

III. Le XX^e siècle et les apports de la radioactivité

La découverte de la radioactivité



Les physiciens Pierre et Marie Curie purifient le radium en 1903 et montrent que sa désintégration produit une grande quantité de chaleur. De nombreux éléments naturels présents sur Terre contenant du radium, le physicien Robert Strutt remet en cause, avec d'autres, le raisonnement de Kelvin dans son estimation de l'âge de la Terre.

DOC 2 Pierre et Marie Curie dans leur laboratoire.



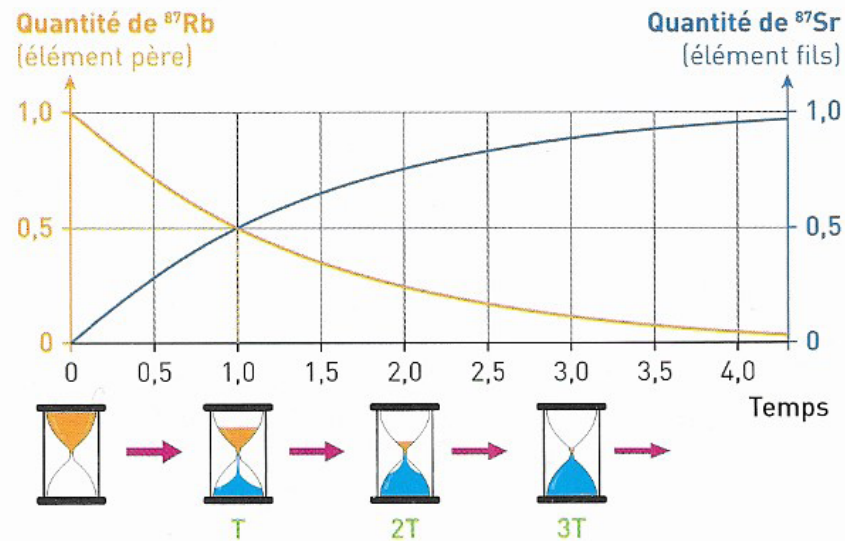
(U) : Uranium (Pb) : Plomb (He) : Hélium

La notion d'isotopie est découverte par Soddy en 1911 pour rendre compte des propriétés chimiques très proches de certains éléments. Deux isotopes ont le même nombre de protons et d'électrons, mais pas le même nombre de neutrons. Le plomb comprend de nombreux isotopes, dont le plomb 204, qui est stable et n'est pas le résultat d'une chaîne de désintégration radioactive.

DOC 4 Deux réactions de désintégration radioactive.

Différents couples isotopiques utilisés en radiochronologie

a. Pour tout couple isotopique, une datation absolue par radiochronologie repose sur la mesure de la quantité d'un élément radioactif et/ou de son élément fils dans un échantillon de matière. Connaissant le temps de demi-vie des isotopes radioactifs, on détermine avec une grande précision l'âge d'un fossile ou d'un minéral. La période radioactive (demi-vie) de l'isotope doit être adaptée à l'âge estimé de la roche que l'on souhaite dater.



b. Quelques exemples de couples d'isotopes utilisés en radiochronologie

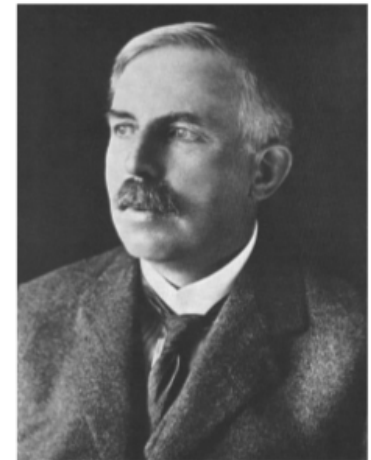
Noyau père	Désintégration	Noyau fils	Constante radioactive λ	Demi-vie $t_{1/2}$
^{14}C	β^-	^{14}N	$1,209 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$	5 730 a
^{40}K	β^+	^{40}Ar	$5,81 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$	11,9 Ga
^{87}Rb	β^-	^{87}Sr	$1,42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$	48,8 Ga
^{147}Sm	α	^{147}Nd	$6,54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$	106 Ga
^{235}U	chaîne	^{207}Pb	$9,848 5 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$	0,704 Ga
^{238}U	chaîne	^{208}Pb	$1,551 25 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$	4,47 Ga

En **1902**, **Ernest Rutherford** (1871-1937, physicien néozélandais) établit la notion de **période radioactive**.

La **période radioactive** (ou demi-vie) d'un [isotope radioactif](#) est le temps nécessaire pour que la moitié des [noyaux](#) de cet isotope initialement présent se désintègrent naturellement.

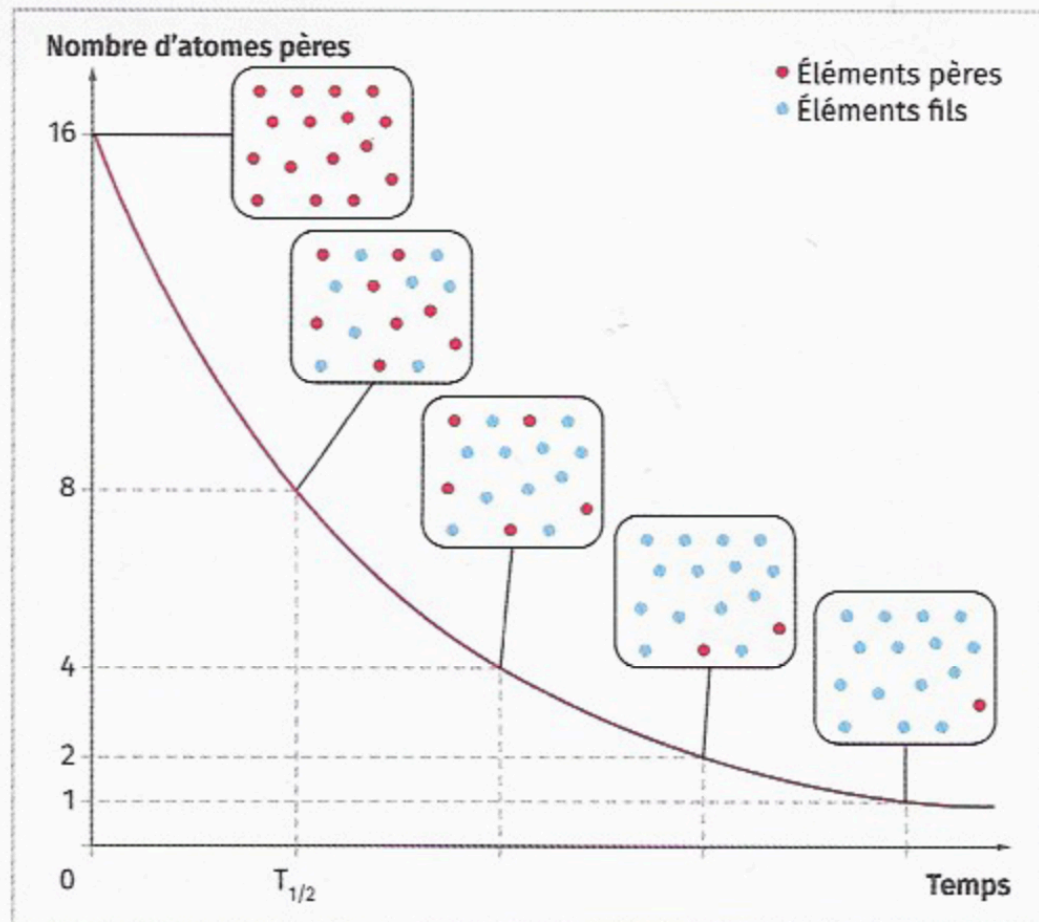
Cela permet de se servir des éléments radioactifs comme **chronomètre absolu** des événements passés (datation absolue).

En 1906, Ernest **Rutherford** attribue à un échantillon de roche un **âge de 500 Ma**



[Ernest Rutherford](#)

Évolution du nombre d'atomes au cours du temps, une horloge moléculaire



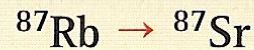
Au cours du temps, les éléments pères se désintègrent : ils sont dits radioactifs. Les éléments fils formés par désintégration des éléments pères sont dits radiogéniques.

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.

Exemple de la désintégration du rubidium en strontium

Rubidium et strontium sont des éléments fréquents dans les roches de la croûte continentale. Le strontium présente deux isotopes stables : ^{87}Sr et ^{86}Sr . La quantité initiale de ^{86}Sr reste stable au cours du temps tandis que celle de ^{87}Sr augmente par désintégration du ^{87}Rb .

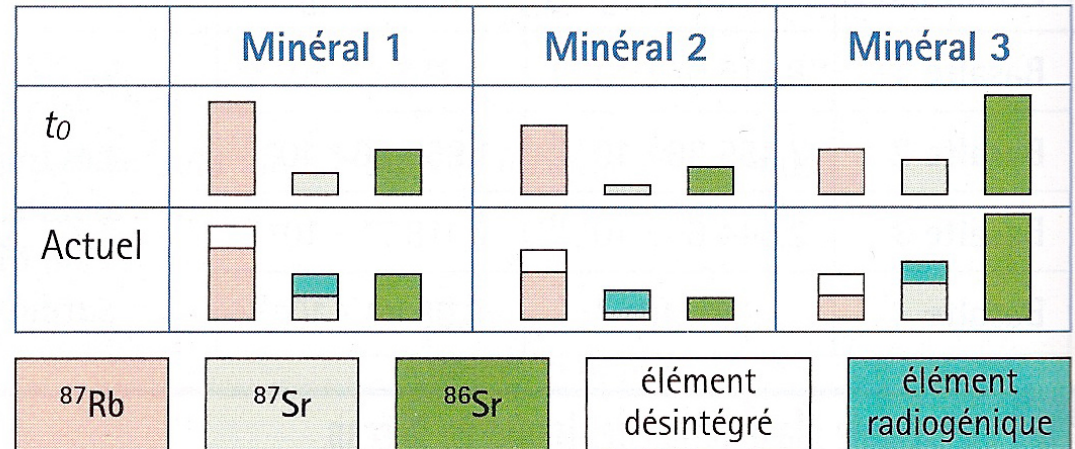


avec :

demi-vie = $48,8 \cdot 10^9$ ans ;

$\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11} \cdot \text{an}^{-1}$.

Lors de leur formation, les minéraux incorporent ces trois isotopes, mais pas dans les mêmes proportions, ils ont donc des compositions isotopiques initiales différentes. Au cours du temps, ^{87}Rb diminue, ^{87}Sr augmente et ^{86}Sr reste stable (*tableau ci-contre*).



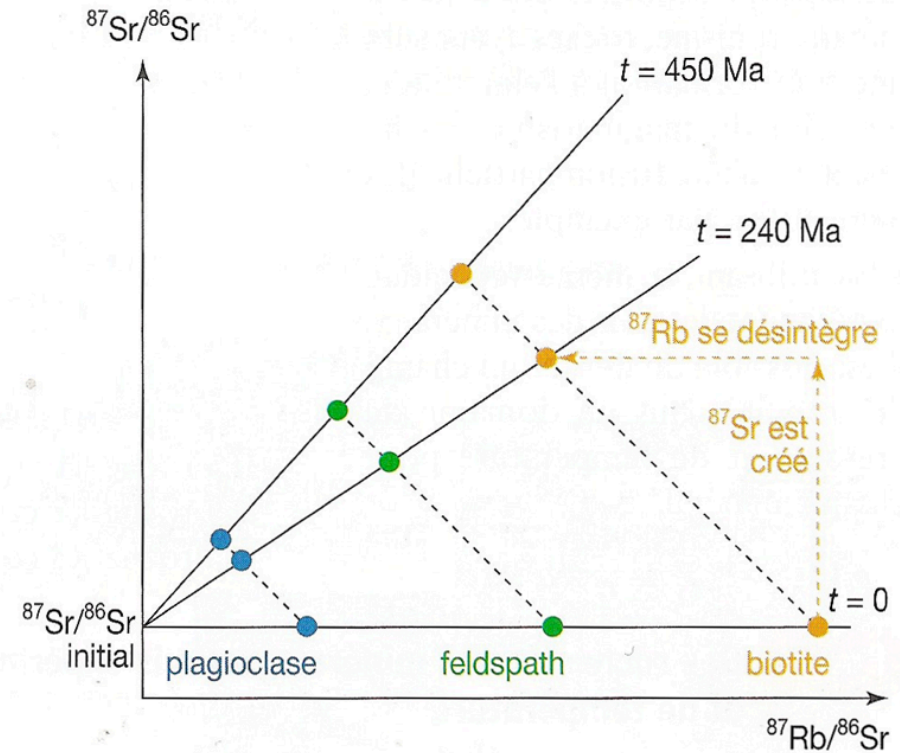
La décroissance de la quantité initiale de ^{87}Rb peut donc s'exprimer ainsi :

$$^{87}\text{Rb} = ^{87}\text{Rb}_0 e^{-\lambda t}$$

Cependant, on ne connaît pas la quantité initiale de $^{87}\text{Rb}_0$ et on ne peut pas la déduire de la quantité de ^{87}Sr car, contrairement au couple K/Ar, $^{87}\text{Sr}_0$ n'est pas nulle.

L'obtention d'une droite isochrone par la méthode de radiochronologie

• Au cours du temps, ^{87}Rb diminue au profit de ^{87}Sr . Donc le rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ diminue et le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ augmente. Cependant, cette variation est d'autant plus importante que le minéral est riche en Rb. À un temps t , on obtient une droite avec un coefficient directeur, a , non nul. Une telle droite est dite **droite isochrone** car elle relie des points correspondant à des minéraux de même âge. Il est facile de comprendre que plus le temps passe, plus le coefficient directeur de cette droite est important, puisqu'il y aura encore moins de ^{87}Rb et plus de ^{87}Sr .

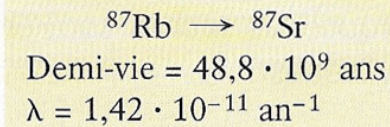


Le coefficient directeur de la droite est donc indicateur du temps écoulé depuis la **crystallisation** de la roche.

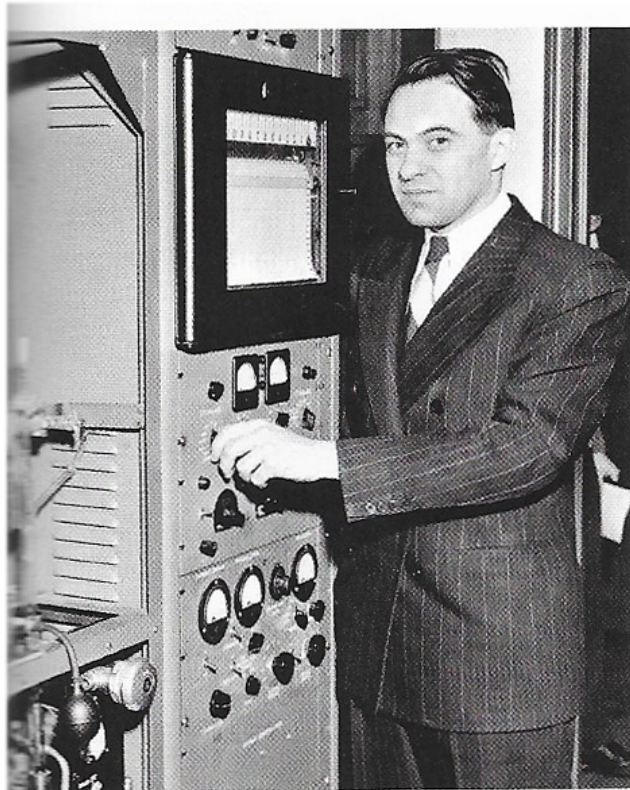
On peut démontrer mathématiquement que :

$$t = \ln(a + 1) / \lambda$$

avec λ : constante de désintégration (propre à l'élément)



La conception du spectromètre de masse

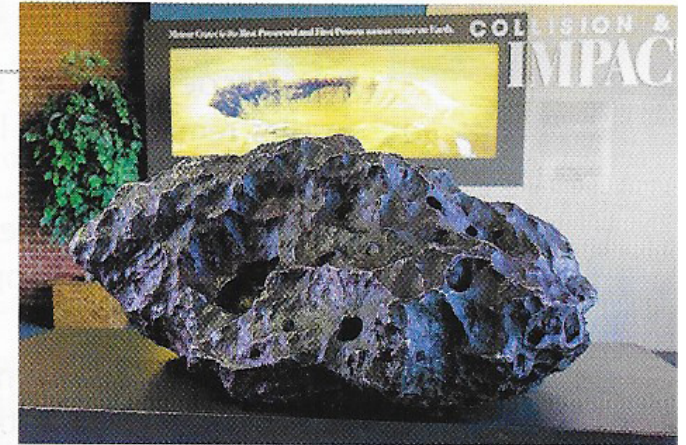


DOC 5 Le physicien A. O. Nier avec un spectromètre de masse de sa conception en 1940. Avec la mise au point de cet appareil, il devient possible de mesurer très précisément des rapports d'abondance entre différents isotopes.

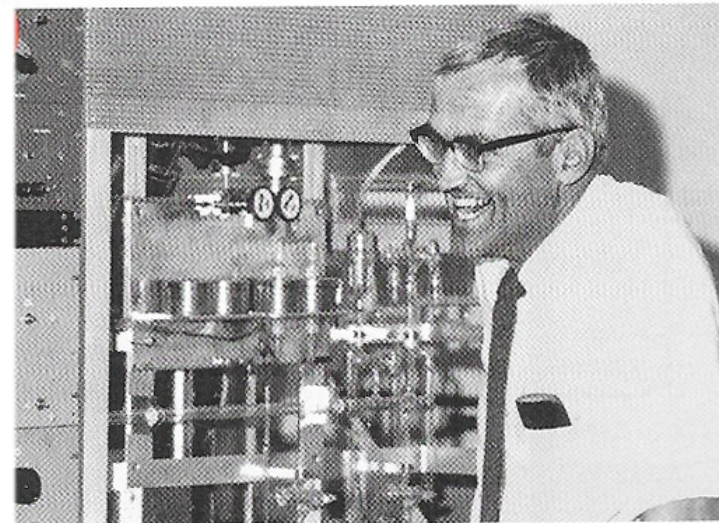
L'âge de la Terre établi grâce à des météorites

En 1950, le géochimiste américain Clair Patterson (1922-1995) comprend que les plus vieilles roches accessibles à la surface de la Terre ne peuvent fournir que l'âge de la croûte, couche supérieure en remaniement permanent. Il peut cependant utiliser d'autres éléments du système solaire formés en même temps que la Terre et à partir des mêmes matériaux : les météorites, blocs rocheux extra-terrestres atteignant la surface des planètes. Les nouvelles technologies dont il dispose à l'époque lui permettent de mesurer précisément la composition isotopique des météorites. Il utilise pour cela trois isotopes du plomb (^{204}Pb , ^{206}Pb et ^{207}Pb). Clair Patterson ana-

lyse alors la proportion en isotopes de fragments de météorite, comme la météorite de Holsinger, et détermine un âge précis de la Terre. Cette approche constitue une méthode de datation absolue, c'est-à-dire aboutissant à des âges chiffrés.

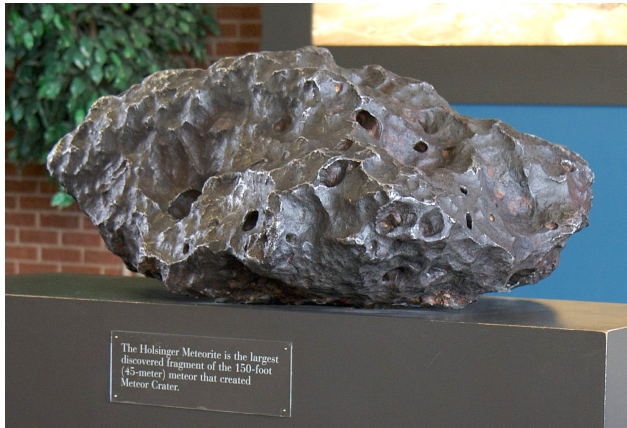


La météorite de Holsinger



**Clair
Patterson
(1922-1995)
Géochimiste
américain**

La météorite **Canyon Diablo** retrouvée dans le [Meteor Crater](#) en [Arizona](#).
L'impact a eu lieu il y a environ 49 000 ans.



Principe de la méthode Pb/Pb utilisée par Clair Patterson

Clair Patterson démontre une relation entre les rapports isotopiques* mesurés sur différents fragments de météorites à l'instant t de la mesure :

$$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = m \ ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} + p$$

L'expression est de la forme $y = mx + p$, ce qui correspond à l'équation d'une droite dont m est le coefficient directeur. Clair Patterson émet l'hypothèse que, si les rapports isotopiques mesurés sur différentes météorites forment une droite, dite droite isochrone*, alors elles ont le même âge. Ainsi, le coefficient directeur de la droite isochrone permet de calculer l'âge des météorites. Clair Patterson montre alors que l'âge de ces météorites est égal à $4,50 \pm 0,07$ Ga.

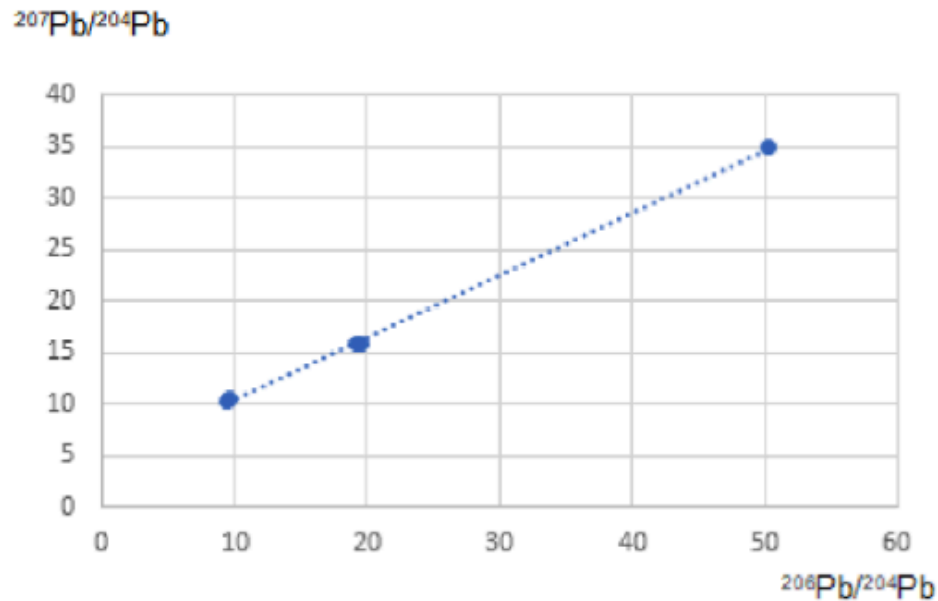
RÉSULTATS D'ANALYSE DE DIFFÉRENTES MÉTÉORITES

Météorites	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
<i>Nuevo Laredo</i>	50,28	34,86
<i>Forest City</i>	19,27	15,95
<i>Holsinger</i>	9,46	10,34

**Clair
Patterson
(1922-1995)
Géochimiste
américain**

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

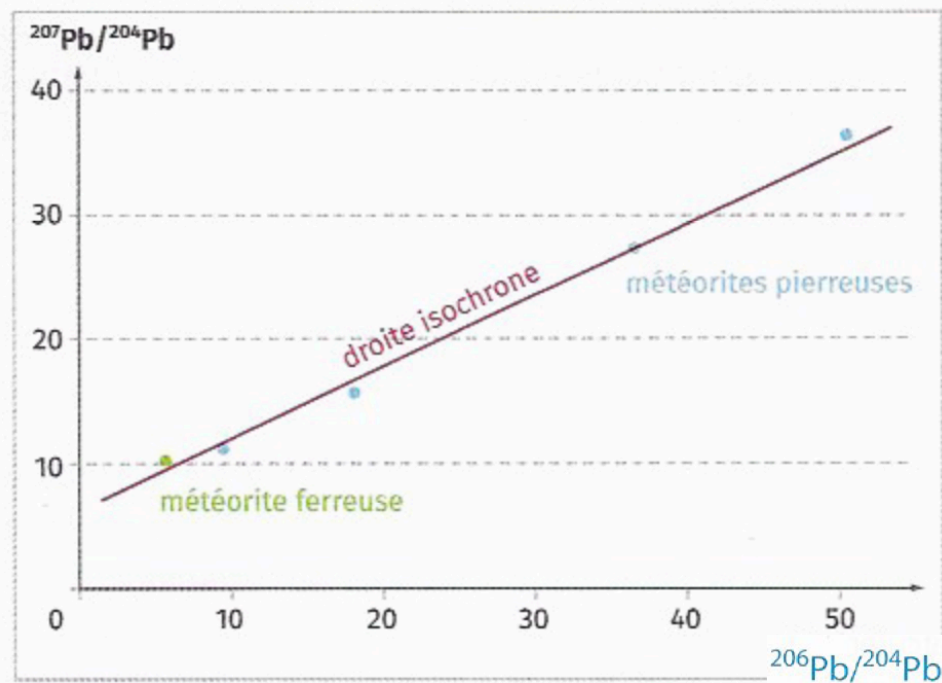
Isochrone des météorites étudiées



La pente de la droite est d'environ 0,6.

Courbe isochrone et détermination de l'âge de la Terre par Patterson en 1950

L'isochrone (d'iso : identique et chronos : temps) est une droite reliant les rapports isotopiques de roches d'âge identique. Le coefficient directeur de cette droite donne, après calcul, l'âge de l'ensemble des échantillons (ici, une météorite ferreuse et quatre météorites pierreuses). Patterson estime grâce à cette méthode un âge de formation de la Terre égal à 4,55 Ga.



La droite isochrone

Le coefficient directeur de la droite est donc indicateur du temps écoulé depuis la **crystallisation** de la roche. On peut démontrer mathématiquement que :

$$t = \ln(a + 1) / \lambda$$

avec λ : constante de désintégration (propre à l'élément)

a : coefficient directeur de la droite isochrone

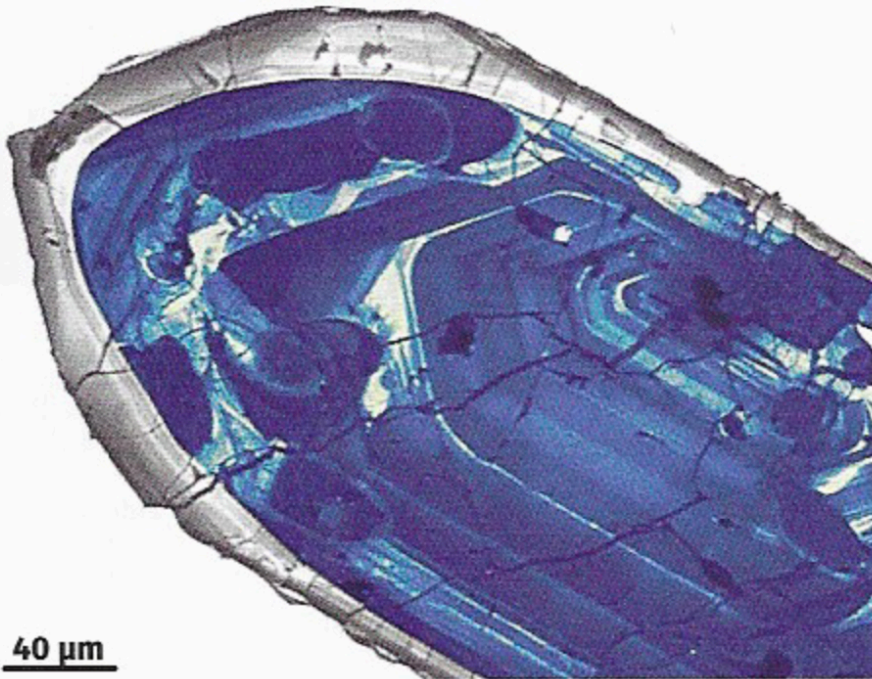
Lambda (λ): constante de désintégration de l'élément chimique (en nombre d'atomes désintégrés par an)

Ln : fonction logarithme népérien

Datation des roches terrestres les plus anciennes

Le zircon, un minéral datable

Le zircon est peu altérable et souvent riche en uranium, ce qui en fait un bon candidat pour la datation des plus anciens minéraux terrestres. Au cœur du cristal se trouvent les éléments les plus anciens à avoir cristallisé.



40 μm

● Cristal de zircon, âgé de 4,4 Ga, échantillonné dans une roche de la région de Jack Hills en Australie (micrographie en fausses couleurs).

Les roches les plus anciennes jamais étudiées

Les plus anciennes roches de la croûte terrestre ont été étudiées et datées en 2014 par John W. Valley et son équipe, sur des roches australiennes contenant des cristaux de zircon.

En se basant sur la méthode développée par Patterson, ils ont utilisé le système U-Th-Pb comme géochronomètre.

La datation se fait par l'analyse des quantités d'éléments radioactifs pères et fils libérés par un impact laser dans le cristal. Les chercheurs aboutissent à une datation de 4,4 milliards d'années, ce qui en fait l'âge le plus grand jamais obtenu pour des roches terrestres.

Bilan :

Au début du XXe siècle, la découverte de la radioactivité met fin à la polémique. La chaleur produite par la **désintégration radioactive** conduit à remettre en cause le raisonnement de Kelvin. La relation entre la quantité **d'éléments père** et **d'éléments fils** dans une roche qui les contient étant liée au temps, il est possible de dater la formation de cette roche.

La mise au point du **spectromètre de masse** permet de mesurer précisément ces teneurs.

En 1953 (Clair Patterson géochimiste américain), l'âge absolu de la Terre a pu être établi à 4,55 milliards d'années à partir de l'étude de météorites (objets primitifs du système solaire formés en même temps que la Terre).

Evolution de l'estimation de l'âge de la Terre au cours de l'histoire.

