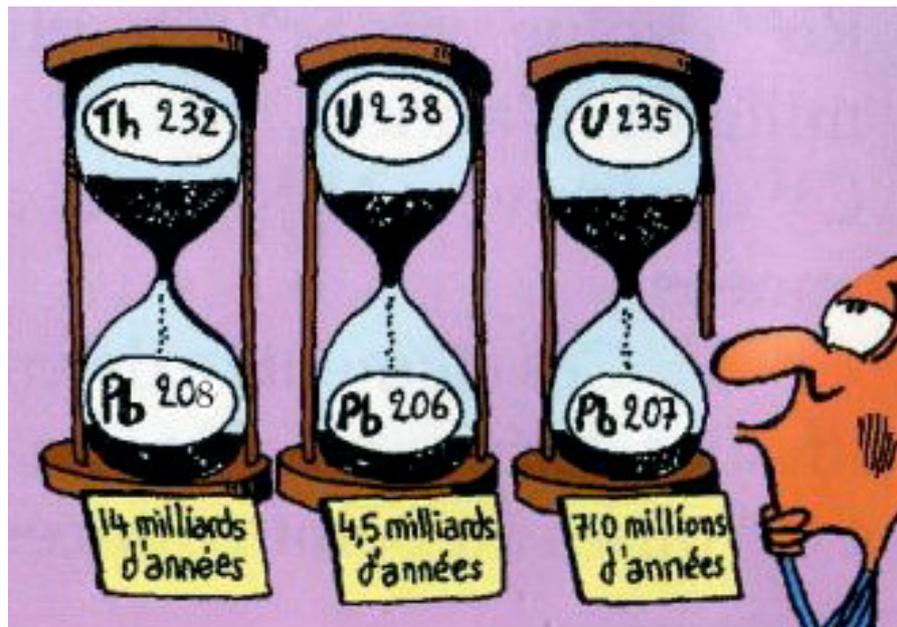


La mesure du temps en géologie

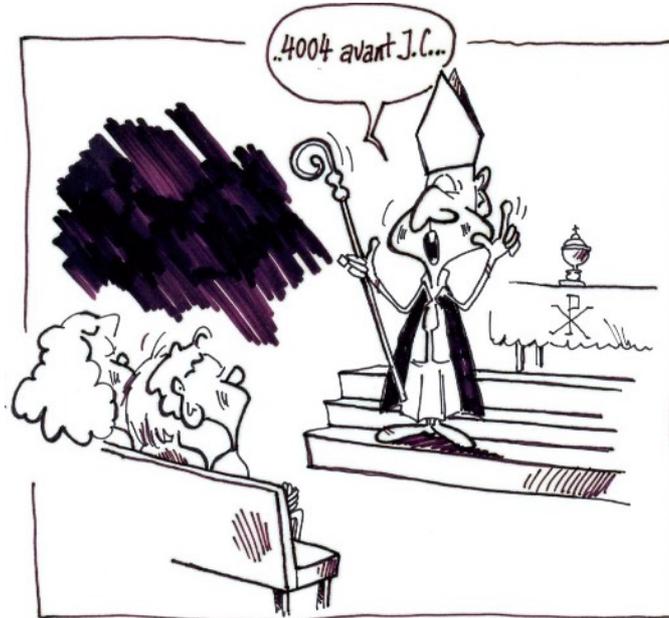


Jacques Deferne



Premières idées sur l'âge de la Terre

Ce sont les théologiens qui, les premiers, ont exprimé leurs convictions sur l'âge de la Terre. Sur la base du livre de la Genèse, qui décrit la création du monde en six jours et sur un texte des psaumes qui affirme "que mille ans sont comme un jour...", les autorités ecclésiastiques ont longtemps estimé qu'il s'était écoulé environ 6'000 ans entre la création de la Terre et la naissance du Christ. L'archevêque anglais Ussher affirma même, au XVI^e siècle, que la Terre avait été créée en octobre 4004 avant J. C. !



Toutefois, les premiers naturalistes qui ont observé les formations sédimentaires, ont bien pris conscience de la lenteur des processus géologiques. Charles Darwin pensait que 100 millions d'années au moins étaient nécessaires pour expliquer l'évolution des espèces. Lord Kelvin, un des plus brillants physiciens du 19^e siècle, partant de l'hypothèse que la Terre était en fusion au moment de sa formation, calcula qu'il fallait entre 20 et 40 millions d'années pour qu'elle atteigne son stade de refroidissement actuel. Bien d'autres méthodes encore ont été préconisées pour estimer la durée des temps géologiques, mais ce n'est qu'avec la découverte de la radioactivité en 1896 par Henri Becquerel, et son étude par Marie Sklodowska et son mari Pierre Curie, qu'une méthode nouvelle, parfaitement fiable, pouvait enfin voir le jour : la datation basée sur la décroissance radioactive de divers éléments chimiques instables.

Age relatif

Depuis longtemps déjà on connaît le mécanisme de formation des roches sédimentaires. Les couches se déposent successivement les unes par dessus les autres, les plus jeunes recouvrant les plus anciennes. La présence de fossiles identiques dans des roches éloignées les unes des autres facilite l'établissement de corrélations entre elles. L'étude des fossiles et de leur évolution permet de fixer l'âge de la roche qui les renferme, relativement à celui d'une autre roche.

Ces études ont conduit les géologues à subdiviser l'ensemble des dépôts sédimentaires en quatre grandes ères dont les limites correspondent à la disparition rapide de nom-

breuses espèces vivante et leur remplacement par des espèces nouvelles. Ce sont les ères primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire.

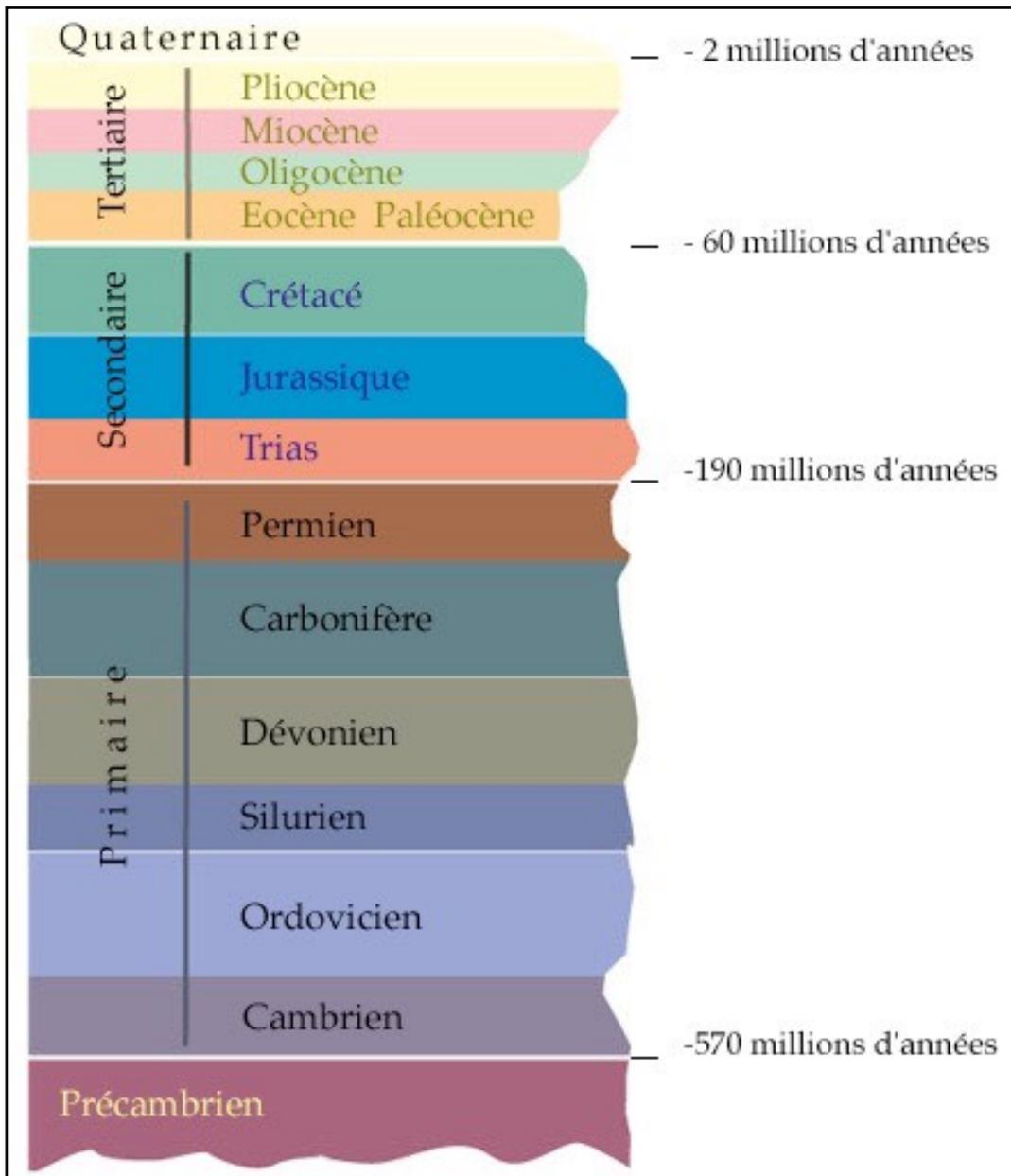
Chacune de ces grandes divisions sont à leur tour subdivisées en **périodes géologique** : Carbonifère, Trias, Jurassique, Crétacé, par exemple. Ces grandes divisions, ères et périodes géologiques sont reconnaissables sur l'ensemble de la Planète.

Régionalement encore, les périodes géologiques se subdivisent en **époques** puis en **étages** géologiques.

L'étude des relations de toutes ces subdivisions entre elles a permis l'établissement de l'échelle géologique universellement adoptée par les scientifiques.

Grandes subdivisions des temps géologiques

(Ères et périodes géologiques)



Ce tableau ne comporte ici que les grandes divisions des terrains sédimentaires. Les âges absolus qui sont indiqués n'ont pu être connus qu'après la découverte des méthodes de datation absolue basées sur la décroissance radioactive.

Les fossiles, des indicateurs d'époque

Depuis la plus haute Antiquité, les fossiles ont intrigué les curieux. Mais ce n'est que tardivement, au XVIIIe siècle, qu'on a commencé à entrevoir comment les dépôts des débris de l'érosion dans des bassins marins, leur enfouissement sous d'autres dépôts, puis leur consolidation et leur plissement ultérieur faisaient surgir de nouvelles roches des océans. On a compris alors que les squelettes des organismes marins, ensevelis dans ces dépôts, se retrouvaient plus tard dans les roches sous forme de fossiles.

On sait aujourd'hui que l'évolution des roches nécessite des dizaines de millions d'années alors que l'homme ne compte qu'en décennies ou en siècles !

Les fossiles sont représentatifs des époques auxquelles ces organismes vivaient. Ainsi les trilobites vivaient à l'ère primaire et les ammonites à l'ère secondaire.



Trilobite, Cambrien, ère primaire

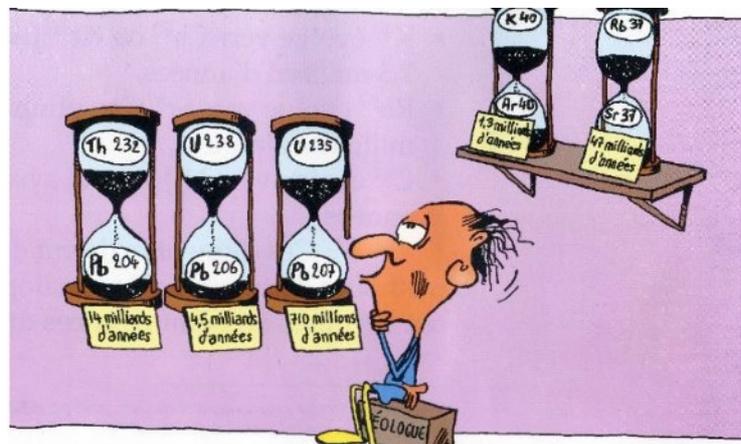


Litoceras, Toarcien, ère secondaire

Age absolu

Avant la découverte de la radioactivité, on savait que les roches formées à l'époque carbonifère étaient beaucoup plus anciennes que celles formées au cours du Jurassique, mais on ne savait pas de combien d'années.

Ce n'est qu'avec la découverte de la radioactivité qu'il a été possible d'établir l'âge absolu des roches. Le principe est basé sur le fait qu'un certain nombre d'éléments chimiques (en réalité certains de leurs isotopes) sont victimes d'une évolution génétique due à la structure instable de leur noyau. La vitesse de cette évolution, immuable dans le temps, est bien connue.



La vitesse de la décroissance de certains éléments naturellement radioactifs permet de mesurer l'âge des roches.

La vitesse de cette évolution, immuable dans le temps, est bien connue.

La décroissance radioactive, une maladie génétique des atomes

Ainsi, certaines familles d'atomes sont atteintes d'une maladie génétique qui affecte leur noyau (neutrons et protons) et que les physiciens appellent **décroissance radioactive**. Elle atteint particulièrement les familles Uranium, Thorium, ainsi que quelques autres familles de moindre importance. On les signalera plus loin en raison de l'intérêt que suscite leur cas chez les géologues. Cette maladie évolue plus ou moins rapidement suivant les familles. Elle a été foudroyante pour les regrettées familles †Technétium et †Prométhéum qui ont été entièrement décimées et ont disparu de la nature aujourd'hui. L'évolution est au contraire très lente chez les membres des familles Uranium et Thorium.



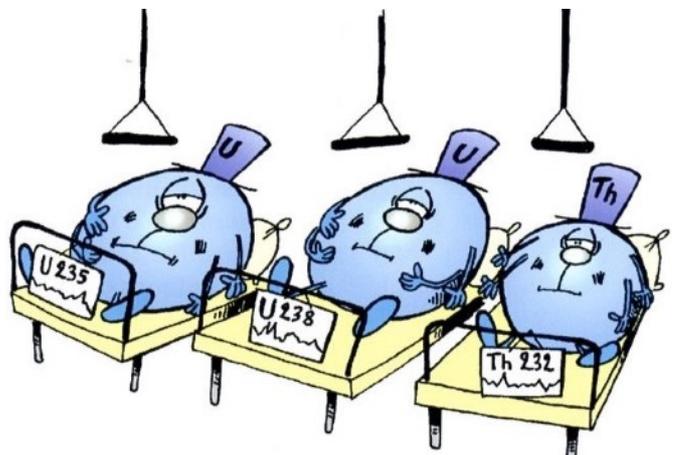
La maladie a été foudroyante pour MM Technecium et Prometheum et les a fait disparaître de notre environnement naturel. Mais les physiciens savent aujourd'hui en produire !

Où rencontre-t-on ces éléments ?

Les familles d'atomes qui se prêtent le mieux aux mesures d'âge absolu se trouvent surtout dans les roches granitiques qui renferment toujours de petites quantités d'uranium, de thorium. L'âge des roches sédimentaires est déterminé par comparaison avec l'âge des intrusions magmatiques. Elles sont plus âgées que les roches magmatiques qui les ont traversées, plus jeunes que les granites qu'elles ont recouverts.

Le triste cas de la famille Uranium

Le cas de la famille Uranium est typique : les membres de cette famille possèdent tous 92 protons. La plupart d'entre eux (99,3 %) possèdent 146 neutrons : c'est l'Uranium 238 (^{238}U). Les autres (0,7 %) n'en possèdent que 143 : c'est l'Uranium 235 (^{235}U). Les deux isotopes sont atteints par une maladie génétique que les physiciens nomment *décroissance radioactive*. Le Thorium, un cousin éloigné de l'Uranium est aussi affecté par cette maladie. Curieusement, la vitesse de l'évolution de la maladie est différente pour chacun d'eux. L'évolution de l'épidémie est en elle-même très curieuse : à chaque instant les membres de la communauté savent que la



Les familles Uranium et Thorium sont particulièrement exposées à cette maladie

moitié d'entre eux vont être atteints au cours d'une période qui est de 4.5 milliards d'années pour les frères ^{238}U , de 710 millions d'années pour les frères ^{235}U .

Vitesse de l'évolution de la maladie

En effet, il n'est pas possible de prévoir l'évolution de la maladie pour un atome particulier, car elle obéit à des lois aléatoires basées sur les probabilités. Par contre, on sait avec précision quelle va être l'évolution de la maladie à l'intérieur d'une communauté d'atomes. Dans le *Monde étrange des Atomes*¹ on appelle période de rémission le temps nécessaire à la disparition de la moitié des individus d'une communauté (les physiciens parlent de demi-vie). On peut ainsi prévoir que la maladie est responsable de la disparition :

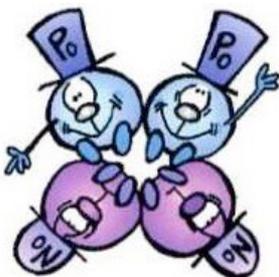
- de la moitié de la communauté de ^{238}U chaque 4,5 milliards d'années,
- de la moitié de la communauté de ^{235}U chaque 710 millions d'années

Il est intéressant de noter que si, aujourd'hui, la proportion d'uranium 235 dans l'uranium naturel n'est que de 0.7 %, cette proportion était environ deux fois plus élevée, soit environ 1.4 %, il y a 710 millions d'années ! Cette proportion atteignait même 28 % au moment de la formation de la Terre, il y a 4.6 milliards d'années.

Prenons le cas de ^{238}U

Tout commence par une subite convulsion interne suivie par des vomissements de divers produits issus du noyau atomique. Dans ces produits, qui sont les constituants de la radioactivité, on peut trouver :

- les particules "alpha" [α] constituées chacune de deux protons et de deux neutrons,
- les particule "bêta" [β] qui sont des électrons (formés dans le noyau par la transformation d'un neutron en proton),
- les rayons "gamma" [γ] qui sont des rayons X très puissants.



particule α



particule β



rayons γ

1 Une fiction amusante sur la chimie écrite par les mêmes auteurs.

Ces émissions¹ s'accompagnent de la transmutation du pauvre ^{238}U en un individu marginal d'une autre famille (un isotope rare et instable de la famille Thorium, ^{234}Th , puis, de rechute en rechute, après avoir transité par diverses autres familles avec de brèves périodes de rémission, il finit par se transmuter définitivement en un isotope stable de la famille Plomb, ^{206}Pb).

Mécanisme de la maladie

L'expulsion d'une particule α (2 protons et 2 neutrons) fait perdre 4 unités de poids² à l'atome malade et le rétrograde de deux numéros atomiques dans le tableau périodique.

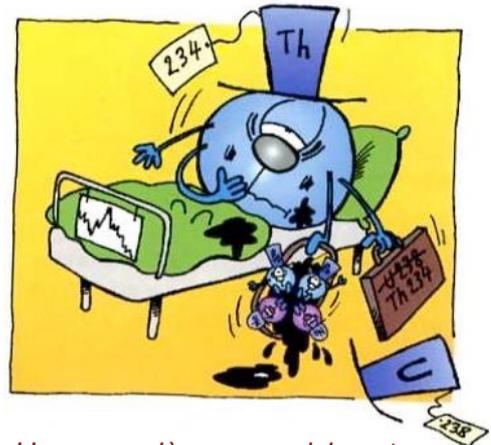
La perte d'une particule β (un électron produit par la transformation d'un neutron en un proton) ne cause aucune perte sensible de poids mais un des neutrons se transforme en un proton : l'atome malade change de matricule et gagne une place dans le tableau périodique.

Cette perte de particules α et β s'accompagne d'une forte fièvre qui provoque le dégagement de chaleur et de rayons X très énergétiques : les rayons γ .

Le premier symptôme qui atteint le pauvre ^{238}U est justement la perte d'une particule α . Il s'amaigrit de 4 unités et ne pèse plus que 234 grons. Comme il y a 2 protons dans la particule α , il rétrograde de 2 places dans le Tableau périodique. Il se transforme ainsi en un membre de la famille Thorium (numéro 90). Toutefois il ne s'agit pas d'un membre habituel de la famille Thorium, mais d'un isotope rare et instable, l'isotope ^{234}Th .

Très vite ce pauvre Th^{234} va perdre successivement 2 particules β , ce qui va le transmuter en Protactinium 234 (^{234}Pa) pour quelques heures, puis en ^{234}U (isotope extrêmement rare de la famille Uranium). Il transitera encore par une dizaine de familles d'atomes avant que la maladie ait terminé son évolution. Vous trouverez ci-contre le détail de cette évolution sur la feuille de maladie de ^{238}U . La phase finale aboutit à un atome de la famille Plomb, ^{206}Pb . Cet isotope est immunisé contre la maladie : il est stable et n'évoluera plus au cours du temps.

En résumé : la maladie provoque chez Monsieur ^{238}U la perte successive de 8 particules α et 6 particules β , avec des périodes de rémission intermédiaires pendant lesquelles il emprunte provisoirement l'identité d'autres éléments avant d'aboutir à un état stable de plomb 206 (^{206}Pb).



Une première convulsion transforme le patient en Thorium 234.

1 L'émission de ces diverses particules et du rayonnement γ constitue la radioactivité. Les cellules vivantes sont très vulnérables à ces rayons qui peuvent leur occasionner diverses dégénérescences, en particulier le cancer.

2 le "gron" est une unité en vigueur dans le Monde étrange des Atomes. C'est approximativement le poids de l'hydrogène, l'atome le plus léger du tableau périodique. Les physiciens l'appellent "unité atomique de masse" et la définissent plus précisément comme le douzième du poids du carbone ^{12}C , ce qui équivaut à 1.66×10^{-24} g.

La maladie est incurable

Les physiciens ont essayé vainement de nombreux traitements. Toutes les études qui ont été faites arrivent à la conclusion qu'il n'est possible ni de ralentir, ni d'accélérer cette évolution. D'une manière inéluctable les deux isotopes naturels de la famille Uranium se transforment en divers isotopes de la famille Plomb selon le processus suivant :

- ^{238}U évolue vers ^{206}Pb avec une période de rémission de 4,5 milliards d'années,
- ^{235}U évolue vers ^{207}Pb avec une période de rémission de 710 millions d'années,

Une autre famille importante est atteinte par cette même maladie : la famille Thorium,

- ^{232}Th évolue vers ^{208}Pb avec une période de rémission de 14 milliards d'années.

On constate que la quantité absolue de ^{206}Pb , ^{207}Pb , et ^{208}Pb de notre planète augmente sans cesse. Par contre il existe un quatrième isotope du plomb, ^{204}Pb , qui n'est pas radiogénique et dont la quantité sur Terre n'a pas varié. Nous parlerons de lui plus loin.

Les tableaux suivants montrent l'évolution de la maladie pour chacun des patients ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th . On voit que cette évolution transite par des éléments qui ont une très faible espérance de survie mais qui existent tout de même dans la croûte terrestre. Ceux qui disparaissent sont en permanence remplacés par les termes intermédiaires de cette évolution.

Schéma de la décroissance radioactive de l'uranium 238

Feuille de maladie			Dr. Marie Sklodowska*			
Nom du patient : Uranium 238			symptômes : lourdeurs, fièvre, nausées			
Symbole : ^{238}U			diagnostic : décroissance radioactive congénitale à longue période d'incubation (4.5 milliards d'an-			
Nb. protons : 92						
Nb. neutrons : 146						
Etat	N° atomique	Symbole	Poids	Rémission	Emission	Symptôme
Uranium 238	92	^{238}U	238		α	perd un noyau d'hélium
Thorium 234	90	^{234}Th	234	24 jours	β	expulse un électron
Protactinium 234	91	^{234}Pa	234	6 h.45	β	expulse un électron
Uranium 234	92	^{234}U	234	250'000 ans	α	perd un noyau d'hélium
Thorium 230	90	^{230}Th	230	80'000 ans	α	perd un noyau d'hélium
Radium 226	88	^{226}Ra	226	1'600 ans	α	perd un noyau d'hélium
Radon 222	86	^{222}Rn	222	4 jours	α	perd un noyau d'hélium
Polonium 218	84	^{218}Po	218	3 min.	α	perd un noyau d'hélium
Plomb 214	82	^{214}Pb	214	27 min.	β	expulse un électron
Bismuth 214	83	^{214}Bi	214	20 min.	β	expulse un électron
Polonium 214	84	^{214}Po	214	1 sec.	α	perd un noyau d'hélium
Plomb 210	82	^{210}Pb	210	21 ans	β	expulse un électron
Bismuth 210	83	^{210}Bi	210	5 jours	β	expulse un électron
Polonium 210	84	^{210}Po	210	138 jours	α	perd un noyau d'hélium
Plomb 206	82	^{206}Pb	206	totalement insensible à la maladie		

* nom de jeune fille de Marie Curie

Schéma de la décroissance radioactive de l'uranium 235

Feuille de maladie

Dr. Marie Sklodowska

Nom du patient : Uranium 235

symptômes : lourdeurs, fièvre, nausées

Symbole : ^{238}U

diagnostic : décroissance radioactive congénitale à longue période d'incubation (704 millions d'années).

Nb. protons : 92

Nb. neutrons : 146

Etat	N° atomique	Symbole	Poids	Rémission	Emission	Symptôme
Uranium 235	92	^{235}U	235		α	perd un noyau d'hélium
Thorium 231	90	^{231}Th	231	25.5 heures	β	expulse un électron
Protactinium 231	91	^{231}Pa	231	33'000 ans	α	perd un noyau d'hélium
Actinium 227	89	^{227}Ac	227	21.8 ans	β	expulse un électron
Thorium 227	90	^{227}Th	227	18.7 jours	α	perd un noyau d'hélium
Radium 223	88	^{223}Ra	223	11.4 jours	α	perd un noyau d'hélium
Radon 219	86	^{219}Rn	219	4 secondes	α	perd un noyau d'hélium
Polonium 215	84	^{215}Po	215	1.8 ms.	α	perd un noyau d'hélium
Plomb 211	82	^{211}Pb	211	36.1 min.	β	expulse un électron
Bismuth 211	83	^{211}Bi	211	2.1 min.	α	perd un noyau d'hélium
Thallium 207	81	^{207}Tl	207	4.77 min.	β	expulse un électron
Plomb 207	82	^{207}Pb	207	totalement insensible à la maladie		



Après une longue maladie, les frères uranium et thorium ressortent guéris mais avec l'identité des frères plomb

Schéma de la décroissance radioactive du thorium 232

Feuille de maladie			Dr. Marie Sklodowska			
Nom du patient : Thorium 232		symptômes : lourdeurs, fièvre, nausées				
Symbole : ^{232}Th		diagnostic : décroissance radioactive congénitale à longue période d'incubation (14 milliards d'années).				
Nb. protons : 92						
Nb. neutrons : 143						
Etat	N° atomique	Symbole	Poids	Rémission	Emission	Symptôme
Thorium 232	90	^{232}Th	232		α	perd un noyau d'hélium
Radium 228	88	^{228}Ra	228	5.75 ans	β	expulse un électron
actinium 228	89	^{228}Ac	228	6 h.15	β	expulse un électron
Thorium 228	90	^{228}Th	228	1.19 ans	α	perd un noyau d'hélium
Radium 224	88	^{224}Ra	224	3.63 jours	α	perd un noyau d'hélium
Radon 220	86	^{220}Rn	220	55.6 s.	α	perd un noyau d'hélium
Polonium 216	84	^{216}Po	216	0.145 s.	α	perd un noyau d'hélium
Plomb 212	82	^{212}Pb	212	10.64 h.	β	expulse un électron
Bismuth 212	83	^{212}Bi	212	60.55 min.	β	expulse un électron
Polonium 212	84	^{212}Po	212	0.3 μs	α	perd un noyau d'hélium
Plomb 208	82	^{208}Pb	208	totalement insensible à la maladie		

D'autres familles sont sujettes à cette maladie

D'autres familles aujourd'hui disparues ont été victimes de cette maladie. Prenons les cas des familles Technétium et Prométhéum que nous avons déjà signalé précédemment. Elles existaient au moment de la formation du système solaire. Mais en ce qui les concerne, la maladie a été foudroyante, la période de rémission étant d'un million et demi d'années pour l'un et deux ans et demi pour l'autre.

- ^{98}Tc évolue vers ^{98}Ru avec une période de rémission de 1,5 million d'années.
- ^{147}Pm évolue vers ^{147}Sm avec une période de rémission de 2,5 d'années.

Il y a le cas intéressant aussi de la famille Radium. Cette famille aurait dû disparaître depuis longtemps car son cas aussi est foudroyant :

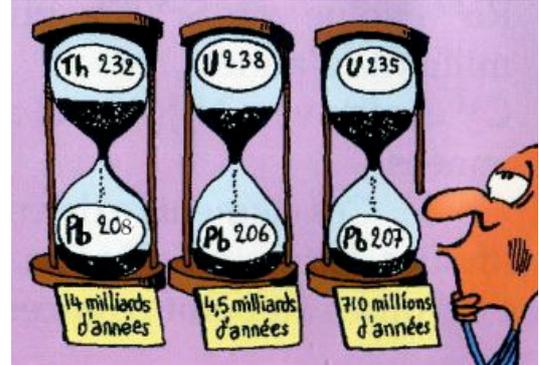
- ^{226}Ra évolue vers le ^{206}Pb avec une période de rémission de 1600 années.

Mais on rencontre tout de même des représentants de cette famille car elle constitue un stade intermédiaire de la maladie de ^{238}U . L'apparition par transmutation de membres de

la famille Uranium leur assure une présence éphémère dans le Monde des Atomes. D'autres cas encore existent, mais il n'est pas utile de les décrire tous ici.

Le vitesse d'évolution de la maladie peut servir d'horloge

Les géologues ont imaginé d'utiliser la vitesse d'évolution de la maladie pour mesurer l'âge des minéraux et des roches. Ils ont fait le raisonnement suivant : ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th enfermés dans un minéral au moment de sa formation se transforment respectivement en ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb . C'est comme si on avait inclu dans le minéral trois sabliers dont les bulbes supérieurs sont remplis d' ^{238}U pour l'un, d' ^{235}U pour le deuxième et de ^{232}Th pour le dernier. Lentement, mais avec des débits différents, ces atomes s'écoulent vers le bas de chacun des sabliers où ils s'accumulent sous forme de ^{206}Pb pour le premier, de ^{207}Pb pour le deuxième et de ^{208}Pb pour le dernier.



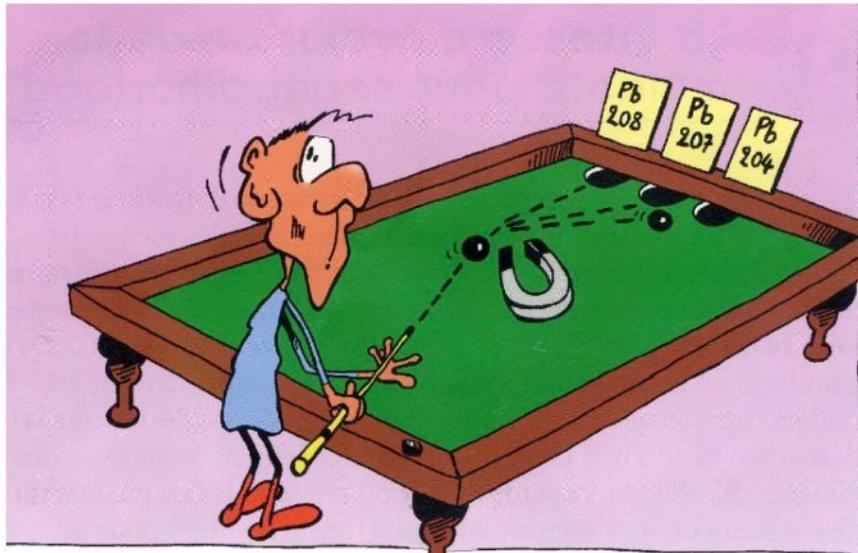
On connaît les lois d'écoulement pour chaque sablier, c'est à dire la vitesse de transformation des atomes. Il est donc possible de trouver l'âge de formation du minéral, pour peu qu'on sache mesurer les quantités d' ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th de ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb .

Cette méthode n'est valable, en principe, que pour des minéraux qui ne renfermaient pas originellement de plomb. En effet, dans le cas contraire, il devient difficile de distinguer la part de ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb dérivant de la décroissance de l'uranium et du thorium de celle du plomb déjà présent dans l'échantillon au moment de sa formation. Cela est tout de même possible par l'introduction de corrections qui prennent en compte les rapports actuels des divers isotopes radiogéniques du plomb vis à vis du plomb 204 (^{204}Pb), le seul isotope non radiogénique.

Comment analyser les divers isotopes ?

C'est l'enveloppe électronique d'un atome qui détermine ses propriétés chimiques. Les propriétés chimiques des divers isotopes d'un même élément sont donc absolument identiques. Les méthodes chimiques sont donc impuissantes pour distinguer les divers isotopes entre eux.

Aussi a-t-on recours à un procédé physique : la **spectrométrie de masse**. A l'intérieur du spectromètre de masse, les atomes sont tout d'abord ionisés, c'est à dire chargés électriquement, puis accélérés. Ils sont ensuite déviés de leur trajectoire par un aimant puissant. L'angle de déviation dépend de la vitesse et de la masse des isotopes. Chaque isotope atteint une cible différente. Un système de comptage permet d'établir les quantités relatives de chacun d'entre eux.



Principe du spectromètre de masse

Autres familles radioactives

Malheureusement l'Uranium et le Thorium ne sont pas des éléments toujours présents dans les minéraux et les roches en quantité suffisante.

Aussi les géologues se sont-ils intéressés à certains membres marginaux de familles connues (certains de leurs isotopes peu abondants), comme MM. Potassium 40 (^{40}K), Rubidium 87 (^{87}Rb) ou Carbone 14 (^{14}C), qui sont sujets à la même dégénérescence radioactive selon les schémas suivants :

- K^{40} évolue vers Ar^{40} (Argon)¹ avec une rémission de 1,3 milliard d'années,

- Rb^{87} évolue vers Sr^{87} (Strontium) avec une rémission de 47 milliards d'années,

Ces éléments existent dans la plupart des roches. Des méthodes de mesure d'âge analogues à celles décrites plus haut ont été mises au point grâce à ces divers isotopes.

Le cas du père Carbone 14

Tout le monde a entendu parler du père Carbone 14 (^{14}C). A vrai dire, c'est un requérant d'asile dans la famille Carbone. Au lieu d'être constitué de 6 protons et de 6 neutrons comme tous les membres de la famille, il comporte 2 neutrons supplémentaires qui portent son poids à 14 grons au lieu des 12 habituels. Il apparaît dans la haute atmosphère, région où les



Un neutron errant peut transformer un atome d'azote (^{14}N) en carbone 14 (^{14}C).

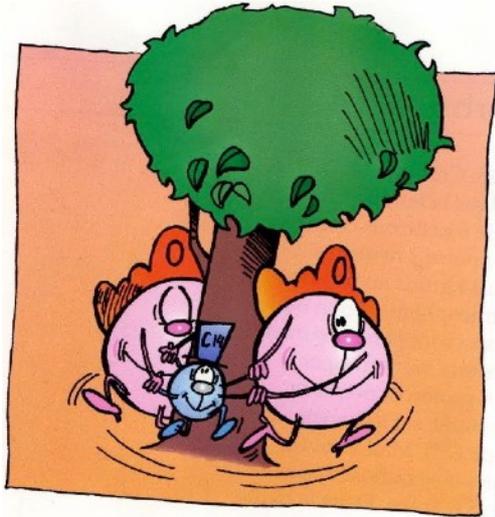
¹ 12% seulement du K^{40} se transforme en Ar^{40} , le 88% restant évolue vers Ca^{40}

rayons cosmiques¹ sont abondants. Ceux-ci sont générateurs de neutrons, et de temps à autre, un de ces neutrons vient frapper le noyau d'un des frères Azote (N^{14}), en expulse un proton et prend sa place. Du coup le pauvre Azote se transmute, sans changer de poids, en un atome de Carbone (l'isotope ^{14}C). Mais c'est un pauvre ^{14}C malade, atteint lui aussi par la décroissance radioactive, avec une période de rémission (demi-vie) de 5'600 ans.

^{14}C évolue vers ^{14}N (Azote) avec une rémission de 5'600 années.

Les sœurs Oxygène s'en occupent

Dans la haute atmosphère où il a été créé, l'atome de carbone ^{14}C se met immédiatement en ménage avec deux soeurs Oxygène pour former la molécule CO_2 . Démographiquement, dans l'atmosphère, le nombre des frères ^{14}C qui disparaissent, emportés par la maladie, est compensé par les nouveaux venus issus de la transmutation des frères Azote. La proportion de ^{14}C dans l'atmosphère demeure donc constante.

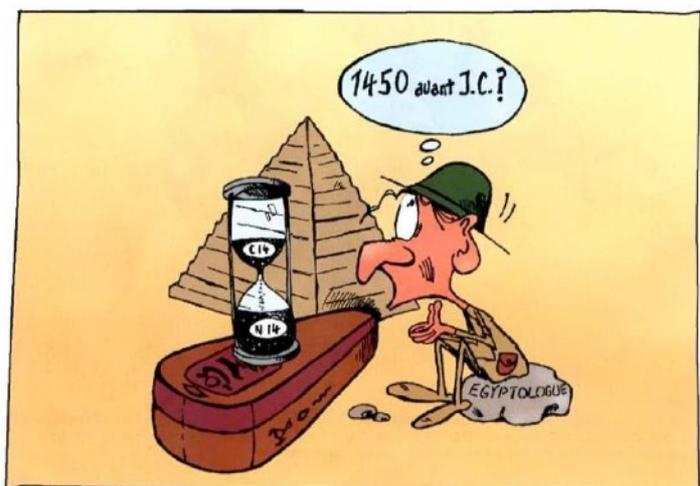


Le nouveau se met immédiatement en ménage avec 2 soeurs Oxygène pour former du CO_2

Les végétaux absorbent du CO_2 durant toute leur vie, et la même proportion de $^{14}C/^{12}C$ qui existe dans l'atmosphère se retrouve aussi dans le bois vivant. Mais après l'abattage d'un arbre, l'échange de CO_2 avec l'air ambiant est interrompu. Le système se referme et, à l'intérieur du bois mort, les frères ^{14}C disparaissent petit à petit sans être remplacés par d'autres. Ainsi un morceau de bois provenant de la

tombe d'un Pharaon renferme beaucoup moins de ^{14}C qu'un bois fraîchement abattu. Comme la demi-vie de l'isotope 14 du carbone est de 5'600 ans, ce type d'horloge est particulièrement bien adapté pour les archéologues et leur permet de mesurer des âges compris entre quelques siècles et 40'000 ans environ.

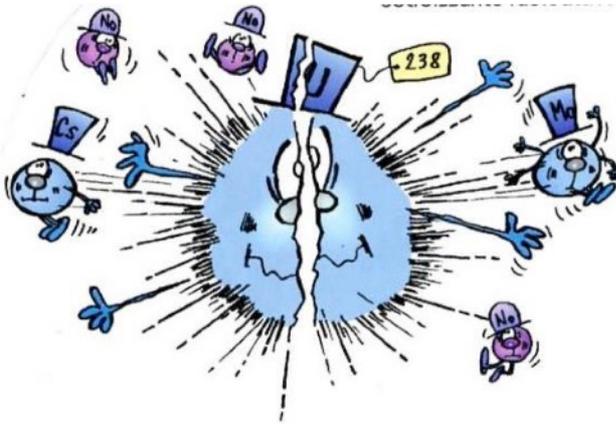
La datation par le carbone 14 intéresse essentiellement les archéologues



1 Ce sont des débris de noyaux d'atomes, principalement des protons qui nous arrivent de l'espace interstellaire. 700.000 de ces projectiles traversent le corps humain chaque seconde. L'interaction de ces protons avec les atomes de l'atmosphère produit 2 à 3 neutrons par seconde et par cm^2 .

La fission spontanée, une autre maladie génétique

Les familles Uranium et Thorium souffrent aussi d'une autre maladie génétique, heureusement beaucoup plus rare : la **fission spontanée** des atomes.



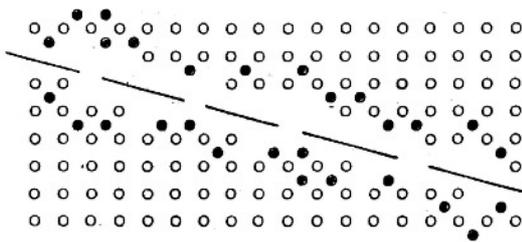
Cette maladie se manifeste par la rupture brutale du noyau de l'atome accompagnée d'une fièvre colossale. Les fragments sont projetés avec une extrême violence loin l'un de l'autre et donnent naissance à deux atomes plus petits accompagnés de deux ou trois neutrons résiduels.

Heureusement pour ceux qui sont sujets à cette affection, la période de rémission est très longue, largement supérieure à des millions de milliards d'années.

C'est donc une maladie extrêmement rare. Cela signifie que la probabilité de disparaître par fission spontanée, la maladie la plus rare, est au moins un million de fois plus faible que celle d'être atteinte par la décroissance radioactive, la maladie la plus fréquente. L' ^{238}U est le seul élément dont la fission spontanée est utilisable pour mesurer l'âge d'un minéral. Par bonheur, de nombreux minéraux accueillent dans leur réseau cristallin des petites quantités d'uranium. Les plus intéressants sont le zircon, le sphène, l'apatite, minéraux qu'on rencontre presque toujours en petite quantité dans les roches granitiques.

Les traces de fission de l'Uranium dans les minéraux

Lorsqu'un atome d'uranium subit une fission, les deux noyaux produits sont expulsés à très grande vitesse en sens opposé l'un de l'autre. L'énergie dégagée est importante et crée une lésion du réseau cristallin du minéral hôte le long du parcours des deux noyaux.



Lésion créée dans le réseau cristallin le long du parcours des produits de fission

Cette trace est plus sensible aux réactifs chimiques que ne le sont les parties intactes du cristal. On peut ainsi "révéler" ces traces en attaquant la surface d'un minéral avec un agent chimique approprié, puis les compter sous le microscope. Chaque trace correspond à la fission d'un seul atome d'uranium !

On peut donc compter le nombre de traces. Connaissant la probabilité de fission spontanée de

^{238}U , il suffit de mesurer la teneur en uranium du minéral et, à partir du nombre de traces enregistrées, calculer depuis combien de temps le minéral constitue un système fermé. Malheureusement cette méthode n'a pas connu tout le succès qu'on aurait pu escompter, car les lésions ainsi créées dans les minéraux ont la fâcheuse tendance à cicatrifier sous l'influence d'un réchauffement ultérieur du minéral.



Traces de fission obtenues par attaque d'une surface polie d'un cristal d'apatite avec de l'acide chlorhydrique.

L'âge de la Terre

Les méthodes que nous venons de décrire s'appliquent toujours à un minéral qui constitue, au moment de sa formation, un système fermé à l'intérieur duquel les "sablons" radioactifs s'écoulent tranquillement jusqu'au moment de la destruction du minéral.

Les roches les plus anciennes qu'on ait jamais rencontrées sur notre planète sont âgées de trois milliards huit cents millions d'années. Ce sont les très rares roches qui ont eu la chance d'échapper aux divers processus de l'érosion qui modifient en permanence notre planète. Les roches plus anciennes ont toutes été détruites depuis longtemps.



Non sans difficultés, on a réussi à déterminer l'âge des météorites. Elles ont presque toutes des âges proches de quatre milliards six cents millions d'années. Si on admet que les météorites constituent le matériau de base des planètes, alors notre Terre est âgée aussi de quatre milliards six cents millions d'années.

Une autre approche consiste à comparer l'évolution des rapports des divers isotopes du plomb au cours du temps. Certaines météorites métalliques ne contiennent pratiquement ni uranium ni thorium. On peut donc admettre que les proportions des divers isotopes du plomb qu'elles renferment sont celles qui existaient lors de la formation des planètes. Par ailleurs, le rapport des isotopes du plomb contenu dans les sédiments profonds des océans peut être considéré comme représentatif de l'époque actuelle. Toutes les méthodes qu'on a imaginées jusqu'à présent pour estimer l'âge de formation de la Terre tendent vers une valeur de 4 milliards six cents millions d'années.

L'âge du Soleil

Le Soleil tire son énergie de la fusion nucléaire de l'hydrogène qui se transforme en hélium selon la réaction : $4\text{H}^1 \Rightarrow \text{He}^4$.

La masse de 4 atomes d'hydrogène vaut $4 \times 1.0078 = 4.0312$ grons¹, alors que la masse d'un atome d'hélium vaut 4.0026 grons. La perte de masse est égale à 0.0053 grons soit environ 0.7 % de la masse d'hydrogène. Connaissant la quantité d'énergie émise par le soleil (4×10^{33} erg/sec.), et conformément à la relation d'Einstein ($E = mc^2$), on peut calculer la perte de masse du Soleil :



$$M = \frac{4 \times 10^{33} \text{ erg/sec.}}{c^2} = \frac{4 \times 10^{33} \text{ erg/sec.}}{9 \times 10^{20} [\text{cm}]} = 0.45 \times 10^{13} [\text{gr}]$$

Le Soleil perd donc environ 4.5 millions de tonnes de sa masse par seconde, ce qui correspond à la transformation dans le même laps de temps, de 650 millions de tonnes d'hydrogène en hélium.

Par ailleurs on a pu déterminer l'évolution de sa luminosité dans le temps (donc de sa consommation d'hydrogène), et on connaît la quantité d'hydrogène déjà consommée depuis sa formation. On a pu ainsi établir que les réactions nucléaires qui assurent le rayonnement du Soleil ont débuté il y a 4.6 milliards d'années, âge qui concorde bien aux mesures effectuées par d'autres méthodes pour les météorites et pour la Terre elle-même.

Il y a encore suffisamment de combustible

Que le lecteur se rassure ! Il reste encore suffisamment d'hydrogène à l'intérieur du Soleil pour lui permettre de réchauffer notre planète pendant encore 4 milliards d'années. Après, il faudra aviser !

L'âge de l'univers

Chauffés à haute température, tous les corps émettent de la lumière. Si on décompose cette lumière dans un prisme (comme l'arc-en-ciel qui est produit par la décomposition de la lumière solaire dans des myriades de gouttes d'eau), on remarque toute une série de raies colorées intenses, correspondant chacune à une longueur d'onde déterminée.



Spectre d'émission du Soleil.

1 définition du gron : voir note 3, page 6.

Chaque raie correspond à l'émission de lumière par un élément chimique bien précis. Ce phénomène nous permet de bien connaître la composition chimique des étoiles. Toutefois, toutes les raies émises par ces dernières montrent un léger décalage de longueur d'ondes du côté du rouge. Ce décalage ne peut être expliqué que si on admet que la source lumineuse, c'est à dire l'étoile, s'éloigne de nous à grande vitesse. On peut comparer ce phénomène au bruit d'une automobile qui vient vers nous à grande vitesse, passe, puis s'éloigne. Au moment de son passage la hauteur du son baisse subitement et devient plus grave lorsque l'auto s'éloigne. C'est une manière de montrer comment la vitesse de la source modifie la longueur de l'onde qu'elle émet.

Or, le décalage des raies d'émission d'une étoile (ou d'une galaxie) est d'autant plus grand qu'elle est plus lointaine. En clair, cela signifie que les étoiles s'éloignent de nous d'autant plus rapidement qu'elles sont plus éloignées. La seule explication possible à ce phénomène est que nous sommes dans un Univers en expansion, un peu comme si nous étions à l'intérieur d'une gigantesque explosion. Connaissant les vitesses d'expansion, il est possible de faire machine arrière et d'estimer la date du début de l'explosion. Celles-ci situent le moment de ce "Big Bang" à un peu moins de quatorze milliards d'années.

Conclusion provisoire

Les progrès de la physique et de l'astrophysique ont contribué à mettre à disposition des géologues des méthodes fiables qui leur permettent d'attribuer un âge absolu aux roches et de reconstituer ainsi l'histoire de notre planète. L'échelle des temps géologiques n'est guère comparable à la vitesse de déroulement des événements de l'activité humaine. Pour un géologue, une roche de vingt millions d'années est plutôt jeune alors qu'un homme de 80 ans nous semble plutôt vieux !

Rappelons que si nous comparons le déroulement de l'histoire de notre planète à une année civile (la naissance de l'univers s'étant déjà produite deux ans plus tôt), les premiers dinosaures ne sont apparus que le 13 décembre vers midi et ont totalement disparu dans la matinée du 26 décembre. Quant à l'Homme, il n'est apparu que le 31 décembre, tard dans la soirée, et les savants qui ont su déchiffrer l'histoire de notre planète ne sont nés qu'une demi-seconde avant minuit. Cette comparaison permettra au lecteur de se faire une idée de l'immensité des temps géologiques par rapport au cours éphémère des événements de la vie !
