

# Datations radiométriques

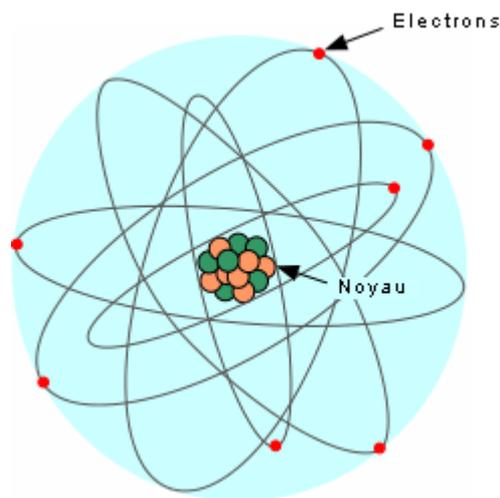
On a vu à la section précédente (4.1.1) que les méthodes de datation relatives, principalement par les fossiles, n'ont pas permis d'obtenir une idée du temps géologique réel. Non seulement ne connaissions-nous pas l'âge des diverses couches géologiques, mais on ne connaissait même pas l'âge de la Terre.

Il fallut attendre la découverte de la radioactivité par Marie et Pierre Curie, au début du 20<sup>e</sup> siècle, pour avoir enfin cet outil qui permit de se faire une idée réaliste du temps géologique, c'est-à-dire obtenir des âges géologiques absolus, et de déterminer l'âge vénérable de notre planète.

Cet outil, la datation radiométrique, utilise certains éléments chimiques qui ont la propriété de se désintégrer radioactivement. En calculant le temps qu'a mis une certaine portion d'un élément contenu dans un minéral à se désintégrer, on obtient l'âge de formation de ce minéral.

## Qu'est-ce que la radioactivité?

Comme on l'a vu à la section 2, l'atome est composé d'un noyau (protons + neutrons) autour duquel gravitent les électrons. Toute la masse de l'atome est concentrée dans le noyau, les électrons ayant une masse négligeable.



Par définition:

**masse atomique** = noyau = nombre de protons (+) + nombre de neutrons (-)

**numéro atomique** = nombre de protons (+)

La radioactivité est due à l'instabilité du noyau qui se désintègre par émission d'énergie, principalement sous deux formes:

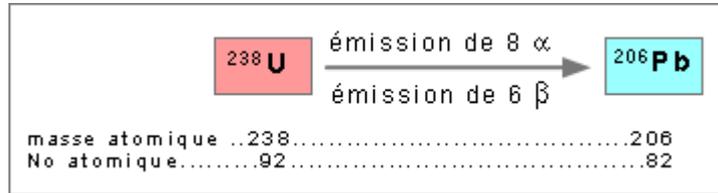
particule  $\alpha$  = 2 protons (+) + 2 neutrons ( $\pm$ ) :

d'où une perte de 4 dans la masse atomique et une perte de 2 dans le numéro atomique;

particule  $\beta$  = 1 électron (-) :

cet électron vient du noyau; il faut donc aller le chercher chez un neutron ( $\pm$ ) qui alors devient un proton (+). Il y a donc gain d'un proton, d'où un gain de 1 au numéro atomique, mais aucun changement de masse atomique, car l'électron a une masse négligeable.

### Un exemple : la désintégration de l'uranium 238 ( $^{238}\text{U}$ ) en plomb 206 ( $^{206}\text{Pb}$ )



L'émission de 8  $\alpha$  entraîne la perte de  $8 \times (2 \text{ protons} + 2 \text{ neutrons})$ , ce qui signifie une perte de 32 à la masse atomique, ainsi que la perte de  $8 \times 2$  protons qui signifie une perte de 16 au numéro atomique.

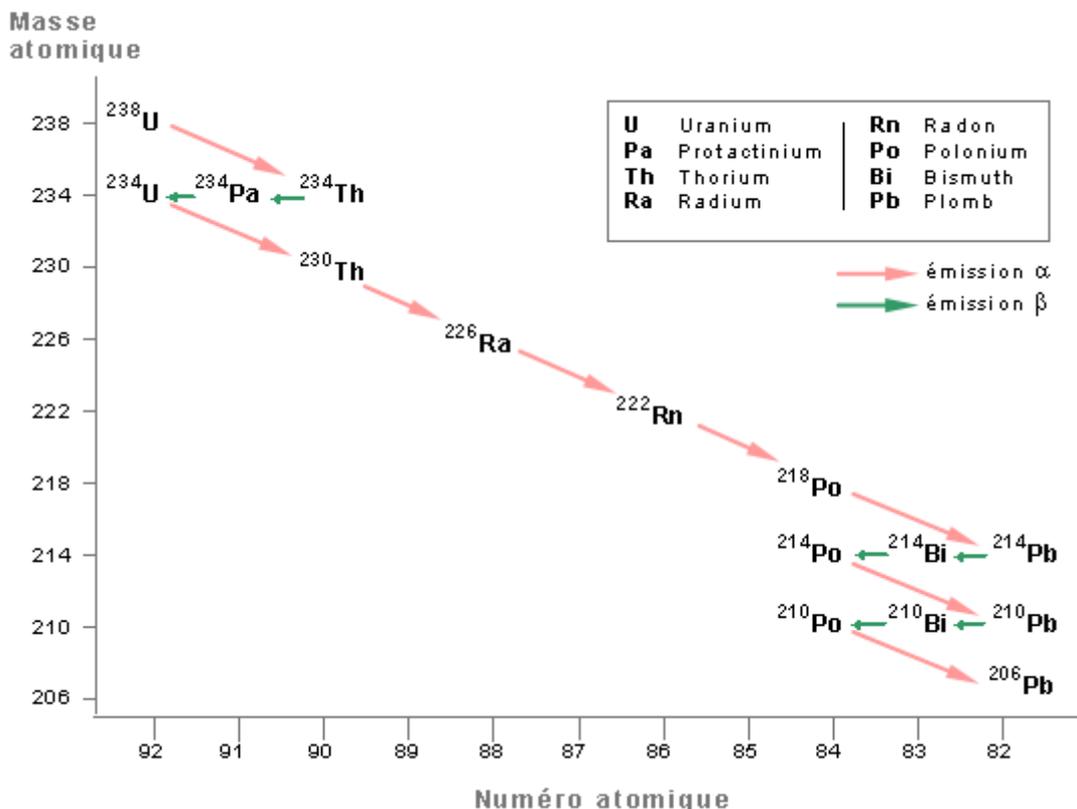
L'émission de 6  $\beta$  entraîne la perte de 6 électrons, donc pas de changement à la masse atomique, mais un gain de 6 au numéro atomique.

Le bilan des gains et pertes s'établit donc ainsi:

masse atomique:  $238 - 32 = 206$

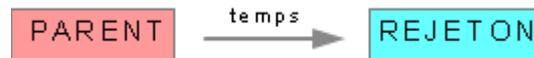
numéro atomique:  $92 - 16 + 6 = 82$  (numéro atomique du Pb)

La désintégration se fait par étapes successives, selon la suite:



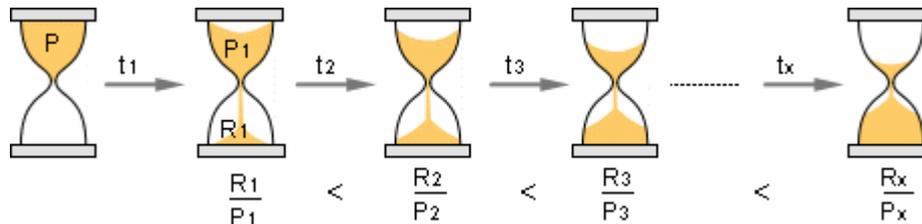
### La Datation radiométrique

La réaction de désintégration peut se résumer ainsi: un élément parent (l'uranium dans l'exemple ci-dessus) se transforme progressivement en un élément rejeton (ici le plomb). Cette désintégration met un certain temps à se faire; c'est ce paramètre temps qui nous intéresse.



Ici, le temps est le temps total pour que tout l'élément parent soit transformé en élément rejeton.

On peut illustrer ainsi la progression de la désintégration :

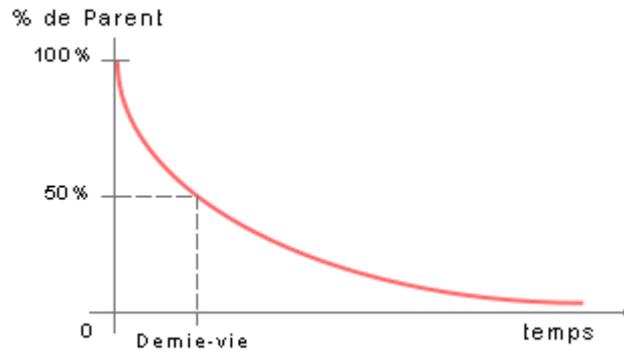


Après un temps 1 ( $t_1$ ), une partie de la quantité originelle d'élément parent (P) aura été transformée en une quantité  $R_1$  d'élément rejeton; il ne restera qu'une quantité  $P_1$  de l'élément parent, ce qui peut s'exprimer par le rapport  $R_1$  sur  $P_1$ . Après un temps 2 ( $t_2$ ), on obtiendra un rapport  $R_2$  sur  $P_2$ , plus grand que le précédent, ... et ainsi de suite.

La valeur du rapport R sur P est donc fonction du temps de désintégration. Le taux de désintégration est différent d'un type de désintégration à l'autre, mais toujours le même pour une désintégration donnée. Comme on connaît bien les constantes de désintégration pour les diverses réactions qu'on utilise couramment, on est capable de calculer le temps de désintégration pour une valeur donnée du rapport R sur P, à l'aide de ces constantes. Ce qu'on calcule, c'est le temps qu'a mis la désintégration à se rendre à cette proportion entre rejeton et parent. Voilà un point très important en ce qui concerne les datations radiométriques: ce qu'on détermine, c'est **depuis combien de temps la désintégration se fait** ou, si on préfère, **depuis combien de temps a commencé la désintégration**.

**En pratique**, il s'agit d'utiliser des minéraux qui contiennent des éléments radioactifs, comme par exemple le zircon, un silicate de zirconium ( $ZrSiO_4$ ). Dans ce minéral, une certaine quantité du zirconium peut être remplacée par l'uranium, ce qui rend le minéral utile pour les datations. Au moment où le minéral cristallise, il incorpore une certaine quantité d'uranium, mais pas de plomb. L'uranium va commencer, à ce moment, à se désintégrer radioactivement. En déterminant le rapport plomb sur uranium (rejeton/parent) par analyse en spectrométrie de masse dans un zircon donné, lequel zircon se trouve par exemple dans un granite, on peut calculer depuis combien de temps se fait la désintégration ou, en d'autres termes, depuis combien de temps a cristallisé le zircon. Comme il a cristallisé en même temps que le granite qui le contient, c'est en ce sens qu'on obtient l'âge du granite, c'est-à-dire le moment de sa formation. C'est pourquoi, on parle d'âge radiométrique, c'est-à-dire un âge obtenu par la mesure des produits de la radioactivité.

La réaction de désintégration d'un élément donné n'est pas constante: elle est très rapide au début, et sa vitesse décroît par la suite, selon cette courbe générale :



Pour plus de commodité, on utilise un paramètre qui permet d'avoir des ordres de grandeur: la demie-vie d'un élément radioactif. La demie-vie est le temps nécessaire pour que la moitié de l'élément parent soit désintégrée. Attention, ce n'est pas la moitié de la vie de la désintégration, mais bien le temps nécessaire pour que la moitié de l'élément parent soit désintégrée.

Voici quelques exemples de désintégrations couramment utilisées :

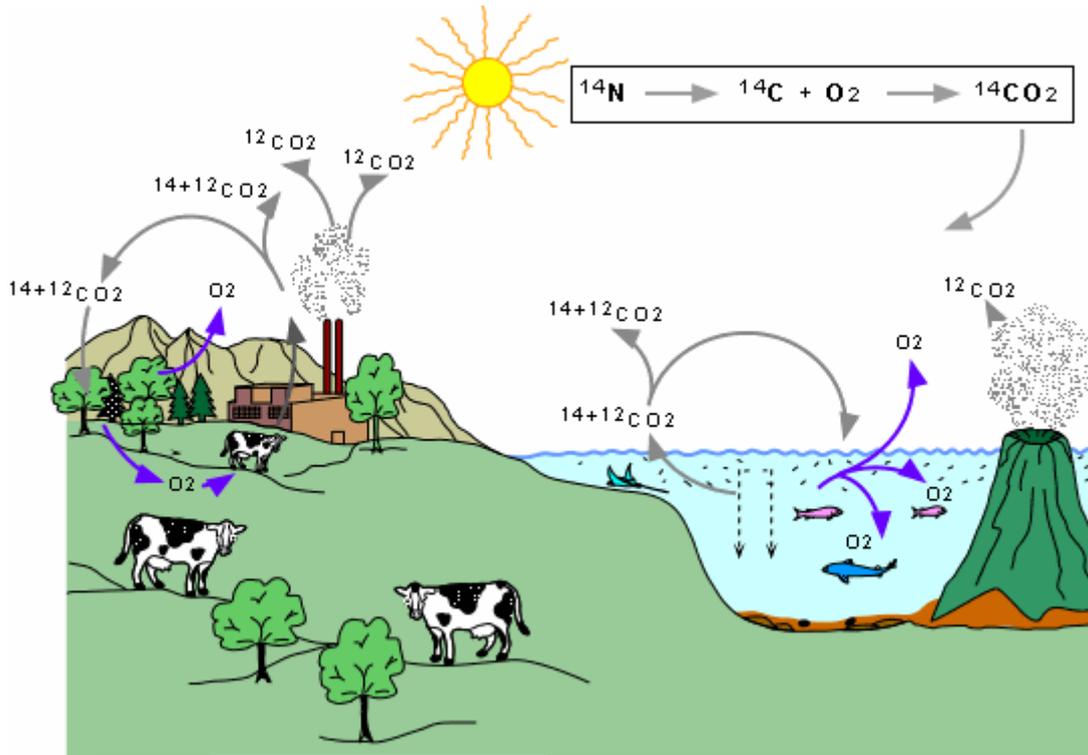
PARENT	REJETON	DEMIE-VIE
238 Uranium	206 Plomb	4,5 milliards d'années
87 Rubidium	87 Strontium	47 milliards d'années
40 Potassium	40 Argon	1,3 milliards d'années
14 Carbone	14 Azote	5730 années

### Et le fameux Carbone-14?

A chaque fois qu'il est question de datation de roches ou d'autres matériaux anciens, on invoque inévitablement l'incontournable Carbone-14 ( $^{14}\text{C}$ ). Le  $^{14}\text{C}$  est en effet une méthode très utile pour la datation de certains matériaux géologiques, et particulièrement de matériaux archéologiques.

La méthode utilise la réaction de désintégration du carbone-14 en azote-14. Il faut savoir que le carbone commun dans la nature a une masse atomique de 12 ( $^{12}\text{C}$ ). Il se combine à l'oxygène atmosphérique ( $\text{O}_2$ ) pour former du  $\text{CO}_2$  dans lequel le carbone a une masse atomique de 12, soit le  $^{12}\text{CO}_2$ . Mais en plus du  $^{12}\text{C}$ , il y a aussi, en bien plus faible quantité, du carbone de masse 13 ( $^{13}\text{C}$ ) et du carbone de masse 14 ( $^{14}\text{C}$ ); ces trois formes, de masse atomique différente pour un même élément, sont ce qu'on appelle des isotopes. Le  $^{12}\text{C}$  et le  $^{13}\text{C}$  sont des isotopes stables, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas radioactifs, tandis que le  $^{14}\text{C}$  est un isotope radioactif; c'est lui qu'on utilise pour les datations.

Pour bien comprendre la méthode, il nous faut voir d'où vient le  $^{14}\text{C}$  et comment ce  $^{14}\text{C}$  est fixé, avec du  $^{12}\text{C}$ , par les organismes vivants, végétaux et animaux.



Le bombardement des gaz de la haute atmosphère par les rayons cosmiques fait que l'azote, de masse atomique 14 ( $^{14}\text{N}$ ) se transforme en  $^{14}\text{C}$  qui se combine à l'oxygène libre ( $\text{O}_2$ ) pour former du  $\text{CO}_2$ , mais un  $\text{CO}_2$  particulier où le carbone est de masse atomique 14, soit le  $^{14}\text{CO}_2$ . Ce  $^{14}\text{CO}_2$  se mélange au  $\text{CO}_2$  qui vient des autres sources, comme des volcans et de l'oxydation des matières organiques ou, aujourd'hui, de la combustion des hydrocarbures. Le  $\text{CO}_2$  qui provient du cycle photosynthèse-oxydation des matières organiques est aussi particulier. En effet, la photosynthèse consomme du  $\text{CO}_2$  atmosphérique, c'est-à-dire un  $\text{CO}_2$  qui contient en partie du  $^{12}\text{C}$  et en partie du  $^{14}\text{C}$ . C'est donc dire que la matière organique des végétaux et des animaux (qui consomment les végétaux) contiendra une certaine quantité de  $^{14}\text{C}$ . C'est ce  $^{14}\text{C}$  qui est utilisé pour les datations

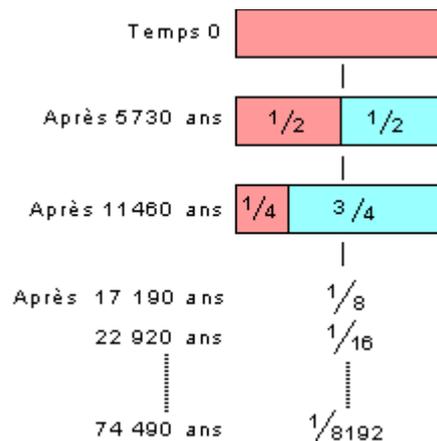
Au départ donc, toute matière organique vivante (végétaux ou animaux) contient du  $^{12}\text{C}$  et du  $^{14}\text{C}$  (ainsi qu'une faible quantité de  $^{13}\text{C}$ ). La proportion entre  $^{14}\text{C}$  et  $^{12}\text{C}$  dans les tissus organiques et le squelette métabolisés par l'organisme demeure la même tout au long de la vie de l'organisme, un rapport correspondant à celui qui se trouve dans le  $\text{CO}_2$  atmosphérique. En pratique, on peut donc dire que l'horloge démarre avec la mort de l'organisme; la proportion commence alors à changer à cause de la désintégration du  $^{14}\text{C}$  et du fait que le  $^{12}\text{C}$  demeure stable. Le produit de la désintégration du  $^{14}\text{C}$ , l'azote 14, est un gaz qui s'échappe dans la nature. En pratique, puisque le  $^{12}\text{C}$  est stable, on mesure le rapport entre,  $^{14}\text{C}$  et  $^{12}\text{C}$ . Connaissant le rapport qui existe dans la nature entre  $^{14}\text{C}$  et  $^{12}\text{C}$ , ainsi que la constante de désintégration, on peut comme dans les autres méthodes, calculer le temps qui s'est écoulé depuis la mort de l'organisme qui a fixé le carbone dans ses tissus ou son squelette. Par conséquent, l'âge que l'on obtient avec la méthode du  $^{14}\text{C}$ , c'est l'âge de la mort de l'organisme (du bois, des coquillages, de la tourbe, des tissus de lin, coton, laine, etc...).

Mais la proportion  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  est-elle vraiment demeurée constante à travers les temps géologiques?

Dans la méthode de datation par  $^{14}\text{C}$ , on prend pour acquis que la proportion  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  n'a pas changé avec le temps géologique, ... ce qui n'est pas vrai. En effet, on sait aujourd'hui que cette proportion a varié avec le temps. On le sait par exemple en comparant l'âge obtenu à partir du  $^{14}\text{C}$  et l'âge obtenu en comptant les anneaux des arbres (dendrochronologie) ou encore les varves (dépôts saisonniers) dans les lacs. On sait que la production de  $^{14}\text{C}$  a été en général plus élevée dans le passé, ce qui implique que les âges non corrigés sont en fait plus jeunes que ce qu'ils devraient être en réalité. C'est pourquoi, il faut apporter des corrections. Ainsi, pour la période entre -20 et -40 Ka, on apporte une correction de l'ordre de 10% (on vieillit les âges de 2 à 3 Ka); ce pourcentage diminue pour des âges plus récents. Même avec un facteur aussi grand que 10% (ce qui n'est pas le cas), le suaire de Turin ne pourrait être vieilli de ...700 ans! (voir plus bas).

La croyance populaire est à l'effet qu'on puisse dater n'importe quoi avec le  $^{14}\text{C}$ . Il faut bien voir, et c'est très important, que cette méthode ne s'applique qu'aux **matériaux qui ont déjà été vivants**, comme du bois, des coquilles, du lin, etc. Inutile de penser dater des outils de métal ou des pointes de flèches en silex ( $\text{SiO}_2$ ) avec cette méthode.

Il y a une autre limitation très importante à la méthode : le temps impliqué. Avec les méthodes de l'uranium-plomb, du rubidium-strontium ou même du potassium-argon (voir plus-haut), la demie-vie s'exprime en milliards d'années. Avec le  $^{14}\text{C}$ , on parle d'une demie-vie de 5730 ans. Le schéma qui suit montre l'implication d'une demie-vie aussi courte.



Au temps 0, on a 100% de  $^{14}\text{C}$  (barre rose). Après 5730 ans (la demie-vie de la désintégration), la moitié du  $^{14}\text{C}$  est désintégrée. Après un autre 5730 ans (11,460 ans au total), la moitié de la moitié est désintégrée; il reste le quart du  $^{14}\text{C}$  originel. Après un autre 5730 ans, il en reste 1/8, ... et ainsi de suite. Après 74,490 ans, il reste 1/8192 (= 0,000122) du  $^{14}\text{C}$  originelle. C'est peu, d'autant plus qu'au départ, la quantité de  $^{14}\text{C}$  par rapport au  $^{12}\text{C}$  était déjà faible. Analyser une si faible quantité devient très difficile. En pratique donc, le  $^{14}\text{C}$  est utile pour dater des objets qui ne sont pas plus vieux que 75 000 ans. On parle ici non plus en milliards, ni même en millions d'années, mais bien en quelques dizaines de milliers d'années seulement.

Le  $^{14}\text{C}$  une méthode très utile en archéologie et en histoire. Elle a été utile pour clore certains débats: le suaire de Turin qui aurait servi à ensevelir le corps du Christ a été daté en 1988, par trois équipes

indépendantes, dans une fourchette d'âge entre 1260 et 1390 ans, donc un suaire fabriqué au Moyen-Age. Le bois du soi-disant trône de St-Pierre a aussi été daté du Moyen-Age.

La méthode est aussi utilisée en géologie des dépôts superficiels qui souvent sont plus jeunes que la limite de 75 000 ans. Les dépôts de la Mer Champlain par exemple qui n'ont que quelques 9 000 à 12 000 ans d'âge sont datés au  $^{14}\text{C}$ , en utilisant les coquilles et le bois fossile de ces dépôts.