

Thème 3 : La Terre un astre singulier

L'histoire de l'âge de la terre

Introduction

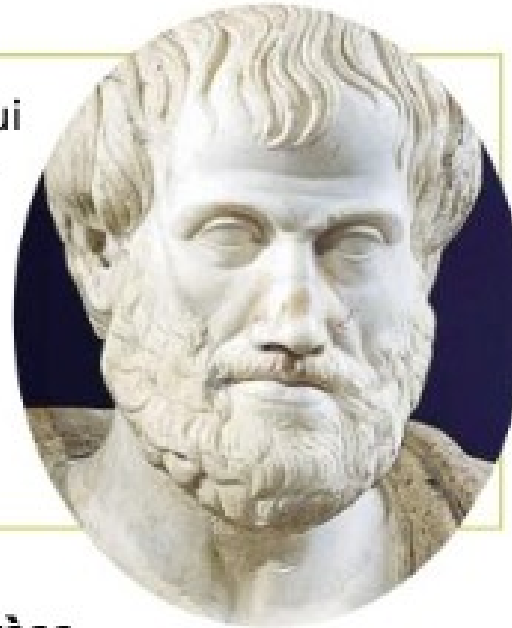
1°) Les premières estimations de l'âge de la Terre

2°) Les controverses du XIX^e siècle

3°) Le XX^e siècle et l'horloge radioactive

Introduction

« On peut donc, d'après tout ce qui précède, voir clairement que l'ensemble du ciel n'a pas été créé, qu'il ne peut pas davantage périr, comme le disent quelques philosophes, mais qu'il est un et éternel, et qu'il n'a ni commencement ni fin, durant toute l'éternité. »



DOC 1 Extrait du **Traité du ciel (II-1)** par le philosophe de la Grèce antique **Aristote (384-322 av. J.-C.)**.

Dans l'antiquité grecque, Aristote et Platon pensaient que **la Terre et les étoiles existaient de toute éternité** : l'origine de la terre était une idée inconcevable.

Au cours des siècles, les êtres humains ont pu observer les étoiles qui meurent et qui naissent, et avec elles leur système de planètes. Le système solaire a donc une histoire avec un début

Comment la connaissance de l'âge de la terre s'est-elle construite ?

Introduction

1°) Les premières estimations de l'âge de la Terre

2°) Les controverses du XIX^e siècle

3°) Le XX^e siècle et l'horloge radioactive

A la renaissance les connaissances reposaient surtout sur les récits religieux

Au XVI^e et au XVII^e siècle, plusieurs estimations de l'âge de la Terre sont proposées sur la base d'un travail d'analyse de la Bible, dans lequel le monde est créé par Dieu en six jours (livre de la Genèse, I, 1-25). Ainsi, Alphonse de Vignole (1649-1744), directeur de l'Académie des sciences de Berlin, écrit :

« On croira peut-être qu'il y a de l'exagération en cela mais j'ai recueilli moi-même plus de deux cents calculs différents dont le plus court ne compte que 3483 ans depuis la création du monde jusqu'à Jésus-Christ, et le plus long en compte 6984. »

Chronologie de l'histoire sainte, 1734.

Ces estimations sont fondées à la fois sur un travail d'érudition (la Bible contient des points de repères chronologiques précis) et la prise en compte d'éléments de l'histoire profane variables d'un auteur à l'autre.

DOC 2 À la Renaissance, la Bible comme outil de datation de la Terre.

James Ussher (1581-1656)

- ▶ Archevêque anglo-irlandais de l'église anglicane.
- ▶ Date proposée : **23 octobre 4004 av. J.-C.**

Johannes Kepler (1571-1630)

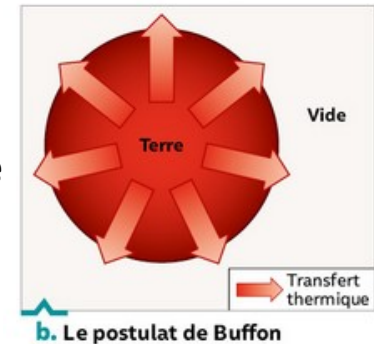
- ▶ Astronome allemand qui a établi trois lois décrivant le mouvement des planètes autour du Soleil. Ces lois dites de Kepler sont aujourd'hui encore admises par la communauté scientifique.
- ▶ Date proposée : **3993 av. J.-C.**

Au XVIII^e siècle émergent les premières démarches scientifiques



Buffon : naturaliste et mathématicien français
(1707 – 1788)

La terre est une sphère
pleine qui se refroidit
vers l'extérieur



Doc. 11 La méthode expérimentale de Buffon

Buffon est le premier à expérimenter afin de proposer un âge pour la Terre. Vers 1770, il part du constat que la température augmente en profondeur (d'après l'observation de mines) pour émettre l'hypothèse que la Terre était à l'origine une boule de roches en fusion, qui refroidit sans cesse depuis sa formation. Il élabore alors un protocole rigoureux à partir d'une publication de Newton sur la propagation de la chaleur : en chauffant à blanc dans ses forges de Bourgogne, des boulets de différentes tailles et en mesurant la durée de leur refroidissement, il parvient à établir un modèle qu'il extrapole à une sphère de la taille de la Terre.



Exercice 1: calcul de l'âge de la terre à partir des données recueilli par Buffon

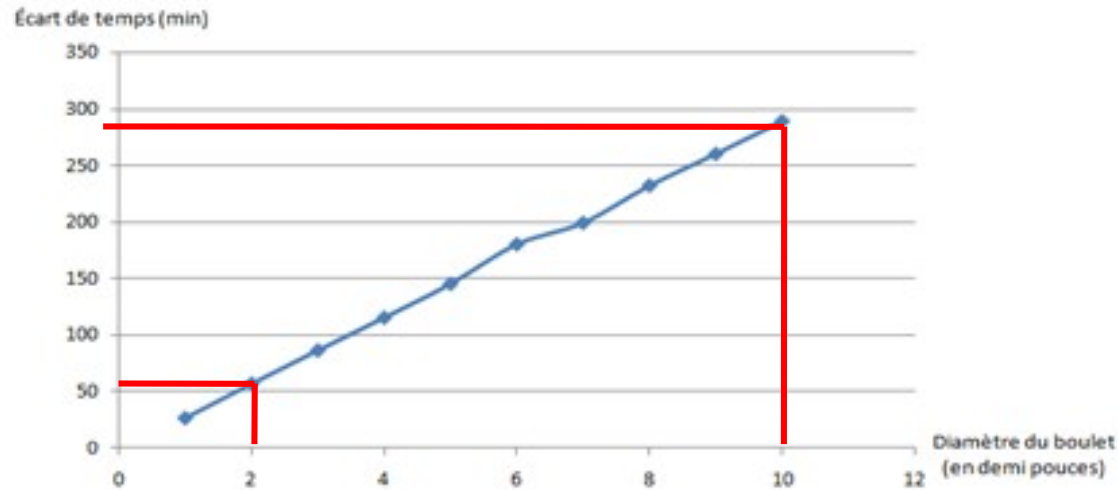
Doc. 12 Buffon face à la pression des théologiens

Dans une première publication, *Les Époques de la nature*, en 1779, Buffon annonce ainsi que la Terre doit avoir 25 000 ans, un âge bien plus important que celui admis alors par l'Église. La hardiesse de la pensée de Buffon, pour l'époque, confine à la témérité. D'ailleurs, à la sortie de son ouvrage, Buffon écrit de Paris à un ami : « Je mets donc pour le moment présent mon salut dans la fuite et je pars dimanche pour arriver à Montbard » (son fief de Bourgogne). Après quelque temps et quelques lettres d'excuses aux instances ecclésiastiques, il put revenir sur Paris. Mais il continue ses travaux et publie successivement 50 000 puis 75 000 ans. Mêmes motifs, mêmes punitions, exils en Bourgogne !

Les carnets de Buffon révèlent quant à eux que ses expériences donnent à la Terre plus de 10 millions d'années. Buffon n'a jamais publié ce chiffre, est-ce encore la pression sociale et morale qui l'a contraint à cette « discrétion » ? [...] S'il s'en tient finalement à une chronologie officielle plus courte, il ne peut s'empêcher d'en expliquer la cause en ces termes : « néanmoins il faut raccourcir autant qu'il est possible pour se conformer à la puissance limitée de notre intelligence. »

Patrick De Wever, « Buffon et la première approche expérimentale de la mesure du temps », *Futura-sciences.com*, septembre 2015.

1) a) Je prends deux points éloignés l'un de l'autre :



Point C : $Y_C = 50$ et $X_C = 2$

Point D : $Y_D = 290$ et $X_D = 10$

J'applique ensuite la formule présentée dans l'énoncé : **$a = (y_2 - y_1 / x_2 - x_1)$**

Résultat : $a = (290 - 50 / 10 - 2) = 30$

$a = 30$

b) j'applique maintenant l'équation de la droite : $y = ax + b$

$$y = 30 \times 941\,461\,920 + (-0.43)$$

négligeable

$$y = 28243857600 \text{ minutes}$$

$$y = 470730960 \text{ heures}$$

$$y = 19613790 \text{ jours}$$

$$y = 53736 \text{ années}$$

Introduction

1°) Les premières estimations de l'âge de la Terre

2°) Les controverses du XIX^e siècle

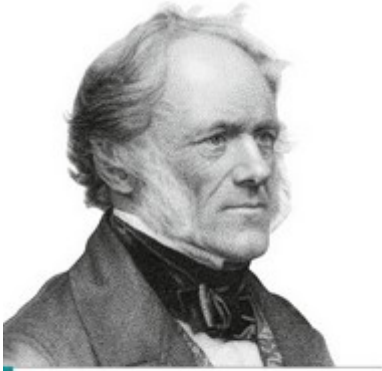
3°) Le XX^e siècle et l'horloge radioactive

Au XIX^e siècle, les approches scientifiques se développent et conduisent à une controverse qui oppose **Darwin et Kelvin**.

Les géologues, le biologiste Charles Darwin

proposent des âges de plusieurs centaines de millions d'années.

Les arguments des géologues



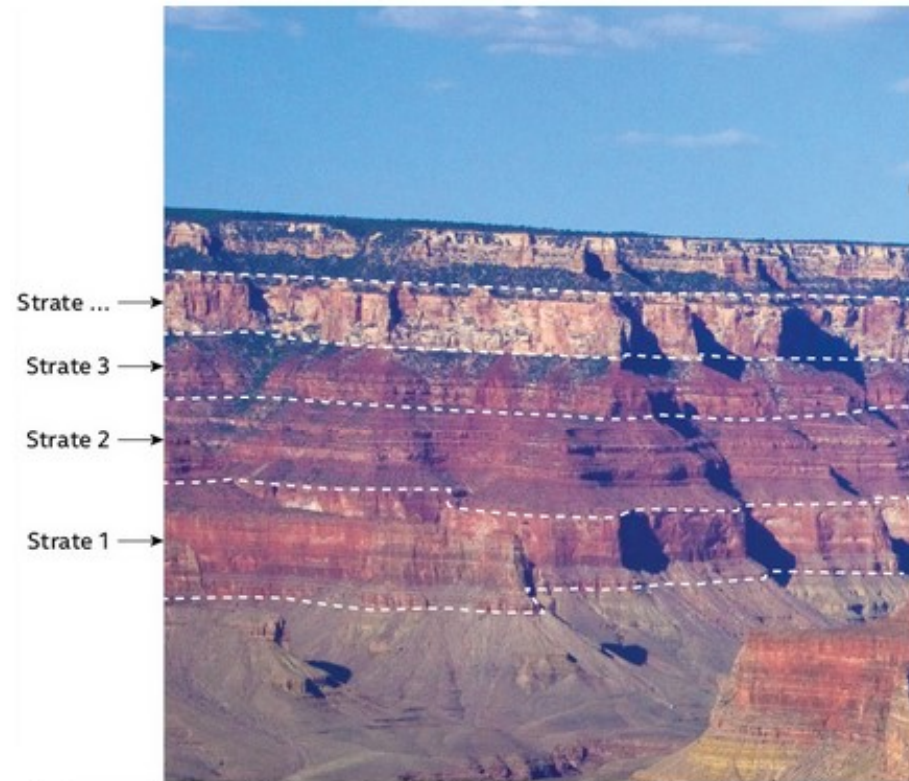
Sir Charles Lyell
Géologue britannique (1797-1875).

Charles Lyell, ami proche de Darwin, est le premier à avoir identifié les strates sédimentaires en fonction de leur contenu en fossiles.

Partisan de la théorie dite de l'uniformitarisme (aussi appelée « actualisme »), Lyell considère que « le présent est la clé du passé » (*Principles of Geology* [*Principes de géologie*], 1830-1833): selon ce principe, l'explication du passé de la Terre réside dans l'étude des phénomènes géologiques actuels.

Lyell estime ainsi que l'âge de la Terre est largement plus ancien que les âges avancés par les défenseurs de la chronologie biblique ou par Buffon.

À la fin du XIX^e siècle, des géologues utilisent la vitesse de sédimentation pour évaluer l'âge de la Terre. En considérant que les sédiments se déposent à un rythme compris entre 1 mm et 1 cm par an, ces scientifiques estiment un âge de la Terre d'environ 3 milliards d'années.



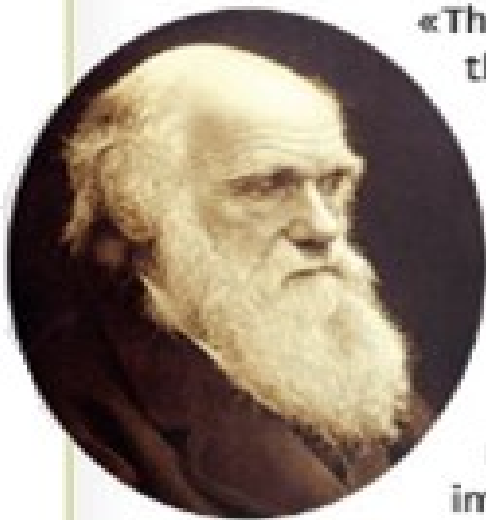
Paysage du Grand Canyon, Arizona, États-Unis

Ces falaises pouvant atteindre 1600 mètres de hauteur sont constituées d'empilements de roches sédimentaires, nommées « strates ». Ces structures se sont formées par des dépôts successifs de sédiments (la strate 1 s'est déposée avant la strate 2, etc.).

L'approche de Charles Darwin

Charles Darwin estime la vitesse d'érosion des collines du Weald, en Angleterre à un pouce par siècle et en déduit qu'il a fallu 300 millions d'années pour les sculpter. La Terre doit donc être au moins aussi vieille.

Il remarque en outre que les fossiles varient peu dans des couches dont l'âge est estimé à plusieurs dizaines de millions d'années. Or, la théorie de la descendance avec modification, qu'il a publiée en 1859, implique que l'histoire de la vie est marquée de variations continuelles de la faune et la flore sous l'influence de la sélection naturelle. Darwin ne donne pas de chiffre, mais il déduit de tout cela que l'estimation de Thompson est inexacte :



«Thompson's views of the recent age of the world have been for some time one of my sorest troubles.»

Lettre au naturaliste Alfred R. Wallace,
14 avril 1869.

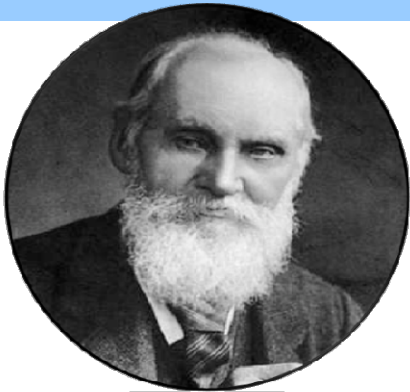
«The brevity of the world troubles me, on account of the pre-silurian creatures which must have lived in numbers during endless ages, else my views would be wrong, which is impossible.»

Lettre à son fils George H. Darwin, 9 déc. 1868.

Charles Darwin estime que les fossiles témoignent de l'évolution des espèces, et que celle-ci requiert des durées bien supérieures à l'âge de la terre estimé par les physiciens.

Exercice 2: Calculer le temps nécessaire à la formation d'une vallée

L'approche de Lord Kelvin



Lord Kelvin

Hypothèses

1 Terre après sa formation

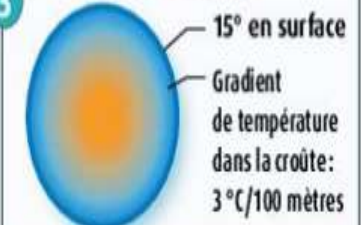


2

- La Terre s'est refroidie par conduction
- La Terre est rigide (aucun transport de matière)

3

Terre actuelle



Raisonnement

L'équation de la chaleur établie par Fourier peut s'appliquer à la Terre

Résultats

- 1862 → Âge de la Terre ≈ 20 à 400 millions d'années
- 1897 → Âge de la Terre ≈ 20 à 40 millions d'années

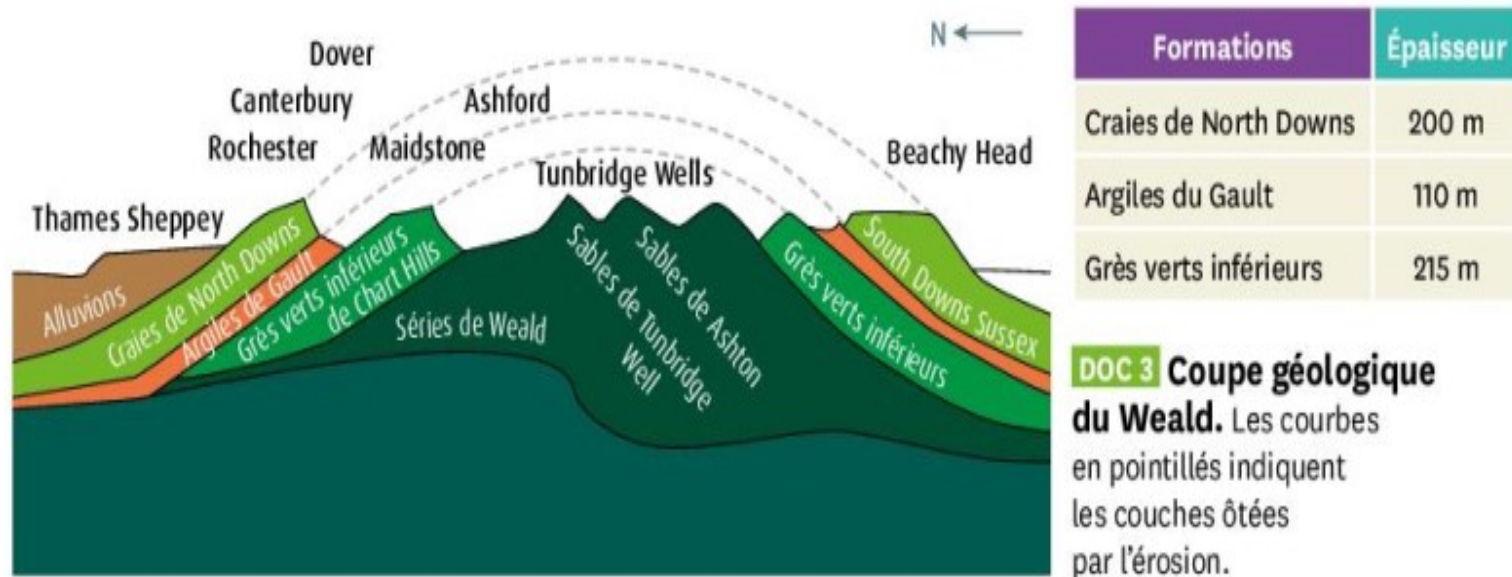
DOC 3 Lord Kelvin : une approche fondée sur le temps de refroidissement de la Terre. Ce physicien suit le même raisonnement que Buffon, mais il s'appuie sur l'équation de la chaleur publiée en 1807 par Joseph Fourier. Cette équation permet de déterminer l'évolution de la température en fonction du temps dans un corps conducteur.

Kelvin, élabore un modèle mathématique du refroidissement de la Terre: il estime la valeur nécessaire pour que le gradient géothermique atteigne sa valeur actuelle de $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ => il propose un temps de 20 à 40 millions.

Ses arguments mathématiques semblent impossibles à mettre en défaut.

Exercice 2

1. Lyell énonce le **principe d'actualisme**, qui permet à Darwin de proposer que les phénomènes d'érosion qu'il observe se sont produits de la même manière dans le passé. Il peut donc appliquer dans ses calculs un taux d'érosion estimé au moment de ses observations.



Exercice 2

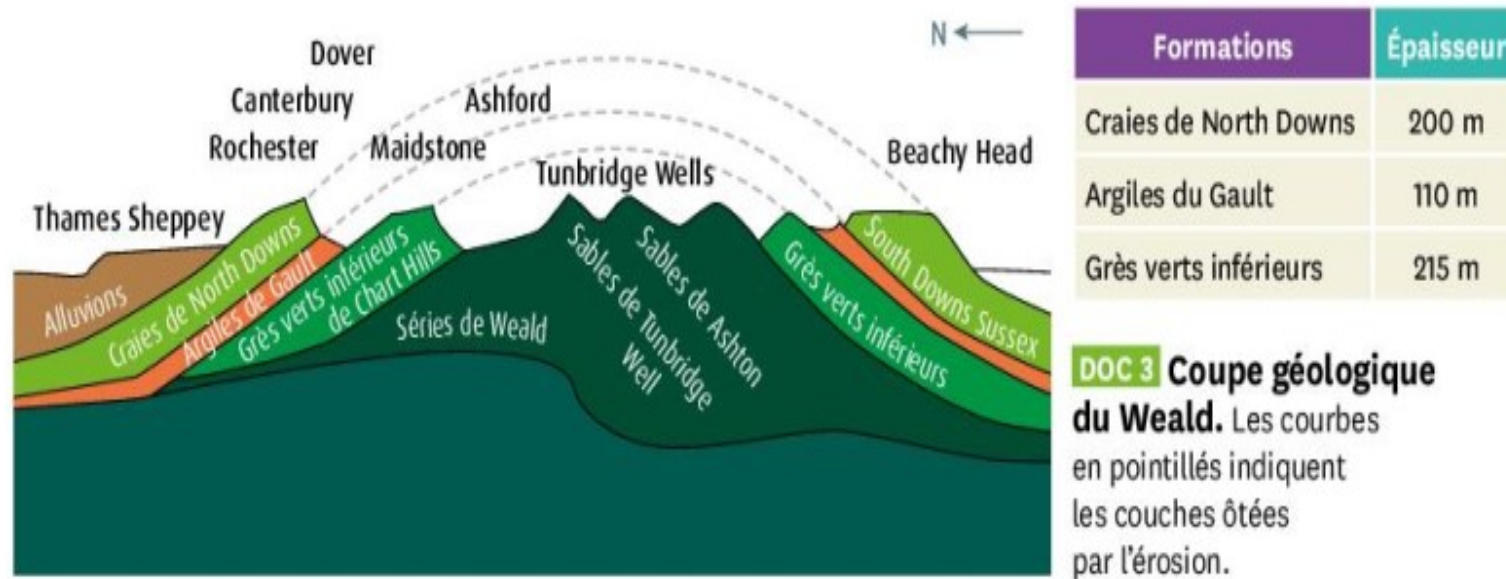
2. Épaisseur totale des formations sédimentaires du Weald:

$$200 + 110 + 215 = 525 \text{ m soit } 525\,000 \text{ mm}$$

en appliquant le taux d'érosion de $20 \text{ mm}/1\,000 \text{ ans}$ on peut calculer la durée nécessaire pour éroder cet ensemble de formations.

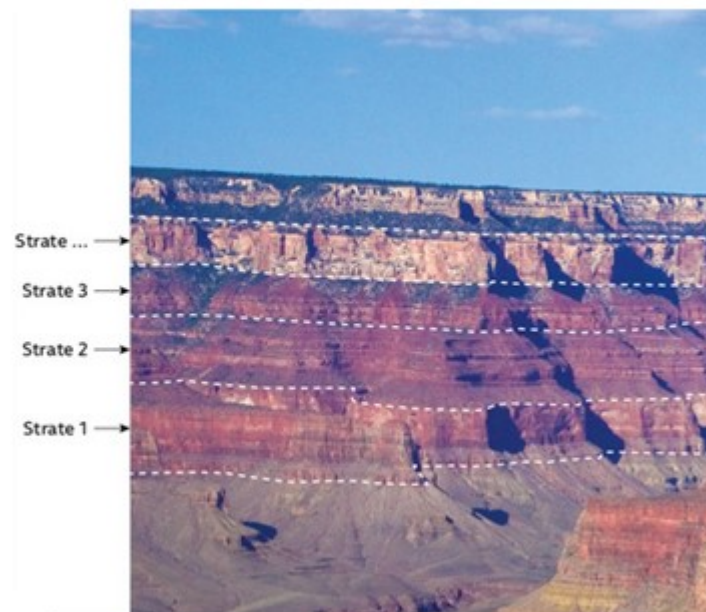
$$t = \frac{525\,000}{20} \times 1\,000 = 26\,250\,000$$

soit un peu plus de **26 Ma**.



Darwin avait proposé 300 Ma, soit pratiquement 10 fois plus que notre résultat. Cela pourrait être lié au taux d'érosion qu'il a utilisé.

Date	Auteur	Épaisseur des sédiments (km)	Taux de sédimentation (en km / Ma)	Durée de sédimentation = âge de la Terre (en Ma)
1860	Phillips	22	0,23	
1890	De Lapparent	45	0,5	
1892	Geike	30	0,4	
1893	Upham	80	0,8	
1900	Sollas	81	3,1	
1909	Sollas	102	1,27	



Paysage du Grand Canyon, Arizona, États-Unis

Ces falaises pouvant atteindre 1600 mètres de hauteur sont constituées d'empilements de roches sédimentaires, nommées «strates». Ces structures se sont formées par des dépôts successifs de sédiments (la strate 1 s'est déposée avant la strate 2, etc.).

4. Calculer l'âge de la Terre de chacun des scientifiques.

Philips	22	0.23	95.6Ma
De Lapparent	45	0.5	90Ma
Geike	30	0.4	75Ma
Upham	80	0.8	100Ma
Sollas	81	3.1	26Ma
Sollas	102	1.27	80Ma

Introduction

1°) Les premières estimations de l'âge de la Terre

2°) Les controverses du XIX^e siècle

3°) Le XX^e siècle et l'horloge radioactive

50 ans de datation des roches terrestres

Rutherford fut le premier à dater des roches par des méthodes de **radiochronologie**. De nombreux physiciens et géologues suivirent sa voie, et datèrent des roches de plus en plus anciennes.

Les progrès des techniques de datation radiochronologique. ▼

Découverte de la radioactivité par **Henri Becquerel**.



1896

Pierre Curie, en observant la décroissance radioactive d'un gaz libéré par le radium, déclare :
« ainsi, une mesure absolue du temps est possible, car la variation d'abondance d'un élément radioactif mesure un temps écoulé ».



1902

Marie Curie isole le radium dans des uraninites (minerais d'uranium).



1904

Ernest Rutherford attribue à un minéral riche en uranium un âge de **40 Ma**, qu'il revise en 1906 à **500 Ma**.

Lord Rayleigh est le premier à proposer un âge supérieur au **milliard d'années**.



1905

1907



Bertram Boltwood élabore une méthode de datation basée sur la mesure du rapport uranium/plomb. Il obtient un âge de **410 à 535 Ma**.

Arthur Holmes estime que les plus vieilles roches avoisinent les **1,6 Ga**. Il ébauche une échelle des temps géologiques en **millions d'années**.



1913



Frederic Soddy découvre que certains atomes ont plusieurs isotopes.

Holmes et **Fritz Houtermans** montrent que la méthode plomb-plomb de Nier donne accès à l'âge de la Terre, qu'ils estiment entre **3 et 3,4 Ga**.



1936



Alfred Nier étudie la désintégration en plomb de trois atomes radioactifs : ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th . Il met au point la méthode plomb-plomb et donne un âge de **2,57 Ga**.

1946

Note : 1 Ga = 1 milliard d'années.

Rutherford met fin à la théorie de Kelvin sur l'âge de la terre



Ernest Rutherford
(1871-1937).

En 1904, Ernest Rutherford découvre que certains atomes radioactifs (isotopes pères) se désintègrent au cours du temps en atomes radiogéniques (isotopes fils), et que leur désintégration s'accompagne d'un rayonnement et d'un dégagement de chaleur. Sa découverte mit à mal les conclusions de Kelvin, car elle montre que la Terre possède une source de chaleur que Kelvin n'avait pas envisagée dans son modèle de refroidissement. Voici comment Rutherford annonça sa découverte lors d'une conférence sur le radium :

« J'entrai dans la salle, à moitié sombre, et remarquai immédiatement la présence de Lord Kelvin. Je compris que j'aurais des difficultés avec la dernière partie de ma conférence, où j'abordais l'âge de la Terre, car mes idées contredisaient les siennes [...] J'eus alors une inspiration soudaine et dis : Lord Kelvin a donné une limite supérieure de l'âge de la Terre, sous la condition qu'on ne découvre pas de source de chaleur nouvelle. Cette possibilité prophétiquement annoncée, c'est précisément notre sujet d'aujourd'hui, le radium ! Voyez ! Le vieil homme me gratifia d'un sourire. »

D'après P. Richet dans *L'Âge du monde*, 1999.

Rutherford fut le premier à dater des roches par des méthodes de radiochronologie. De nombreux physiciens et géologues suivirent sa voie, et datèrent des roches de plus en plus anciennes.

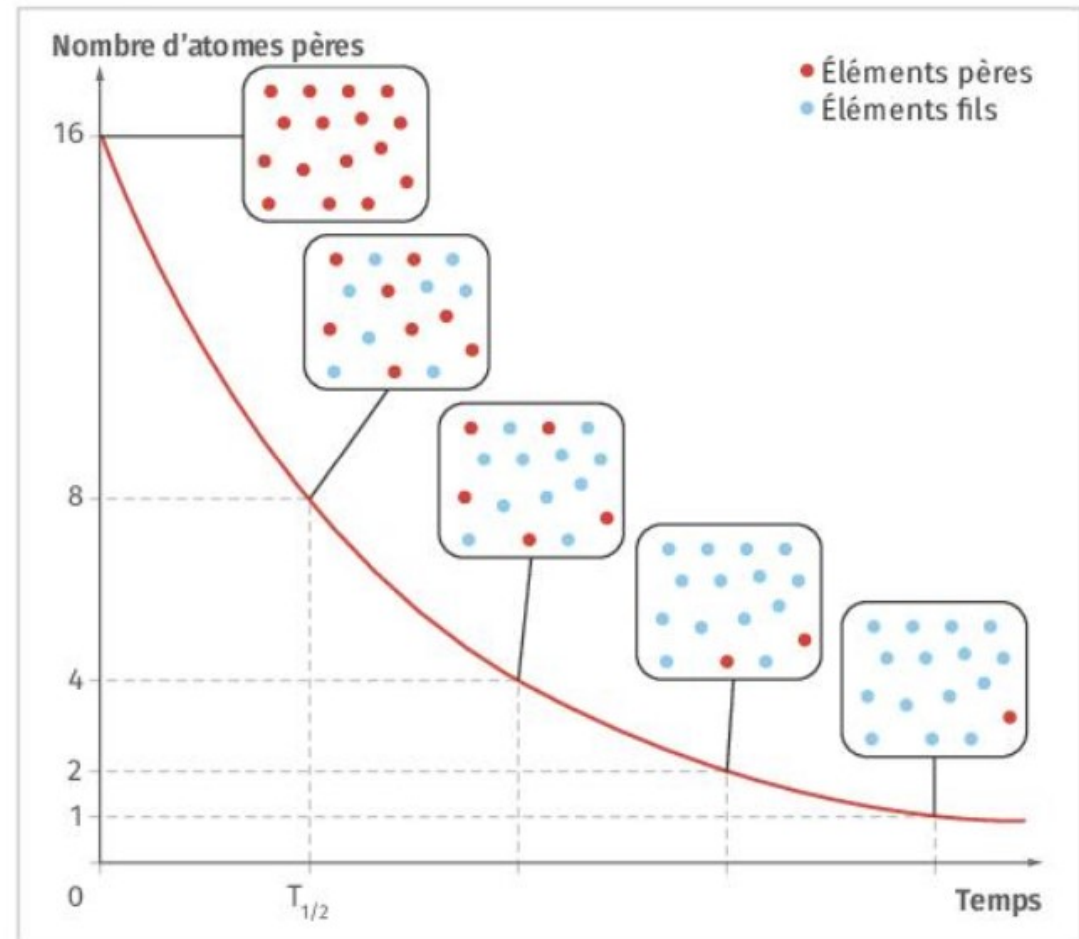
La découverte des isotopes radioactifs va permettre la naissance de la radio-chronologie

Au cours du temps, les éléments pères se désintègrent : ils sont dits radioactifs. Les éléments fils formés par désintégration des éléments pères sont dits radiogéniques.

Le temps de demi-vie (ou période radioactive $T_{1/2}$) correspond à la durée écoulée lorsque la moitié de la quantité d'éléments pères est désintégrée. Le nombre d'atomes pères diminue selon une loi exponentielle :

$P = P_0 e^{-\lambda t}$ où P est le nombre d'atomes pères à l'instant t , P_0 le nombre d'atomes pères à l'instant initial, et λ une constante positive.

$$P = P_0 e^{-\lambda t}$$



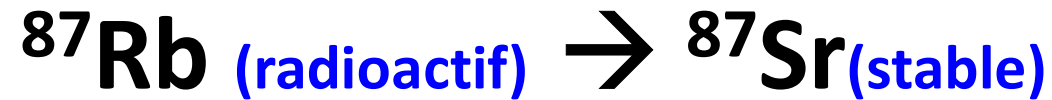
Quel que soit la quantité d'éléments père, il faut toujours la même durée pour que cette quantité soit divisée par 2 : c'est la **période de demi vie de l'élément**.

Les géochronomètres: différents isotopes utilisés en radiochronologie

Géochronomètre Isotope père → Isotope fils	Demi-vie $t_{1/2}$ (en années)	Remarques
$^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$	5 730	S'utilise sur des fossiles.
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$	$1,25 \times 10^9$	Difficile à utiliser sur des roches magmatiques refroidies en profondeur.
$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$	$0,7 \times 10^9$	S'utilise sur des minerais d'uranium et des zircons.
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$	$4,47 \times 10^9$	
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$	14×10^9	
$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$	$48,8 \times 10^9$	S'utilise sur des roches magmatiques.
$^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$	106×10^9	S'utilise sur des roches anciennes continentales.

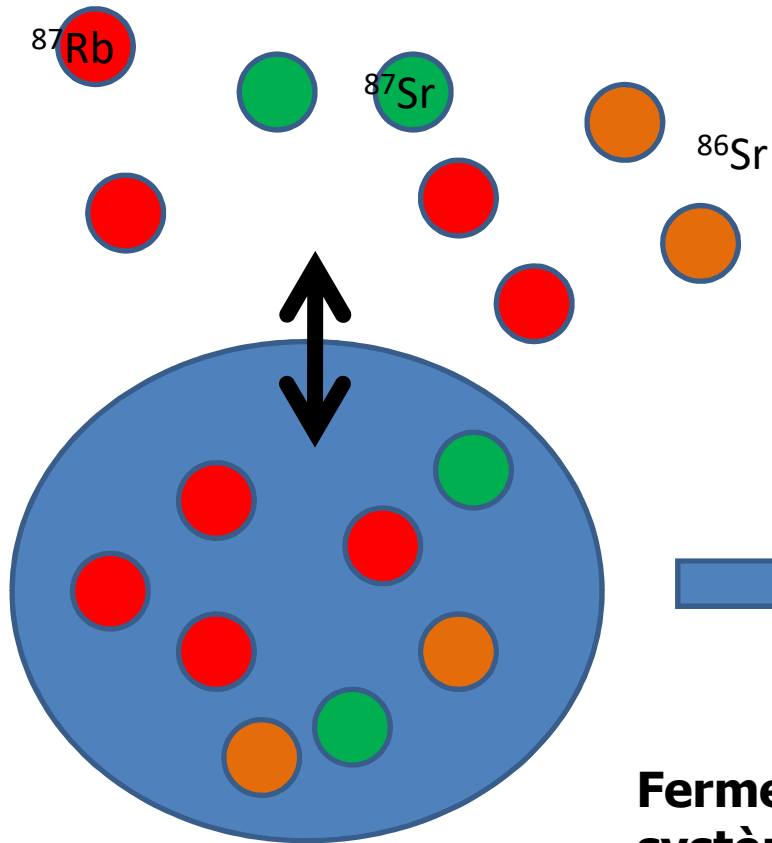
■ Les différents géochronomètres utiles en géologie.

Exemple : Le géochronomètre rubidium / strontium



$t_{1/2} = 50 \text{ Ga} \rightarrow$ datation époques très
anciennes

Echanges de ^{87}Rb et ^{87}Sr avec l'extérieur

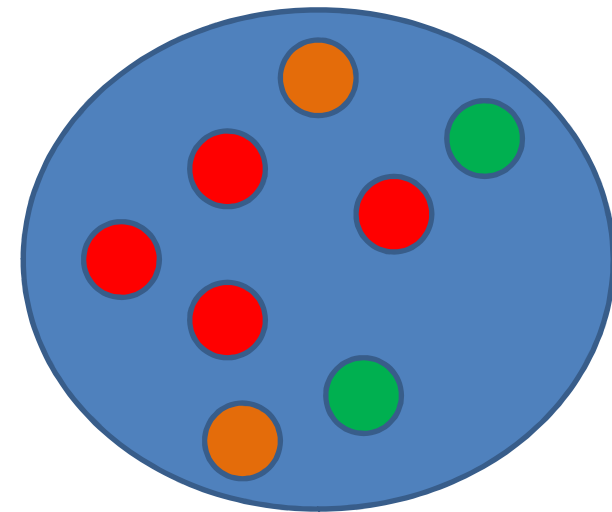


Quantité de ^{87}Rb et de ^{87}Sr initiales **inconnues**

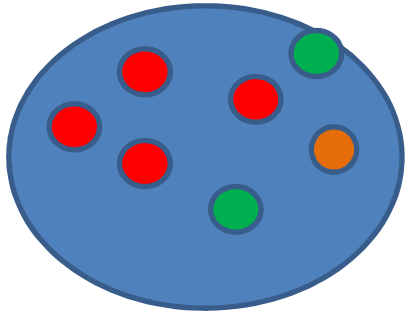


Fermeture du système

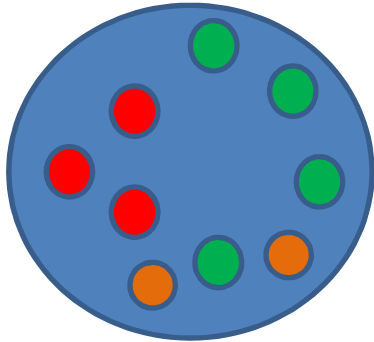
Solidification de la roche



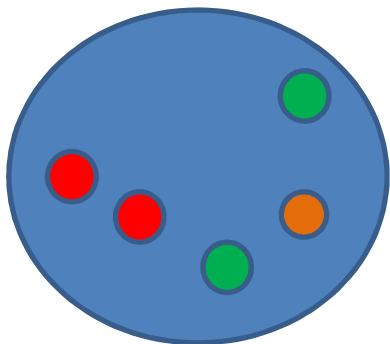
La solution pour contourner ce problème consiste à analyser **plusieurs échantillons d'une même roche**



Plagioclase



Felspath



Biotite

A la fermeture du système, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est identique pour les 3 minéraux

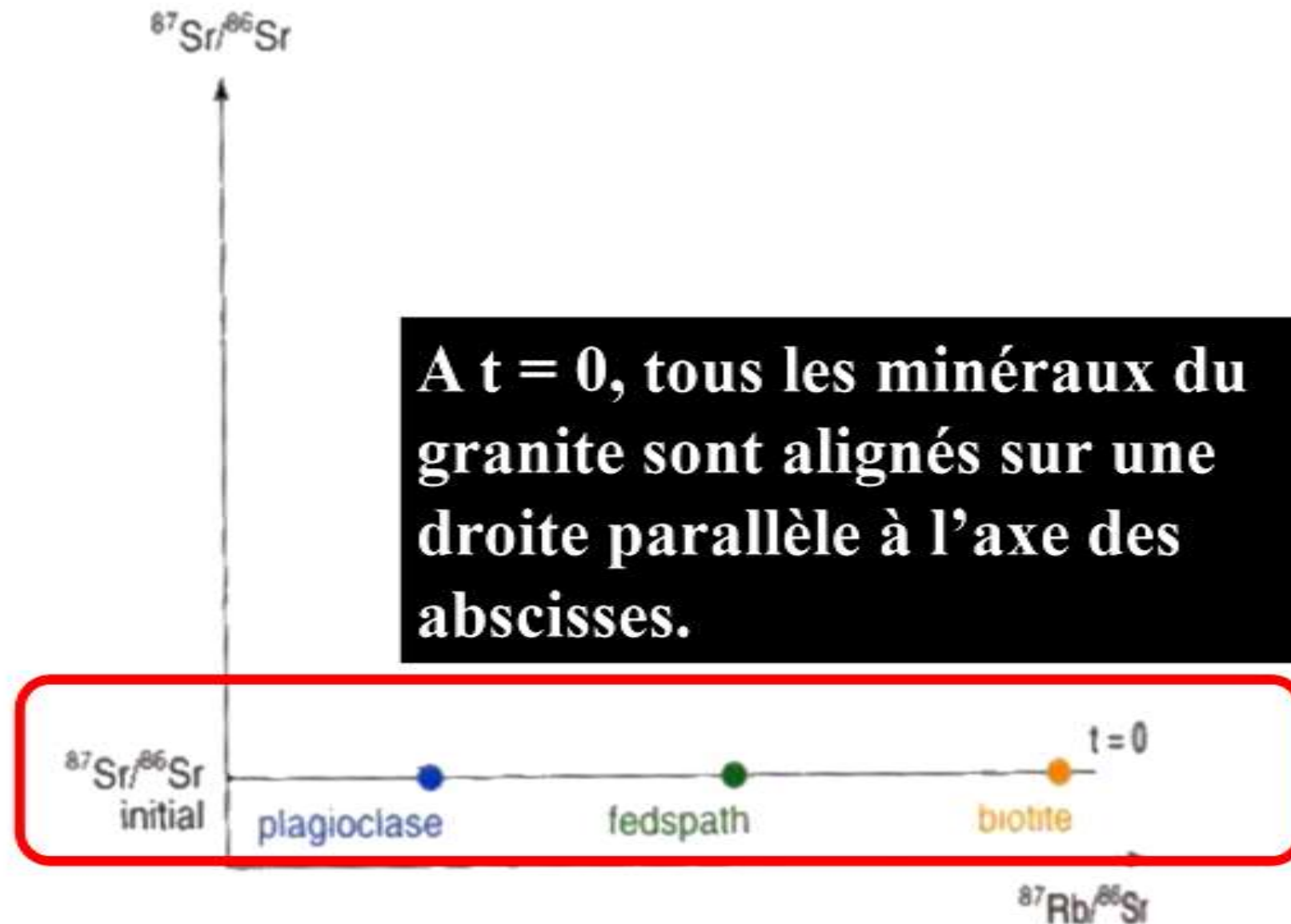
A la fermeture du système, les 3 minéraux n'intègre pas tous la même quantité de ^{87}Rb

Avec le temps :

^{87}Rb diminue donc $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ diminue

^{87}Sr augmente donc $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ augmente

Le géochronomètre rubidium / strontium

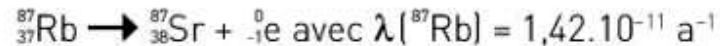


Exercice 3



▲ Des gneiss d'Isua

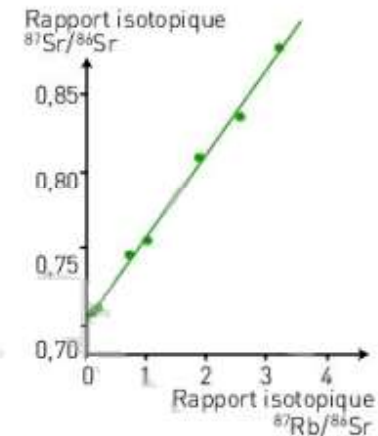
les différents minéraux incorporent du strontium stable (^{86}Sr), du ^{87}Sr radiogénique et du rubidium radioactif (^{87}Rb) :



À l'origine, tous les minéraux possèdent le même rapport en concentration de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, mais sont plus ou moins riches en rubidium 87. En comparant les rapports isotopiques aujourd'hui dans les différents minéraux, on obtient une droite dont la pente permet de déterminer l'âge de la roche.

Les roches les plus anciennes découvertes à ce jour sur Terre se localisent au sein de cratons, zones de croûte continentale géologiquement très stables. Ainsi, les gneiss d'Isua, au Groenland, font partie de ces roches les plus anciennes. Il est possible de dater la formation de ces gneiss d'origine magmatique. Lors de la cristallisation du magma,

Avec une écriture mathématique simplifiée, la pente est liée à l'âge par la relation : $P = \lambda \times t$



▲ Diagramme isotopique Rb - Sr

1. **Calculer** l'âge des gneiss d'Isua à partir de la droite isochrone qui passe par les points (0,15 : 0,711) et (3,34 : 0.877)

Rappel: formule calcul de la pente de la droite $y = ax (+b)$

$$\mathbf{a = (y_2 - y_1 / x_2 - x_1)}$$

$$a = (0,877 - 0,711) / (3,34 - 0,15) = 0,166 / 3,19 = 0,052$$

Comme $a = \lambda t$

alors, on peut dire que $t = a / \lambda$

$$\text{soit } t = 0,052 / 1,42 \times 10^{-11} = \mathbf{3,66 \times 10^9}$$

Selon cette méthode, l'âge des gneiss serait de 3,66 Ga.

2. Calculer l'âge de la terre à l'aide d'une droite isochrone obtenue par la récolte des météorites.

Rappel: formule calcul de la pente de la droite $y = ax (+b)$ négligeable

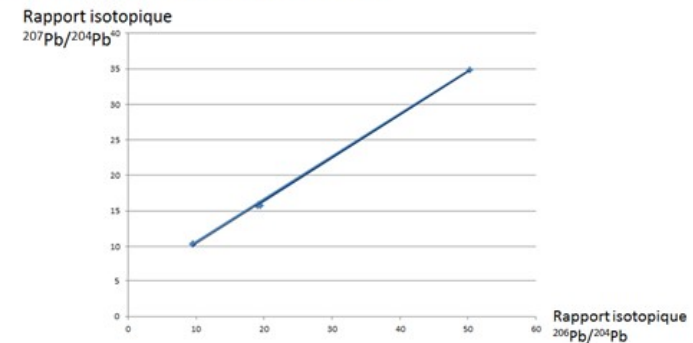
$$a = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$$

Échantillon	Météorite de Nuevo Laredo (Nouveau-Mexique)	Météorite de Canyon Diablo (Arizona)	Météorite de Forest City (Iowa)	Météorite de Modoc (Kansas)	Météorite de Henbury (Australie)
$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	50,28	9,46	19,27	19,48	9,55
$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	34,86	10,34	15,95	15,76	10,38

X
Y

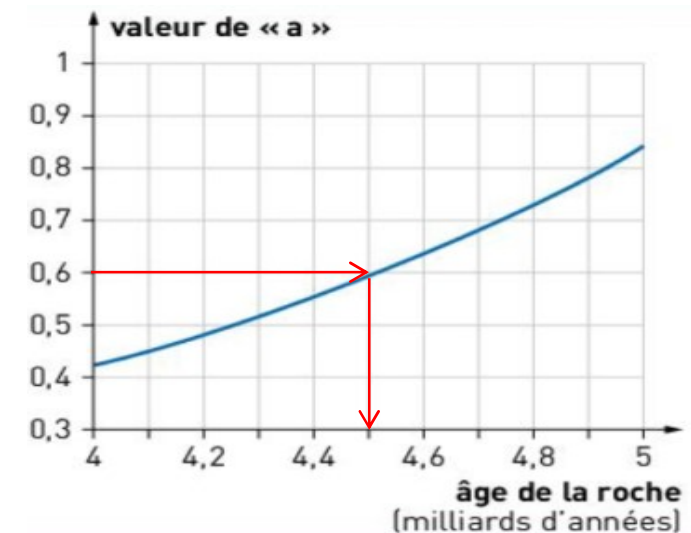
Données exploitées par Patterson pour dater la formation de la Terre.

Il arrive à tracer le graphique suivant :



$$a = (34,86 - 10,34) / (50,28 - 9,46) = 0.6$$

On se réfère au graphique de l'évolution de la valeur a en fonction de l'âge de la roche, on peut dire que l'âge des météorites est de 4,5 Ga.

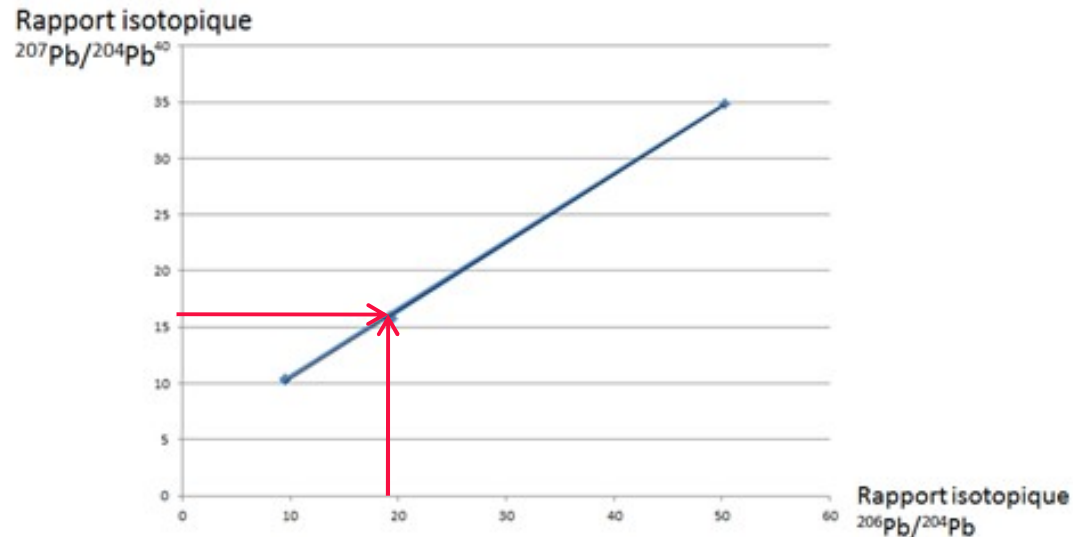


2. Vérifier graphiquement si l'échantillon sédimentaire s'aligne avec les météorites.

Échantillon	Météorite de Nuevo Laredo (Nouveau-Mexique)	Météorite de Canyon Diablo (Arizona)	Météorite de Forest City (Iowa)	Météorite de Modoc (Kansas)	Météorite de Henbury (Australie)	Sédiments marins
$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	50,28	9,46	19,27	19,48	9,55	19,00
$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	34,86	10,34	15,95	15,76	10,38	15,80

Données exploitées par Patterson pour dater la formation de la Terre.

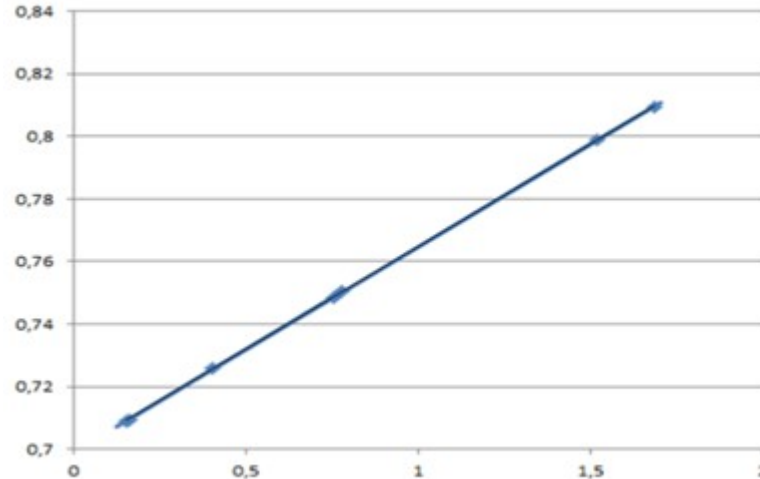
Il arrive à tracer le graphique suivant :



L'échantillon sédimentaire s'aligne avec les météorites.
Il permettrait aussi de justifier l'âge de la Terre.

4. Tracer la droite $y = b + Xa$ ou $(y = ax + b)$

Rapport isotopique
 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$



Rapport isotopique
 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$

	X	Y
Échantillon	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Chainpur 1	0,7580	0,74864
Soko banja A 1	1,520	0,79891
Soko Banja B 2	1,685	0,80952
Soko Banja I	0,1542	0,70910
Guider	0,4060	0,72576
Olivenza	0,7790	0,75035
Saint Severin B 1	0,1610	0,70941

DOC 1 Les mesures effectuées sur différentes chondrites.

5. Rappel: formule calcul de la pente de la droite

$$a = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$$

$$a = (0,80952 - 0,70941) / (1,685 - 0,1610) = 0,10011 / 1,524 = 0,0657$$

6.

Comme $a \approx \lambda t$, alors, on peut dire que $t \approx a / \lambda$ soit $t = 0,0657 / 1,4 \times 10^{-11} = 4,69 \times 10^9$

Selon cette méthode, l'âge de la Terre serait d'environ 4,7 Ga.