

Presque tout sur la radioactivité

par

Jacques Deferne



Avant propos

La radioactivité est un mot qui fait peur. On l'associe aux armes nucléaires, aux centrales nucléaires, aux déchets radioactifs des mêmes centrales, aux accidents de Tchernobyl et de Fukushima. On l'imagine comme un poison invisible qui va nous surprendre sans que nous nous en rendions compte.

Aussi l'idée m'est venue d'écrire ce petit ouvrage pour que le lecteur se fasse une idée moins angoissante de ce phénomène qui existe naturellement depuis des temps immémoriaux.

Les physiciens ont alors mis en évidence les mécanismes de la radioactivité et décrit les deux processus au cours desquels la radioactivité se manifestait :

- la décroissance radioactive naturelle de plusieurs éléments instables qui se transmutaient plus ou moins rapidement en d'autres éléments stables.*
- La fission nucléaire au cours de laquelle un atome lourd explose en deux atomes plus légers en dégageant une quantité énorme d'énergie.*

Autour de ces deux processus, on observe l'émission de diverses particules, des noyaux d'hélium, des neutrons, des électrons et un rayonnement électromagnétique (des photons) semblable à celui des rayons X mais beaucoup plus puissant. Ce sont les principales C'est la méconnaissance des faits qui crée l'angoisse. En espérant clarifier un peu vos connaissances sur ce sujet brûlant, j'ai la modeste ambition de vous apporter un peu de la sérénité nécessaire pour vous faire une opinion personnelle sur la radioactivité et sur le traitement des déchets nucléaires.

Jacques Deferne

Qu'est-ce que la radioactivité ?

Selon la définition des physiciens, la radioactivité est un flux constitué de particules de matière (électrons, noyaux d'hélium, neutrons) et d'énergie.

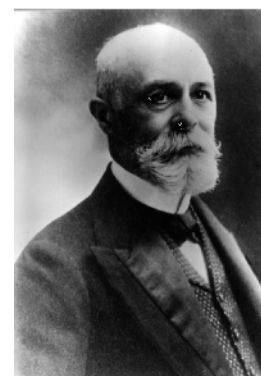
Cette définition est évidente aujourd'hui, mais au moment où Henri Becquerel découvrait les rayons uraniques et que Marie Curie et son mari découvraient de nouveaux éléments radioactifs, on ne savait pas de quoi cette radioactivité était faite.

Les rayons uraniques

La découverte de la radioactivité, le premier mars 1896, est due un peu au hasard et à l'intuition d'Henri Becquerel un physicien français. Il étudiait la phosphorescence de diverses substances pour savoir s'il y avait une relation entre la lumière émise par phosphorescence et les rayons X découverts quelques mois plus tôt par le physicien allemand Wilhelm Röntgen.

Il avait laissé dans un même tiroir des plaques photographiques soigneusement emballées dans du papier opaque noir et des préparations de sels d'uranium. Le lendemain, son intuition l'avait poussé à développer une plaque photographique et il a eu alors la surprise de constater qu'elle avait été impressionnée par un rayonnement invisible qui provenait vraisemblablement des sels d'uranium.

Immédiatement il reprit ses expériences et il pu confirmer alors que l'uranium émettait en permanence un rayonnement invisible qui impressionnait les émulsions photographique. Il venait de découvrir ce que nous appelons aujourd'hui la radioactivité. Becquerel baptisa ce rayonnement "**rayons uraniques**". En 1903, il partagea le prix Nobel de physique avec Pierre et Marie Curie.



Henri Becquerel
(1852-1908)

Baptême de la radioactivité

Cette même année, Marie Skłodowska, épouse de Pierre Curie, entreprend l'étude du rayonnement produit par l'uranium et qu'on appelle encore "rayons uraniques". Elle découvre que la pechblende, un minerai d'uranium, présente une activité beaucoup plus intense que celle de l'uranium.

Avec son mari Pierre Curie, elle découvre dans ces minerais le **polonium**, un élément 400 fois plus actif que l'uranium, puis le **radium**, 900 fois plus actif. Ils donnent le nom de **radioactivité** à la propriété d'un corps d'émettre des rayonnements analogues à ceux de l'uranium. Ils partagèrent le prix Nobel de physique avec Henri Becquerel en 1903 et Marie Curie reçut, plus tard, le prix Nobel de chimie en 1911.

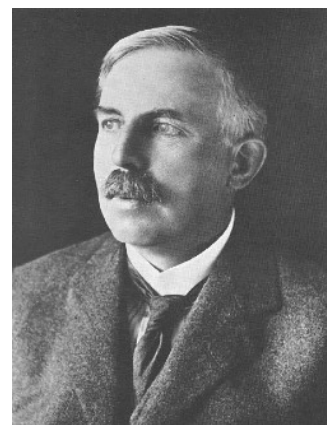


Marie et Pierre Curie

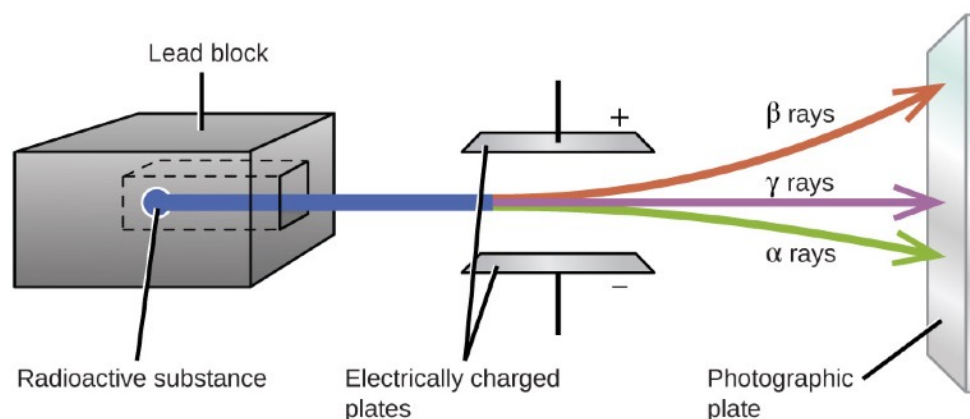
Nature de la radioactivité

L'année suivante, pendant que les Curie remuaient des tonnes de pechblende pour en extraire une fraction de gramme de radium, un chercheur anglais, Ernest Rutherford, s'employait à déterminer la nature du rayonnement radioactif. En soumettant ce rayonnement à des champs magnétiques, il fut conduit à distinguer trois sortes d'émissions :

- **les rayons alpha**, constitués de particules relativement massives chargées positivement,
- **les rayons bêta**, constitués d'électrons,
- **les rayons gamma**, non porteurs de charges, et de nature semblable à celle des rayons X mais beaucoup plus pénétrants.



Ernest Rutherford, 1871-1937, prix Nobel de chimie en 1908.



C'est lui aussi qui montrera plus tard, en 1909, que le rayonnement alpha est constitué de noyaux d'hélium, soit 2 protons et 2 neutrons. Il montre encore que ces rayonnements accompagnent la transformation de certains éléments en d'autres éléments différents. Il met ainsi en évidence la **transmutation des atomes**.

Pour comprendre l'origine de ces divers rayonnements, il faut tout d'abord savoir de quoi la matière est-elle considérée. Dans les pages qui suivent, nous allons essayer de vous faire découvrir les secrets intimes des atomes

Mais de quoi la matière est-elle constituée ?

Si les chimistes se contentaient du fonctionnement des électrons pour expliquer toutes les réactions chimiques qui les préoccupaient, les physiciens, intrigués par les phénomènes de la radioactivité, ont cherché à en expliquer le mécanisme et à imaginer l'architecture de l'atome, en particulier la structure de son noyau et des particules qui le constituent. Dès la découverte accidentelle de la radioactivité par Henri Becquerel, de nombreux physiciens ont participé à l'avancée de la connaissance de l'atome.

Les constituants de la matière, selon les chimistes

Les autopsies pratiquées par les chimistes sur certains atomes avaient révélé qu'ils étaient constitués de trois particules qui leur semblaient élémentaires : **le proton**, **le neutron** et **l'électron**.



- Autopsie d'un atome de potassium

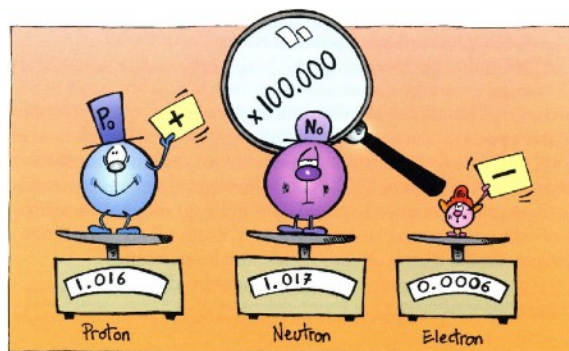
Dans la périphérie des atomes, les électrons, petites particules extrêmement légères, - elles pèsent environ 0.00054 gron^1 - sont porteuses chacune d'une charge électrique négative. Extrêmement agités, les électrons parcourent, dans une ronde vertigineuse, des orbites très diverses autour d'un noyau central, lui-même extrêmement petit et qui constitue le cœur de l'atome.

Le volume grossièrement sphérique défini par la zone d'influence des électrons constitue ce qu'on a coutume d'appeler le volume de l'atome, déterminant du même coup sa taille.

¹ C'est une unité imaginaire utilisée uniquement dans le "Monde étrange des Atomes". En réalité, c'est le poids, exprimé en grammes, de 602.488 milliards de milliards d'atomes d'hydrogène. Ce grand nombre est connu sous le nom de "Nombre d'Avogadro" (célèbre chimiste italien, 1776-1856). On peut ainsi comparer entre eux des mêmes nombres d'atomes et en exprimer le poids en grammes. En réalité les chimistes ont défini plus précisément "l'unité de masse atomique" (U.M.A.) comme le douzième du poids du carbone ^{12}C , ce qui équivaut à $1.66 \times 10^{-24} \text{ gr}$.

Aux yeux des **chimistes**, les constituants fondamentaux de l'atome sont donc :

- **Le proton**, particule comportant une charge électrique positive. Il pèse 1,016 gron, Il en faut 602'448 milliards de milliards pour faire un gramme! Cela correspond approximativement au poids d'un des frères Hydrogène.
- **Le neutron**, particule sans charge électrique, pesant 1,017 gron, donc de poids presque identique à celui du proton.



- **L'électron**, particule porteuse d'une charge électrique négative, pesant 0,00054 gron soit environ 1840 fois plus légère qu'un neutron ou qu'un proton.

On constate aussi que la quasi totalité de la masse d'un atome est concentrée dans son noyau. Toute la matière familière qui constitue notre environnement est régie par les relations que ces trois particules entretiennent entre elles.

Toutes les réactions chimiques qui font vivre cette matière dépendent uniquement du comportement des électrons et les chimistes ne se soucient pas vraiment de l'architecture du noyau des atomes.

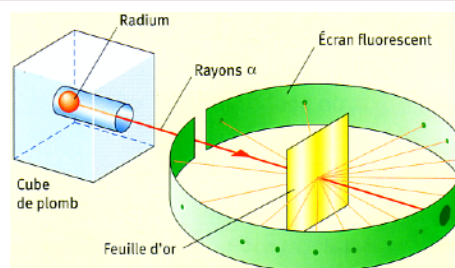
L'atome semble constitué de vide

En 1911, Ernest Rutherford, par une expérience célèbre, découvre que presque toute la masse de l'atome est concentrée dans un noyau cent-mille fois plus petit que l'atome lui-même.

Il arrive à la conclusion que l'atome est essentiellement constitué de vide et que la masse de l'atome est quasi entièrement concentrée dans ce noyau chargé positivement. Il imagine donc un noyau positif autour duquel gravitent des électrons négatifs.

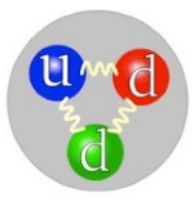
L'expérience de Rutherford

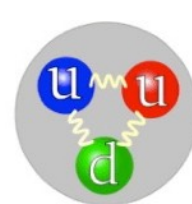
Une source de radium émet des particules α , des ions d'hélium, qui sont focalisées sur une feuille d'or extrêmement fine ($0.6\mu\text{m}$). La grande majorité des ions traversent la feuille d'or sans être déviés. Quelques très rares ions sont déviés, voire même renvoyés vers l'arrière.



Les constituants du noyau

On sait aujourd'hui que le cœur de l'atome est constitué de deux sortes de particules, les neutrons et les protons. Ils sont agglutinés au centre de l'atome, maintenus ensemble par une force extrêmement puissante qui confine les protons qui auraient dû normalement "exploser" sous l'effet de la force électrostatique répulsive qui existe entre les particules de même charge.

Neutron	Identifié en 1937 par James Chadwick.	
Symbole : n, n ⁰	Masse :	939,2565 MeV/c ² (1.672'623 x 10 ⁻²⁷ kg)
Famille des fermions Groupe des baryons 	Charge électrique:	nulle
	Espérance de vie :	- 885 secondes hors du noyau, - stable à l'intérieur du noyau.
	- Le neutron est constitué d'un quark up et de deux quarks down. - Sensible à l'interaction forte, faible et à la gravité. - Un des constituants du noyau des atomes - Hors du noyau, il se désintègre rapidement, se transforme en proton avec émission d'un électron et d'un neutrino.	

Proton	Découvert en 1919 par Ernest Rutherford.	
Symbole : p, p ⁺	Masse :	938,272 MeV/c ² (1.672'623 x 10 ⁻²⁷ kg)
	Charge électrique:	+1
	Espérance de vie :	stable (supérieure à 10 ³⁰ ans)
	- Le neutron est constitué de deux quarks up et de un quark down. - Sensible aux quatre forces - Un des constituants du noyau des atomes. - Peut se transformer en neutron par capture électronique. Ce processus n'est pas spontané et nécessite un fort apport d'énergie.	

Puis les quarks sont apparus

En 1964 deux chercheurs américains Murray Gell-Mann et George Zweig émirent l'hypothèse, indépendamment l'un de l'autre, que les neutrons et les protons n'étaient pas des particules élémentaires mais qu'ils étaient composés de particules plus petites encore, les **quarks**. Ils postulèrent qu'il devait y avoir plusieurs sortes de quarks. Ainsi, ceux qui constituent les neutrons et les protons sont le **quark up** et le **quark down**.

Anatomie des protons et des neutrons

Les protons et les neutrons, que les chimistes croyaient être des particules élémentaires, sont, donc, selon les physiciens, des particules composites constituées de quarks.

Composés de triplets de quarks, les neutrons et les protons sont concentrés dans le noyau des atomes. Protons et neutrons s'associent intimement pour former la petite centaine d'atomes que l'on retrouve dans le tableau périodique qui nous est bien connu. L'atome le plus simple est l'hydrogène qui ne comporte qu'un proton en guise de noyau. Le plus complexe qu'on trouve dans la nature est l'uranium 238 dont le noyau comporte 92 protons et 146 neutrons.

Un casse-tête instructif

Comme nous connaissons la masse du proton et celle du neutron, il paraît donc facile de calculer la masse du noyau d'un atome en additionnant les masses des protons et des neutrons qui le constituent. Mais, ô surprise, on constate que la masse du noyau est inférieure à la somme des masses de ses constituants. Où est donc passée la masse manquante ?

C'est là qu'intervient la fameuse équation d'Einstein $E = m \times c^2$, qui nous enseigne qu'une partie de la masse de ces constituants a été transformée en énergie, énergie colossale nécessaire pour garder confinés protons et neutron dans cet ensemble très petit qu'est le noyau de l'atome. C'est **l'énergie de liaison**. C'est elle qui assure la cohésion des particules constituant le noyau. C'est aussi l'énergie qu'il faut fournir à ce noyau si on veut en séparer les constituants.

Mais à quoi servent les neutrons ?

Les neutrons sont nécessaires pour assurer la cohésion des noyaux d'atomes. En s'insérant entre les protons, ils les éloignent un peu les uns des autres et contribuent ainsi à la diminution des forces répulsives qui s'exerce entre les protons. La proportion de neutrons dans un noyau augmente avec le poids atomique de l'élément considéré. Par ailleurs, les neutrons ne supportent pas la solitude. Ils ne se sentent en sécurité que lorsqu'ils sont confinés à l'intérieur d'un noyau. Ils peuvent y vivre indéfiniment. Hors d'un noyau, ils sont très menacés et leur espérance de vie n'est guère que d'un quart d'heure. Ils sont atteints par la décroissance radioactive et se transforment rapidement en protons.

La mystérieuse interaction forte qui emprisonne les quarks

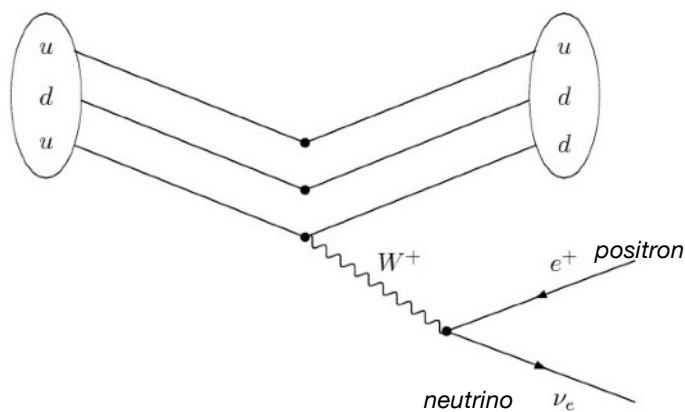
On connaît bien la force de la gravité qui nous maintient collé sur le sol et on connaît aussi les effets de la force électromagnétique. Par contre on imagine mal comment fonctionne la force nécessaire pour maintenir confinés au sein du noyau des protons qui normalement devraient se repousser violemment à cause de leur charge positive. Cette force, d'un nouveau genre, est ce que les physiciens nomment **l'interaction forte**.

L'interaction faible, une force perturbatrice

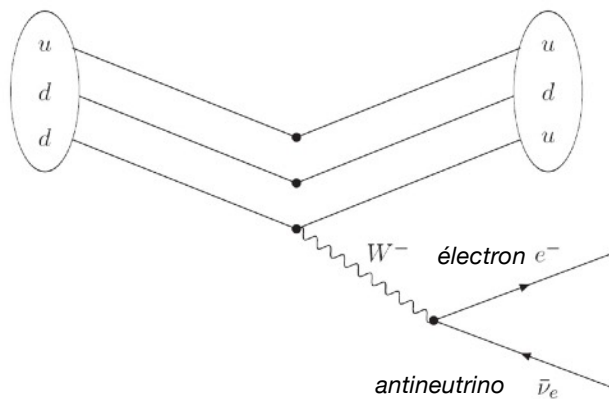
Il existe encore une autre force mystérieuse qui vient semer le trouble à l'intérieur des protons et des neutrons. Elle est connue sous le nom **d'interaction faible**. Elle modifie en permanence le caractère des quarks en les bombardant de grosses particules extrêmement fugitives qui apparaissent comme par magie puis disparaissent aussi subitement qu'elles sont apparues. Elles sont connues sous les noms de bosons **W+**, **W-** et **Z⁰**. Les quarks sont rendus furieux et changent de comportement. Les physiciens imaginent que les quarks peuvent devenir **bleus de peur**, **verts de rage** ou **rouges de honte**. Ce bouillonnement constant provoque la transmutation de protons en neutrons ou de neutrons en protons. Parfois, excédés par cette animosité incessante, il arrive que des noyaux d'atome s'auto-mutilent, engendrant ainsi le phénomène de la **radioactivité**, voire même, plus rarement, celui de la **fission** des atomes.

Lorsqu'un boson W^- frappe un quark down, celui-ci se désintègre en un quark up, transformant le proton en un neutron en émettant alors un électron de grande énergie ainsi qu'une particule encore très mystérieuse, un antineutrino qui emporte avec lui une partie de l'énergie dissipée. Lorsqu'un boson W^+ frappe un quark up, celui-ci se désintègre en un quark down, transformant le neutron en proton en émettant un électro positif (un positron) et un neutrino. La transformation d'un proton en neutron ou d'un neutron en proton sème alors un grand trouble à l'intérieur du noyau qui, pour retrouver son équilibre, expulse soit une particule alpha, soit un électron. Ce rééquilibrage provoque aussi une perte d'énergie sous la forme de rayons γ (gama).

Transformation d'un neutron en proton



Transformation d'un proton en neutron



Les atomes qui constituent notre environnement

Les scientifiques ont identifié dans la nature 92 famille d'atomes ou presque, parce que certains d'entre eux sont si instables qu'ils ont complètement disparu de la nature. C'est le cas du Technétium et du Prométhéum dont la période est respectivement de 1.5 millions d'années et 2.5 ans. A noter que les hommes ont réussi à ressusciter le Technétium dans les processus nucléaires.



Deux familles, Promethium et Technétium, prématurément disparues pour cause de décroissance radioactive foudroyante.

Chaque élément est caractérisé par son nombre de protons autour desquels gravitent un nombre équivalent d'électrons. L'atome le plus simple est l'hydrogène constitué d'un proton et d'un électron. En mesurant les masses des divers atomes, les chimistes avaient été intrigués par le fait que la masse d'un atome était très souvent un multiple entier de la masse de l'hydrogène. Toutefois, pour le deuxième élément du tableau périodique, l'hélium, la masse est le quadruple de la masse de l'hydrogène. On constate que des neutrons participent à la constitution du noyau des atomes. En plus des deux protons, le noyau d'hélium comporte aussi 2 neutrons. Les noyaux des atomes sont donc constitués de protons auxquels s'ajoutent en nombres parfois variables un certain nombre de neutrons. Ainsi l'atome le plus complexe est l'uranium 238 dont le noyau est constitué de 92 protons auxquels se joignent 146 neutrons.

Le chimiste russe Dmitri Mendeleïev avait remarqué, qu'en classant les atomes par ordre de poids atomique croissant, on voyait apparaître une périodicité remarquable des propriétés de ceux-ci. Cette périodicité obéit à des nombres précis : 2, 8, 18, 32. Pour son tableau, Mendeleïev disposa tout ce petit monde sur une série de sept gradins, plaçant les plus légers sur les niveaux supérieurs, les plus lourds en bas, de la manière suivante :

- première marche (haut): 2 atomes : Hydrogène et Hélium,
- deuxième marche : 8 atomes, de Lithium à Néon,
- troisième marche : 8 atomes, de Sodium à Argon,
- quatrième marche : 18 atomes, de Potassium à Krypton,
- cinquième marche : 18 atomes, de Rubidium à Xénon
- sixième marche : 32 atomes, de Césium à Radon
- septième marche : 32 atomes, de Francium à Lawrencium

Tableau périodique des éléments

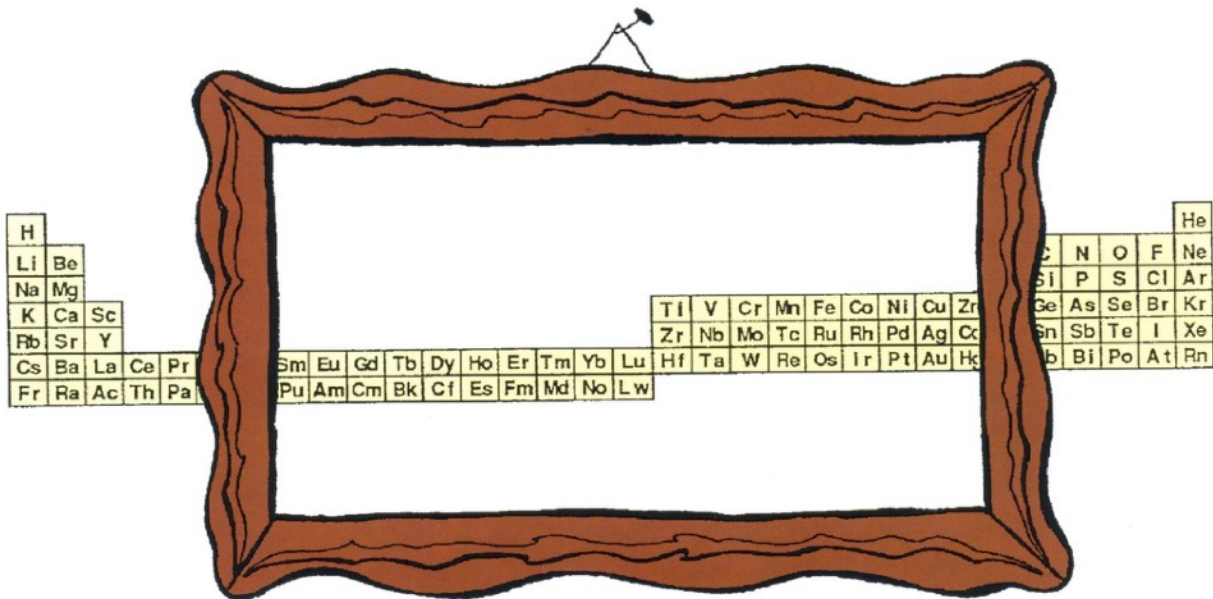
Tableau périodique des éléments																		2																	
1		Atomique																		2															
H		Sym																		He															
Hydrogène		Nom																		Hélium															
40796		Compound																		2															
3		4																5		6		7		8		9		10							
Li		Be																B		C		N		O		F		Ne							
Lithium		Béryllium																Bore		Carbone		Azote		Oxygène		Fluor		Néon							
169		42																1065		40112		20185		32620		3865		2							
11		12																13		14		15		16		17		18							
Na		Mg																Al		Si		P		S		Cl		Ar							
Sodium		Magnésium																Aluminium		Silicium		Phosphore		Soufre		Chlore		Argon							
803		303																159		1055		2961		5831		6109		2							
19		20		21		22		23		24		25		26		27		28		29		30		31		32		33		34		35		36	
K		Ca		Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni		Cu		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr	
Potassium		Calcium		Scandium		Titane		Vanadium		Chrome		Manganèse		Fer		Cobalt		Nickel		Cuivre		Zinc		Gallium		Germanium		Arsenic		Sélénium		Brome		Krypton	
348		143		28		106		112		166		89		332		182		117		191		291		41		73		140		2811		4			
37		38		39		40		41		42		43		44		45		46		47		48		49		50		51		52		53		54	
Rb		Sr		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ag		Cd		In		Sn		Sb		Te		I		Xe	
Rubidium		Strontium		Yttrium		Zirconium		Niobium		Molybdène		Technétium		Ruthénium		Rhodium		Palladium		Argent		Cadmium		Indium		Étain		Antimoine		Tellure		Iode		Xénon	
25		50		43		102		52		81		4		76		83		87		77		79		36		163		102		89		872		17	
55		56		57-71		72		73		74		75		76		77		78		79		80		81		82		83		84		85		86	
Cs		Ba				Hf		Ta		W		Re		Os		Ir		Pt		Au		Hg		Tl		Pb		Bi		Po		At		Rn	
Césium		Baryum				Hafnium		Tantale		Tungstène		Rhénium		Osmium		Iridium		Platine		Or		Mercure		Thallium		Plomb		Bismuth		Polonium		Astate		Radon	
45		140				46		34		103		48		27		44		94		44		204		49		106		50		3		1		1	
87		88		89-103		104		105		106		107		108		109		110		111		112		113		114		115		116		117		118	
Fr		Ra				Rf		Db		Sg		Bh		Hs		Mt		Ds		Rg		Cn		Nh		Fl		Mc		Lv		Ts		Og	
Francium		Radium				Rutherfordium		Dubnium		Seaborgium		Bohrium		Hassium		Meitnérium		Darmstadtium		Roentgenium		Copernicium		Nihonium		Flerovium		Moscovium		Livermorium		Tennessine		Oganesson	
1		2				1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1	

Click one or more elements to show all compounds containing those elements.

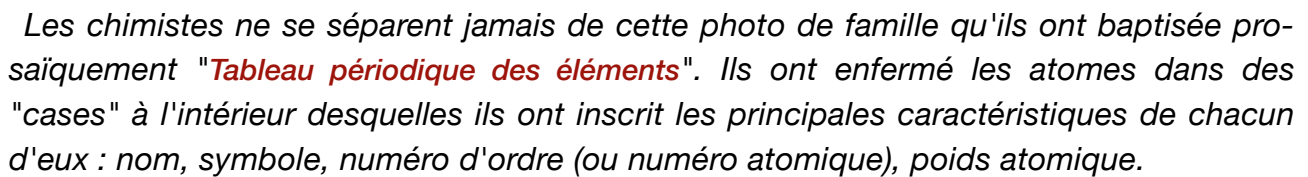
Tableau Périodique Copyright du design et interface © 1997 [Michael Dayah](#). Ptable.com Dernière mise à jour 16 juin 2017

57 La Lanthane 57 41	58 Ce Cérium 58 55	59 Pr Praséodyme 59 44	60 Nd Néodyme 60 38	61 Pm Prométhium 61 5	62 Sm Samarium 62 36	63 Eu Europium 63 43	64 Gd Gadolinium 64 44	65 Tb Terbium 65 27	66 Dy Dysprosium 66 31	67 Ho Holmium 67 25	68 Er Erbium 68 37	69 Tm Thulium 69 29	70 Yb Ytterbium 70 25	71 Lu Lutécium 71 25
89 Ac Actinium 89 1	90 Th Thorium 90 25	91 Pa Protactinium 91 2	92 U Uranium 92 43	93 Np Neptunium 93 2	94 Pu Plutonium 94 11	95 Am Américium 95 8	96 Cm Curium 96 1	97 Bk Berkélium 97 2	98 Cf Californium 98 1	99 Es Einsteinium 99 1	100 Fm Fermium 100 1	101 Md Mendélévium 101 1	102 No Nobélium 102 1	103 Lr Lawrencium 103 1

La rangée inférieure aurait dû aussi compter 32 personnes, mais elle est restée incomplète car on n'a pas trouvé suffisamment d'atomes dans la nature pour occuper toutes les places. En réalité, Mendeleïev n'a trouvé que 6 atomes pour ce dernier rang ce sont la francium, le radium, l'actinium, le thorium, le protactinium et l'uranium. Depuis lors, les physiciens ont réussi à créer artificiellement une douzaine de nouveaux atomes qui ont trouvé place sur ce niveau. Mais ces nouveaux venus sont très instables et leur espérance de vie n'est pas très grande.



Malheureusement cette disposition n'est pas très commode: les rangées supérieures sont très clairsemées et il est difficile de trouver un cadre qui ait une proportion si peu commune pour y loger ce tableau. Aussi les successeurs de Mendeleïev ont-ils pris



29
Cu
Cuivre
63.456

Dans certaines familles d'atomes, le nombre de neutrons peut varier d'un individu à l'autre. Par exemple, les membres de la famille Cuivre ont tous 29 protons, mais certains d'entre eux possèdent 34 neutrons et d'autres 36. Sur le plan chimique leurs propriétés sont absolument identiques. Ce qui diffère, c'est leur poids atomique. Certains atomes de Cuivre pèsent 63 grons, d'autres 65 grons. Le cuivre qu'on trouve dans la nature est constitué de 69% de l'isotope ^{63}Cu et 31% de l'isotope ^{65}Cu . Le poids atomique du

cuivre (qui figure dans la grande photo) est une moyenne pondérée des poids de ^{63}Cu et ^{65}Cu , soit 63.546.

Chaque élément chimique est en réalité constitué d'un mélange d'isotopes et le poids atomique indiqué sur le tableau périodique est la résultante des poids de chaque isotope pondérés par leur proportion dans le mélange.

Le spectrographe de masse permet de trier les isotopes

Les isotopes ne peuvent pas être séparés les uns des autres par voie chimique car leur environnement électronique est identique. Il faut donc les séparer d'après leur masse.

On utilise alors un spectrographe de masse. Les atomes sont ionisés, puis accélérés. Sur leur trajectoire un champ magnétique va dévier différemment chaque isotope selon sa masse.

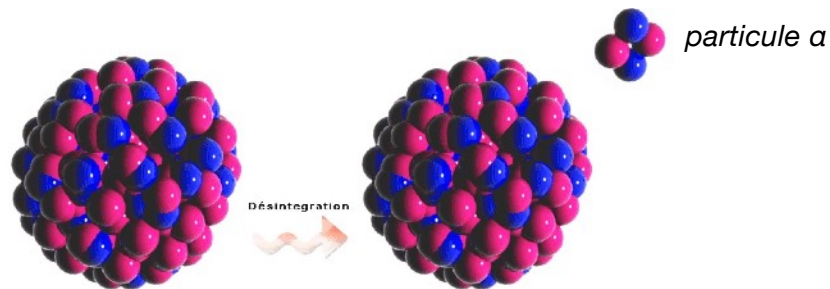


Principe du spectrographe de masse

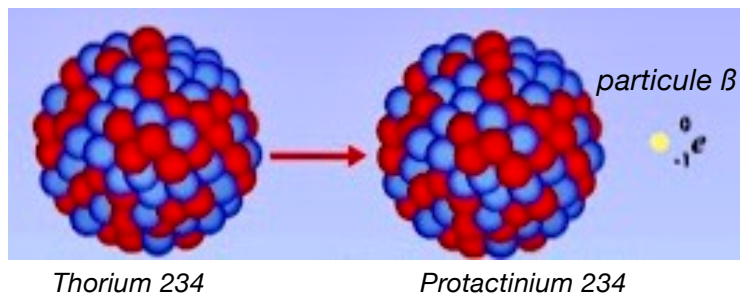
La décroissance radioactive

L'atome d'uranium n'est pas bien dans sa peau

Un atome d'uranium 238 (^{238}U) renferme dans son noyau 92 protons et 146 neutrons. Ce noyau est instable. Pour essayer de retrouver une plus grande stabilité, il lui arrive d'expulser un rayon α {alpha}. Sa masse diminue de 4 unités et il recule aussi de 2 cases dans le tableau périodique. Il s'est transmuté en un autre élément, le thorium 234 (^{234}Th).



Ce thorium est lui même très instable et très rapidement un de ses protons se transforme en un neutron en expulsant une particule β . Il est transmuté en protactinium 234 (^{234}Pa). Ce phénomène porte le nom de **décroissance radioactive**.



Thorium 234

Protactinium 234

Période ou demi-vie

La probabilité qu'un noyau d'atome d'uranium amorce sa transmutation est plutôt faible. Pour quantifier cette probabilité, on parle de "demi-vie" ou "période", c'est à dire le temps nécessaire pour que la moitié d'une communauté d'atomes subisse cette transmutation. Pour l'uranium 238 (^{238}U) cette demi-vie est d'environ 4,5 milliards d'années. Pour son cousin l'isotope 235 (^{235}U) la demi-vie est de 704 millions d'années. Pour le Thorium 234 (^{234}Th) la demi-vie n'est que de 24 jours. Le thorium 234 est donc extrêmement instable alors que les 2 isotopes de l'uranium, beaucoup plus paresseux, ne sont que très peu instables.

A son tour ce Protactinium encore plus instable (demi-vie = 6h.45) émet une particule β et se transforme en uranium 234 (^{234}U), un isotope très rare de l'uranium.

Ces transformations successives se poursuivent et, tout à tour, on va transiter par toute une cascade d'isotopes instables qui sont, dans le cas de ^{238}U , le thorium, le radium, le radon, le polonium, le bismuth pour finir par aboutir vers un isotope stable du plomb (^{206}Pb).

Le tableau ci-dessous résume comment l'uranium 238 (^{238}U), dont le noyau est instable, rééquilibre celui-ci et se transforme lentement en plomb 206 (^{206}Pb).

Mécanisme 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'années).			
Nb. protons : 92						
Nb. neutrons : 146						
Etat	N° atomique	Symbole	Poids	Rémission	Emission	Symptômes
Uranium 238	92	^{238}U	238	4.5 x 10 ⁹ ans	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		

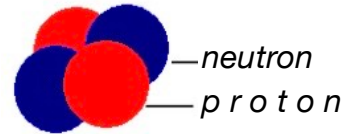
* nom de jeune fille de Marie Curie

Ce schéma de décroissance radioactive existe pour chacun des isotopes radioactifs d'éléments dont le noyau est instable.² On remarque que ^{234}U , ^{230}Th et ^{226}Ra auraient dû disparaître de la nature comme le prométhéum et le technétium, mais, à la différence de ces derniers, ils se recréent en permanence au cours du cycle de la décroissance radioactive de l'uranium.

Que sont donc ces mystérieuses particules ?

Dans l'aventure qui accompagne sa transmutation en plomb, l'uranium va perdre successivement 8 particules α , 6 particules β et l'excès d'énergie sera emporté par le biais de puissants rayons γ . Ce sont ces particules qui constituent le mystérieux rayonnement de la radioactivité. Ces particules sont :

- **les particules "alpha" $[\alpha]$** , constituées chacune de deux protons et de deux neutrons. C'est donc un noyau d'atome d'hélium débarrassé de ses 2 électrons et donc porteur de 2 charges positives. Cette association de 2 protons et 2 neutrons est particulièrement stable et constitue une particule difficilement dissociable. Lors de son expulsion hors du noyau d'un atome lourd (l'uranium par exemple) une particule alpha emporte avec elle une énergie comprise entre 3 et 7 MeV³ qui lui confère une vitesse d'environ 15'000 km/s. A cause de leur masse et de leur charge électrique, les particules alpha sont facilement absorbées par la matière et ne peuvent parcourir que quelques centimètres dans l'air. Les particules alpha sont aussi des composants importants des rayons cosmiques.



- **les particules "bêta" $[\beta]$** , sont des électrons (formés dans le noyau par la transformation d'un neutron en proton). Ils sont expulsés à la vitesse de 270'000 km/seconde.



- **les rayons "gamma" $[\gamma]$** , sont des rayons X extrêmement puissants qui se déplacent à la vitesse de la lumière. Ils sont produits par la désexcitation du noyau qui se "réarrange" à la suite de l'expulsion d'une particule alpha ou d'une particule bêta. Tout comme l'énergie d'un photon témoigne de la chute d'un électron d'une orbite à une autre, la désexcitation du noyau procède par saut d'un état à un autre et l'énergie du photon gamma émis par un noyau radioactif porte donc la signature du noyau émetteur.



- On peut donc identifier les atomes émetteurs de rayons gamma en mesurant l'énergie (leur longueur d'onde) de leur rayonnement.

² Pour plus de détails, consulter du même auteur le texte "Au cœur de l'atome"

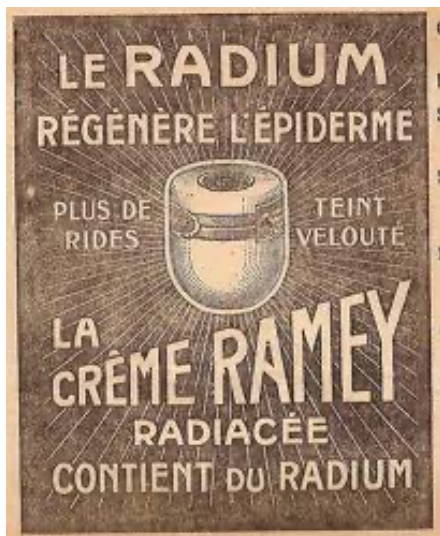
³ l'électron-volt est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt.
1 MeV correspond à un million d'électrons-volts

Folies autour de la radioactivité

Le radium a très vite suscité de l'intérêt et, peu après la découverte de la radioactivité, de très nombreuses firmes commerciales ont mis sur le marché de produits radioactifs censés apporter de nombreux bienfaits pour le corps.

Les charlatans s'en sont vite emparés et les médications à base de radium ont été vantées et prescrites pour toutes sortes d'affections. Les crèmes de beauté radioactives, les boissons radioactives, savons radioactifs, chocolats au radium ont envahi le marché. On proposait même des suppositoires au radium sensés revigorer la sexualité !

On a aussi confectionné les cadrans de montre dont les aiguilles et les chiffres peints avec des substances radioactives devenaient phosphorescents pendant la nuit. On ignorait encore tout des effets néfastes de la radioactivité sur les tissus vivants.



VITA RADIUM SUPPOSITORIES



OUR VITA RADIUM SUPPOSITORIES (HIGH STRENGTH) are one of the outstanding triumphs of Radium Science. These Suppositories are guaranteed to contain **REAL RADIUM**—in the exact amount for most beneficial effect. They are inserted per rectum, one each night, this being one of the several practical and successful ways of introducing Radium into the system.

After insertion, the Suppository quickly dissolves and the Radium is absorbed by the walls of the colon; then, within a few minutes, it enters the blood stream and traverses the entire body. Every tissue, every organ of the body is bombarded by its health-giving electric atoms. Thus the use of these Suppositories has an effect on the human body like recharging has on an electric battery.

Actual Size of Suppository

HISTORY

La radioactivité naturelle

Dans la nature, la décroissance radioactive et la fission nucléaire spontanée sont des phénomènes plutôt rares et localisés. La radioactivité qui en résulte peut être considérée comme négligeable. Toutefois, sans le savoir, nous baignons dans un flux de particules qui traversent notre corps en permanence.

L'uranium est omniprésent

L'uranium et le thorium sont des éléments omniprésents dans les roches granitiques. Ces éléments se concentrent dans le zircon, le sphène et l'apatite, des minéraux accessoires toujours présents en faible quantité dans les granites. Insensibles à l'érosion, ces minéraux se retrouvent dans les dépôts alluvionnaires issus de la destruction des granites.

L'énergie libérée par la radioactivité produit aussi de la chaleur qui participe pour moitié au flux de chaleur émis par les roches qui sont sous nos pieds.



La chaleur produite par l'activité de l'uranium et de thorium renfermés dans un bloc de granite de 30 cm de côté est suffisante pour préparer une théière de thé bouillant...

...à condition d'attendre 200'000 ans !

Les gens qui habitent dans des régions granitiques sont plus exposés à la radioactivité naturelle que ceux qui habitent sur des terrains sédimentaires. Mais ces doses sont très faibles et n'ont pas de conséquences significatives sur la santé.

Teneur en éléments radioactifs de quelques roches en parties par millions [ppm]

	uranium	thorium	chaleur produite [μcal:/cm ³ par an]
granite	4	13	20.0*
basalte	0.5	2	3.3
calcaire	2	?	

* ce flux était 2.2 fois plus intense il y a 4.5 milliards d'années

Mais attention tout de même au radon !

Dans les roches granitiques, l'uranium et le thorium trouvent un accueil favorable dans les minéraux accessoires toujours présents en faible quantité. Le zircon (ZrSiO_4) est particulièrement accueillant. Les atomes d'uranium et de thorium remplacent, en petite quantité, les atomes de zirconium au sein de la structure du minéral. Le zircon résiste aux agents de l'érosion et se retrouve dans les sables issus de la destruction des granites. Au cours de la décroissance radioactive de l'uranium et du thorium on voit apparaître le radon, un élément très radioactif, le seul qui soit sous forme de gaz.

Si vous bronziez, couché sur un sable d'origine granitique, en Bretagne par exemple, vous avez de bonne chance d'inhaler un certain nombre d'atomes de radon. Comme leur existence est très éphémère, il est possible qu'ils se transmutent, dans vos poumons, en un autre isotope radioactif qui lui est solide et se fixe alors dans votre organisme.



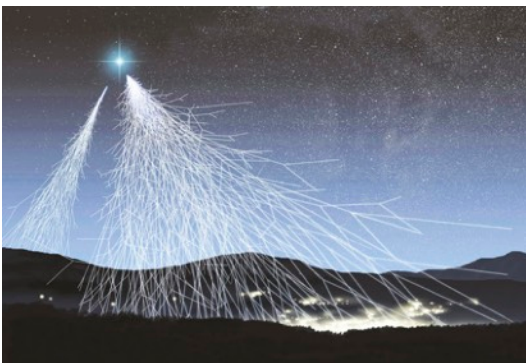
Comment inhaler sûrement du radon !

Dans certains pays, les sables utilisés pour confectionner le béton sont particulièrement riches en zircon et les immeubles génèrent de faibles quantités de radon. Le radon est un gaz lourd qui s'accumule dans les parties basses des bâtiments. Une bonne circulation d'air suffit à réduire le danger.

Il y a aussi les rayons cosmiques

Les rayons cosmiques bombardent la Terre de particules de très haute énergie. Ces particules provenant de l'espace intersidéral sont constituées d'environ 85 % de protons, de 14% de noyaux d'hélium (particules alpha) et de 1% d'électrons, pour la partie chargée. La partie neutre consiste en des rayons gamma et des neutrinos. Les noyaux d'azote et d'oxygène de la haute atmosphère terrestre constituent les cibles et jouent ainsi le rôle de détecteur. Des réactions complexes produisent le carbone 14 (^{14}C), un isotope radioactif qui se retrouve dans le CO_2 de l'atmosphère. Il y a également produc-

tion de muons⁴, des particules éphémères, et de neutrinos, des particules insaisissables qui arrosent en permanence la planète et traversent notre corps par millions chaque jours.



Les muons et les neutrinos, des particules insaisissables issues des collisions entre les rayons cosmique venant de l'espace et l'azote de la haute atmosphère, traversent notre corps par milliers chaque seconde

⁴ le muon est un électron lourd, 207 fois plus lourd que l'électron. Sa durée de vie n'excède 2 milliardièmes de seconde.

Détection et protection

Principe de la détections des particules

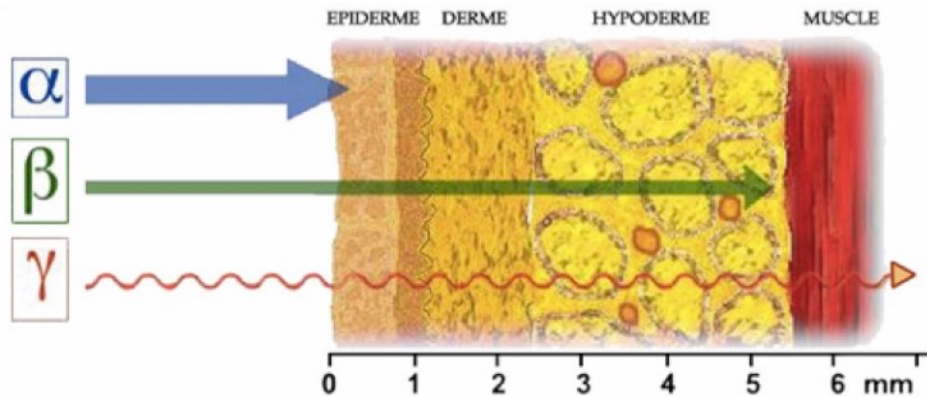
Les diverses méthodes de détection de la radioactivité sont fondées sur les effets qu'elle produit sur la matière. Ainsi, les divers composants de la radioactivité ont pour effet :

- de ioniser⁵ les gaz sur leur passage,
- de rendre fluorescentes certaines substances,
- de noircir les émulsions photographiques.

- **Le compteur Geiger-Müller** a été imaginé par Hans Geiger en 1913 et mis au point par Walther Müller en 1928. Il est basé sur le principe de l'ionisation d'un gaz.
- C'est un tube métallique cylindrique au centre duquel est tendu un fil métallique. Il est rempli d'un gaz sous faible pression. Une tension d'environ 1000 volts règne entre le tube et le fil. Au passage d'un rayon ionisant (rayons alpha, bêta, gamma, rayons X) le gaz est ionisé et les électrons arrachés au gaz se multiplient, rendant ce dernier conducteur et une décharge a lieu entre les deux électrodes, induisant un déclic sonore. Le courant détecté agit aussi sur l'aiguille d'un galvanomètre. Ce détecteur permet de compter une à une les particules qui traversent le tube. L'intensité de la radioactivité se manifeste par le nombre de clics par seconde. L'intensité du crépitement est proportionnel à l'intensité du rayonnement ionisant. Par contre, le compteur Geiger-Müller ne détecte pas les neutrons.
- **Les compteurs à scintillation** utilisent la propriété de certaines substances de devenir fluorescentes au passage d'un rayonnement. Un détecteur à scintillation amplifie le signal et compte les photons émis par le détecteur, ce qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement.
- **La radiographie** utilise la propriété des émulsions photographiques de réagir sous l'effet de rayons ionisants. Son utilisation en médecine est bien connue avec les appareils à rayons X.
- **Les dosimètres** mesurent la dose radioactive cumulée à laquelle une personne a été exposée pendant une durée de temps déterminée. Ils utilisent diverses techniques. Une des plus utilisée repose sur la capacité de certains sels de piéger les charges provoquées par les rayons ionisants. La lecture se fait sous l'impulsion de flash extérieurs qui libèrent les électrons piégés et induit une lumière qui est proportionnelle à la dose d'irradiation reçue.



⁵ la ionisation charge électriquement les molécules d'un gaz et le rend alors conducteur de l'électricité.



Pénétration des divers constituants de la radioactivité dans le corps

Les unités de mesure de la radioactivité

On utilise trois unités de mesure de la radioactivité suivant qu'on considère l'activité d'une source radioactive, la dose reçue par le corps humain ou les effets biologiques provoqués par le rayonnement. Ces trois unités sont :

- **le Becquerel [Bq]** qui mesure l'activité d'une substance radioactive. Il correspond à une désintégration par seconde. C'est une unité très petite aussi utilise-t-on des multiples : kilobecquerel, mégabecquerel, etc.. Il a remplacé le curie [Ci], une ancienne unité⁶. Cette unité nous renseigne sur le nombre de désintégrations mais ne donne aucune indication ni sur l'énergie du rayonnement ni sur leur effet sur l'homme.
- **le Gray [Gy]** qui mesure la dose radioactive reçue par le corps. Il correspond à l'absorption de un joule par masse de 1 kg. Cette dose est déjà très élevée. Appliquée à l'ensemble du corps c'est le seuil d'apparition du syndrome d'irradiation aiguë qui provoque finalement la mort. Aussi utilise-t-on des sous-multiples le milligray (mGy un millième de Gray) et le nanogray (nGy), un milliardième de Gray.
- **le Sievert [Sv]** qui mesure l'effet biologique provoqué par un rayonnement ionisant. Il mesure donc la dose reçue. Il est équivalent à un Gray mais doit être pondéré par les effets et la nature du rayonnement qui ne sont pas les mêmes suivant qu'il s'agit de protons ou de rayons gamma et de la nature de l'organe qui a été exposé. Pratiquement on utilise le millisievert (mSv).

Dans le domaine médical, le gray définit la dose absolue d'irradiation subie. C'est donc une approche objective de l'irradiation sur des organismes vivants. Un être humain soumis à un Gy verra sa santé s'altérer rapidement et durablement. Une exposition de 10 Gy entraîne une mort certaine. Au delà de 30 Gy la mort est instantanée.

Le Sievert est une variante pondérée du Gray qui prend en compte les effets spécifiques sur la santé. A énergie égale, l'impact des particules alpha est plus significatif que les rayonnement bêta et gamma. De même la vulnérabilité des divers tissus du corps n'est pas la même vis-à-vis d'un rayonnement ionisant. A rayonnement égal, le foie est beaucoup sensible que les poumons.

⁶ unité ancienne correspondant à l'activité de 1 g de radium 226. Il correspond à 3.7×10^{10} désintégrations par seconde.

Effets physiologiques de la radioactivité

Les particules α sont donc des noyaux d'atomes d'hélium privés de leurs 2 électrons. Elles cherchent donc à récupérer leurs électrons. En prélevant des électrons à des cellules de la peau cela provoque des brûlures : ce sont les **brûlures radioactives**.

Une particule β est un électron animé d'une grande vitesse. En heurtant la peau, son énergie est suffisante pour expulser un électron des atomes qu'elle rencontre et cause aussi une **brûlure radioactive**.

Un rayonnement γ est comparable à un rayonnement X extraordinairement énergétique. Il peut aussi percuter un atome, arracher des électrons et provoquer encore une **brûlure radioactive**.

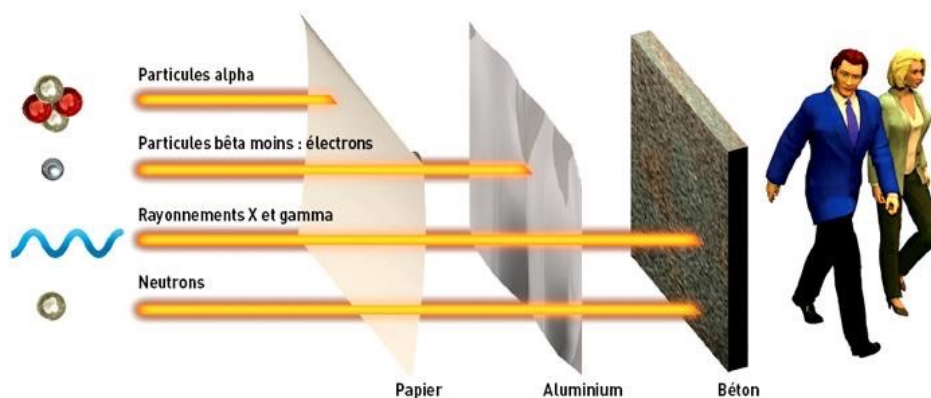
Mais, à cause de sa grande énergie il peut pénétrer plus à l'intérieur du corps, provoquer soit des brûlures radioactives plus profondes soit encore il peut briser des molécules au sein de nos cellules voire même perturber des cellules de notre ADN. Cela peut provoquer des mutations ou des cancers.

Il faut signaler encore l'effet des neutrons qui ne figurent pas parmi les particules produites par la radioactivité mais qui sont émis lors de la fission nucléaire. Les neutrons peuvent s'incorporer dans le noyau d'atomes inoffensifs et les transforment ensuite en des isotopes radioactifs. C'est là que réside leur dangerosité. Il est donc impératif de se protéger des sources radioactives.

Comment s'en protéger

La dangerosité est due surtout aux rayons gamma et aux rayons X. Le rayonnement alpha, arrêté par l'air et les vêtements ne pénètre pas au-delà des cellules mortes de la couche supérieure de la peau. Une grande partie du rayonnement bêta est généralement arrêté avant d'atteindre la peau, mais ce rayonnement est plus pénétrant et peut atteindre des couches internes. Plus la source est intense et proche de la peau, plus l'atteinte aux tissus vivants sera importante.

Les rayons gamma, tout comme les rayons X, ne peuvent jamais être totalement arrêtés. Ils feront sentir leur effet au-delà des couches de la peau, à l'intérieur du corps.



Ecrans permettant d'arrêter les radiations radioactives

A quelles doses sommes nous exposés dans notre environnement ?

On estime que nous sommes soumis naturellement à une dose annuelle de 2.4 mSv/an. Cette dose provient essentiellement de la radioactivité naturelle du sol et des rayons cosmiques. Cette valeur est un peu plus élevée pour les populations qui résident dans des régions granitiques.

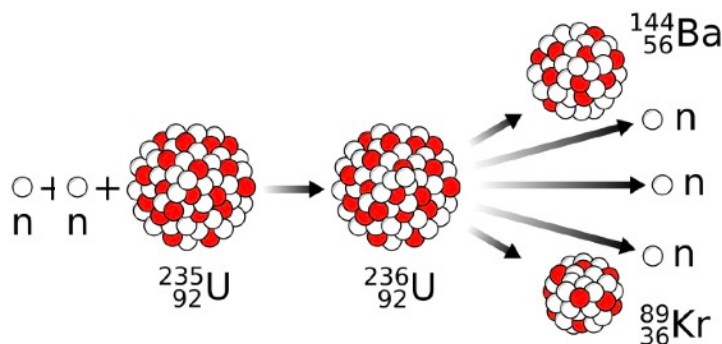
Une radiographie pulmonaire vous expose à une dose de 7 mSv. Un cosmonaute qui stationne durant 6 mois dans une station orbitale reçoit 80 mSv à cause des rayons cosmiques.

Un fumeur moyen est beaucoup plus exposé : il ingère environ 160 mSv/an alors que la dose maximum admissible pour un travailleur d'une centrale nucléaire est de 20 mSv/an. En effet, les feuilles de tabac renferment des doses très faibles de Polonium 210 (^{210}Po) provenant des engrais phosphatés utilisés pour sa culture.

Au cours de cette cascade de transformations successives de l'uranium vers le plomb, on voit apparaître le **radium** que Marie Curie avait identifié dans les minerais d'uranium. Cet élément a pendant longtemps suscité de l'intérêt : il rendait les peintures phosphorescentes. On a alors confectionné les cadrans de montre dont les aiguilles et les chiffres étaient peints avec des substances à base de radium. On ignorait tout des effets néfastes de la radioactivité sur les tissus vivants. Ce n'est que plus tard qu'on s'est aperçu de sa nocivité et les ouvrières qui confectionnaient ces cadrans ont payé de leur vie les effets dangereux de la radioactivité.

La fission nucléaire, une nouvelle source de radioactivité⁷

La radioactivité est un phénomène qui ne peut être ni accélérée ni ralentie. Par contre les scientifiques ont découvert qu'ils pouvaient à leur guise provoquer la fission de certains éléments instables, en particulier ^{235}U .

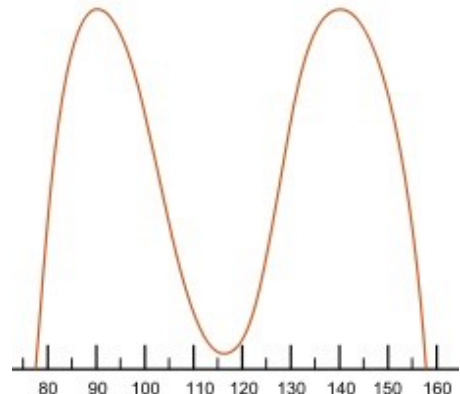


Dans l'exemple ci-dessus, avoir absorbé un neutron l'atome ^{235}U se transmute en un atome ^{236}U très instable qui éclate immédiatement en 2 atomes, ici ^{144}Ba et ^{89}Kr qui sont des isotopes radioactifs très instables. La fission nucléaire dégage une quantité énorme d'énergie et a conduit à la construction des centrales nucléaires qui nous alimentent en électricité.

⁷ Pour plus de détails, consultez, du même auteur, "Presque tout sur les déchets nucléaires"

Mais la transformation du combustible nucléaire à l'intérieur d'un réacteur induit la formation de trois catégories de sous-produits radioactifs. C'est ce qu'on appelle les déchets nucléaires. Ce sont :

1. **Les produits de fission** sont les éléments engendrés principalement par la fission de l'uranium et, dans une moindre mesure, par celle du plutonium qui se forme au cœur des réacteurs dans le combustible par capture de neutrons. Au cours de la fission un atome d' ^{235}U se divise en deux atomes d'éléments communs du tableau périodique : statistiquement on trouve un petit atome dont le poids atomique est compris entre 90 et 100 et un gros atome dont le poids atomique est compris entre 133 et 144. Ce sont tous des isotopes radioactifs possédant un excès de neutrons. Ils sont extrêmement radioactifs mais leur période est généralement très courte et leur radioactivité diminue rapidement.



Courbe de la probabilité de formation des éléments de fission de l' ^{235}U .

2. **Les actinides**⁸ sont des éléments très lourds, inexistant dans la nature, situés sur le tableau périodique au delà de l'uranium, et qui sont produits par capture de neutrons par l'uranium sans qu'il y ait fission. Le principal d'entre eux est le plutonium dont la quantité produite est de plus de 9 kg par tonne de combustible usagé. La quantité des autres actinides dits "mineurs" est d'environ 600 grammes par tonne de combustible. À part le plutonium, ces actinides sont principalement le neptunium, l'américium et le curium. Les autres actinides mineurs, le berkélium, le californium, l'einsteinium, le fermium, le mendelevium, le nobélium et le lawrencium n'ont qu'une existence anecdotique extrêmement éphémère.

3. **Les produits d'activation** issus de l'irradiation par les neutrons des matériaux qui entourent le cœur du réacteur (activation neutronique). Par exemple, le cobalt ^{59}Co se transforme en ^{60}Co . Ces produits ont presque tous une demi-vie assez courte.

L'industrie nucléaire s'occupe de ses déchets

Contrairement aux promoteurs de centrales thermiques qui rejettent leurs déchets dans l'atmosphère, les responsables des centrales nucléaires ont la responsabilité de traiter leurs déchets radioactifs. Ils s'en occupent très sérieusement et aucun déchet n'est abandonné dans la nature. Le traitement de ces déchets fait l'objet d'une autre publication "**Presque tout sur les déchets nucléaires**".

⁸ l'uranium et le plutonium sont appelés actinides majeurs. Le neptunium, l'américium et le curium sont désignés sous le terme d'actinides mineurs.