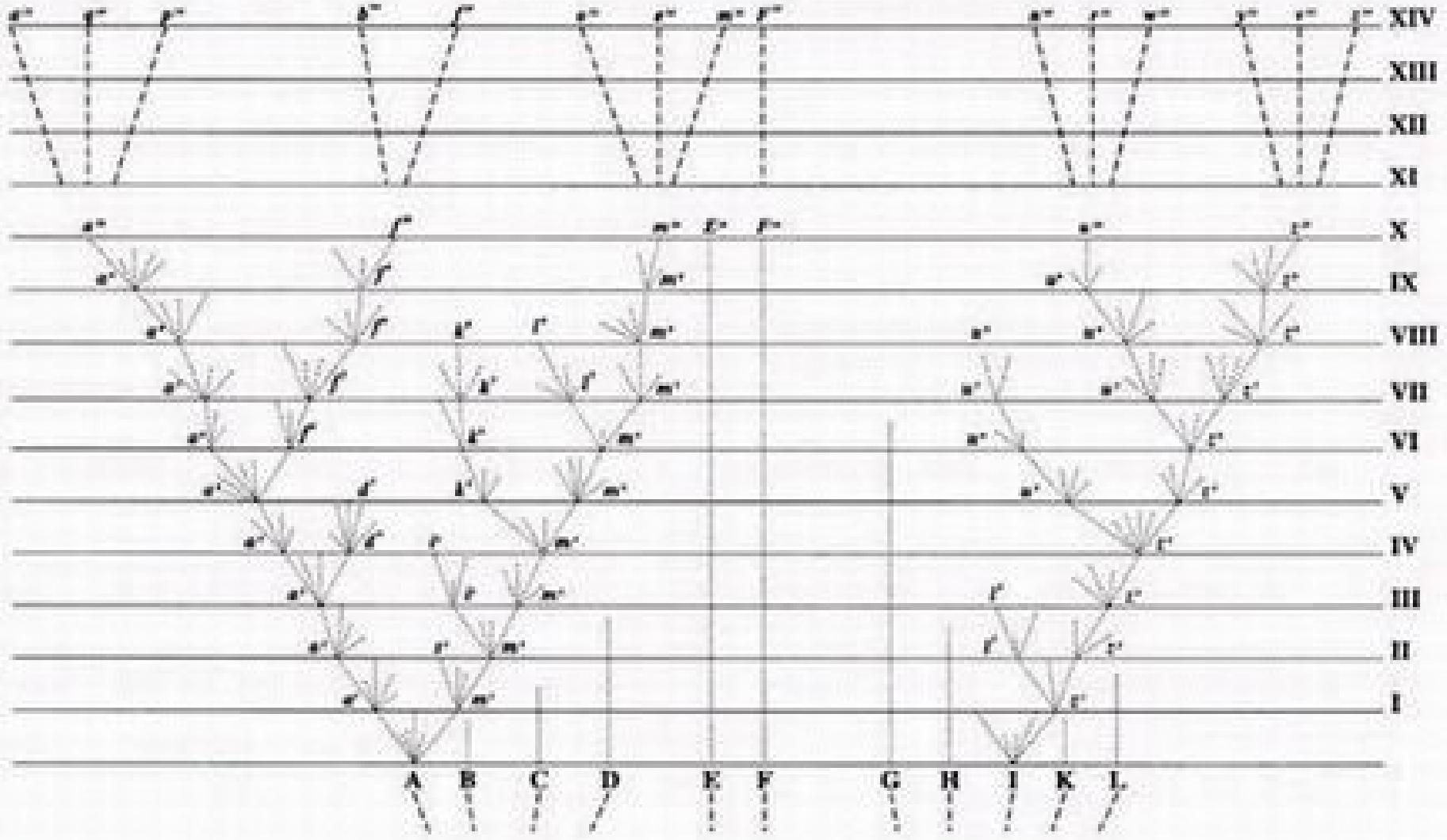


YEAH, APPARENTLY
MY PARENTS DIDN'T
STRIVE HARD ENOUGH
FOR THOSE UPPER
CANOPY LEAVES.

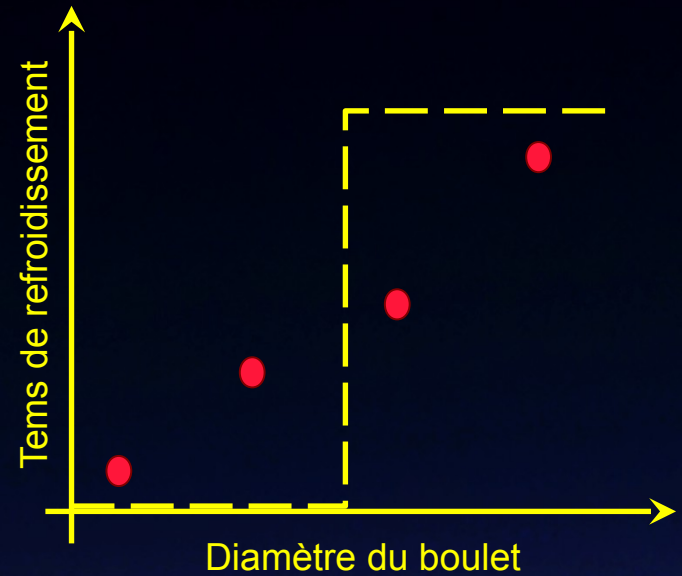
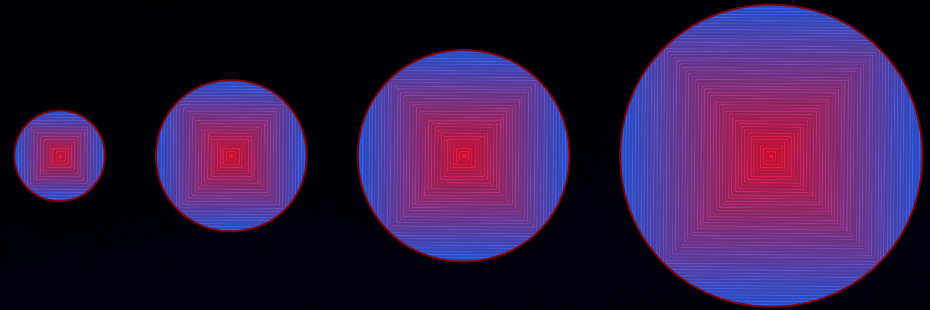


*Pour une juste sélection
tout le monde doit passer le
même examen : vous allez
devoir grimper à cet arbre*



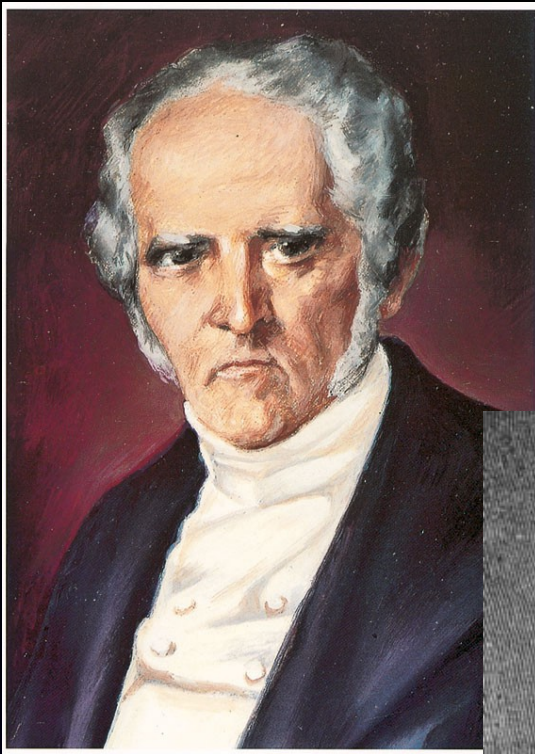


La physique entre en scène



Expériences sur le progrès de la chaleur dans les corps (1774)

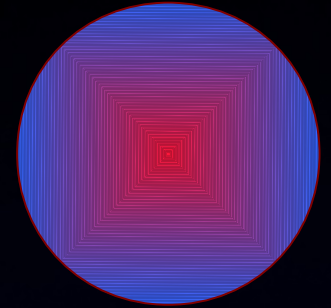
$\Rightarrow \approx 100$ millions d'années



Joseph Fourier,
1768 - 1830

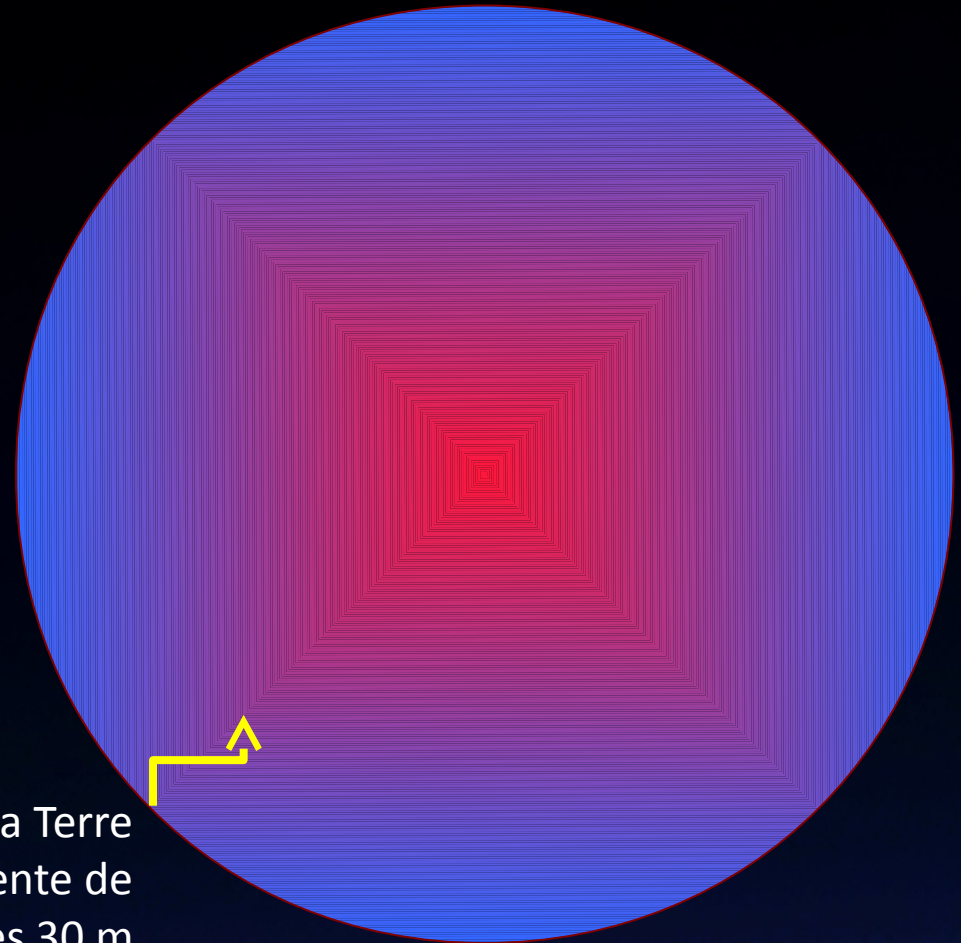


William Thomson, Lord Kelvin of Largs, 1824 - 1907



Les hypothèses de Kelvin :

- La Terre était initialement une boule de roche en fusion à la température de 3900°C
- Elle perd son énergie par conduction au travers d'une matière rigide – ce qui lui permet d'utiliser la théorie de Fourier



Lorsque l'on s'enfonce dans la Terre (mines), la température augmente de 1°C tous les 30 m

=> Âge compris entre 20 et 400 millions d'années

Combien de temps le Soleil a-t-il brillé?

Si l'étoile rayonne en prenant sur son énergie potentielle gravitationnelle sa durée de vie sera :

$$\tau = \frac{U_G}{L_\star}$$

Dans le cas du Soleil, cela donne

$$\left\{ \begin{array}{l} R_\odot = 6.96 \cdot 10^5 \text{ km} \\ M_\odot = 1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg} \\ L_\odot = 3.83 \cdot 10^{26} \text{ W} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} U_G \approx 2.3 \cdot 10^{41} \text{ J} \\ \tau \approx 31 \cdot 10^6 \text{ ans} \end{array} \right.$$



Cette estimation faite par Helmholtz en 1854 et adoptée par Kelvin en 1862 conduit Kelvin à considérer que la formation du Système solaire remonte à **moins de 100 millions d'années**

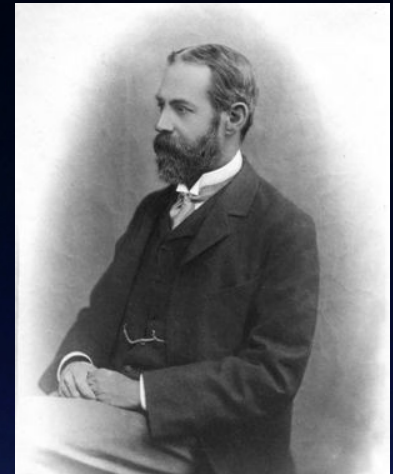
La controverse entre Darwin et Kelvin entre naturalistes et physiciens

Les géologues ne disposent pas d'une méthode de datation absolue... et le prestige de Lord Kelvin est immense



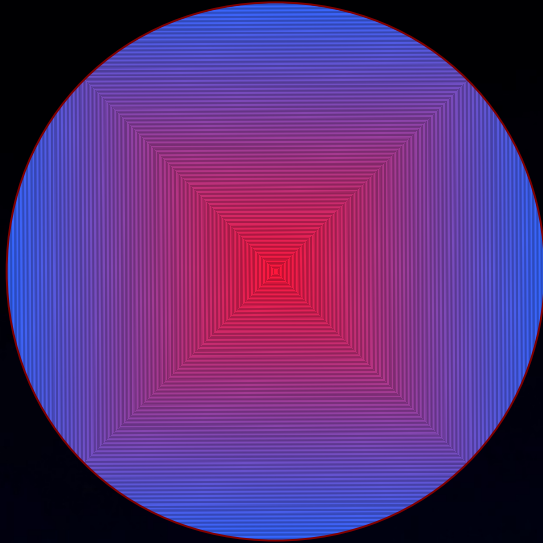
Ils abandonnent le terrain peu à peu... sauf quelques isolés tel que **John Goodchild (1844-1906)** : il détermine qu'il faut 3 000 ans pour sédimenter une couche d'argile épaisse d'un pied, 25 000 pour la même épaisseur de calcaire. Il évalue à 700 millions d'années la durée depuis le Cambrien, et à probablement autant de temps le temps qui a précédé depuis l'apparition de la vie sur Terre.

George Howard Darwin (1845 – 1912) : l'influence de la Lune sur la rotation d'une Terre, pâteuse, entraîne des des frottements qui ralentissent la rotation de la Terre sur elle-même et la période de révolution de la Lune autour de la Terre – ce qui augmente la distance entre elles. George Darwin calcule en 1879 que **la distance Terre-Lune était nulle il y a 54 millions d'années !**



Mort de Charles Darwin en 1882

Science « dure », science « semi-molle », qui avait raison ?



La physique, c'est le solfège,
la biologie et la géologie sont les concertos !

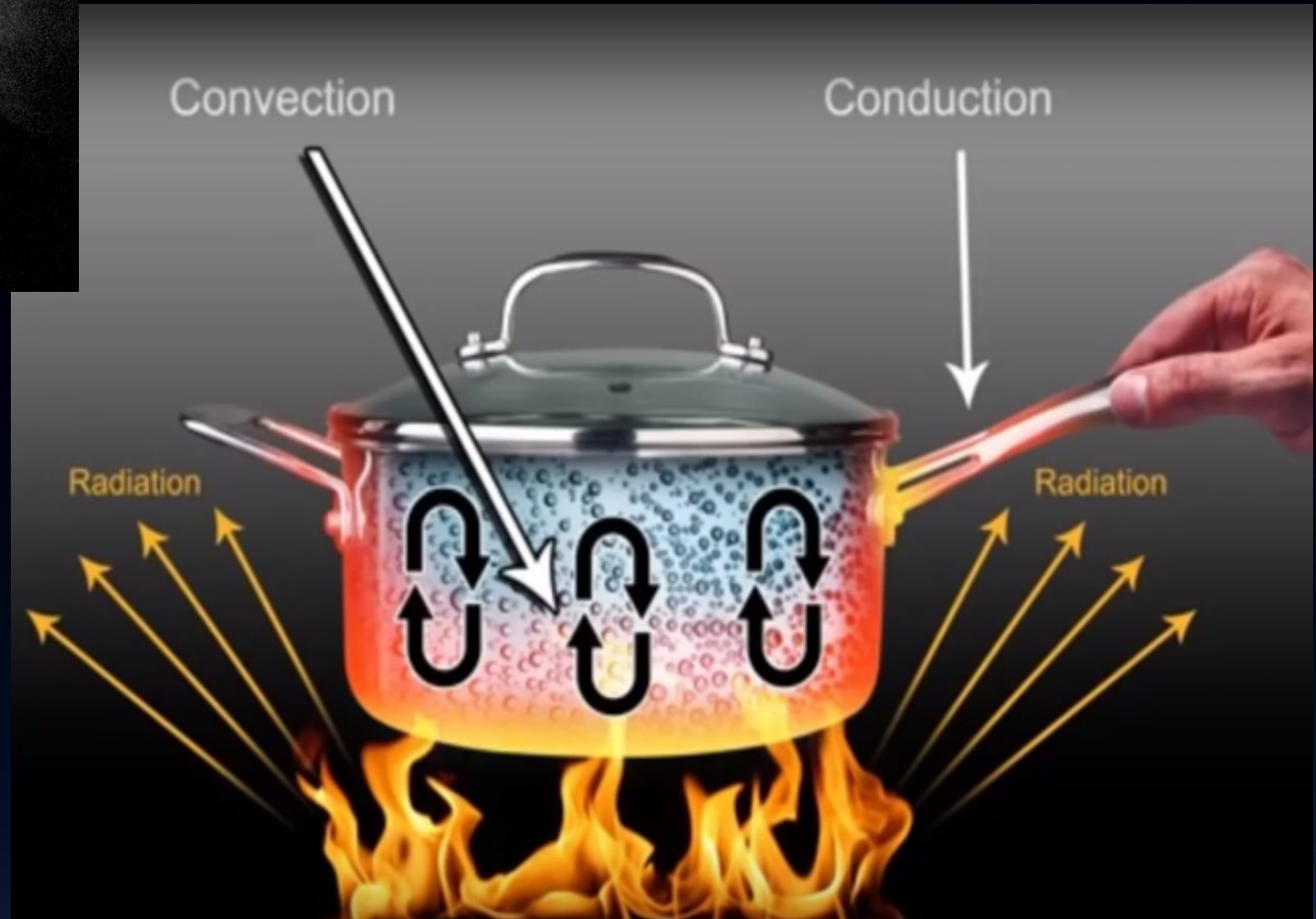
(Stéphane Sarrade, Marathon du Festival de Fleurance 2017)

Mais la Terre est-elle vraiment rigide... ou est-elle animée de mouvements de convection ?

Cette objection est faite à Kelvin par Perry en 1895



John Perry, 1850-1920





John Perry, 1850-1920

Avec la convection, c'est la Terre dans son ensemble qui apporte sa chaleur vers la surface, et la croûte superficielle se refroidit beaucoup plus LENTEMENT



Lorsque l'on s'enfonce dans la Terre (mines), la température augmente de 1°C tous les 30 m

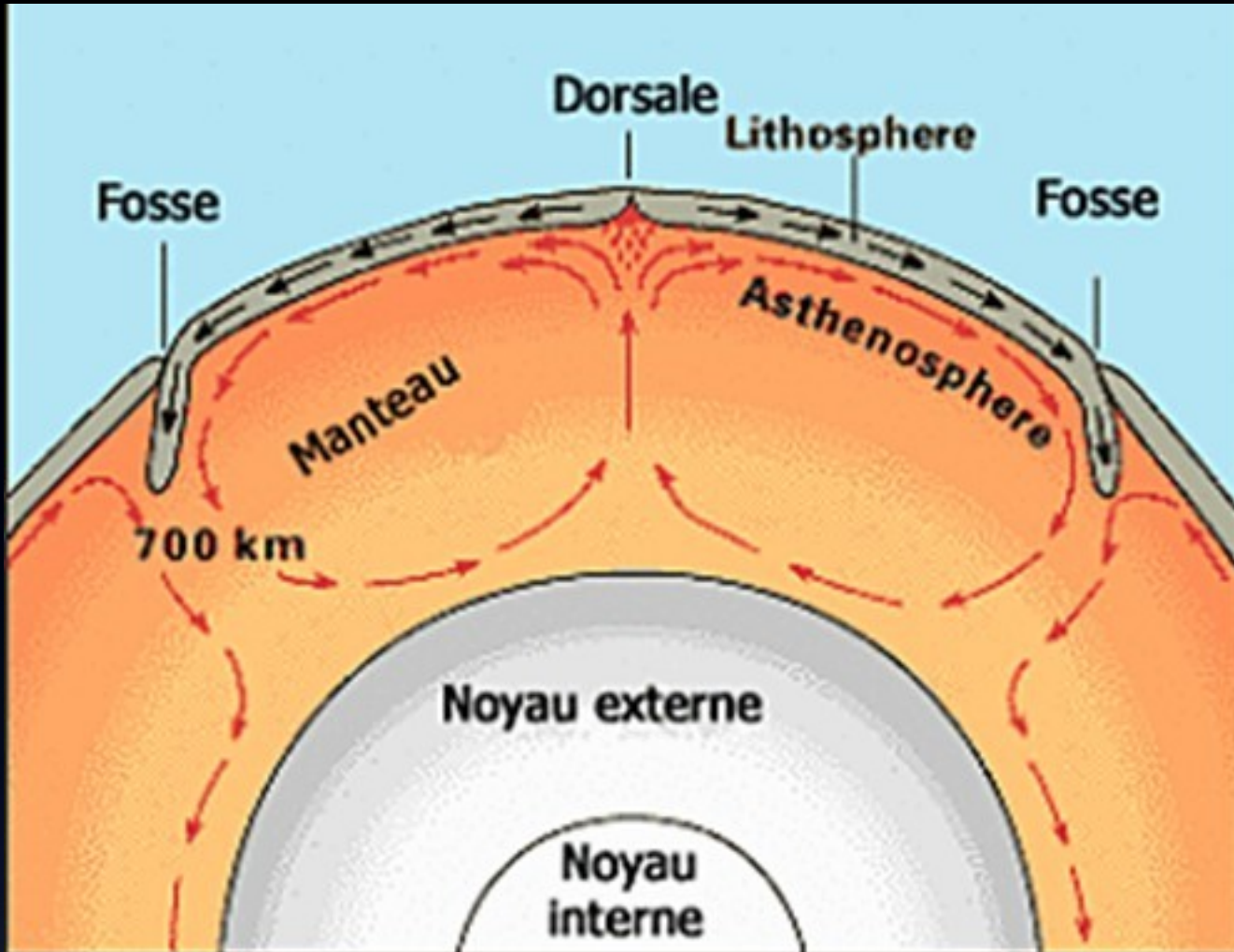
Le temps nécessaire au refroidissement calculé par Perry est de l'ordre de **plusieurs milliards d'années**

Perry ne parviendra jamais à convaincre Kelvin... qui a raison ?

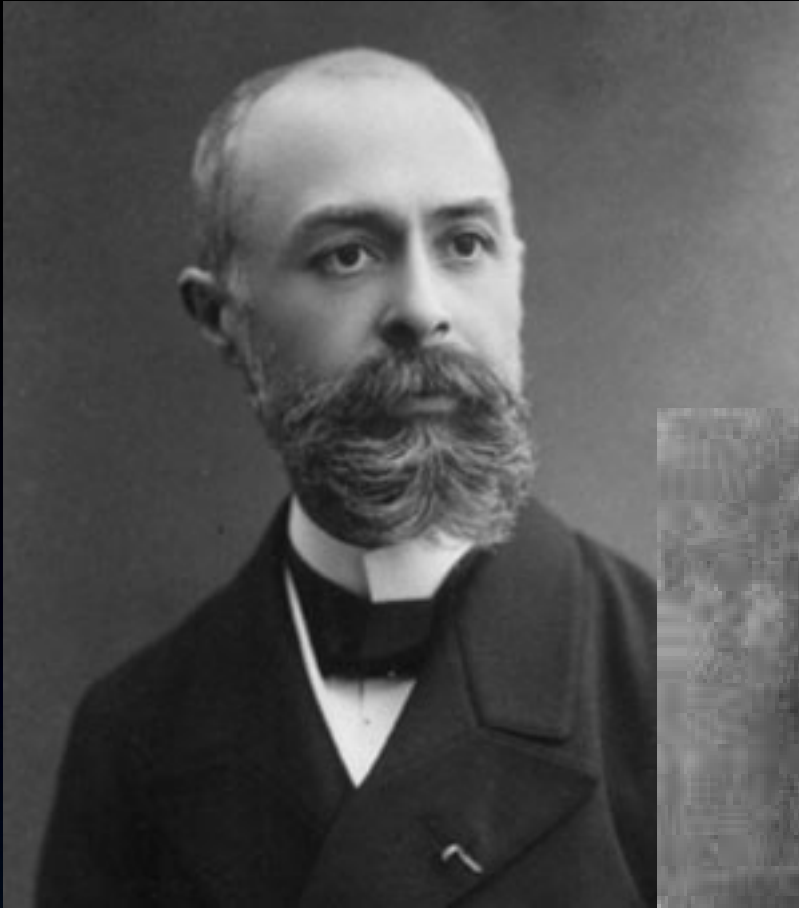


La Terre est **solide**... mais elle flue !

Le manteau de la Terre contient une source de chaleur **diffuse** : la radioactivité



1896 : Découverte de la radioactivité



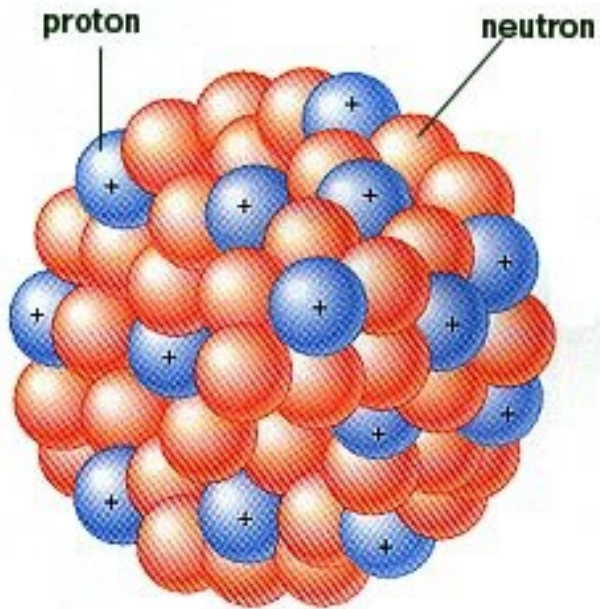
Henri **Becquerel**, 1852 – 1908
Professeur au Muséum



Pierre et Marie **Curie**, 1859-1906 et 1867-1934

Structure de la matière

Le noyau de l'atome



Z protons
N neutrons
 $A = Z + N$ nucléons

Comment lier les nucléons ?

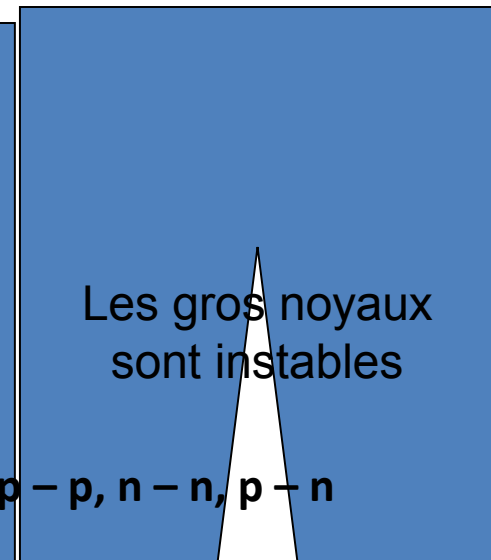
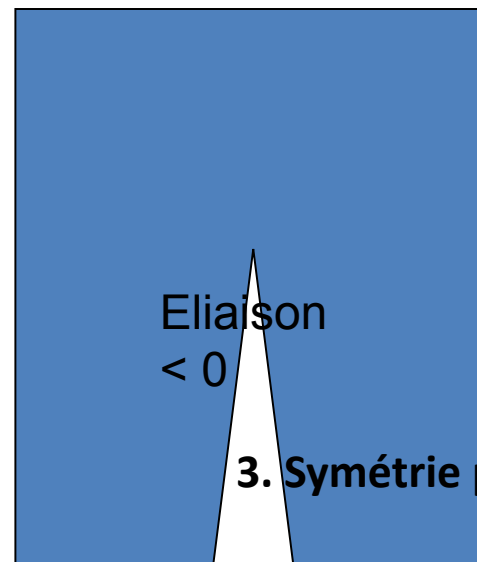
FORCE NUCLÉAIRE FORTE

1. Attractive

100 fois plus que
la répulsion électrostatique

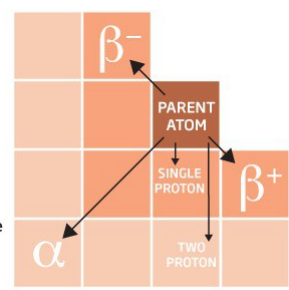
2. À courte portée

1 fermi = 10^{-15} m

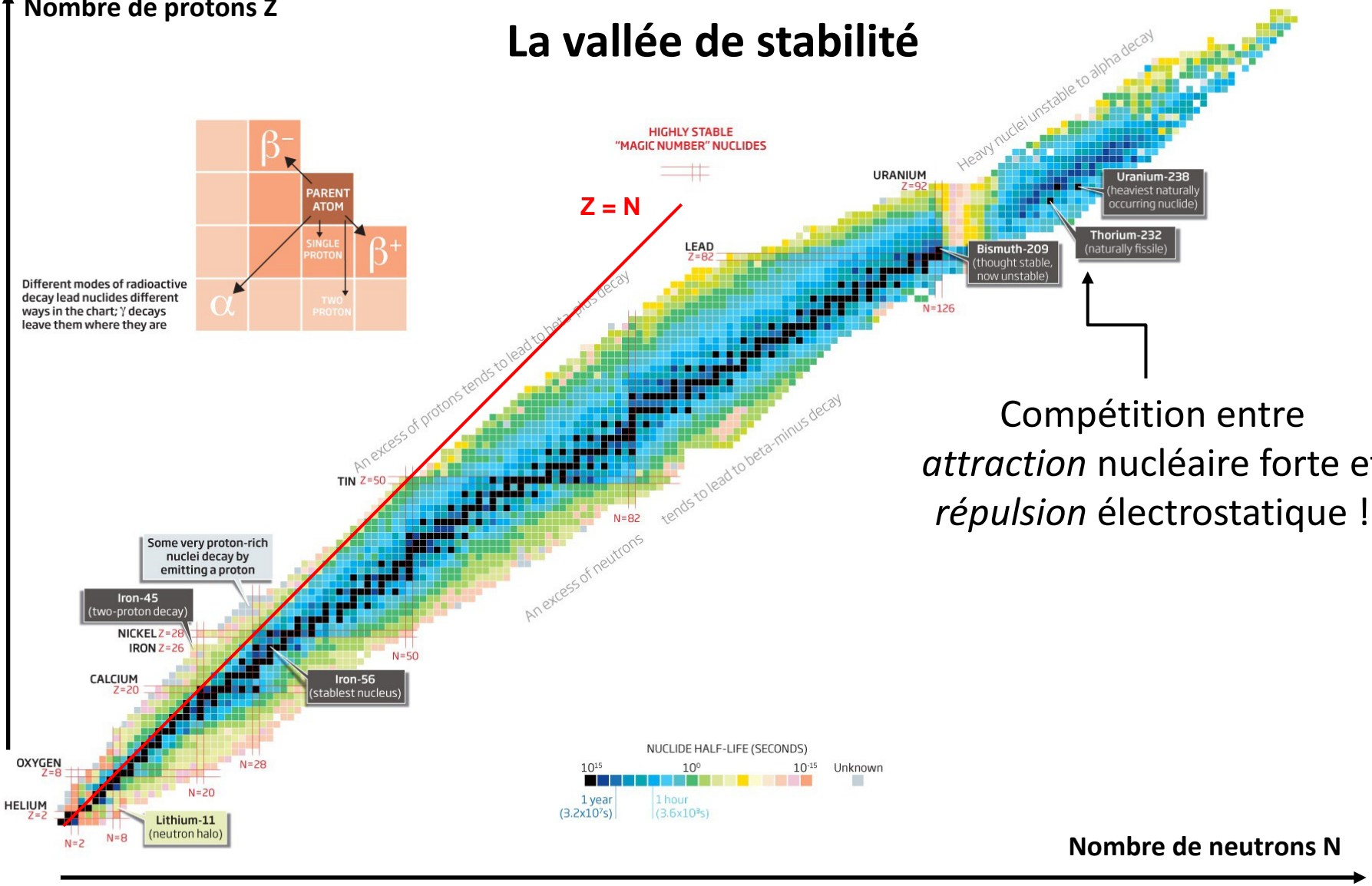


Nombre de protons Z

La vallée de stabilité



Different modes of radioactive decay lead nuclides different ways in the chart; γ decays leave them where they are

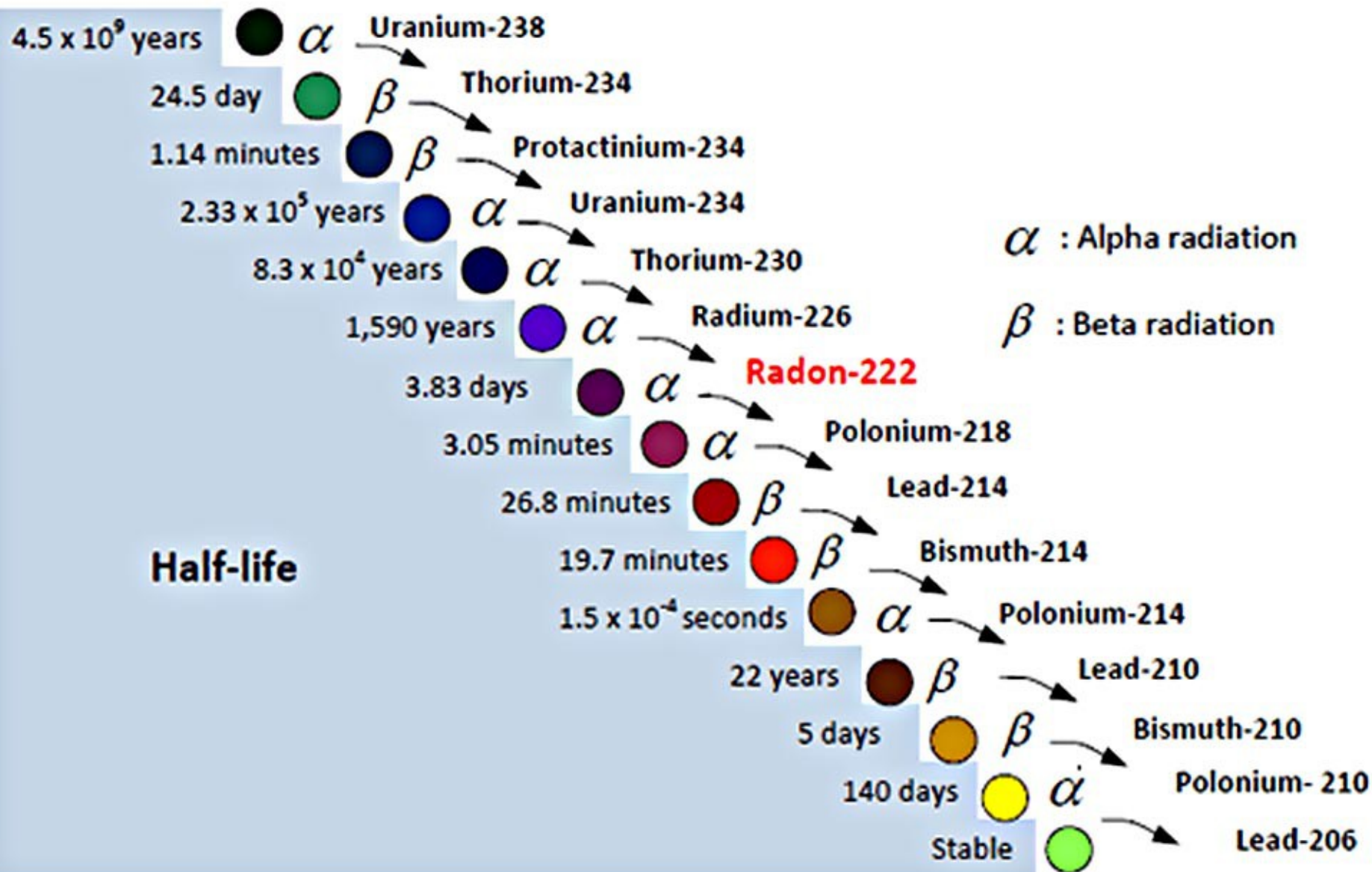


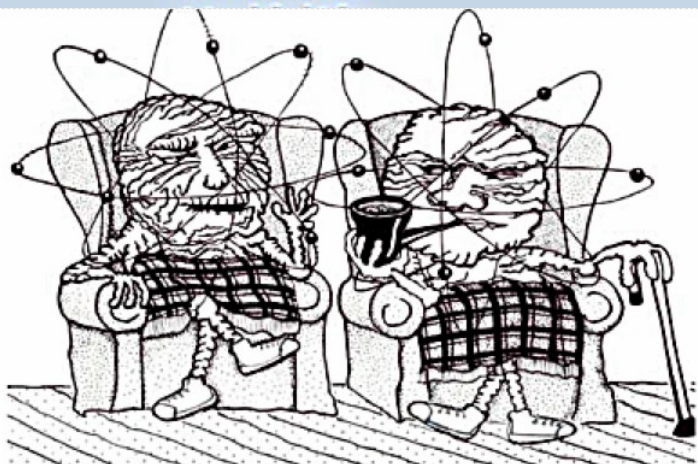
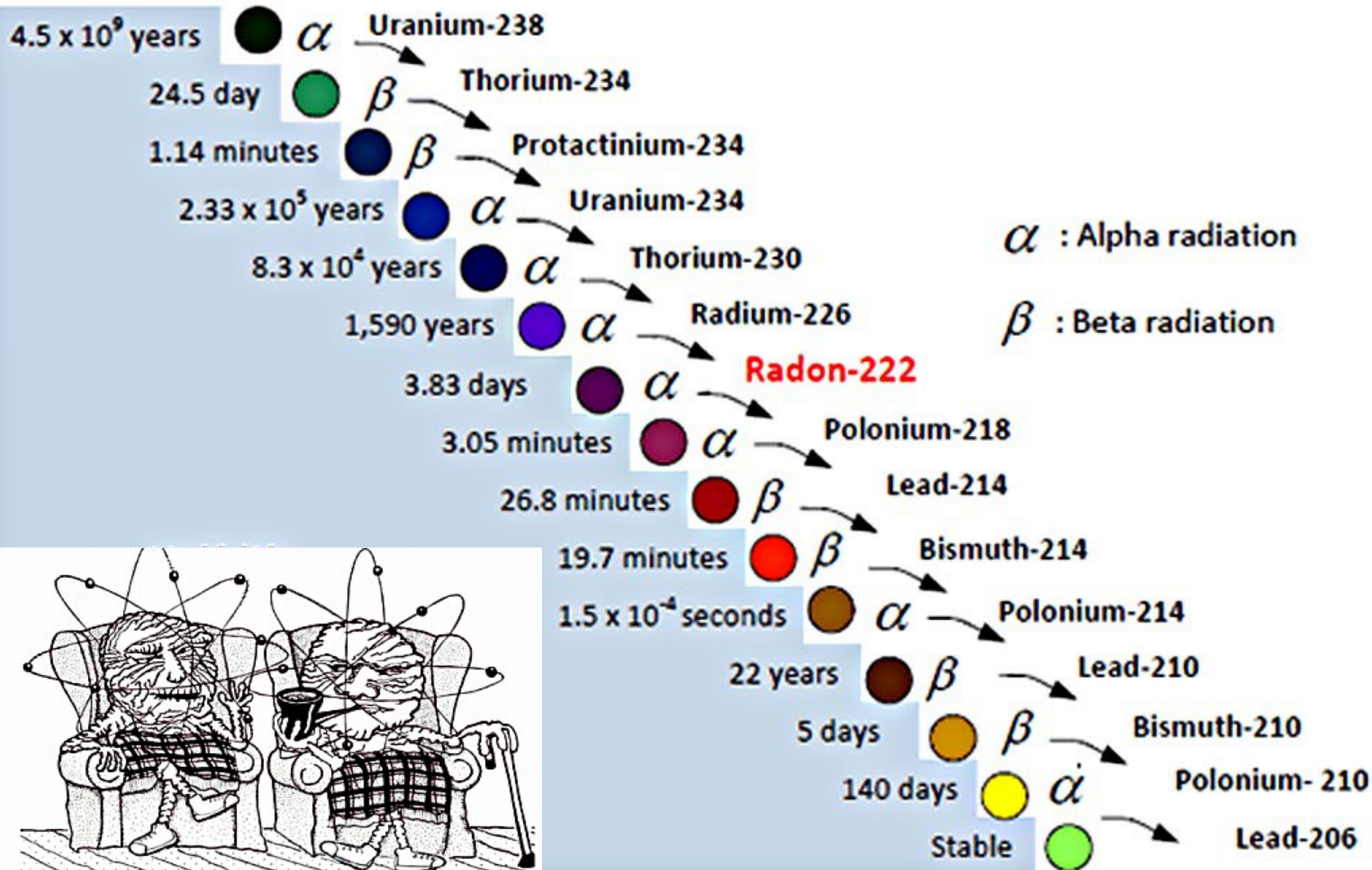
Compétition entre *attraction* nucléaire forte et *répulsion* électrostatique !

Tous les couples (Z, N) ne sont pas stables !

Stabilité dans la région $Z < 83$ et $N < 126$

Les autres noyaux sont instables





"When I was young I used to feel so alive, so dangerous! In fact, would you believe I started life as a Uranium-238? Then one day I accidentally ejected an alpha particle....now look at me, a spent old atom of Lead-206. Seems that all my life since then has been nothing but decay, decay, decay..."

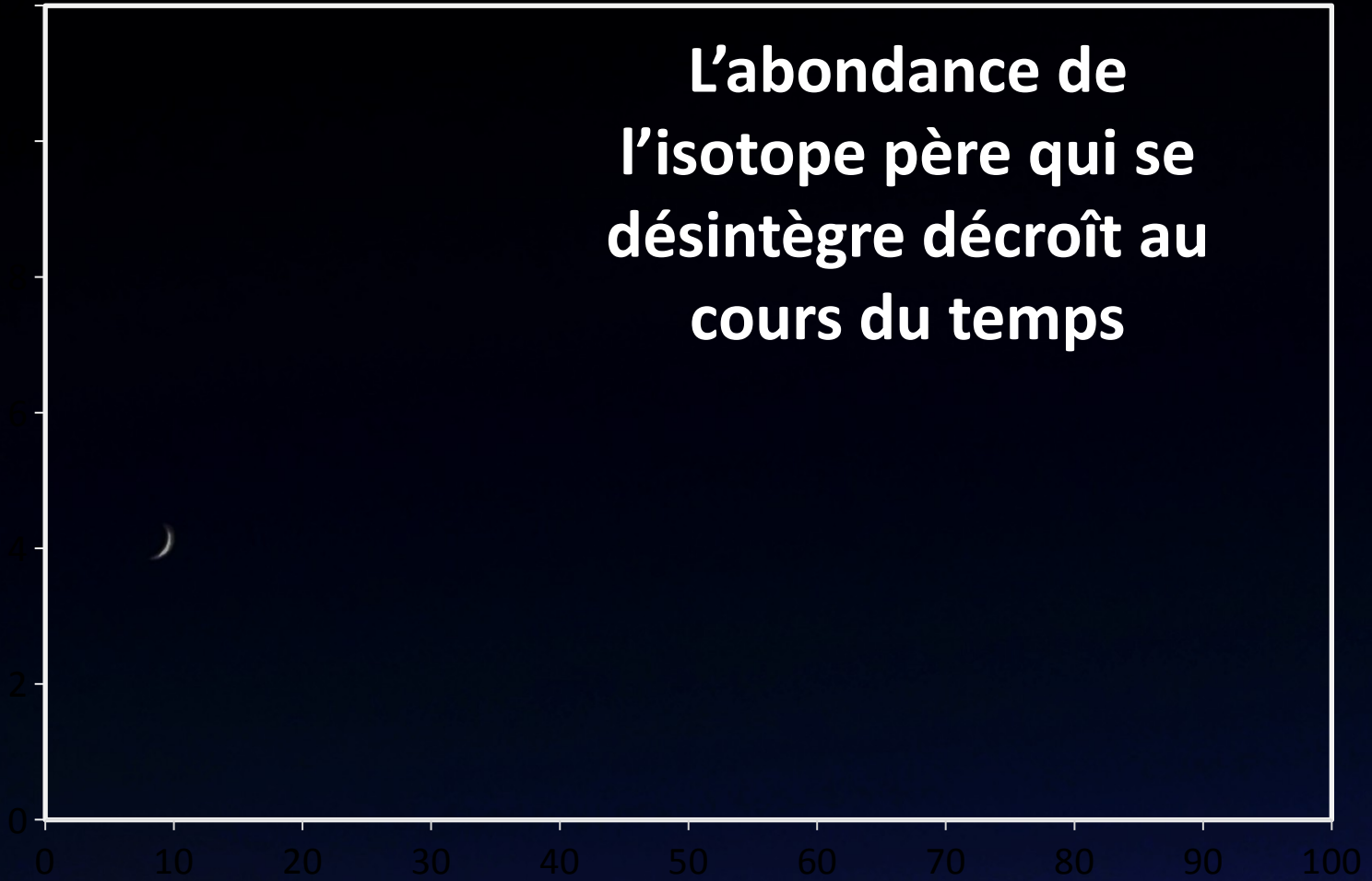
La radioactivité est la source interne de chaleur diffuse dans le manteau qui est l'un des moteurs de la convection...
mais ce n'est pas en estimant la chaleur produite que l'on va pouvoir estimer un âge à partir des méthodes de physique du 19ème siècle (Fourier, Kelvin, Perry)...

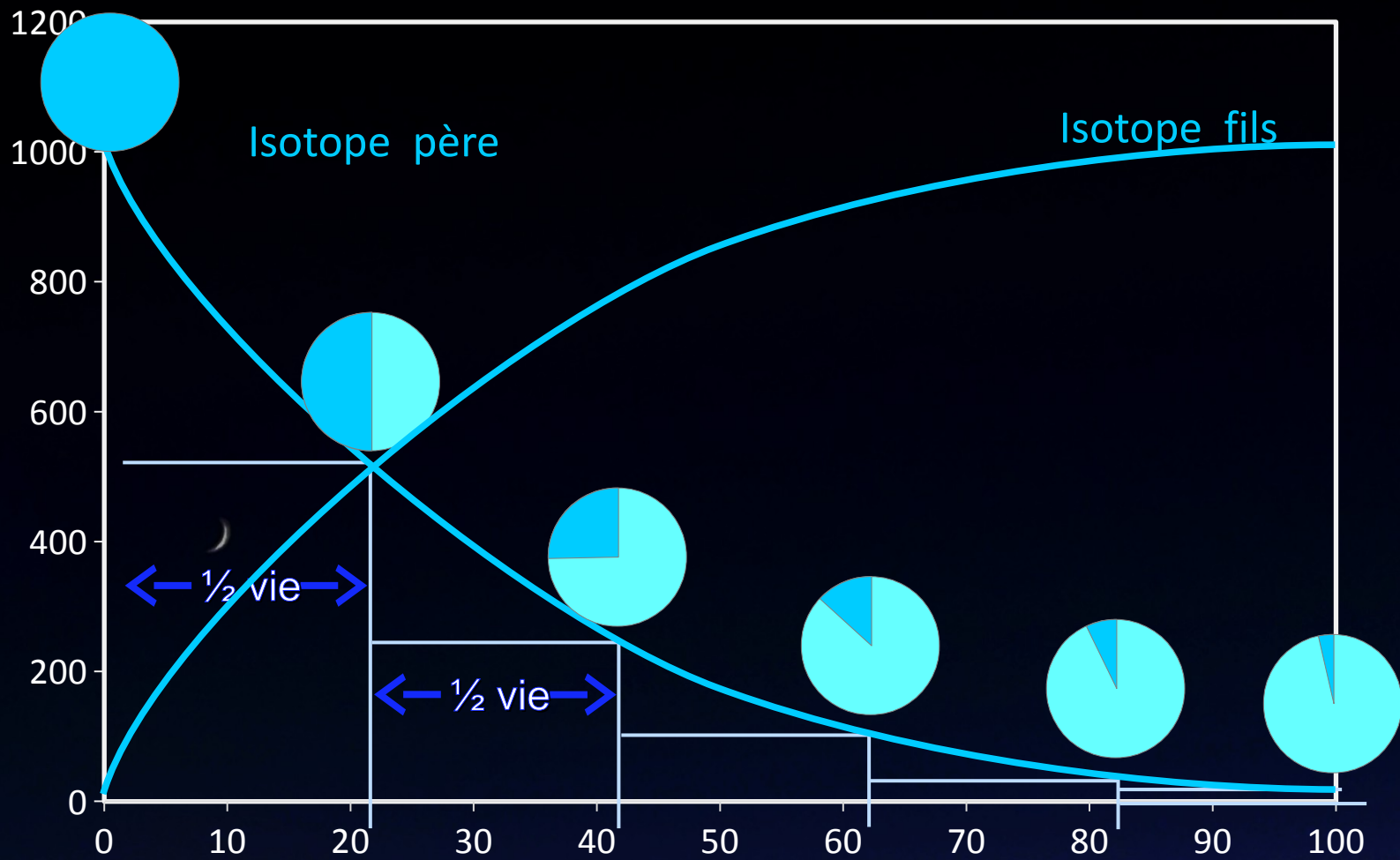


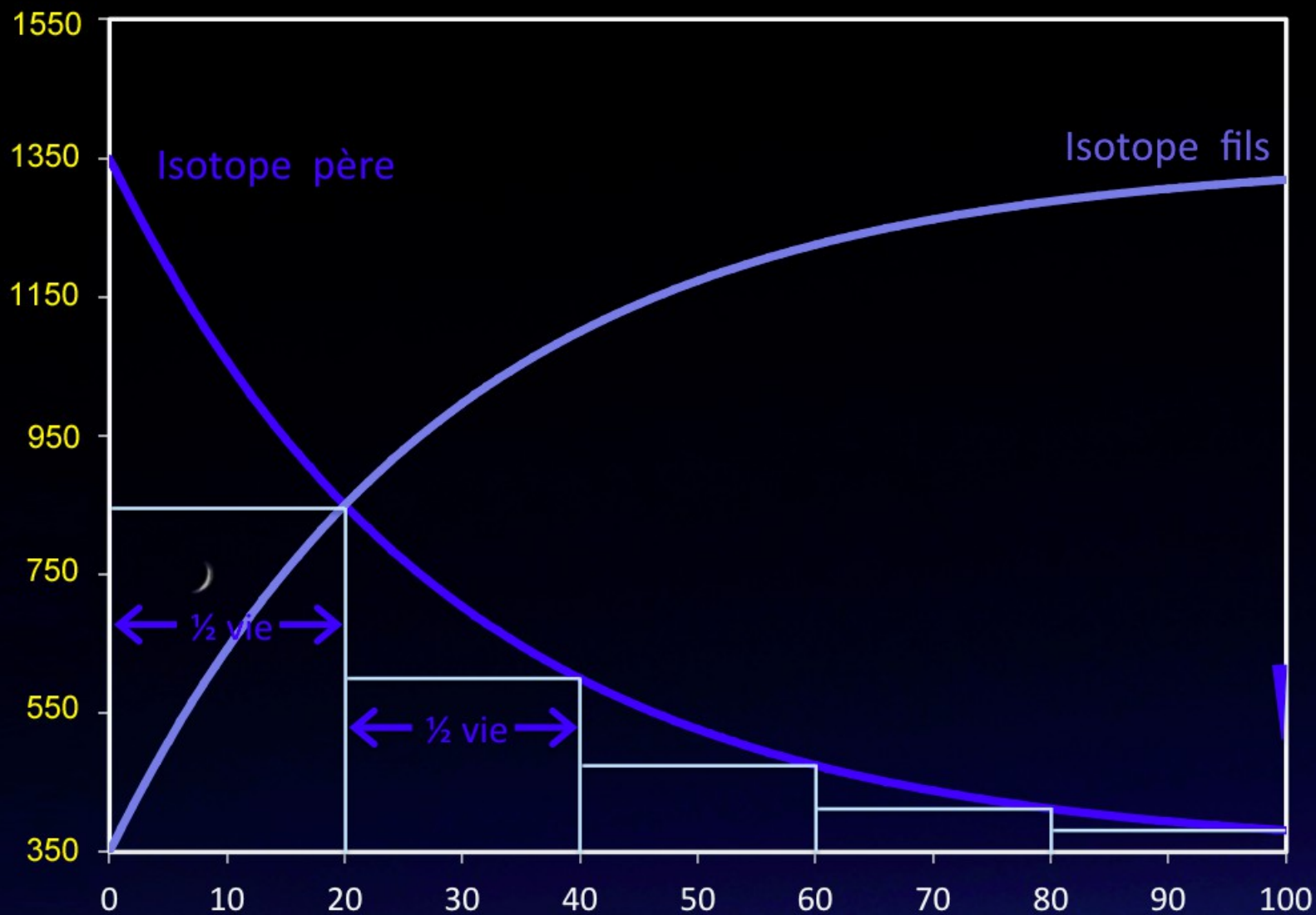
La radioactivité est la source interne de chaleur diffuse dans le manteau qui est l'un des moteurs de la convection...
mais ce n'est pas en estimant la chaleur produite que l'on va pouvoir estimer un âge à partir des méthodes de physique du 19ème siècle (Fourier, Kelvin, Perry)...

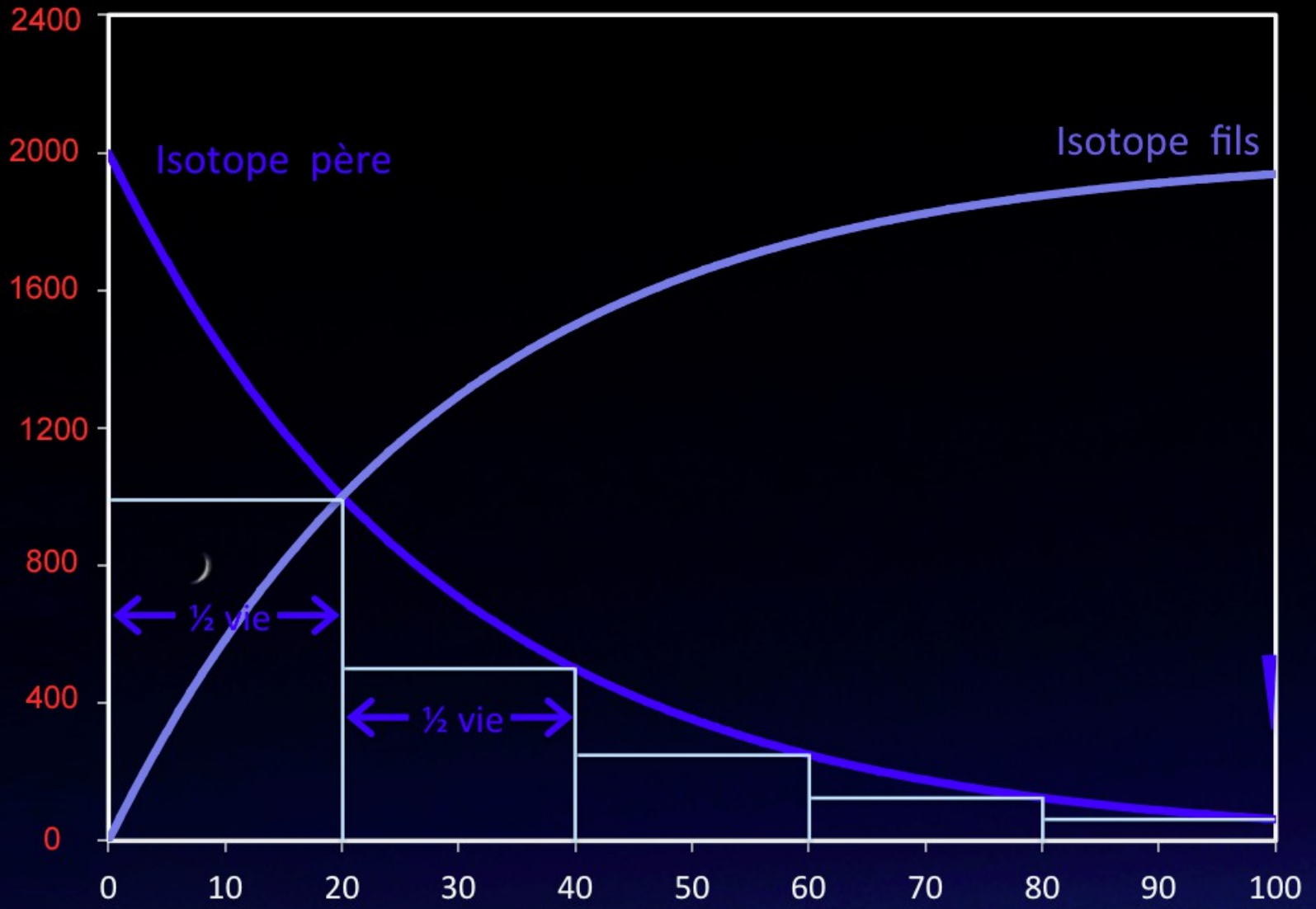
La radioactivité nous offre aussi une **horloge** !

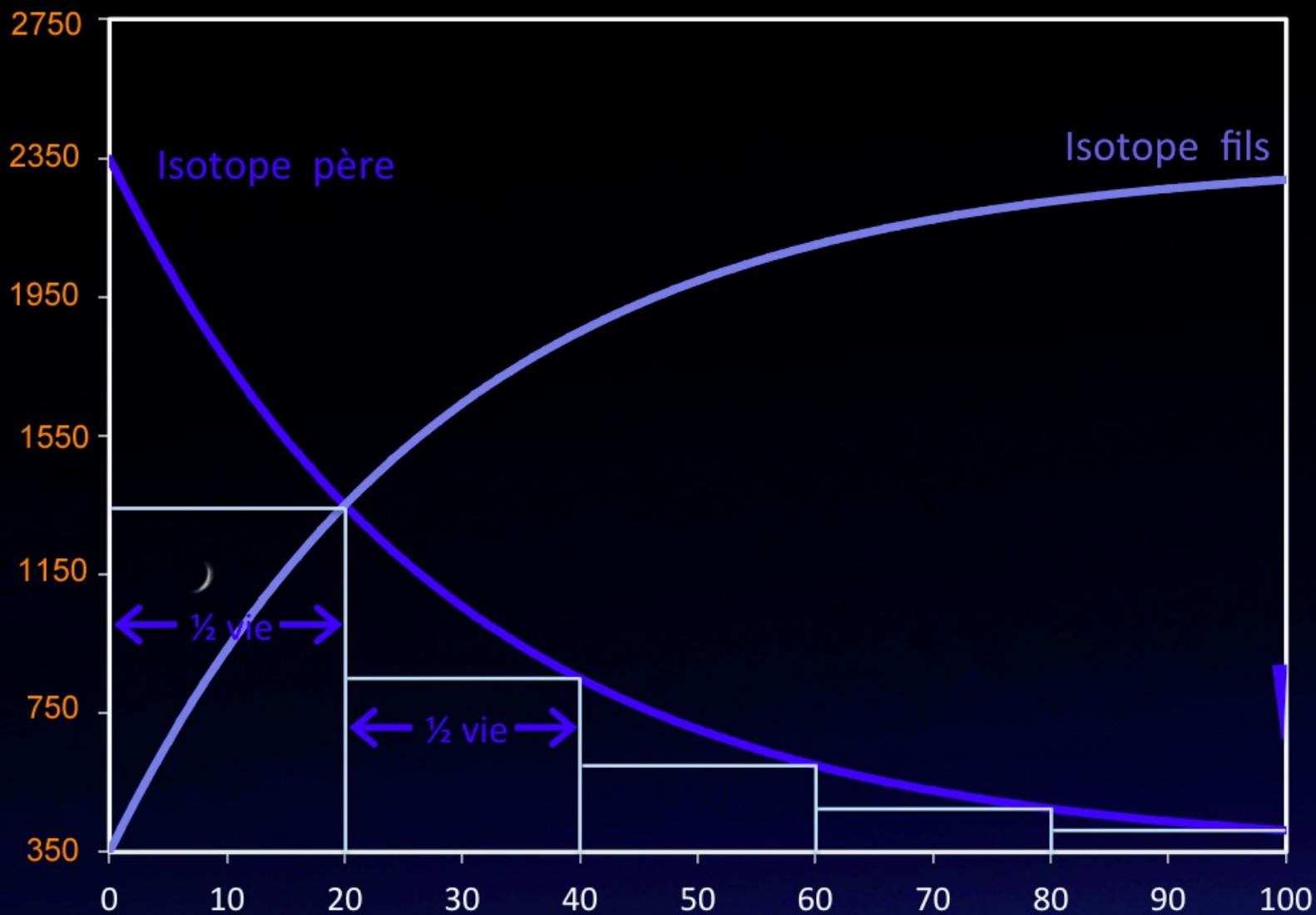
**L'abondance de
l'isotope père qui se
désintègre décroît au
cours du temps**













Météorite de Canyon Diablo

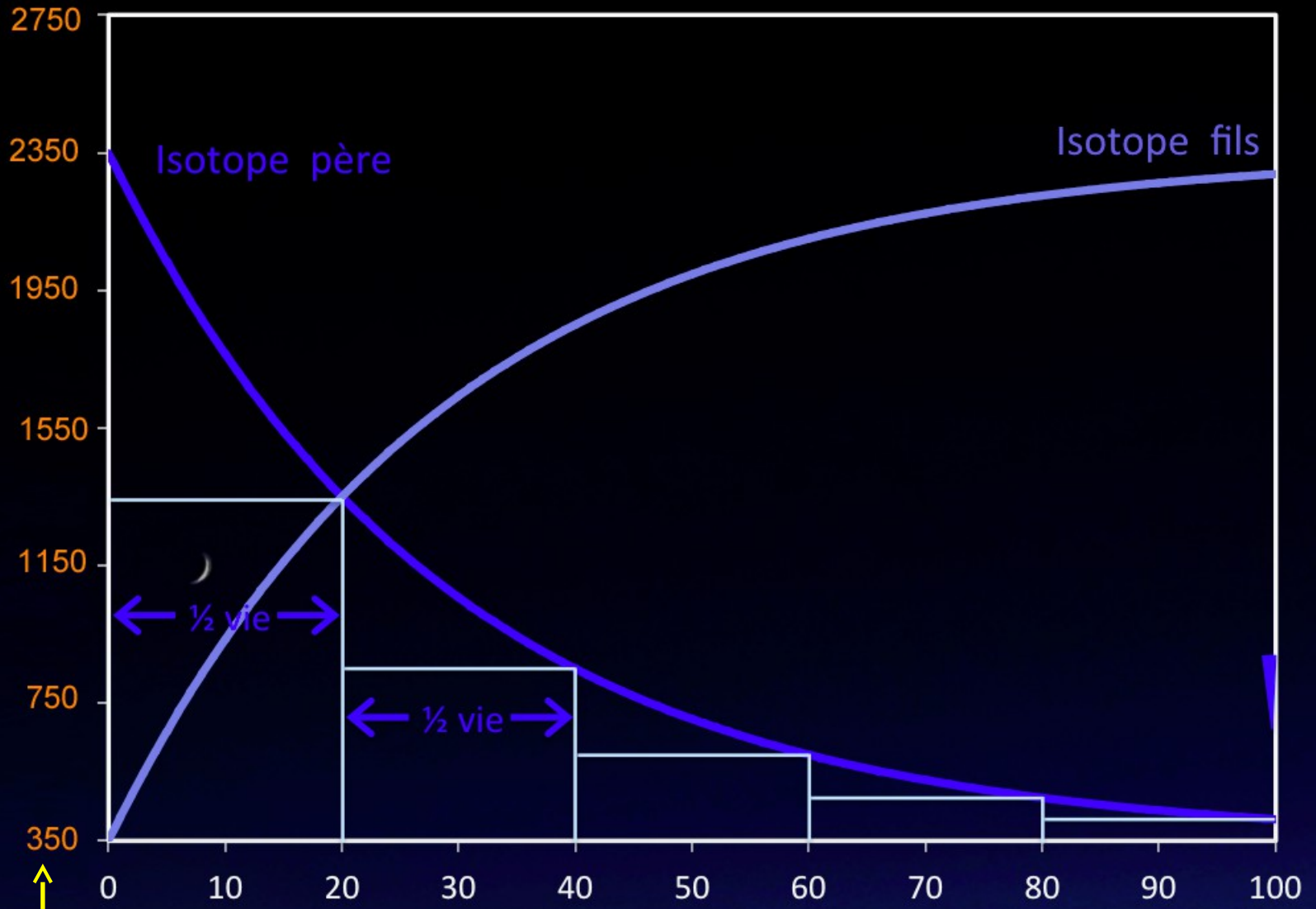
Photo E. Gaillou, Mines ParisTech

2 isotopes de l'uranium donnent 2 isotopes du plomb :
(même comportement chimique des 2 pères et des 2 fils)

$U\ 238 \Rightarrow Pb\ 206$

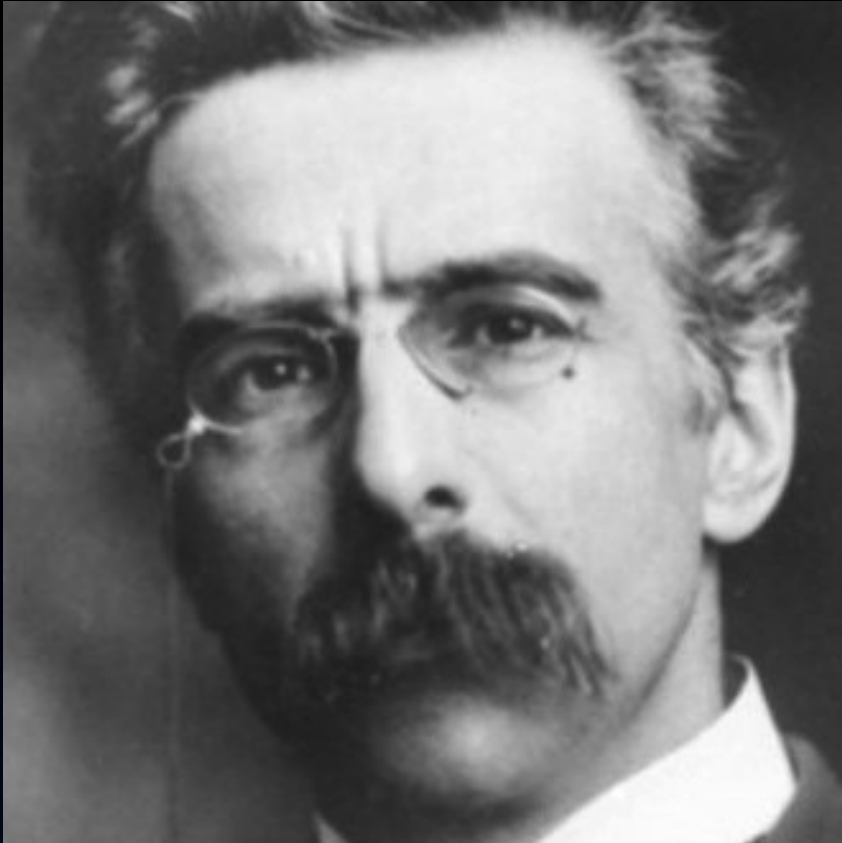
$U235 \Rightarrow Pb\ 207$

L'échelle peut être déduite d'une comparaison entre les deux systèmes uranium-plomb



La quantité initiale est connue grâce aux sulfures de la météorite de Nantan (ou de Canyon Diablo)

Nous disposons donc d'un chronomètre, mais quelles roches dater pour dater la Terre ?



John Joly, 1857-1933

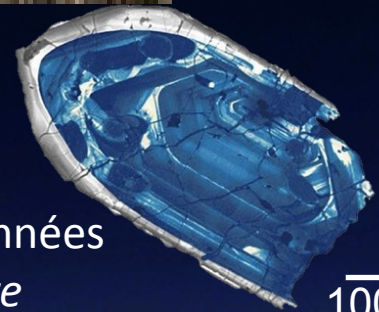
Premières datations utilisant la radioactivité : Joly + Rutherford (1913) => 1,4 milliard d'années

Les plus anciennes roches de la Terre ?



Gneiss d'Acasta (Canada) : 4 milliards d'années
*La plus vieille **roche** connue sur Terre*

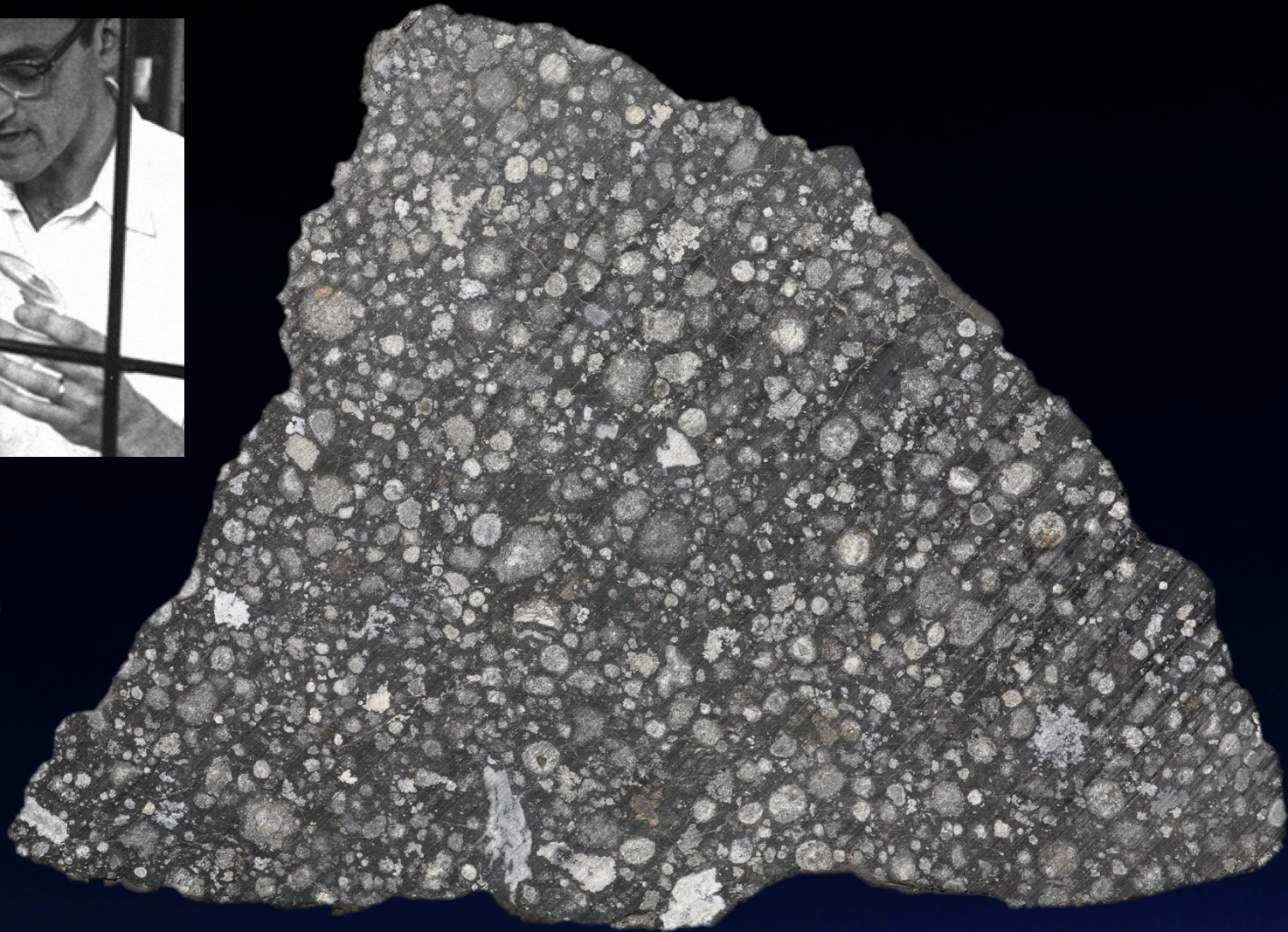
Zircon de Jack Hill : 4,4 milliards d'années
*Le plus vieux **minéral** connu sur Terre*



100 μm

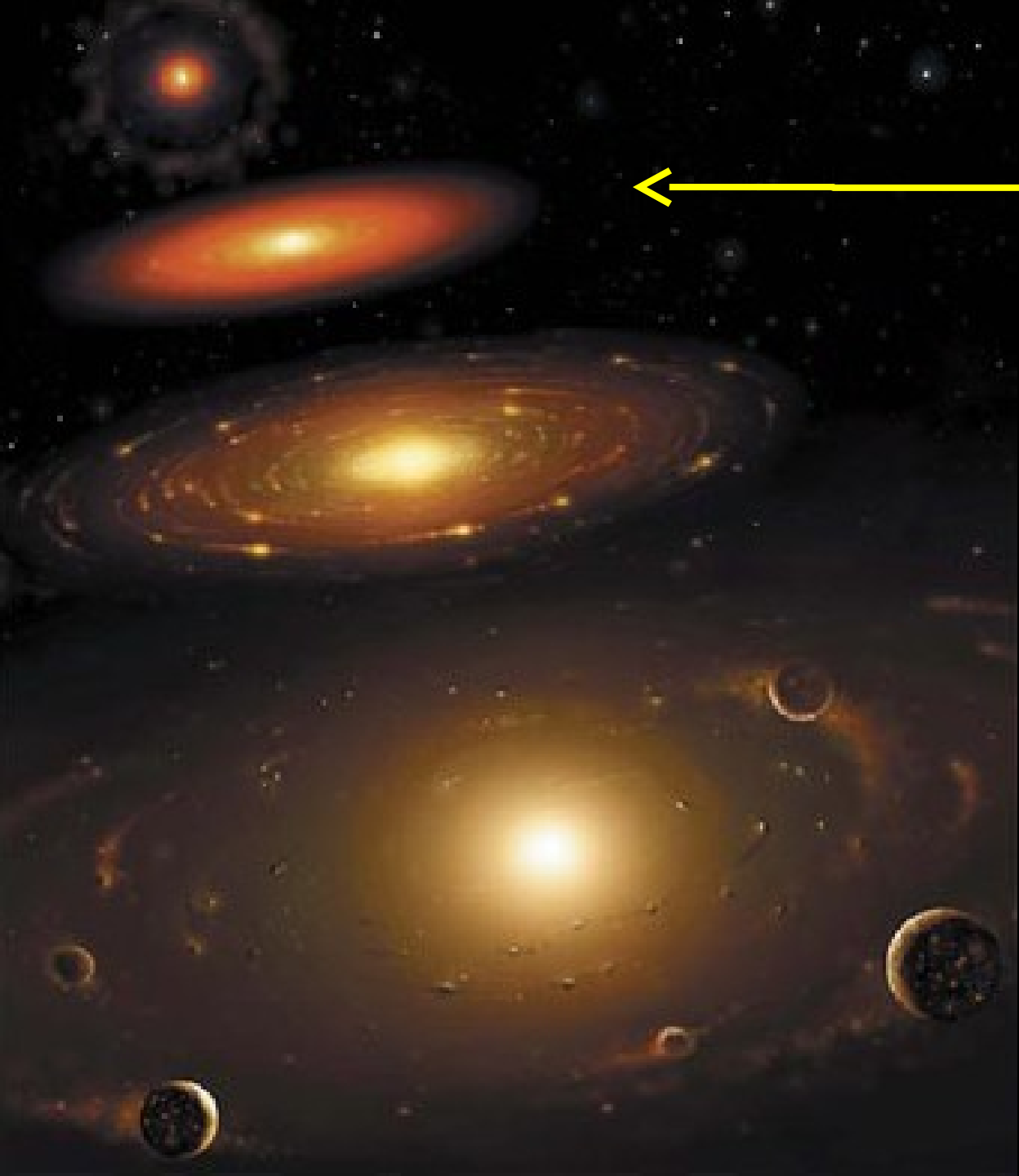
Et avant ?

1953 : Clair Patterson détermine l'âge de plusieurs météorites et vérifie que la Terre s'est bien formée « en même temps » il y a 4,55 milliards d'années



Météorite de Bali : *Photo L.-D. Bayle, Le Règne Minéral*

Les inclusions réfractaires sont datées à **4 milliards 567 millions et 300 000 ans \pm 160 000 ans**



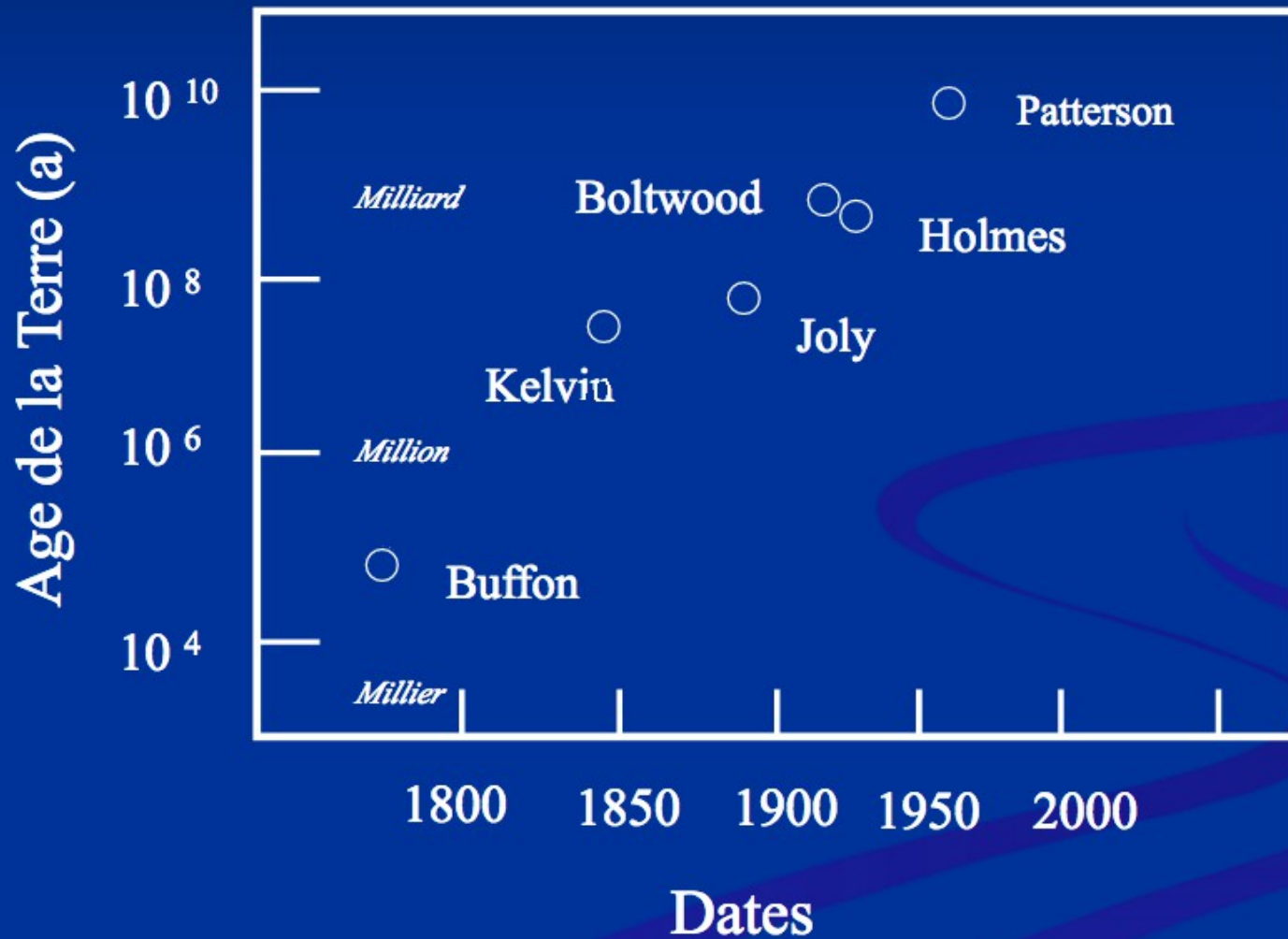
Premiers grains
≈ 100 000 ans
après le début de
contraction du nuage

Et la Terre ?

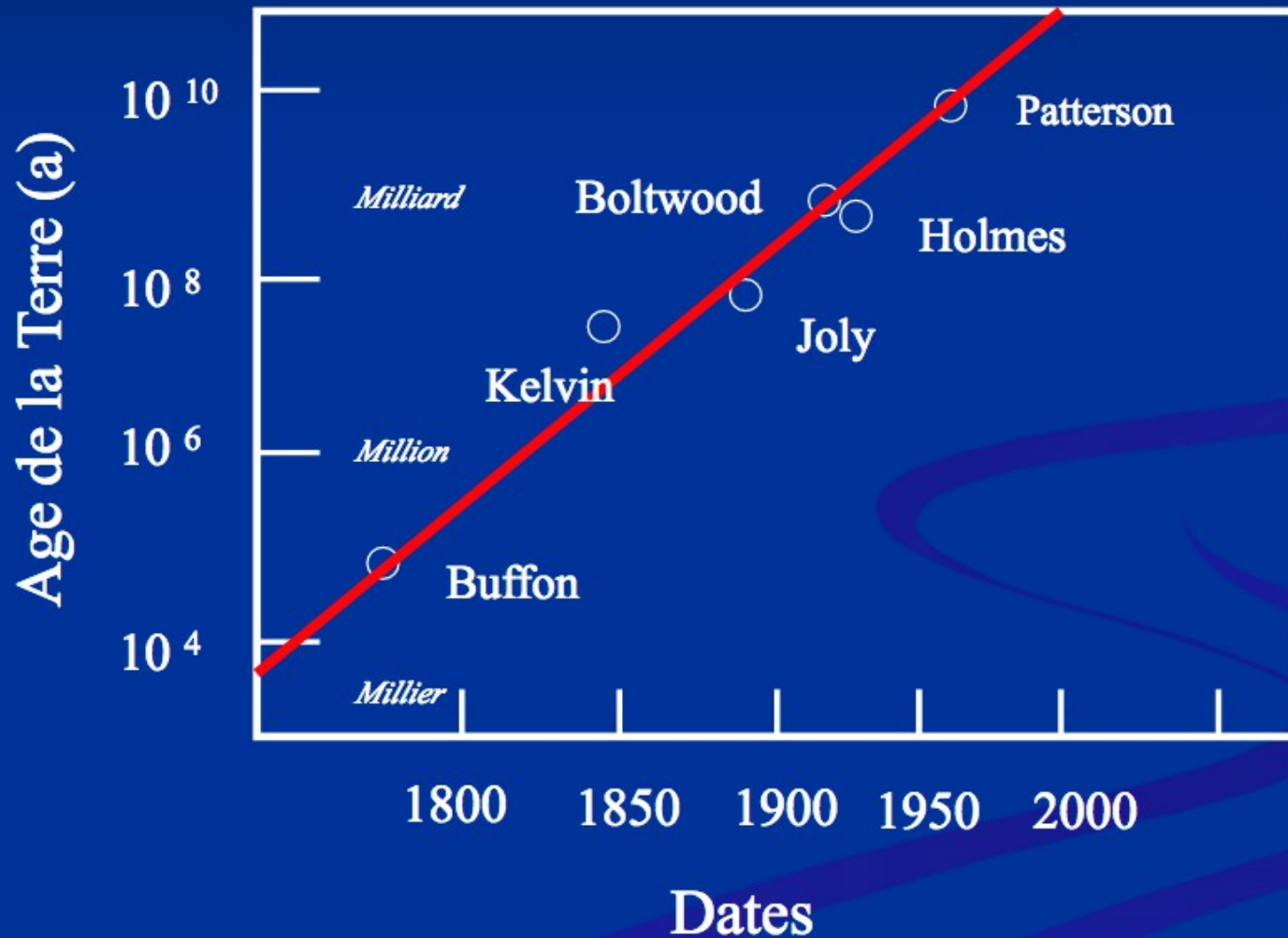
**À partir de quel
moment considère-t-
on que la Terre est
formée ?**



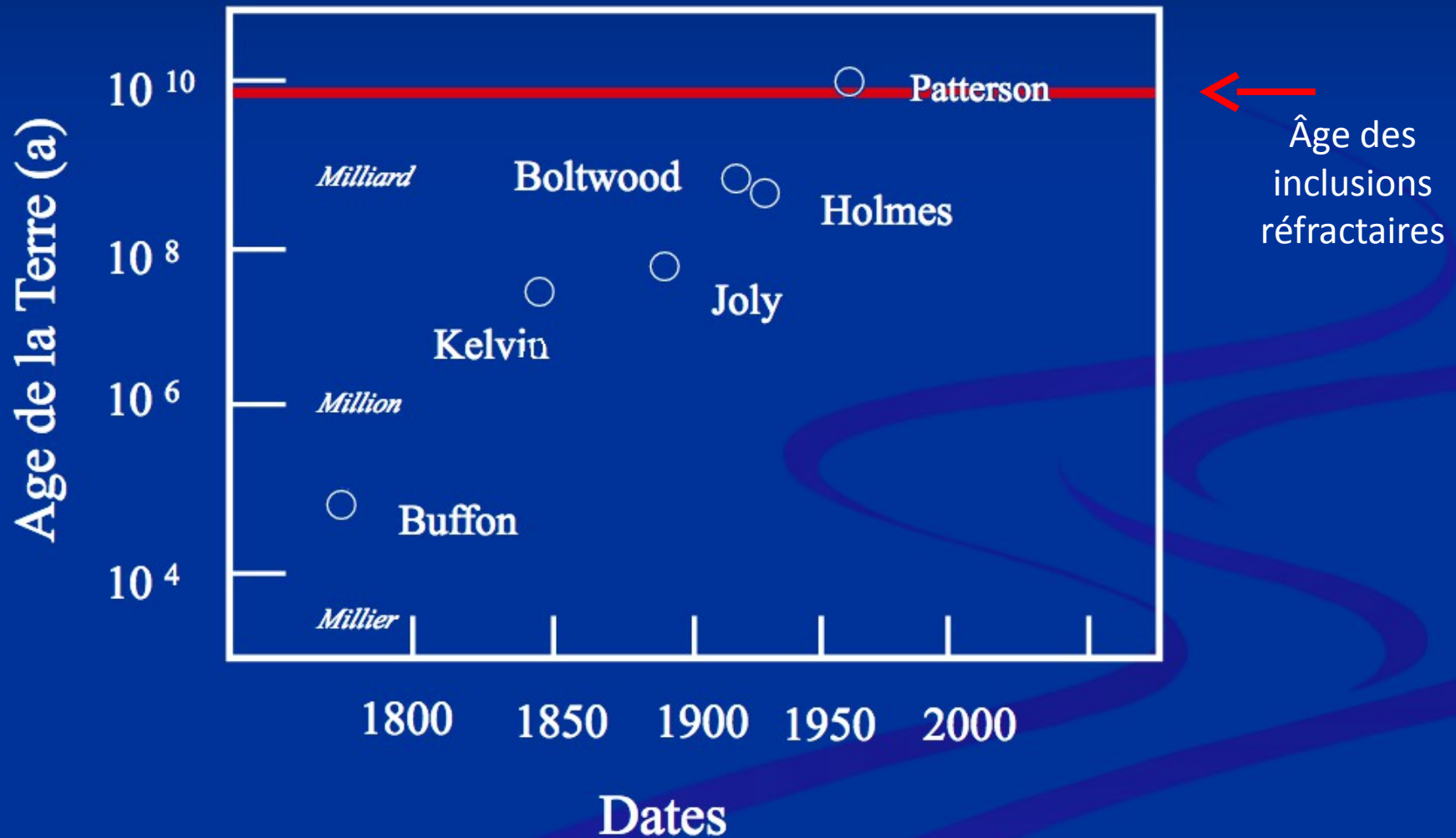
Les âges de la Terre au cours des développements des sciences géologiques.



Les âges de la Terre au cours des développements des sciences géologiques.



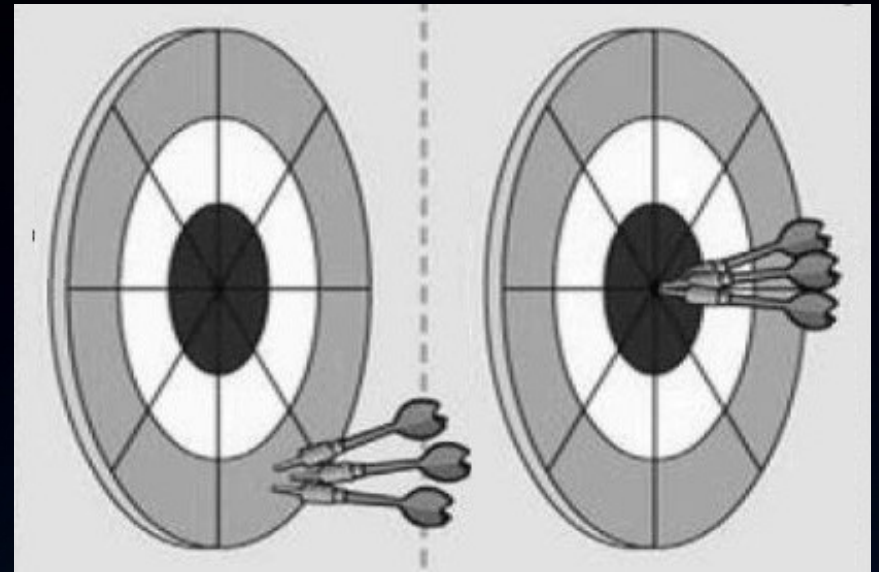
Les âges de la Terre au cours des développements des sciences géologiques.



L'âge des inclusions réfractaires est connu avec une extrême finesse :

4 milliards 567 millions et 300 000 ans \pm 160 000 ans

Mais est-il juste ? La présence de Curium 237 dans le système pourrait entraîner un décalage du début de 5 millions d'années !



Pascal Richet

L'âge du monde

À LA DÉCOUVERTE DE L'IMMENSITÉ DU TEMPS



Seuil

