

# DECROISSANCE RADIOACTIVE

## 1. LOI DE DECROISSANCE RADIOACTIVE.

### 1.1. NOMBRE DE DESINTEGRATIONS PENDANT UNE DUREE $\Delta t$ .

Malgré le caractère aléatoire de la désintégration radioactive, il est possible d'en établir les lois en utilisant des échantillons contenant un très grand nombre de noyaux, et en réalisant un grand nombre de mesures. Il s'agit donc de lois statistiques.

Un noyau radioactif ne «vieillit» pas: il ne subit aucune transformation progressive avant de se désintégrer.

Chaque noyau radioactif d'un même ensemble a une probabilité constante, notée  $\lambda$ , de se désintégrer pendant une unité de temps.

Soit un échantillon de noyaux radioactifs. On note comme l'illustre la figure ci-contre:

- $N_0$  le nombre de noyaux présents à une date choisie comme date initiale ( $t = 0$ );
- $N$  le nombre de noyaux présents (non désintégrés) à la date  $t$ ;
- $N + \Delta N$  le nombre de noyaux présents à la date  $t + \Delta t$  (avec  $\Delta N < 0$  car  $N$  diminue).

Le nombre de noyaux qui se désintègrent entre les dates  $t$  et  $t + \Delta t$  est donc:  $N_i - N_f = N - (N + \Delta N) = -\Delta N$

Ce nombre est proportionnel:

- au nombre  $N$  de noyaux présents (pendant une même durée, le nombre de désintégrations est double dans un échantillon deux fois plus importants);
- à la durée  $\Delta t$  (pour un même échantillon, le nombre de désintégrations est double pendant une durée double, à condition que  $\Delta t$  soit petit par rapport à  $t$ ).

On en déduit que le nombre de désintégrations  $-\Delta N$  pendant la durée  $\Delta t$  est proportionnel à la durée  $\Delta t$  et au nombre de noyaux présents  $N$ :  $-\Delta N = \lambda N \Delta t$

$\lambda$  est la constante radioactive, elle dépend de la nature du noyau radioactif.

Puisque  $-\frac{\Delta N}{N} = \lambda \Delta t$ , le produit  $\lambda \Delta t$  est sans dimension. Si la durée  $\Delta t$  est exprimée en secondes, la constante radioactive est alors en  $s^{-1}$

### 1.2. DECROISSANCE EXPONENTIELLE.

Expérimentalement on a montré que le nombre moyen de noyaux radioactifs  $-\frac{\Delta N}{\Delta t}$  qui se désintègrent pendant une durée  $\Delta t$  décroît de manière exponentielle au cours du temps.

D'après l'expression  $-\Delta N = \lambda N \Delta t$ , le nombre moyen  $N$  de noyaux radioactifs présents est proportionnel à sa propre variation moyenne  $-\frac{\Delta N}{\Delta t}$  pendant la durée  $\Delta t$ .

La fonction mathématique qui a cette propriété est la fonction exponentielle.

#### ***Loi de désintégration radioactive:***

La désintégration des noyaux radioactifs au niveau microscopique est aléatoire mais au niveau macroscopique le nombre moyen  $N$  de noyaux restant dans l'échantillon suit une loi déterminée: la décroissance radioactive est exponentielle.  $N = N_0 e^{-\lambda t}$

D'après les propriétés de la fonction exponentielle, la durée de désintégration totale d'un échantillon est infinie quelle que soit la nature de l'échantillon.

Les décroissances peuvent être plus ou moins rapides suivant la nature des noyaux radioactifs. On peut les comparer en utilisant la notion du temps caractéristique pour passer d'une population  $N$  à une population  $N/2$ .

***Remarque.*** On définit la constante de temps  $\tau = \frac{1}{\lambda}$  ce qui donne  $N = N_0 e^{-t/\tau}$

## 2. DEMI-VIE RADIOACTIVE.

### 2.1. DEFINITION.

La demi vie  $t_{1/2}$  d'un échantillon de noyaux radioactifs est égale à la durée nécessaire pour que statistiquement la moitié des noyaux de l'échantillon présents à la date  $t$  soit désintégrée à la date  $t + t_{1/2}$ :

$$N(t + t_{1/2}) = \frac{N(t)}{2}$$

#### ***Remarque:***

Il faut une durée infinie pour que l'échantillon soit désintégré. La demi-vie ne correspond pas à la moitié de la durée de vie de l'échantillon.

## 2.2. EXPRESSION DE DEMI-VIE $t_{1/2}$ .

A la date  $t$ , le nombre de noyaux radioactifs est  $N(t)$ .

A la date  $t_{1/2}$  ce nombre est, par définition, divisé par 2:  $N(t + t_{1/2}) = \frac{N(t)}{2}$

Or d'après la loi de décroissance, on peut écrire: - à la date  $t$ :  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ ;  
- à la date  $t + t_{1/2}$ :  $N(t + t_{1/2}) = N_0 e^{-\lambda(t + t_{1/2})}$

On obtient donc  $N_0 e^{-\lambda(t + t_{1/2})} = \frac{N_0 e^{-\lambda t}}{2}$

En simplifiant, on obtient  $e^{-\lambda t} = \frac{1}{2}$  d'où  $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$  la demi-vie ne dépend que de  $\lambda$ .

La demi vie radioactive  $t_{1/2}$  est une caractéristique de chaque type de noyau radioactif. Elle ne dépend que de la constante radioactive  $\lambda$ :

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Isotope	Temps de demi-vie
Technétium 99	6,01 heures
Iode 131	8,02 jours
Chrome 51	27,71 jours
Cobalt 60	5,27 ans
Césium 137	30,15 ans
Iridium 192	73,82 jours
Iode 131	8,02 jours
Samarium 153	1,93 jours

## 2.3. POURQUOI DIT-ON QU'UN NOYAU RADIOACTIF NE VIEILLIT PAS ?

Considérons un échantillon de  $N_0$  noyaux de césium 137 dont la demi-vie est de 30 ans.

Au bout de 30 ans, si l'échantillon est suffisamment grand, statistiquement la moitié de l'échantillon s'est désintégrée.

Pour un noyau donné, la probabilité de se désintégrer pendant ces 30 ans est donc  $1/2$ .

Supposons que le noyau en question existe toujours à l'issue de ces 30 ans, la probabilité pour qu'il se désintègre dans les 30 ans à venir est toujours de  $1/2$ .

Bien sûr, pour l'homme, il n'en est pas de même, la probabilité de mourir entre 0 et 30 ans n'est pas la même qu'entre 30 et 60 ans.

C'est pour cette raison qu'on dit souvent qu'un noyau radioactif ne vieillit pas.

## 3. ACTIVITE D'UNE SOURCE ET EFFET BIOLOGIQUE.

### 3.1. ACTIVITE D'UNE SOURCE.

L'activité  $A$  d'une source est égale au nombre moyen de désintégrations par seconde dans l'échantillon:

$$A = - \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad \text{elle s'exprime en becquerels dont le symbole est Bq} \quad 1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration par seconde.}$$

Exemples de valeurs d'activités que l'on trouve dans notre environnement.

- Le granite: 1 000 becquerels/kg.
- Le corps humain: un individu de 70 kg a une activité de l'ordre de 8 000 Bq dont environ 5 000 Bq dus au  $^{40}\text{K}$  dans les os.
- le lait: 80 Bq/L.
- L'eau de mer: 10 Bq/L
- 1 g de Plutonium:  $2 \times 10^9$  Bq

### 3.2. ACTIVITE D'UNE SOURCE ET DANGEROUSITE.

Plus l'activité d'une source est grande et plus elle est potentiellement dangereuse.

D'après la relation  $-\Delta N = \lambda N \Delta t$ , l'activité  $A$  peut s'écrire:  $A = \lambda N$

De cette relation, deux observations peuvent être tirées:

#### L'activité suit une loi de décroissance exponentielle.

L'activité  $A$  et le nombre  $N$  de noyaux sont proportionnels à chaque instant.

Comme  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ , on peut écrire  $A_0 = \lambda N_0$ ;  $A = A_0 e^{-\lambda t}$

L'activité décroît de moitié à chaque demi-vie  $t_{1/2}$ .

#### Dangerosité et demi-vie.

En introduisant la demi-vie  $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ , on obtient l'expression de l'activité  $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \times N$

A un instant donné, l'activité d'une source dépend de la demi-vie et dépend aussi du nombre de noyaux radioactifs présents. On peut dire que:

- une source de demi-vie courte n'est pas très active à condition qu'elle soit peu abondante;
- une source de très grande demi-vie peut être très active si elle est très abondante.

## 4. AUTRE APPLICATION DE LA RADIOACTIVITE: LA DATATION PAR UN RADIOELEMENT.

### 4.1. PRINCIPE.

Le comportement statistiquement déterminé d'un échantillon de matière radioactive nous a conduit à écrire une loi de décroissance qui est universelle:  $N = N_0 e^{-\lambda t}$

Utiliser un échantillon radioactif en tant qu'horloge, c'est lui demander de nous donner une date t.

Mathématiquement, une date t est donnée par  $t = - \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N}{N_0}$

La détermination de la valeur de la date nécessite:

- un échantillon de noyaux radioactifs de constante radioactive  $\lambda$  connue;
- un moyen de détermination du nombre de noyaux à la date t;
- la connaissance de la population initiale  $N_0$  à la date  $t = 0$ .

### Remarque.

Si la composition initiale n'est pas connue, il faut avoir recours à d'autres méthodes.

### 4.2. DOMAINE D'UTILISATION DE QUELQUES RADIOELEMENTS.

L'âge estimé de l'échantillon à dater doit être en rapport avec le temps de demi-vie du noyau radioactif; en effet, au delà de  $10t_{1/2}$ , on peut considérer que les noyaux radioactifs sont tous désintégrés.

Pour la datation de vieilles roches, plusieurs méthodes reposent sur des isotopes radioactifs (ou radioéléments) dont la demi-vie s'exprime en milliards d'années. On détermine la proportion du couple noyau père / noyau fils.

Par exemple le produit de désintégration ultime de l'uranium 238 est le plomb 206. Il est donc possible de déterminer l'âge des roches anciennes par la mesure du rapport de la teneur de ces roches en plomb 206 à celle en uranium 238.

Une roche contient d'autant plus de plomb qu'elle est âgée.

D'autres couples tels le couple rubidium 87 et le strontium 87 sont utilisés. L'âge de la Terre a été estimé à 4,55 milliards d'années.

Pour la datation de matériaux anciennement en équilibre avec l'atmosphère et jusqu'à environ 50 000 ans, on utilise le carbone 14, isotope de courte demi-vie: environ 5 600 ans.

### 4.3. DATATION AU CARBONE 14.

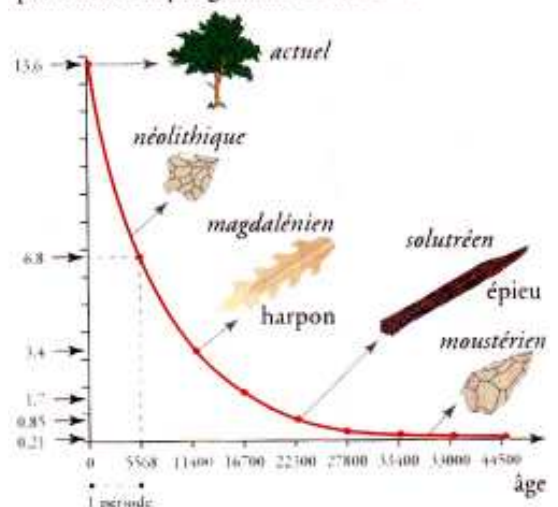
La méthode repose sur deux hypothèses:

- la teneur en carbone 14 des matières organiques carbonées actuelles est très proche de celle des matières carbonées qui constituaient les organismes vivants autrefois.
- la répartition du carbone 14 est homogène dans l'atmosphère.

Dans ces conditions tout organisme vivant a la même composition isotopique en carbone 14 que l'atmosphère. La composition initiale est donc connue.

A la mort de l'échantillon, le carbone 14 n'est plus renouvelé car les échanges avec l'atmosphère cessent. La teneur en carbone 14 décroît de manière exponentielle, elle est divisée par 2 tous les 5 570 ans. La mesure de l'activité du carbone 14 dans l'échantillon mort permet alors de le dater.

nombre de désintégrations par minute et par gramme de carbone



## 4.2. DOMAINE D'UTILISATION DE QUELQUES RADIOELEMENTS.

L'âge estimé de l'échantillon à dater doit être en rapport avec le temps de demi-vie du noyau radioactif; en effet, au delà de  $10t_{1/2}$ , on peut considérer que les noyaux radioactifs sont tous désintégrés.

Pour la datation de vieilles roches, plusieurs méthodes reposent sur des isotopes radioactifs (ou radioéléments) dont la demi-vie s'exprime en milliards d'années. On détermine la proportion du couple noyau père / noyau fils.

Par exemple le produit de désintégration ultime de l'uranium 238 est le plomb 206. Il est donc possible de déterminer l'âge des roches anciennes par la mesure du rapport de la teneur de ces roches en plomb 206 à celle en uranium 238.

Une roche contient d'autant plus de plomb qu'elle est âgée.

D'autres couples tels le couple rubidium 87 et le strontium 87 sont utilisés. L'âge de la Terre a été estimé à 4,55 milliards d'années.

Pour la datation de matériaux anciennement en équilibre avec l'atmosphère et jusqu'à environ 50 000 ans, on utilise le carbone 14, isotope de courte demi-vie: environ 5 600 ans.

## 4.3. DATATION AU CARBONE 14.

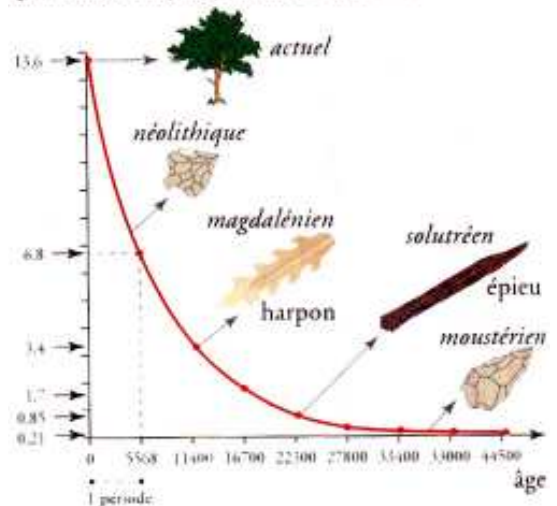
La méthode repose sur deux hypothèses:

- la teneur en carbone 14 des matières organiques carbonées actuelles est très proche de celle des matières carbonées qui constituaient les organismes vivants autrefois.
- la répartition du carbone 14 est homogène dans l'atmosphère.

Dans ces conditions tout organisme vivant a la même composition isotopique en carbone 14 que l'atmosphère. La composition initiale est donc connue.

A la mort de l'échantillon, le carbone 14 n'est plus renouvelé car les échanges avec l'atmosphère cessent. La teneur en carbone 14 décroît de manière exponentielle, elle est divisée par 2 tous les 5 570 ans. La mesure de l'activité du carbone 14 dans l'échantillon mort permet alors de le dater.

nombre de désintégrations par minute et par gramme de carbone



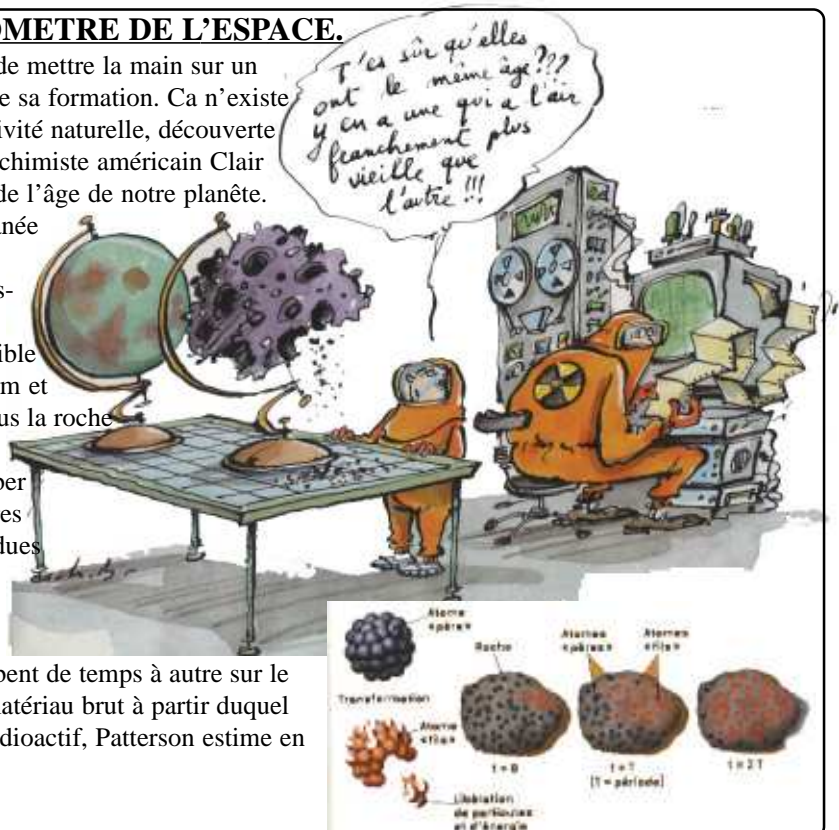
## QUEL AGE A LA TERRE ? UN CHRONOMETRE DE L'ESPACE.

La meilleure méthode pour dater la Terre c'est encore de mettre la main sur un chronomètre qui se serait enclenché juste au moment de sa formation. Ca n'existe pas ? Eh bien si ! Ce chrono magique, c'est la radioactivité naturelle, découverte par Henri Becquerel en 1896. Elle va permettre au géochimiste américain Clair Patterson de déterminer la première estimation exacte de l'âge de notre planète.

En effet, la radioactivité, c'est la transformation spontanée d'un atome en un autre, avec émission au passage de particules et d'énergie. Par exemple, l'uranium se transforme spontanément en plomb. Si vous connaissez la vitesse de désintégration de l'uranium, il est ainsi possible de dater une roche en comparant les quantités d'uranium et de plomb qu'elle contient. Plus vous avez de plomb, plus la roche est ancienne.

Seulement, pour que ça marche, il faut être sûr de tomber sur un caillou aussi ancien que la Terre. Or, les premières roches terrestres ont disparu depuis belle lurette, refondues maintes et maintes fois dans les entrailles de la Terre.

Mais Patterson a l'idée d'aller chercher ces sabliers radioactifs là où ils ont été bien protégés: dans les météorites. Les fameuses étoiles filantes, qui nous tombent de temps à autre sur le coin de la figure, sont en effet considérées comme le matériau brut à partir duquel les planètes se sont formées. En relevant leur sablier radioactif, Patterson estime en 1956 l'âge de la Terre à 4,55 milliards d'années.





# On sait dater les objets très anciens

Quand il s'agit de faire avouer leur âge aux vestiges, les archéologues n'hésitent pas à emprunter leurs techniques à la physique. Les méthodes varient suivant la nature de l'objet. Une poterie antique, un silex préhistorique ou encore des restes de repas ne subiront pas le même traitement.



## Faire sortir la lumière

Parce qu'ils ont de petites imperfections dans leur structure atomique, certains minéraux tels que le silex ou les quartz contenus dans les poteries ont un comportement spécial face à la radioactivité naturelle: certains de leurs électrons se détachent de l'atome auquel ils étaient accrochés et se trouvent piégés dans ces défauts de structure. Plus le minéral est exposé longtemps, plus le nombre de ces pièges occupés est grand. Propriété intéressante: si le minéral est chauffé, les électrons se libèrent de leur prison en émettant une quantité de lumière proportionnelle à leur nombre. C'est cette propriété, la thermoluminescence, qu'utilise le physicien pour dater l'objet.

- 1) Le silex est exposé depuis des lustres à la radioactivité naturelle. Résultat: bon nombre de ses pièges sont occupés.
- 2) Notre ancêtre le met dans le feu pour le tailler plus facilement. Tous les électrons quittent leur piège. Sans le savoir, l'homme préhistorique vient de mettre le chrono de datation à zéro.
- 3) Après de bons et loyaux services, le silex est abandonné. En attendant que l'archéologue le retrouve, des dizaines de milliers d'années plus tard, ses pièges se remplissent lentement.
- 4) Pour lui faire avouer son âge, le spécialiste chauffe l'objet au-delà de 400°C et mesure la quantité de lumière qu'il émet. Il en déduit le nombre d'électrons libérés, et donc la dose de radioactivité à laquelle le silex a été soumis. Il ne lui reste qu'à la diviser par la dose de radioactivité naturelle annuelle qui existait quand la pierre a été taillée. Ce procédé permet de dater des objets vieux de 400 000 ans.



## Écouter les boussoles miniatures

Certains matériaux, lorsqu'ils sont chauffés puis refroidis, enregistrent les caractéristiques du champ magnétique terrestre. C'est le cas des argiles cuites. Elles contiennent des oxydes de fer qui se comportent comme de petites boussoles.

- 1) Tant que l'argile est crue, ces petites boussoles sont orientées dans tous les sens.
  - 2) Lorsque l'argile est chauffée, elles prennent toutes la même direction, celle du pôle nord magnétique à laquelle elles ont été cuites.
  - 3) Pour dater un site par cette méthode nommée archéomagnétisme, il faut dégoter sur ce site de l'argile qui n'a pas été déplacée depuis sa dernière chauffe, typiquement un brique de four. Avant de la briser, on note sa position.
- Puis, on détermine, grâce à un magnétyomètre, comment sont orientées ses petites boussoles intérieures. Et on en déduit la direction qu'elles indiquaient avant qu'on ne prélève la brique. Il ne reste plus qu'à regarder sur une frise chronologique à quelles époques le nord magnétique a occupé cette position. Enfin, si cette frise existe pour la région et la période données. En France, on peut dater ainsi des argiles jusqu'à un peu plus de 2 000 ans.

## Doser le carbone 14

Cette méthode s'applique à ce qui a été vivant: un squelette, une peinture rupestre faite au charbon de bois. Son principe: regarder dans quelle proportion le carbone que contient l'objet n'est pas du carbone commun  $^{12}\text{C}$  mais du carbone radioactif  $^{14}\text{C}$ .



- 1) Ce  $^{14}\text{C}$  est naturellement présent, en faible proportion, dans le dioxyde de carbone de l'atmosphère, que les végétaux absorbent pour en fixer les atomes de carbone et se fabriquer des feuilles, des racines, des tiges... Les plantes contiennent donc le même faible pourcentage de  $^{14}\text{C}$  que le dioxyde de carbone. Les animaux qui mangent ces plantes aussi.
- 2) Quand l'animal meurt, les apports en carbone cessent. Le  $^{14}\text{C}$ , qui est instable, se désintègre peu à peu.

- 3) Pour dater un vieil os, le physicien mesure la quantité de  $^{14}\text{C}$  qu'il contient encore. Il détermine celle qu'il contenait avant de subir les affres du temps et de la désintégration radioactive, à partir d'un échantillon d'os récent. La différence des deux lui donne la quantité de  $^{14}\text{C}$  qui s'est désintégrée. Comme la vitesse de désintégration du  $^{14}\text{C}$  est connue, il en déduit le temps qui s'est écoulé depuis la mort de l'animal.



Ou faux ?

« On allume un feu en cognant deux silex »

Un livre réponses pp. 96-97

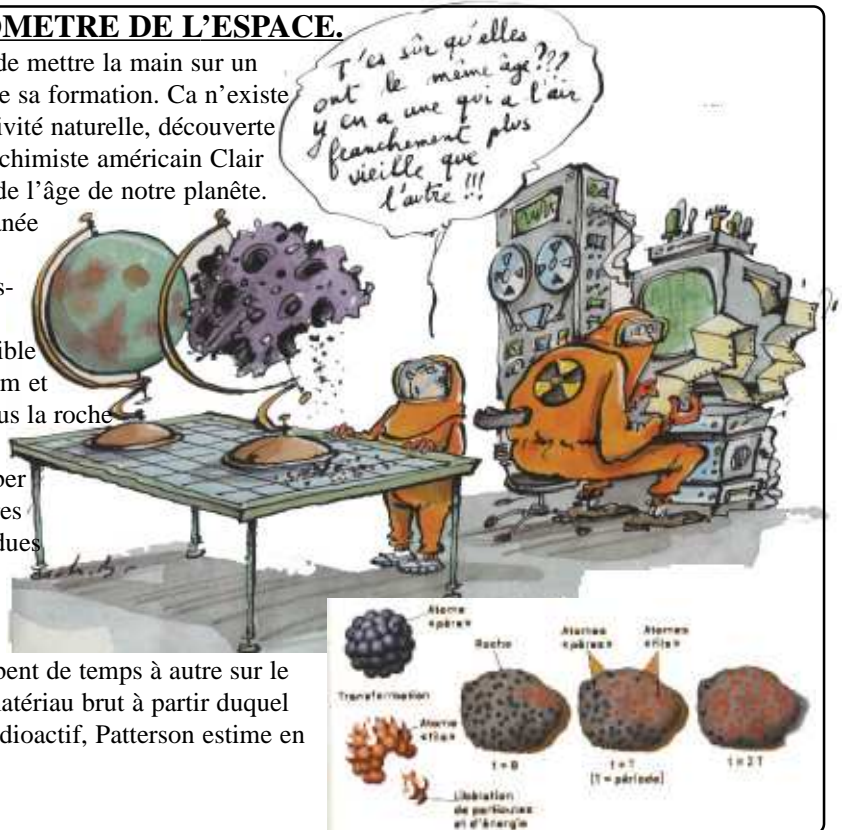
## QUEL AGE A LA TERRE ? UN CHRONOMETRE DE L'ESPACE.

La meilleure méthode pour dater la Terre c'est encore de mettre la main sur un chronomètre qui se serait enclenché juste au moment de sa formation. Ca n'existe pas ? Eh bien si ! Ce chrono magique, c'est la radioactivité naturelle, découverte par Henri Becquerel en 1896. Elle va permettre au géochimiste américain Clair Patterson de déterminer la première estimation exacte de l'âge de notre planète.

En effet, la radioactivité, c'est la transformation spontanée d'un atome en un autre, avec émission au passage de particules et d'énergie. Par exemple, l'uranium se transforme spontanément en plomb. Si vous connaissez la vitesse de désintégration de l'uranium, il est ainsi possible de dater une roche en comparant les quantités d'uranium et de plomb qu'elle contient. Plus vous avez de plomb, plus la roche est ancienne.

Seulement, pour que ça marche, il faut être sûr de tomber sur un caillou aussi ancien que la Terre. Or, les premières roches terrestres ont disparu depuis belle lurette, refondues maintes et maintes fois dans les entrailles de la Terre.

Mais Patterson a l'idée d'aller chercher ces sabliers radioactifs là où ils ont été bien protégés: dans les météorites. Les fameuses étoiles filantes, qui nous tombent de temps à autre sur le coin de la figure, sont en effet considérées comme le matériau brut à partir duquel les planètes se sont formées. En relevant leur sablier radioactif, Patterson estime en 1956 l'âge de la Terre à 4,55 milliards d'années.



## COMMENT SAIT-ON QUE MICRORAPTOR VIVAIT IL Y A 120 MILLIONS D'ANNEES ?

Les paléontologues ont découvert cet étrange dinosaure - il a des plumes et quatre ailes - il y a à peine cinq ans. Comment ont-ils été capables de donner son âge ? Les roches de la province chinoise de Liaoning, sont des cendres volcaniques expulsées lors d'éruptions survenues un peu plus au nord, en Mongolie, il y a 125 millions d'années. Notre Microraptor a donc dû être enterré à ce moment-là, sous des tonnes de cendres.

Comment connaît-on la date des éruptions ? Il suffit de dénicher dans les roches volcaniques, un échantillon contenant des atomes radioactifs - par exemple, de l'uranium. Ces atomes sont instables, et au bout d'un certain temps, ils se désintègrent pour donner des atomes plus petits (du plomb dans le cas de l'uranium). Il suffit de compter le nombre de petits atomes stables qui ont eu le temps d'apparaître dans l'échantillon depuis sa formation pour en déduire son âge.



Microraptor est tué par le volcan. Enterré sous les cendres, il se fossilise (à droite). On peut connaître la date à laquelle cet animal est mort à partir des laves vomies par le volcan (ci-dessus). Elles contiennent des atomes d'uranium radioactif qui se désintègrent progressivement pour donner au final des atomes de plomb. Il suffit de compter ces derniers dans la roche volcanique pour connaître l'âge de sa formation et donc l'âge du cataclysme qui a tué le fossile.

