

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.

Oui, Henri Becquerel a découvert que des sels d'uranium émettaient un rayonnement inexpliqué qu'il a baptisé « rayon uranique ». Puis Marie et Pierre Curie ont découvert d'autres éléments, le polonium et le radium qui émettaient un rayonnement beaucoup plus puissant que celui produit par l'uranium, rayonnement mystérieux auquel ils ont donné le nom de radioactivité.

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 manifestations de la radioactivité.

Mais voilà, si la vitesse du processus de décroissance radioactive est immuable, les physiciens sont parvenus à provoquer à leur guise le processus de la fission. Cela a permis la mise au point des armes nucléaires mais aussi, pour un usage pacifique, des centrales nucléaires productrices d'électricité sans émission de CO₂.

Ces usages nouveaux, entrepris pour nous approvisionner en énergie, ont considérablement augmenté la production de matières radioactives issues des processus de fission. Les physiciens nous assurent que la maîtrise de ces phénomènes est assurée.

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.

Qu'est-ce que la radioactivité ?

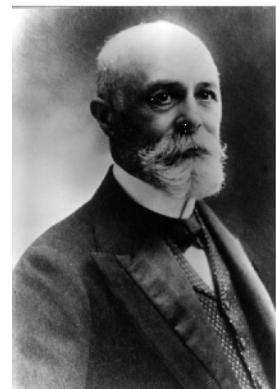
Selon la définition des physiciens, la radioactivité est un phénomène physique au cours duquel certains atomes, dont la structure nucléaire est instable, émettent des particules matérielles, noyaux d'hélium, électrons, neutrons ainsi que de l'énergie sous forme de photons et d'énergie cinétique.

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 photographiques. 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 minéral d'uranium, présente une activité beaucoup plus intense que celle de l'uranium.

Avec son mari Pierre Curie, elle découvre dans ces minéraux 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.

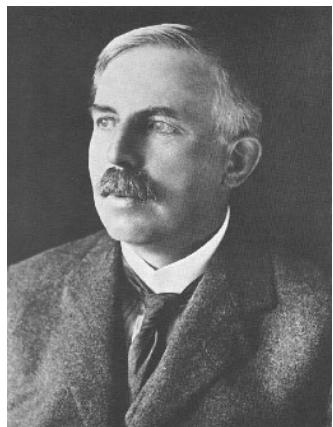


Marie et Pierre Curie

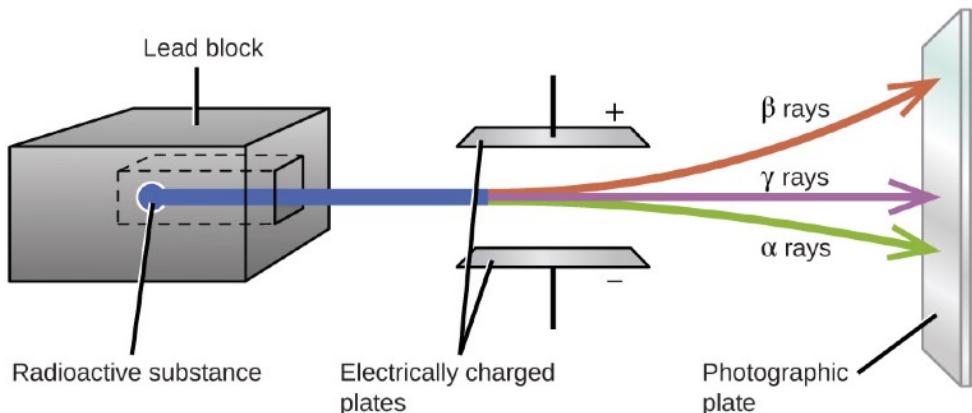
Nature de la radioactivité

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 un champ magnétique, il fut conduit à distinguer trois sortes d'émissions :

- les *rayons alpha* [α], constitués de particules relativement massives chargées positivement,
- les *rayons bêta* [β], constitués d'électrons,
- les *rayons gamma* [γ], 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 gron¹ - sont porteurs 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.

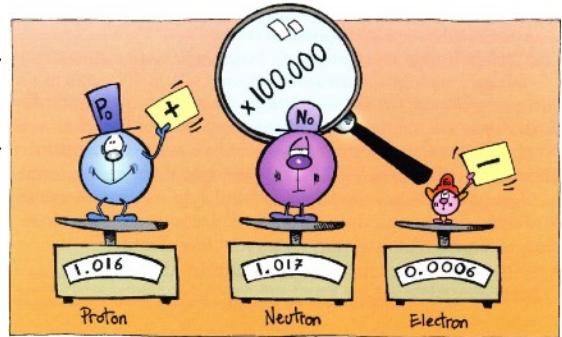
¹ C'est une unité imaginaire utilisée uniquement dans le "Monde étrange des Atomes". En réalité, c'est le poids, exprimé en grammes, de 602.488 milliards de milliards d'atomes d'hydrogène. Ce grand nombre est connu sous le nom de "Nombre d'Avogadro" (célèbre chimiste italien, 1776-1856). On peut ainsi 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 1.66×10^{-24} gr.

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.

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 des forces très puissantes, formant un noyau dont le rayon est environ 100.000 fois plus petit que celui de l'atome lui-même !

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.

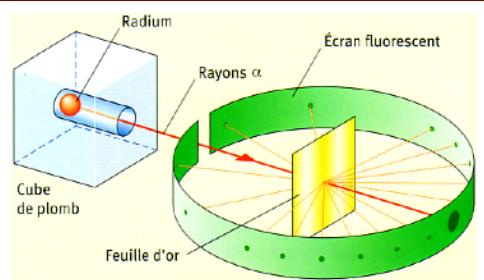
Toutes les réactions chimiques qui font vivre cette matière dépendent uniquement du comportement des électrons et les chimistes ne se soucient pas vraiment de l'architecture du noyau des atomes.

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.



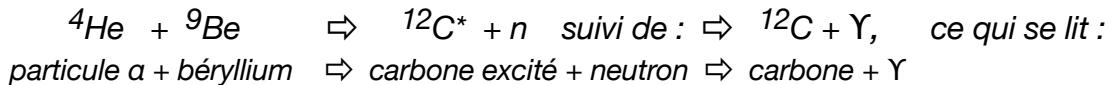
Le proton identifié comme un constituant du noyau

Dès la fin du 19e siècle, on avait imaginé que les noyaux des atomes pourraient être constitués de particules semblables à des atomes d'hydrogène. Cette hypothèse était suggérée par le fait que les masses des atomes sont approximativement des multiples entiers de la masse de l'atome d'hydrogène. C'est en 1919, que Rutherford, toujours lui, démontre que le noyau des atomes est constitué de particules chargées positivement qu'il baptise **protons**. Le noyau de l'hydrogène est donc constitué d'un seul proton.

Découverte du neutron

Dès 1920, Rutherford avait aussi émis l'hypothèse de l'existence d'une particule neutre de masse un et qui ne serait pas de l'hydrogène.

James Chadwick, un assistant de Rutherford, se souvint de l'hypothèse de son patron, il entreprit de bombarder une cible de beryllium par des particules α et, à l'aide de détecteurs très sensibles. Il mit en évidence que la réaction correspondait au schéma suivant :



Chadwick avait donc identifié en 1932 cette particule mystérieuse qu'était le neutron. Il reçut le prix Nobel en 1935 pour cette découverte.

Approche de l'architecture de l'atome

Rutherford imagina, en 1911, un modèle dit planétaire avec un noyau chargé positivement et renfermant la plus grande part de la masse de l'atome, séparé, par du vide, des électrons qui tournent autour de ce noyau comme les planètes autour du Soleil. Les neutrons, qui n'avaient pas encore été découverts, n'étaient évidemment pas pris en considération.

Suspicions de l'existence d'une force nouvelle

C'est en 1935 qu'un chercheur japonais, Hideki Yukawa, imagina qu'il devait exister une force nucléaire puissante qui devait lier les protons et les neutrons. Mais la théorie de Yukawa était incomplète et ne donnait pas de résultats vraiment satisfaisants. Il reçut le prix Nobel de physique en 1949 pour sa prédiction de l'existence des **mésons** à partir de travaux théoriques sur les forces nucléaires.



Hideki Yukawa,
1907-1961,

Il fut le premier Japonais à recevoir un prix Nobel. Mentionnons aussi le Suisse Ernst Stuekelberg qui, indépendamment de Hideki Yukawa, avait prévu la même année le mécanisme de l'interaction forte.

Puis les quarks sont apparus

*Ce n'est qu'en 1964 que 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**.*

Quarks	<i>Préssenti par Murray Gell-Mann en 1960 Mis en évidence par Hames Bjorken et Richard Feynman en 1969</i>	
	Quark up [u]	Quark down [d]
<i>Masse :</i>	<i>1,7 à 3,3 MeV/c²</i>	<i>4.1 à 5.8 MeV/c²</i>
<i>Charge électrique :</i>	<i>+ 2/3</i>	<i>- 1/3</i>
<i>Espérance de vie :</i>	<i>stable</i>	<i>stable</i>
<i>Sensible aux quatre forces, constituants des neutrons, des protons et des mésons.</i>		

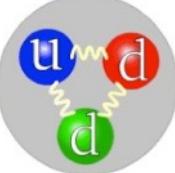
Anatomie des protons et des neutrons

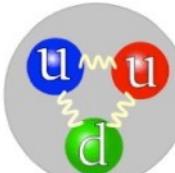
Les protons et les neutrons, que les chimistes croyaient être des particules élémentaires, sont, donc, selon les physiciens, des particules composites constituées de quarks.

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.

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.

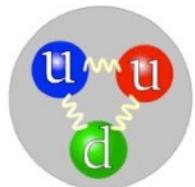
Neutron	<i>Identifié en 1937 par James Chadwick.</i>	
<i>Symbol : n, n⁰</i>	<i>Masse :</i>	<i>939,2565 MeV/c² (1.674'927 x 10⁻²⁷ kg)</i>
<i>Famille des fermions</i> <i>Groupe des baryons</i>	<i>Charge électrique:</i>	<i>nulle</i>
	<i>Espérance de vie :</i>	<i>- 885 secondes hors du noyau, - stable à l'intérieur du noyau.</i>
 <ul style="list-style-type: none"> - 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	<i>Découvert en 1919 par Ernest Rutherford.</i>	
<i>Symbol : p, p⁺</i>	<i>Masse :</i>	<i>938,272 MeV/c² (1.672'649 x 10⁻²⁷ kg)</i>
	<i>Charge électrique:</i>	<i>+1</i>
	<i>Espérance de vie :</i>	<i>stable (supérieure à 10³⁰ ans)</i>
 <ul style="list-style-type: none"> - Le neutron est constitué de deux quarks up et d'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. 		

Les quarks sont donc des briques élémentaires

Les quarks sont d'extrêmement petites particules. Ils ne peuvent pas exister de manière isolée. Ils ont l'instinct grégaire. Dans la matière ordinaire, ils sont toujours confinés trois par trois. Le quark up porte une charge électrique de $+ \frac{2}{3}$, le quark down une charge de $- \frac{1}{3}$. Ces quarks sont sensibles à une "force nucléaire" connue sous le nom d'**interaction forte**. Il y a plusieurs sortes de quarks :

- le quark up porte une charge électrique de $+ \frac{2}{3}$,
- le quark down une charge de $- \frac{1}{3}$.



Ces quarks¹ baignent dans le champ de l'interaction forte. Cette interaction s'effectue par l'intermédiaire d'une brigade de gluons (en blanc sur le schéma) qui lient les quarks très fortement ensemble. Il est impossible d'isoler un quark et aucun accélérateur n'est encore assez puissant pour le faire. Toutefois, au cours du premier millionième de seconde d'existence de l'univers, la température a dû être suffisamment élevée pour que l'agitation thermique empêche l'interaction forte de confiner les quarks.

Mais très vite cette dernière a pris le dessus et a obligé les quarks à s'associer trois par trois pour constituer les protons et les neutrons ou deux par deux (un quark et un anti-quark) pour constituer les **mésions**, des particules très éphémères dont nous parlerons plus loin.

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*.

Cette force s'exerce à l'intérieur des protons et des neutrons. Elle maintient solidement soudés les quarks grâce à une brigade de gluons, des particules qui sont les vecteurs de cette force. Cette force a une particularité bien singulière : contrairement aux autres forces, elle est d'autant plus forte que les quarks s'éloignent. Elle agit un peu comme un élastique dont la force augmenterait avec la distance. A l'intérieur d'un proton ou d'un neutron les quarks sont assez libres mais dès qu'ils cherchent à s'écartez un peu, ils sont vigoureusement rappelés à l'ordre par les gluons.

Les gluons présentent encore une autre propriété : parfois deux d'entre eux s'échappent hors d'un neutron ou d'un proton, se transforment en une particule extrêmement éphémère, un **mésion**, constitué d'une paire de quarks, qui se dirige et pénètre à son tour à l'intérieur d'un autre proton ou neutron ou il se retrouve en 2 gluons. Par ce mécanisme, ces mésions sont les vecteurs de la **force nucléaire forte** qui assure le confinement des protons et des neutrons au sein du noyau et dont ils assurent la stabilité.

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**.

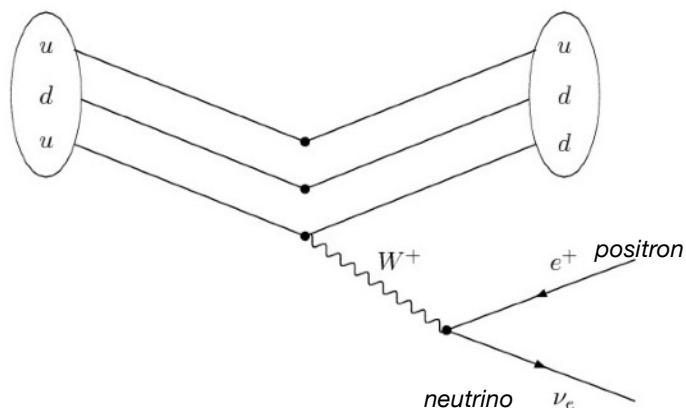
¹ Il y a encore d'autres quarks très rares à l'existence très éphémère.

L'interaction faible est à l'origine de la radioactivité

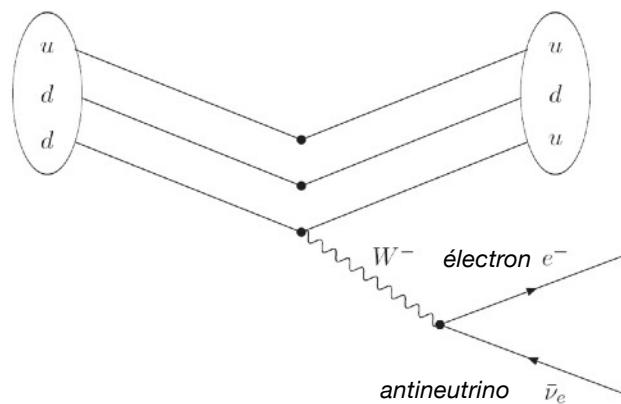
Ce bouillonnement constant provoque la transmutation de protons en neutrons ou de neutrons en protons. Parfois, excédés par cette animosité incessante, il arrive que des noyaux d'atome s'auto-mutilent, engendrant ainsi le phénomène de la radioactivité, voire même, plus rarement, celui de la fission des 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 électron 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



On doit à Richard Phillips Feynman (1918-1988) un physicien américain, l'un des plus influents de la seconde moitié du 20e siècle, les diagrammes qui portent son nom et permettent de visualiser les transformations de particules.

Les atomes qui constituent notre environnement

Les scientifiques ont identifié dans la nature 92 familles 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 prométium qui ne comportent aucun isotope stable et se désintègrent rapidement avec des périodes respectives de 1.5 millions d'années pour le technétium et 2.5 ans pour le prométium. Notons tout de même que les hommes ont réussi à ressusciter le technétium dans les déchets nucléaires.



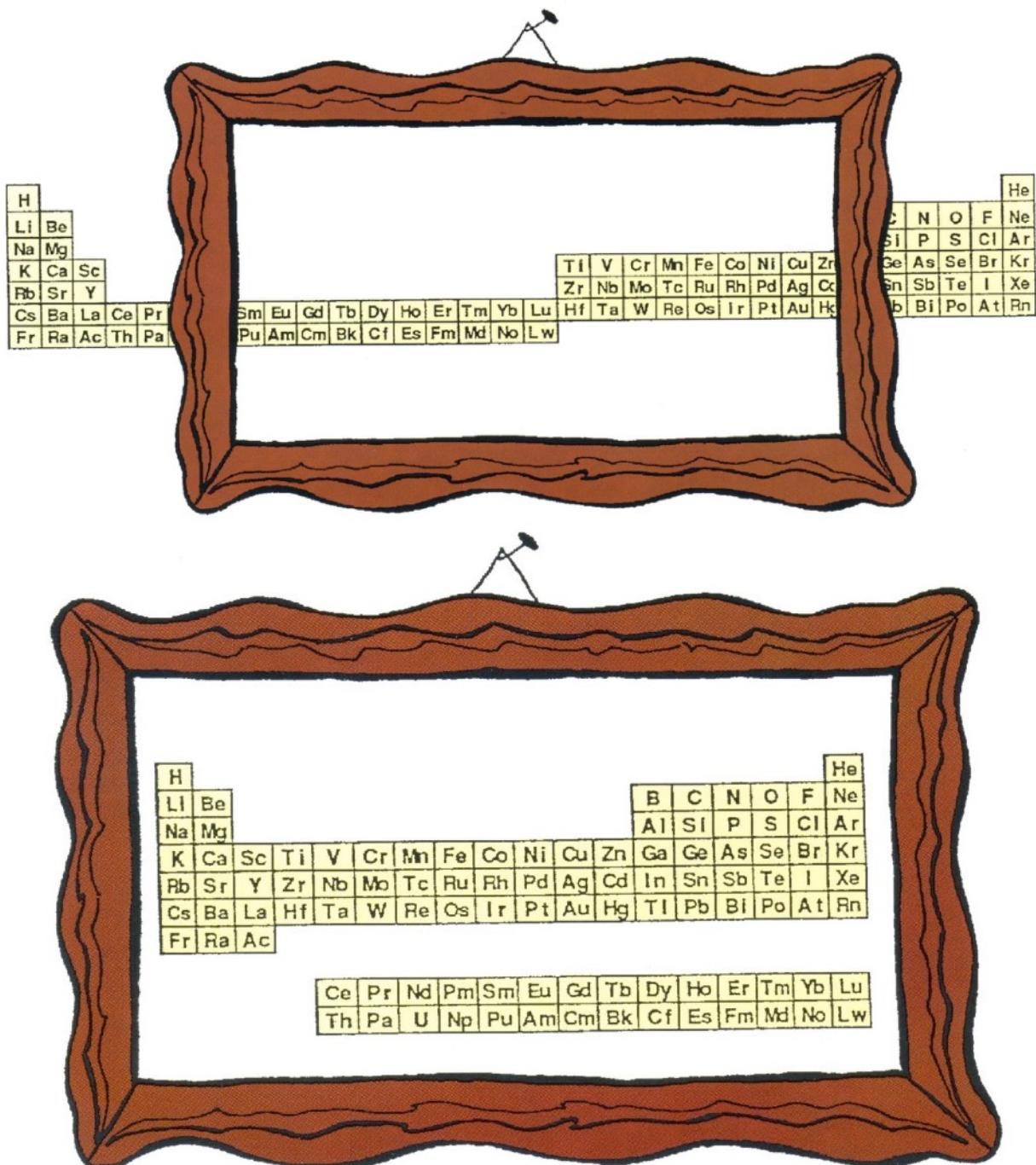
Deux familles, Prométhium et Technétium, prématulement disparues pour cause de décroissance radioactive foudroyante.

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. Il est donc à l'origine du tableau périodique bien connu de tous les chimistes.

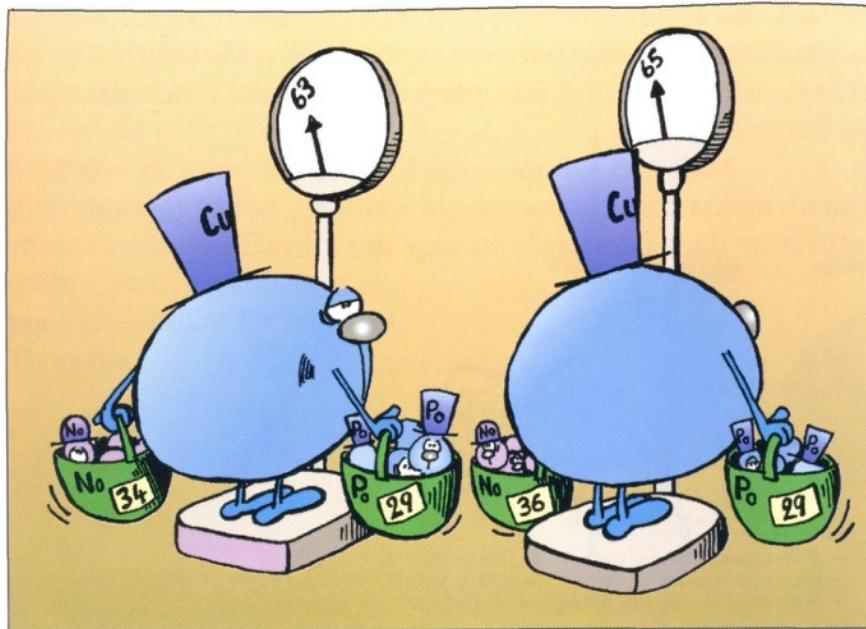
Aujourd'hui, les chimistes ne se séparent jamais cette disposition qu'ils ont baptisée prosaïquement "**Tableau périodique des éléments**". Ils ont enfermé les atomes dans des "cases" à l'intérieur desquelles ils ont inscrit les principales caractéristiques de chacun d'eux : nom, symbole, numéro d'ordre (ou numéro atomique), poids atomique.



De haut en bas, la disposition des atomes sur ce tableau est donc basée sur des périodicité de 2, 8, 16 et 32. La disposition normale n'est donc pas très commode: Les rangées supérieures sont très clairsemées et celles du bas très étendues. Il était 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 l'habitude de retrancher 14 atomes de chacune des rangées les plus longues (celles de 32 places) pour les disposer sur deux rangées supplémentaires en bas à droite.

Qu'est-ce qu'un isotope ?

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 membres de la famille Cuivre ne font pas le poids : ils manquent de neutrons..

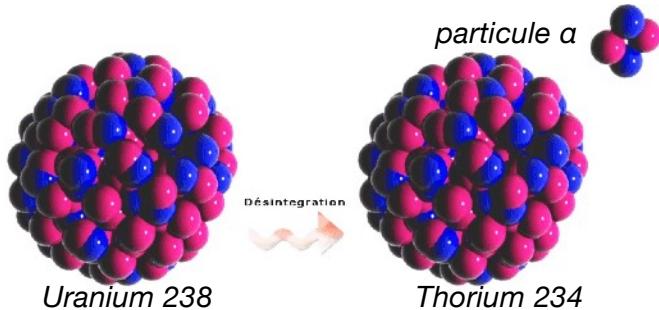
Certains atomes de Cuivre pèsent 63 grons, d'autres 65 grons. Le cuivre qu'on trouve dans la nature est constitué de 69% de l'isotope ^{63}Cu et 31% de l'isotope ^{65}Cu . Le poids atomique du cuivre (qui figure dans la grande photo) est une moyenne pondérée des poids de ^{63}Cu et ^{65}Cu , soit 63.546.

Les isotopes les plus connus dans le public sont le carbone 14 (^{14}C) qui est utilisé pour dater certains objets préhistoriques, le cobalt 60 (^{60}Co) utilisé en médecine et l'uranium 235 (^{235}U) utilisé dans les centrales nucléaires conventionnelles.

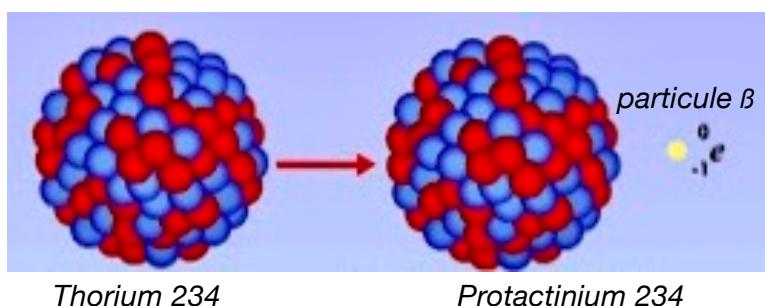
La décroissance radioactive

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.



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 donc peu radioactifs.

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 Skłodowska*				
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).	
Etat	N° atomique	Symbol	Poids	Rémission	Emission	Symptômes
Uranium 238	92	^{238}U	238	4.5×10^9 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

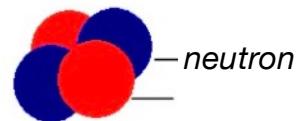
Ce schéma de décroissance radioactive existe pour chacun des isotopes radioactifs d'éléments dont le noyau est instable.¹ On remarque que ^{234}U , ^{230}Th et ^{226}Ra auraient dû disparaître de la nature comme le Prométhium et le Technétium, mais, à la différence de ces derniers, ils se recréent en permanence au cours du processus 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"**^{[α], 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 MeV² 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"**^[β], 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"**^[γ], 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.



¹ Pour plus de détails, consulter du même auteur le texte "Au cœur de l'atome"

² L'électron-volt est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt.

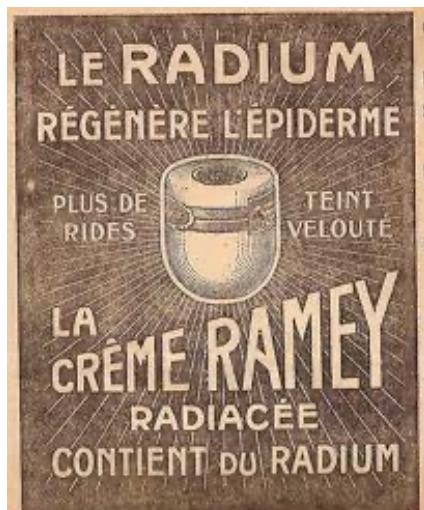
1 MeV correspond à un million d'électrons-volts

Folies autour de la radioactivité

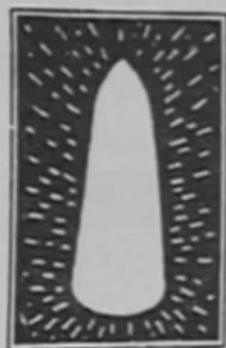
Le radium a très vite suscité de l'intérêt et, peu après la découverte de la radioactivité, de très nombreuses firmes commerciales ont mis sur le marché de produits radioactifs censés apporter de nombreux bienfaits pour le corps.

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 cadans 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



Actual Size of
Suppository

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.

HISTORY

La fission de certains atomes

Beaucoup plus rarement, un autre phénomène peut atteindre certains atomes instables : la **fission** qui est la rupture brutale d'un noyau, donnant naissance à 2 fragments plus petits qui sont projetés avec une extrême violence loin l'un de l'autre et constituant, comme stade final, deux atomes plus petits. C'est le phénomène de la **fission spontanée**. Elle s'accompagne d'un dégagement énorme d'énergie. L'uranium 238 (^{238}U) est sujet à la fission spontanée. Mais la probabilité de fission est environ un million de fois moindre que celle de subir la décroissance radioactive. C'est donc un phénomène naturel d'une extrême rareté.



Fission d'un atome d'uranium 238.

Dans l'exemple choisi, les produits de fission sont le césium et le molybdène plus quelques

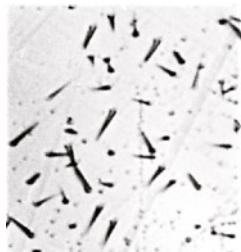
Les minéraux peuvent enregistrer la fission spontanée de ^{238}U

L'uranium est omniprésent en faible quantité dans les roches de composition granitique. On le trouve piégé dans les minéraux accessoires de ces roches, principalement dans le zircon et l'apatite. Lorsqu'un atome de ^{238}U subit la fission, les deux fragments produits s'éloignent l'un de l'autre à grande vitesse et provoquent une lésion dans le réseau cristallin du minéral hôte. Autour de cette lésion, la solubilité du minéral vis-à-vis d'un agent corrosif est plus importante que dans la région saine. On peut donc "révéler" par une attaque chimique appropriée la densité des événements de fission enregistrés dans le minéral. Les deux fragments expulsés lors de la fission sont des éléments courants du tableau périodique mais qui ont la désagréable propriété de renfermer un excès de neutrons qui rend leur noyau instable : ils sont donc devenus radioactifs. Dans l'opération il y a encore expulsion de 2 ou 3 neutrons.



Traces de fission développées sur une surface polie d'un cristal d'apatite, traitée à l'acide chlorhydrique.

Chaque trace correspond à la fission d'un seul atome de ^{238}U .

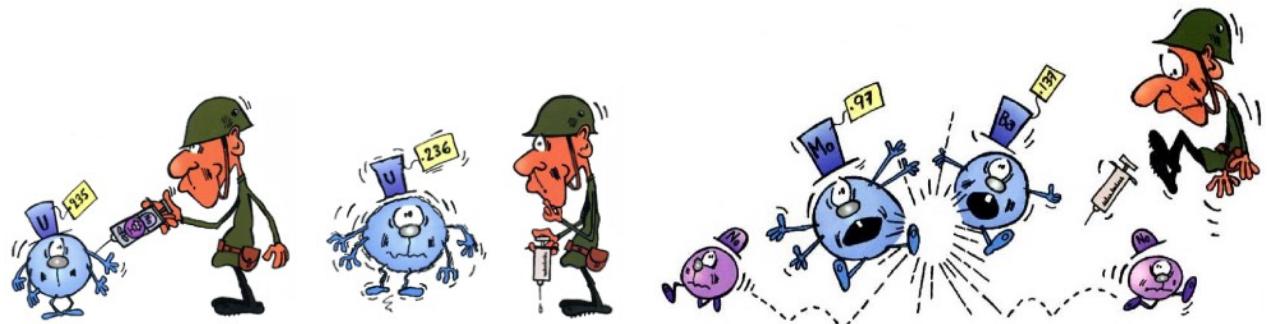


On peut provoquer la fission de certains atomes

Mais voilà, les physiciens ont découvert qu'il était possible de provoquer à volonté la fission de certains atomes. C'est la **fission induite**. Par exemple, si on envoie un neutron sur un atome d' ^{235}U , cela peut provoquer sa fission.

Que se passe-t-il alors ? Après qu'on lui ait inoculé un neutron, le pauvre ^{235}U s'alourdit et se transforme en ^{236}U , un gros lourdaud de la famille Uranium qui n'arrive plus à maintenir toutes ensemble les particules de son noyau. Comme une goutte d'eau qui devient trop grosse et se divise en deux gouttelettes plus petites, le pauvre ^{236}U éclate et se fragmente en deux atomes plus petits, expulsant en même temps deux ou trois neutrons. Ces neutrons excédentaires peuvent à leur tour induire la fission d'autres atomes ^{235}U .

Mécanisme de la fission induite



On injecte un neutron à un atome ^{235}U .

Alourdi d'un neutron, il se transforme en ^{236}U , un isotope très instable

Celui-ci se brise alors brutalement en 2 atomes plus légers (ici ^{97}Mo et ^{137}Ba) et libère un plus 2 neutrons.

Un amaigrissement incompréhensible

Si l'on pèse les deux atomes nouveaux plus les deux ou trois neutrons produits, on a la surprise de constater qu'on n'arrive pas tout à fait au poids que montrait notre patient ^{236}U , juste avant sa crise.



Il y a donc eu disparition d'un petit peu de matière au cours de cette fission. Et nous savons, grâce à Einstein, que cette matière s'est transformée en énergie selon la relation fameuse:

$$E = m \times c^2$$

Ce qui signifie en clair : l'Energie [E] est égale à la masse disparue [m] multipliée par le carré de la vitesse de la lumière [c^2]

Ce processus de fission produit environ 200 millions de fois plus d'énergie par atome éclaté que celle que peut produire une molécule dans la réaction chimique la plus violente! Voilà donc un procédé bien séduisant pour se procurer de grandes quantités d'énergie !

Mais que deviennent les neutrons ?

En inoculant un neutron dans le noyau du pauvre ^{235}U , il s'est transformé en ^{236}U qui s'est brisé, qui a libéré de l'énergie et abandonné un surplus 2 ou 3 neutrons errants¹. Que vont devenir ces neutrons ? Ils sont expulsés dans la matière à grande vitesse. Comme ils sont neutres, ils ne sont pas influencés par les orbites électroniques des atomes qu'ils pourraient rencontrer et, pour provoquer une nouvelle fission, ils doivent impérativement frapper de plein fouet un noyau d' ^{235}U .

Mais la cible est très petite et la probabilité de rencontrer un noyau d'Uranium pour le briser en deux demeure extrêmement faible. Par ailleurs, les neutrons sont eux-mêmes atteints de décroissance radioactive foudroyante qui les transforme très rapidement en un proton plus un électron².

On peut tout de même influencer la chance

Les Terriens sont astucieux et savent modifier cette probabilité de fission de ^{235}U par un neutron en combinant deux actions :

1. En augmentant la concentration des atomes d' ^{235}U .

Dans l'uranium naturel extrait des mines, il n'y a que 0.7% d' ^{235}U contre 99.3 % d' ^{238}U . On procède alors à l'enrichissement en ^{235}U dans de coûteuses usines, ce qui augmente le nombre de cibles par unité de volume. Pour les usages courants, on l'enrichit généralement aux alentours de 3%. On peut augmenter cet enrichissement autant qu'on le désire. Mais on ne le fait effectivement qu'à la demande des militaires, qui en ont besoin pour des usages bien particuliers.

2. En ralentissant les neutrons

Les neutrons produits dans une réaction de fission sont trop rapides pour espérer pouvoir accrocher au passage un autre ^{235}U . Aussi va-t-on, à l'aide d'un modérateur, les ralentir pour les rendre plus "virulents". On place sur leur passage des atomes légers, Messieurs Hydrogène, Béryllium ou Carbone, par exemple. Les chocs successifs avec ces atomes légers vont augmenter la vitesse de ces derniers et ralentir les neutrons.

En combinant ces deux conditions, on augmente l'efficacité des neutrons errants. Il devient alors possible de réaliser et d'entretenir une réaction en chaîne et, si on sait la contrôler, on peut du même coup construire une centrale nucléaire!

¹ appelés neutrons prompts par les physiciens

² il faut encore mentionner l'émission d'un neutrino, cette particule quasi indétectable qui emporte une partie de l'énergie dégagée.

Comment fonctionne une centrale nucléaire ?

Les centrales nucléaires peuvent différer les unes des autres par les caractéristiques du combustible, par la nature du milieu ralentisseur de neutrons, et par le système d'échangeur de chaleur entre le réacteur et la turbine. Mais le principe du fonctionnement est toujours à peu près le même.

Le combustible est constitué de barres d'uranium enrichi à environ 3 % d' ^{235}U . Ces barres sont plongées dans de l'eau qui ralentit (grâce à M. Hydrogène) les neutrons émis par la fission d'atomes d' ^{236}U , leur permettant à leur tour de provoquer la fission d'autres atomes.

Ces réactions de fission dégagent une chaleur énorme qui permet de produire la vapeur nécessaire au fonctionnement d'une turbine, qui entraîne à son tour un générateur électrique.

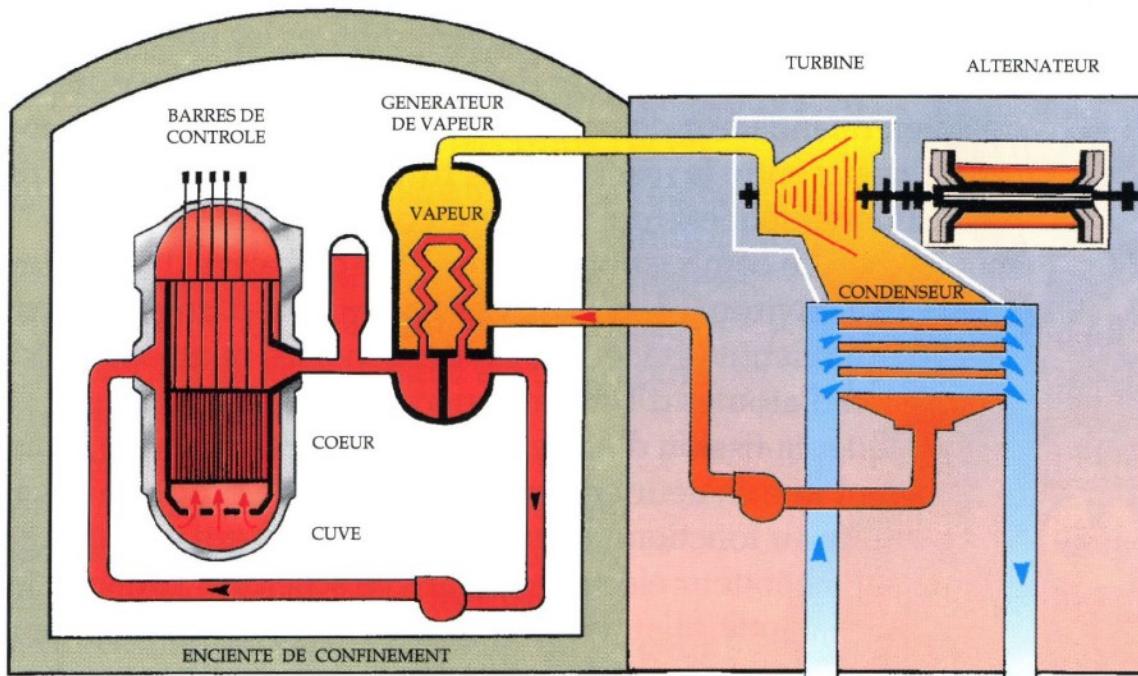


Schéma simplifié d'une centrale nucléaire.

Dans ce schéma, l'eau joue le rôle double de modérateur de neutrons et de liquide caloporteur qui permet le transfert de l'énergie vers la turbine.

Pour arrêter la réaction, on laisse tomber dans le réacteur des barres de bore ou de cadmium qui ont la propriété d'absorber les neutrons et, par conséquent, d'interrompre la réaction.

On peut aussi construire aussi une bombe atomique

Les neutrons se déplacent à grande vitesse et, par le fait qu'ils n'ont aucune charge électrique, ils passent à travers les nuages électroniques des atomes sans les perturber. Il faut vraiment qu'ils heurtent le noyau d'un atome d'Uranium pour s'y incorporer. Or les noyaux étant des millions de fois plus petits que les atomes eux-mêmes, les neutrons peuvent traverser une certaine masse d'Uranium sans rencontrer un noyau et fuir hors de la matière. Pour augmenter la probabilité de collision, il faut augmenter la concentration de l'uranium naturel en ^{235}U ou ralentir les neutrons, ou encore combiner ces deux actions.

Ainsi donc, si on réussit à rassembler une masse suffisamment importante d' ^{235}U débarrassé de son cousin ^{238}U (enrichissement à 100 %), on peut provoquer une réaction en chaîne. Cela signifie que, dès qu'il y a fission spontanée d'un seul atome, les neutrons produits vont à leur tour provoquer la fission d'autres atomes voisins, qui libèrent à leur tour de nouveaux neutrons qui vont provoquer d'autres fissions. Le nombre des événements de fission se multiplie alors avec une vitesse prodigieuse, dégageant une énergie colossale dans un laps de temps très court : c'est une explosion nucléaire !

Heureusement pour nous, ces conditions ne sont jamais remplies dans les centrales nucléaires et toute explosion nucléaire y est impossible !

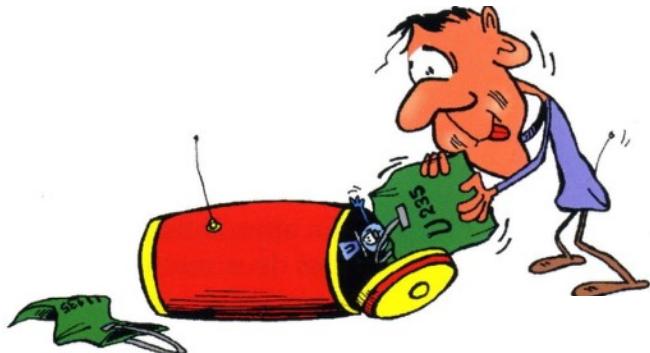
La masse minimum nécessaire pour qu'il y ait réaction en chaîne s'appelle la **masse critique**. Cette masse est de l'ordre d'une vingtaine de kg pour l' ^{235}U . Nous avons donc en main tous les éléments pour construire une bombe atomique et le schéma ci-dessous vous en donne la recette !



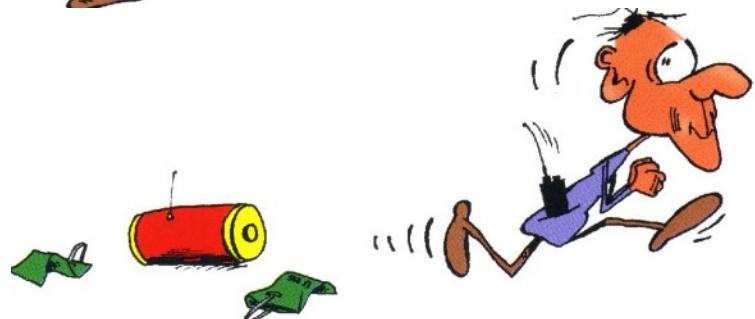
Essai nucléaire américain sur l'atoll de Bikini en juillet 1946.

Recette pour construire une bombe atomique :

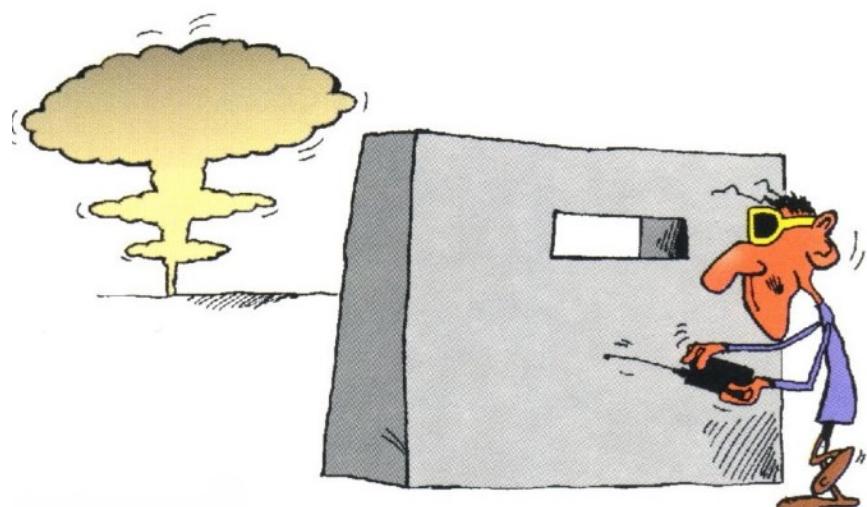
1. Procurez-vous de l' ^{235}U en quantité légèrement supérieure à la masse critique, tout en prenant la précaution de maintenir cet uranium en deux paquets séparés.



2. Disposez les deux moitiés de la masse d' ^{235}U aux deux extrémités intérieures d'un solide tube court et prévoyez un système télécommandé qui rapproche brutalement les deux moitiés d' ^{235}U l'une contre l'autre, au moyen d'une charge explosive, par exemple.



3. Eloignez-vous à une distance raisonnable.



4. Actionnez !

Les déchets nucléaires

Si l'homme utilise à son profit la fission nucléaire, il produit subsidiairement beaucoup d'atomes radioactifs absents de l'environnement jusqu'ici. Comment ces atomes nouveaux apparaissent-ils ?

Si nous reprenons le cours de la maladie du pauvre ^{235}U , nous avons vu qu'après avoir absorbé un neutron et s'être transformé en ^{236}U , il se scindait en deux autres atomes plus légers. Quels sont donc ces nouveaux atomes ?

Les expériences montrent que chaque atome d' ^{236}U peut se scinder de manière différente en donnant des paires de fragments de fission dont les poids atomiques sont compris généralement entre 72 et 166. Ces résidus sont composés d'une bonne trentaine d'éléments bien connus des services de l'Etat-civil du monde des atomes, mais qui ont tous la désagréable propriété de comporter une trop forte proportion de neutrons par rapport au nombre habituel que comporte leur famille. Ce sont donc des isotopes lourds de familles d'atomes bien connus. Ils n'existent généralement pas dans la nature et sont des isotopes issus de la fission induite des atomes. Ils sont tous instables et atteints de décroissance radioactive. Heureusement la plupart d'entre eux retrouvent assez rapidement une forme stable car leur demi-vie est très courte.

Un chapitre ultérieur nous analyserons plus précisément le mécanisme de la formation des déchets nucléaire et les problèmes que soulèvent leur stockage puis de élimination.



Les déchets nucléaires sont non seulement radioactifs, mais ils dégagent aussi passablement de chaleur.

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 [$\mu\text{cal}/\text{cm}^3 \text{ par an}$]
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

Présence d'uranium dans les minéraux

Comme nous l'avons déjà signalé, certains minéraux hébergent volontiers des atomes d'uranium. Lorsqu'un atome d'uranium est victime d'un accès de 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. 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.



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

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 bronzez, 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.

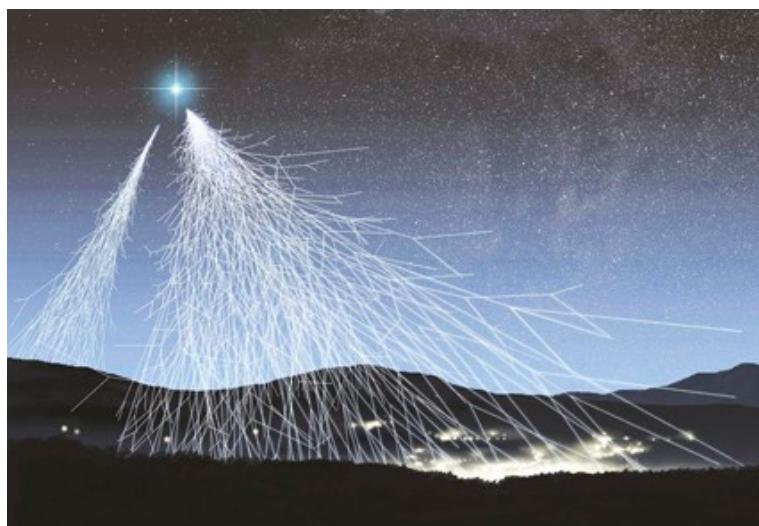
Dans certains pays, les sables utilisés pour confectionner le béton sont particulièrement riches en zircon et les immeubles génèrent de faibles quantités de radon. Le radon est un gaz lourd qui s'accumule dans les parties basses des bâtiments. Une bonne circulation d'air suffit à réduire le danger.



Comment inhalaient sûrement du radon !

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 production de muons¹, 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 cosmiques venant de l'espace et l'azote de la haute atmosphère, traversent notre corps par milliers chaque seconde.

¹ le muon est un électron lourd, 207 fois plus lourd que l'électron. Sa durée de vie n'excède 2 millionièmes de seconde.

Détection et protection

Principe de la détection des particules

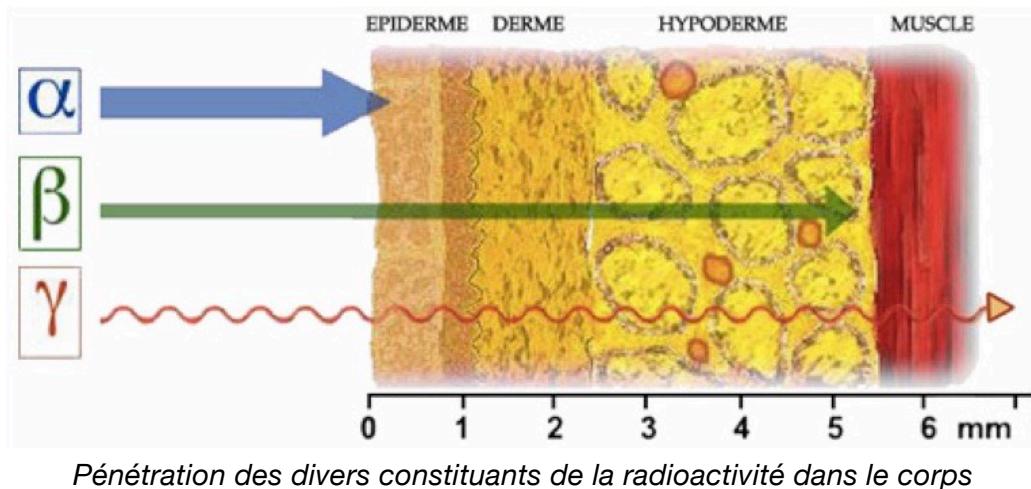
Les diverses méthodes de détection de la radioactivité sont fondées sur les effets qu'elle produit sur la matière. Ainsi, les divers composants de la radioactivité ont pour effet :

- de ioniser¹ 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 crissement 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.



¹ la ionisation charge électriquement les molécules d'un gaz et le rend alors conducteur de l'électricité.



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 unité¹. 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

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

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.

Effets physiologiques de la radioactivité

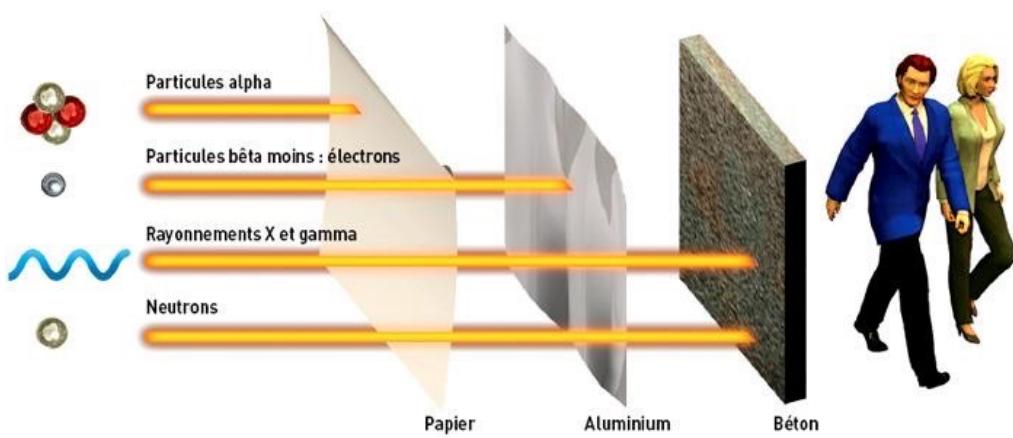
*Les particules α sont donc des noyaux d'atomes d'hélium privés de leurs 2 électrons. Elles cherchent donc à récupérer leurs électrons. En prélevant des électrons à des cellules de la peau cela provoque des brûlures : ce sont les **brûlures radioactives**.*

*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 radioactive 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 faible de Polonium 210 (^{210}Po) provenant des engrangements utilisés pour sa culture.

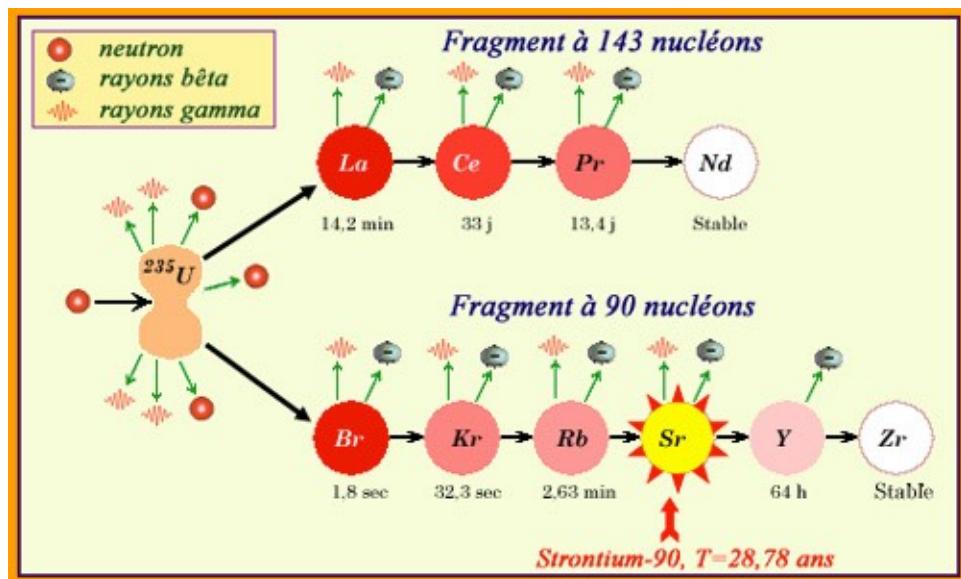
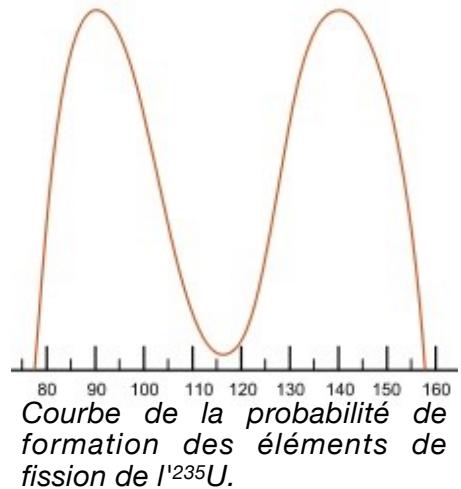
Au cours de cette cascade de transformations successives de l'uranium vers le plomb, on voit apparaître le radium que Marie Curie avait identifié dans les minerais d'uranium. Cet élément a pendant longtemps suscité de l'intérêt : il rendait les peintures phosphorescentes. On a alors confectionné les cadran 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 cadans ont payé de leur vie les effets dangereux de la radioactivité.

Les déchets nucléaires

Mode de formation des déchets nucléaires

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.

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.



Exemple d'un événement de fission :

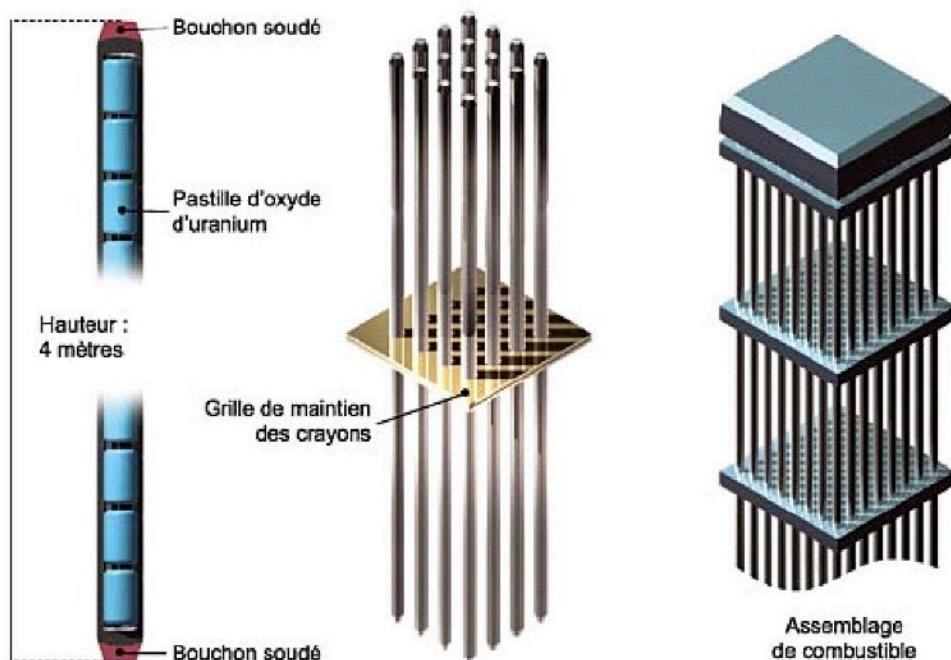
Les 2 atomes produits ici sont le ^{143}La à très courte période (14 min.) qui évolue très rapidement vers le ^{143}Nd stable après avoir passé par ^{143}Ce et ^{143}Pr . L'autre fragment est le ^{90}Br dont la période est inférieure à 2 sec. évolue vers ^{90}Zr en passant très rapidement par ^{90}Kr , ^{90}Rb mais qui reste bloqué vers ^{90}Zr dont la période de 30 ans en fait un produit de fission à vie moyenne !

2. **Les actinides**¹ 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 mendélévium, 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 ⁵⁹Co se transforme en ⁶⁰Co. Ces produits ont presque tous une demi-vie assez courte.

Le combustible nucléaire

Au cœur d'une centrale nucléaire, le combustible est constitué de petites pastilles de poudre d'oxyde d'uranium comprimée et durcie appelées UOX (oxyde d'uranium) dans lesquelles la proportion d'²³⁵U est d'environ 3.5%. Dans certains réacteurs on utilise des pastilles contenant un peu de plutonium appelées MOX (oxydes mixtes). Ces pastilles sont empilées dans des tubes de zirconium de 1 cm de diamètre et d'environ 4 mètres de hauteur, constituant des "crayons de combustible". Un assemblage d'environ 200 de ces crayons constitue une barre de combustible qui va alimenter la réaction en chaîne pendant quelques années.



Assemblage du combustible destiné à une centrale nucléaire

¹ L'uranium et le plutonium sont appelés actinides majeurs. Le neptunium, l'américium et le curium sont désignés sous le terme d'actinides mineurs.

Assemblage des "crayons de combustible"

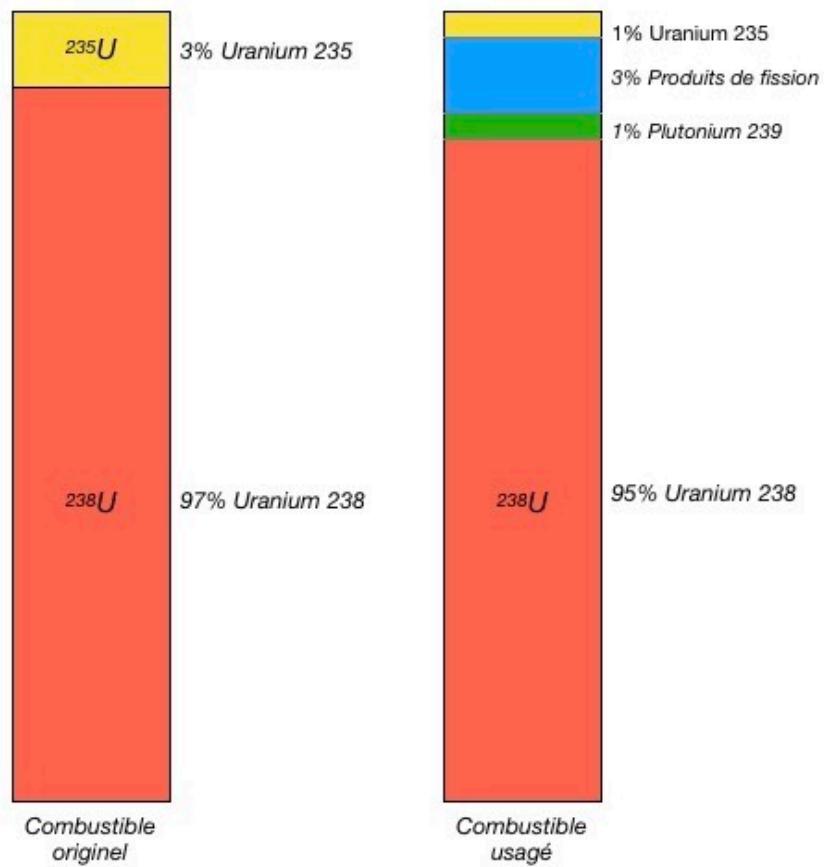
L'uranium est un élément faiblement radioactif et il peut être manipulé sans danger à mains nues. La fission ne débute que lorsque le combustible est plongé dans l'eau au cœur du réacteur. Rappelons que l'eau joue le rôle de ralentisseur de neutrons.

Après usage, ces assemblages sont extrêmement radioactifs et dégagent encore beaucoup de chaleur. Ils ne pourront être manipulés qu'à distance et avec beaucoup de précaution !



Le combustible usagé

Le combustible nucléaire comporte au départ un mélange de 96.5 % d' ^{238}U et de 3.5 % d' ^{235}U . La fission d' ^{235}U entraîne la production de plutonium et d'actinides mineurs¹. Le changement de composition du combustible en diminue la productivité et après quelques années de fonctionnement il doit être changé. On retire les barres de combustibles usagées avec précautions car leur radioactivité est intense à cause des produits de fission. Heureusement, ces produits ont des périodes très courtes et leur radioactivité diminue rapidement. C'est pour cette raison qu'on entrepose les barres usagées



dans des piscines pendant environ un an, période au cours de laquelle la radioactivité diminue considérablement. L'eau est une protection efficace contre les effets de la radioactivité et assure l'évacuation de la chaleur produite par la forte radioactivité

¹ Neptunium, Américium et Curium

Les principaux déchets

La plupart des réacteurs ont une puissance d'environ 1'000 MW. Pour produire cette énergie, le réacteur a besoin de 23 tonnes de combustible soit environ 22 tonnes d' ^{238}U et 900 kg d' ^{235}U .

Les barres de combustibles restent environ 3 ans à l'intérieur du réacteur. Les réactions de fission modifient la composition originelle et il faut les retirer pour les remplacer par du combustible nouveau. La quantité de déchets nucléaires produits chaque année par un réacteur est résumé dans les tableaux ci-dessous :

- **Produits de fission à vie courte** : on en retrouve près de 700 de kg. Plus de 90% de ces produits ont une durée de vie extrêmement courte et se transforment rapidement en éléments stables. On constate qu'au bout de dix ans d'entreposage, ils ont atteints leur forme stable.
- Parmi ces isotopes, signalons particulièrement l'iode 131 (^{131}I) qui a une très courte période de 8 jours mais qui, en cas d'accident majeur, peut être absorbé par la glande thyroïde des populations exposées.
- **Produits de fission à vie moyenne et longue** : parmi le 10% restant dont les durées de vies sont supérieures à 30 ans, les produits qui peuvent poser un problème sont : le strontium 90 (^{90}Sr), et le césium 137 (^{137}Cs) qui ont des périodes d'environ 30 ans. Le zirconium 93 (^{93}Zr), le technétium 99 (^{99}Tc), le palladium 107 (^{107}Pd), l'iode 129 (^{129}I) et le césium 135 (^{135}Cs) ont des périodes beaucoup plus longues.

Produits de fission notablement encombrants

Produits de fission à vies moyennes			Produits de fission à vie longue		
	Poids*	Demi-vie		Poids*	Demi-vie
strontium 90 (^{90}Sr)	24 kg	28 ans	zirconium 93 (^{93}Zr)	16 kg	1.53 Ma
Césium 137 (^{137}Cs)	8.5 kg	30 ans	technétium 99 (^{99}Tc)	19 kg	0.21 Ma
			palladium 107 (^{107}Pd)	4.6 kg	6.5 Ma
			iode 129 (^{129}I)	4 kg	15.7 Ma
			césium 135 (^{135}Cs)	8 kg	2.3 Ma

* quantité produite chaque année par un réacteur de 1'000 MW.

Le césium 137 pose un problème : il n'existe pas dans la nature. Il provient uniquement des activités nucléaires civiles et militaires. Proche du potassium, il est métabolisé par les plantes et peut arriver par ce biais jusque dans notre assiette. Il n'est libéré dans l'atmosphère que par des explosions nucléaires ou par un accident majeur d'une centrale nucléaire.

Le strontium 90 n'est disséminé que par une explosion nucléaire ou un accident majeur d'un réacteur. A la suite d'un accident il peut se disséminer sur les herbages être ingéré par les bovins et se retrouver ensuite dans les produits laitiers.

L'activité des produits de fission à vie longue est moins problématique à cause de leur très longue période.

Les actinides : ils sont produits par l'absorption de neutrons par l'uranium sans qu'il y ait fission. Ils constituent divers isotopes de l'uranium ainsi que des éléments artificiels comme le plutonium, le neptunium, l'américium et le curium.

Le plutonium est produit en abondance au cœur des réacteurs nucléaires. Parmi ses divers isotopes, c'est le plutonium 239 (^{239}Pu) qui suscite le plus d'intérêt. Considéré comme déchets par les uns, il constitue pour d'autres des sources intéressantes de combustible nucléaire pour certains types de réacteurs. C'est évidemment un des constituants principaux des armes nucléaires. Les stocks actuels comprennent environ 1'000 tonnes de Plutonium. C'est un élément hautement stratégique et les quantités produites sont sévèrement surveillées.

L'Américium 241 (^{241}Am), a une demi-vie de 142 ans. Il émet en abondance des rayons α . On utilise cette propriété dans les détecteurs de fumées : une pastille d'Américium entretient un léger courant électrique grâce à l'émission de ses particules α qui ionisent l'air. Les particules de fumées perturbent ce courant et donnent l'alarme.

Le curium 244 (^{244}Cm) dégage un rayonnement γ très intense. On utilise ce rayonnement comme source pour les spectromètres utilisés dans l'exploration spatiale.

Le curium 242 (^{242}Cm) a une très courte période et dégage beaucoup de chaleur. On l'utilise comme source de chaleur des générateurs thermoélectriques embarqués dans les sondes spatiales.

- **Les produits d'activation** : ce sont des éléments rendus radioactifs par une absorption de neutrons. Ce sont essentiellement le fer à béton qui renferme un peu de cobalt et de nickel. Il faudra en tenir compte lors du démantèlement d'une centrale.

Produits d'activation

Elément originel	Isotope radioactif	Demi-vie
Cobalt 59 (^{59}Co) →	Cobalt 60 (^{60}Co)	5,7 ans
Fer 54 (^{54}Fe) →	Fer 55 (^{55}Fe)	2,7 ans
Nickel 62 (^{62}Ni) →	Ni 63 (^{63}Ni)	100 ans

Rappelons que les éléments à courtes périodes sont extrêmement radioactifs mais ils ne le resteront pas très longtemps. Les éléments à longues périodes sont faiblement radioactif mais ils le demeureront encore très longtemps !

Isotopes de l'uranium et du plutonium générés par an

Uranium:			Plutonium:		
isotope	quantité	demi-vie	isotope	quantité	demi-vie
^{234}U	4 kg	0.24 Ma	^{239}Pu	132 kg	224'000 ans
^{236}U	102 kg	23 Ma	^{240}Pu	52 kg	6'500 ans
			^{241}Pu	28 kg	14.3 ans
			^{242}Pu	11 kg	0.37 Ma

Quantité d'actinides générés par un réacteur en un an

Neptunium			Américium			Curium		
isotope	quantité	demi-vie	isotope	quantité	demi-vie	isotope	quantité	demi-vie
^{237}Np	10 kg	2.15 Ma	^{241}Am	5 kg	432 ans	^{244}Cm	564 gr	18 ans
			^{243}Am	2.5 kg	7'382 ans			

Usage de quelques isotopes radioactifs

Depuis la découverte de la radioactivité et l'utilisation de la fission induite on a découvert de nouveaux isotopes d'éléments connus ou d'éléments nouveaux issus de l'activité nucléaire industrielle. On a utilisé ces nouvelles sources d'énergie pour des applications variées et nombreuses.

Les rayons Y émis par certains isotopes sont plus pénétrants que les rayons X délivrés par les générateurs classiques. On peut donc les utiliser comme source pour radiographies de matériaux industriels habituellement opaques aux rayons X ordinaires.

En médecine, on utilise de plus en plus l'imagerie nucléaire qui consiste à injecter un isotope faiblement radioactif d'un élément qui participe à certains métabolismes. Une gamma caméra permet de localiser et de suivre l'évolution de l'isotope. L'imagerie nucléaire renseigne sur une fonction du corps alors qu'une radiographie classique ne renseigne que sur la structure d'un organe.

Les isotopes utilisés en médecine nucléaire sont nombreux. Certains proviennent des produits de fission des réacteurs nucléaires, d'autres sont produits dans des accélérateurs de particules. Ainsi, au CERN, le programme ISOLDE fournit de nombreux isotopes spécifiques pour les hôpitaux.

En médecine, l'iode 131 (^{131}I) sert à l'étude du fonctionnement de la thyroïde. A très faible dose, il est utilisé comme traceur pour des diagnostics en médecine nucléaire. Quelques atomes radioactifs administrés par voie sanguine permettent de suivre le cheminement de l'iode dans la thyroïde. À plus forte dose, l'iode 131 est aussi utilisé pour les radiothérapies des cancers de la thyroïde.

Le **cobalt 60** (^{60}Co) a longtemps été utilisé en médecine pour la radiothérapie. On utilise sa propriété d'émettre un rayonnement Y très Intense pour stériliser les denrées alimentaires et pour radiographier des pièces métalliques opaques aux rayons X ordinaires.

Le **technétium 99** est un élément indésirable dont on doit se débarrasser. Sa période est de 215'000 ans. Mais il existe un isomère¹ du technétium 99 qui subsiste plusieurs heures dans un état d'excitation avant de se transformer en l'état normal de technétium 99 en émettant un photon gamma unique. Cette propriété est largement utilisée en imagerie médicale. A ce titre, le technétium est l'isotope le plus utilisé au monde en imagerie, la scintigraphie.

Que faire des déchets nucléaire ?

Tout comme pour les déchets ménagers, il faut séparer les éléments valorisables de ceux dont on ne sait que faire. L'intérêt est de récupérer en premier lieu l'uranium et le plutonium qui pourront servir à élaborer de nouveaux combustibles. On récupère aussi certains actinides tels l'américium et le curium. Ensuite, il faudra se débarrasser de ceux dont on n'a pas besoin.

Transport des déchets

Après entreposage d'au moins une année en piscine dans l'environnement immédiat de la centrale, lorsque la radioactivité due aux produits de fission a suffisamment diminué, on peut envoyer les déchets dans une usine de retraitement

En France, c'est l'usine de la Hague qui se charge de cette opération. Le transport s'effectue le plus souvent par voie ferroviaire. Le combustible est enfermé dans des containers étanches aux divers rayonnements ionisants et qui permettent d'évacuer la chaleur encore produite par l'activité résiduelle des éléments transportés.

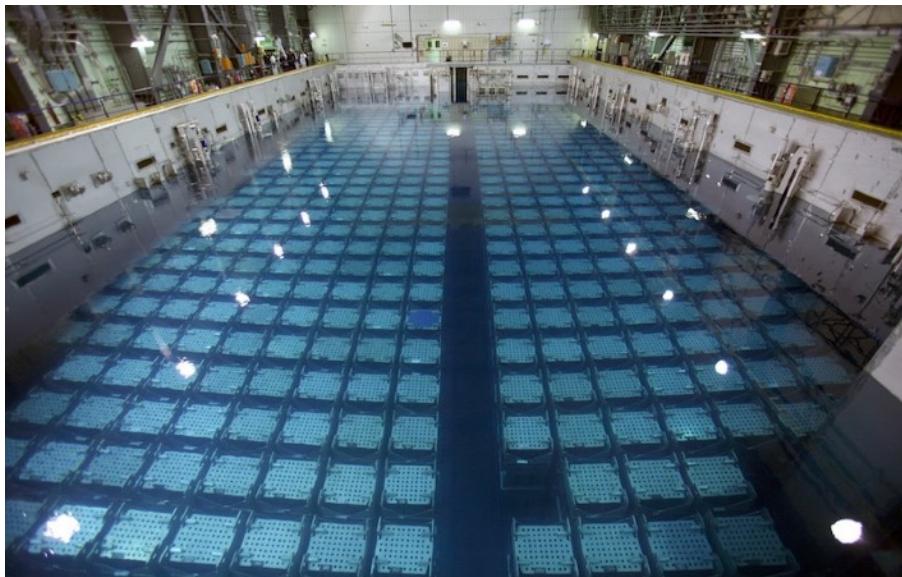


Containers utilisés pour le transport des déchets nucléaires

Traitements

À son arrivée à l'usine, le combustible va séjourner à nouveau dans une piscine pendant une durée de 3 à 5 ans afin d'en diminuer encore la radioactivité résiduelle.

¹ on appelle isomère un noyau qui se maintient anormalement longtemps en état d'excitation



Une des piscines de la Hague, où le combustible usagé est stocké plusieurs années avant d'être retraité. © Denis Delbecq

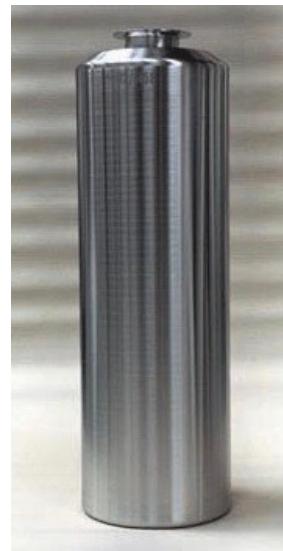
Le traitement vise ensuite à séparer l'uranium et le plutonium indépendamment l'un de l'autre, puis les actinides mineurs et les produits de fission indésirables. Les opérations ont lieu au moyen de robots dans un espace étanche protégé par des murs de béton d'un mètre d'épaisseur. Des fenêtres de verre de plus d'un mètre d'épaisseur permettent de diriger les opérations.

Les crayons de combustibles sont alors cisaillés en petits éléments et le combustible libéré est dissout dans de l'acide nitrique concentré bouillant. L'uranium et le plutonium sont transformés en nitrates et, finalement, dans un litre de solution on trouve 200g d'uranium, 2.5 g de plutonium et 6 à 7 g de produits de fission. Une série d'opérations chimiques permet alors de séparer l'uranium du plutonium.

La solution restante renferme encore le solde des produits de fission et des actinides mineurs. Elle représente encore 99.5 % de la radioactivité résiduelle. Stockée encore pendant plusieurs mois dans des cuves en acier, cette solution est brassée et ventilée pour permettre la diminution de la chaleur engendrée par la radioactivité.

Après quelques mois, on calcine ces déchets et on les incorpore dans un verre conçu spécialement à cet effet qu'on coule dans des containers cylindriques en acier inoxydables. Ces containers sont renvoyés ensuite aux propriétaires des centrales pour lesquelles ces opérations ont eu lieu. Chaque container renferme 400 kg de verre dont 11 kg de déchets radioactifs.

Container en acier inoxydable (134cm x 43cm), renfermant 400 kg de verre dont 11 kg de déchets radioactifs.



Que faire des déchets indésirables

Il faut distinguer d'une part l'**entreposage** des déchets qui est une solution temporaire en attendant que ceux-ci aient suffisamment refroidi et que leur radioactivité diminué d'une manière significative, du **stockage** qui aura comme vocation ultime d'être définitif.

Le stockage dure quelques dizaines d'années dans des locaux sécurisés. Cette attente permet aux déchets à relativement courte période de voir leur radioactivité et leur production de chaleur diminuer notablement.

En Suisse, les exploitants des centrales nucléaires ont construit un dépôt de stockage intermédiaire à Würenlingen sous le nom de Zwilag¹. Ce centre assure le traitement des déchets non seulement des centrales nucléaires mais aussi de ceux issus de l'usage médical et de l'industrie. Elle organise leur traitement, leur conditionnement et leur stockage en attendant un enfouissement définitif en couches géologiques profondes.



Centre d'entreposage Zwilag près de Würenlingen (Argovie)

Les éléments de combustible usagé des centrales nucléaires sont en premier lieu entreposés pendant quelques années dans les piscines de refroidissement dans l'enceinte même des centrales. Lorsque la radioactivité et le dégagement de chaleur ont notablement diminué, ils sont transportés au Centre de stockage intermédiaire de Zwilag. Les déchets de haute activité sont enfermés dans des conteneurs d'acier hermétiquement scellés et stockés dans un hall d'entreposage. La chaleur dégagée par un conteneur correspond à une puissance d'environ 40 kW. Elle est évacuée par circulation naturelle de l'air. Au bout de 10 ans, la puissance thermique n'est plus que de 25 kW.

¹ un acronyme issu de "Swischenlager" signifiant dépôt intermédiaire.



Conteneurs de déchets de haute et moyenne activité

Caractéristiques des conteneurs:

Hauteur: 6.5 mètres

Poids, plein: 135 tonnes

Poids, vide: 118 tonnes

Les déchets faiblement radioactifs sont vitrifiés dans un four à plasma, coulés dans des fûts d'acier qui seront ensuite placés dans des sarcophages en béton.



Fûts de 200 litres pour déchets de faible et moyenne activité.



Les fûts sont stockés dans des sarcophages en béton recouverts d'une dalle.

Enfouissement ultime des déchets radioactifs

Les scientifiques sont quasiment unanimes à reconnaître que, pour les déchets fortement et moyennement radioactifs à vie longue, seuls les dépôts en couches géologiques profondes implantés dans des roches stables peuvent garantir un confinement sûr et à long terme.

Le stockage définitif consiste à déposer les déchets dans des ouvrages souterrains profonds creusés dans des roches imperméables. Le but est de soustraire ces déchets de l'environnement de la biosphère durant la période nécessaire à la décroissance de leur radioactivité. Il faut donc que les roches présentent des propriétés qui limitent la migration des éléments radioactifs hors du site de stockage. En Suisse, ce sont les argiles dites à Opalinus, qui présentent la meilleure option.

Recherches en cours

En France, trois sites ont été considérés comme favorables. Le site de Bure, dans la Meuse, le site de Marcoule dans le Gard et le site de la Chapelle-Bâton, dans la Vienne.

Mais c'est le site de Bure qui apparaît comme le plus favorable et les travaux préliminaires de recherche y sont aujourd'hui activement menés. Un puits a permis d'atteindre une couche d'argile située à cinq cents mètres de la surface. Il s'agit d'une couche d'argilite (mélange d'argile et de quartz) d'une centaine de mètres d'épaisseur, quasiment horizontales. Ces dépôts argileux ont été déposées il y a environ 150 millions d'années, au cours du Callovien-Oxfordien. Ils n'ont pas évolué depuis cette époque et ne présentent pas de failles. Ce sont les équivalents des argiles à Opalinus du Jura.

Ces recherches visent à mieux connaître les caractéristiques de ces couches, en particulier leur compacité et leur régularité, à étudier la circulation de l'eau dans les couches situées au-dessus et au-dessous des argilites, ainsi que leur capacité à confiner les déchets et à ralentir au maximum leur éventuelle migration.

En Suisse, c'est la société NAGRA¹, fondée par la Confédération Suisse et les propriétaires des centrales nucléaires, qui est chargée de rechercher des sites favorables à l'enfouissement des déchets nucléaires.

Pour l'enfouissement définitif des déchets radioactifs il faut trouver des roches situées au moins à 500 mètres de profondeur et au sein de couches parfaitement imperméables de l'argile par exemple. En Suisse ce sont les "argiles à Opalinus" qui semblent répondre à toutes les qualités nécessaires pour constituer un site qui pourrait accueillir nos déchets radioactifs

En Suisse, les Argiles à Opalinus

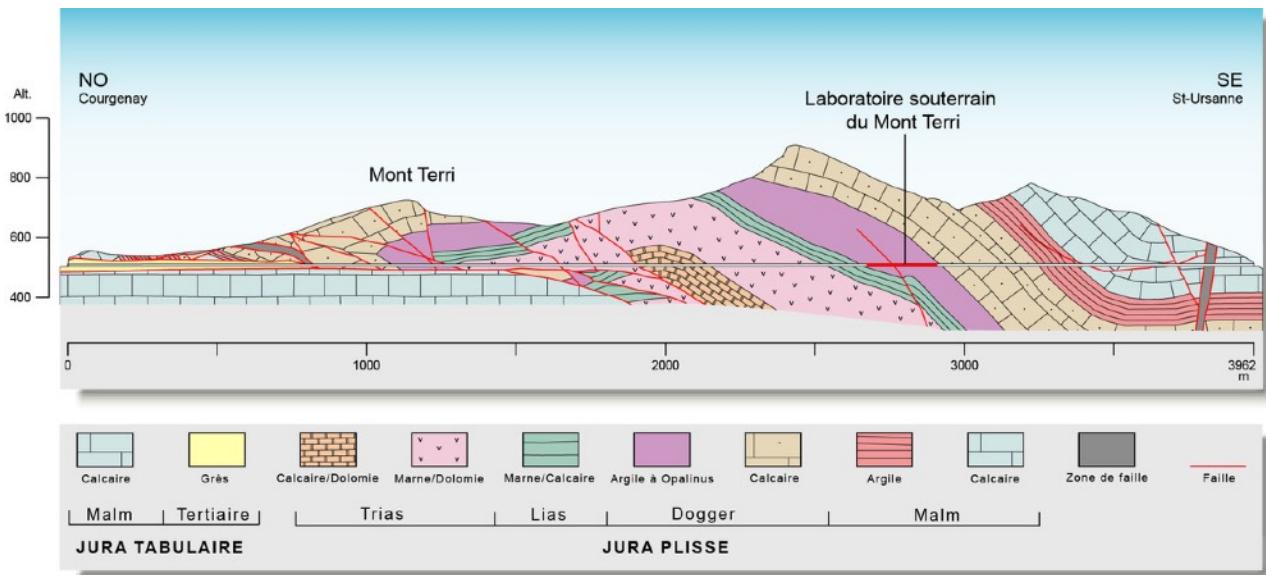
Il s'agit de roches argileuses. On y trouve de nombreux fossiles parmi lesquels une ammonite dont la coquille opalescente est à l'origine de l'appellation Opalinus.

Ce sont des sédiments argileux extrêmement fins qui se sont déposés il y a 180 millions d'années dans l'océan qui existait durant l'ère secondaire entre l'Europe et l'Afrique bien avant le début du plissement alpin.

Au cours du plissement alpin, durant l'ère tertiaire, ces sédiments ont été projetés par dessus les anciens socles rigides de roches métamorphiques beaucoup plus anciennes et ont constitué ce que les géologues nomment la couverture sédimentaire des Alpes. Le Jura est constitué de cette couverture sédimentaire. Les Argiles à Opalinus sont datées du Dogger, une époque située dans le Jurassique moyen.

C'est au Mont Terri, dans le canton du Jura, qu'un laboratoire souterrain a été installé dans le but d'étudier toutes les propriétés que présentent ces argiles à opalinus. Parmi ces propriétés, mentionnons sa très faible perméabilité, son pouvoir d'auto-colmatage des failles et fissures par gonflement de l'argile. Les minéraux argileux sont constitués de strates ultra fines qui sont chargées négativement et qui ont alors la propriété de capturer et fixer les ions positifs qui caractérisent les métaux. C'est une sécurité intéressante qui permet d'arrêter une migration éventuelle de ions radioactifs.

¹ acronyme de "Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle"



C'est l'Office fédéral de topographie suisse qui exploite et dirige les travaux de recherche. Une dizaine de pays participent à ces recherches dont l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne, la France, le Canada et le Japon.

De nombreuses expériences sont menées pour tester les capacités de ces roches à protéger les fûts de déchets. Ces recherches permettront de décider si ces argiles sont aptes à conserver les déchets nucléaires pour au moins 200'000 ans.

La solution d'enfouissement est parfaitement sûre. Le seul obstacle est la peur des habitants qui vivent non loin des lieux d'enfouissement !

L'Uranium dans le passé de la Terre

La période de ^{238}U est de 4.5 milliards d'années. C'est aussi l'âge approximatif de la formation de notre planète. Au début de l'existence de la Terre, la quantité d' ^{238}U était donc le double de ce qu'elle est aujourd'hui.

La période de ^{235}U n'est que de 700 millions d'années. Le teneur de cet isotope devait alors être environ 85 fois plus élevée qu'aujourd'hui. La proportion de ^{235}U dans l'uranium naturel était d'environ 40 %, soit beaucoup plus que ce qui est nécessaire pour l'activité d'un réacteur. Par ailleurs ^{235}U est un des rares isotopes naturels qui est fissile. Il est donc probable que des réactions nucléaires spontanées se sont produites dans la toute première période d'existence de notre planète. Et les scientifiques en ont eu la preuve lorsqu'ils ont découvert le gisement d'uranium d'Oklo, au Gabon.

Un réacteur naturel, il y a près de 2 milliards d'années

Au cours de l'exploitation du gisement d'uranium d'Oklo, au Gabon, les scientifiques ont constaté un appauvrissement anormal de la teneur de l'isotope ^{235}U . Une étude plus attentive a pu démontrer qu'une réaction en chaîne avait eu lieu il y a 1.7 milliard d'années et qu'un réacteur nucléaire avait fonctionné naturellement pendant des milliers d'années. Les traces de produits de fission ont également été décelées. En fait, toutes les conditions nécessaires au fonctionnement d'un réacteur avaient été réunies :

- la concentration en ^{235}U était à l'époque d'environ 3.8 %, ce qui est approximativement la teneur nécessaire pour les réacteurs actuels,*
- le gisement était à haute teneur en uranium,*
- une remontée de la nappe phréatique avait apporté l'eau nécessaire pour assurer le rôle de modérateur et ralentisseur de neutrons.*

Les déchets de ce réacteur naturel sont restés sur place. Ils ont été enfouis dans la roche tout comme on envisage aujourd'hui d'enfouir nos déchets actuels en site géologique profond.

Concentration de minerai d'uranium dans le gisement d'Oklo au Gabon.



Et l'énergie solaire ?

Tout comme Monsieur Jourdain faisait de la prose sans le savoir, nous utilisons depuis longtemps l'énergie solaire sans nous en rendre compte !

L'énergie hydroélectrique est de l'énergie solaire, car les précipitations qui alimentent les bassins d'accumulation et les fleuves proviennent des nuages, eux-mêmes produits par l'évaporation des eaux superficielles des océans sous l'effet du rayonnement solaire.

Les éoliennes, versions modernes des antiques moulins à vent, utilisent les courants aériens engendrés par l'action du soleil.

Toutes les formes de vie, en particulier la croissance des arbres et des forêts, doivent leur existence à l'énergie solaire. Le charbon et le pétrole sont les témoins dégradés des déchets de la vie. Leur consommation aujourd'hui ne fait que restituer l'énergie solaire empruntée, il y a des dizaines ou des centaines de millions d'années.

Le charbon et le pétrole sont des formes fossiles d'énergie solaire. Les régimes des vents et des précipitations sont des formes presque instantanées (à l'échelle géologique) de cette même énergie.

Le Soleil tire son énergie d'un gigantesque réaction nucléaire !

Mais n'oublions pas que l'énergie solaire est produite par une gigantesque réaction nucléaire basées, non sur les phénomènes de fission, mais par la fusion de l'hydrogène en hélium.

En effet, si les atomes très lourds peuvent fissionner en des paires d'atomes plus léger pour rééquilibrer leur noyau, il existe un autre type de réarrangement des noyaux atomiques, la fusion nucléaire qui est une réaction inverse.

La fusion nucléaire

Certains atomes très légers, l'hydrogène en particulier, peuvent s'associer deux à deux pour se transformer en hélium C'est le phénomène qui voit plusieurs noyaux atomiques légers s'unir pour en former un seul plus lourd.

On a souvent utilisé l'image de la goutte d'eau trop grosse qui se brise en deux gouttes plus petites pour symboliser le phénomène de la fission.

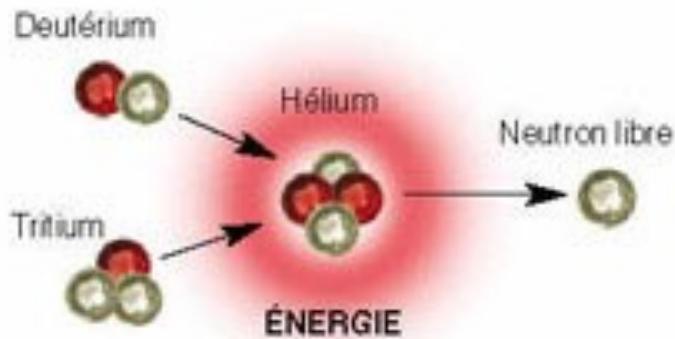
Dans le fusion, c'est comme si deux petites gouttes s'associaient pour en former une plus grosse.



Au centre du Soleil la pression est énorme et la température atteint 15 millions de degrés. Au cours de réactions complexes, les noyaux de 2 atomes d'hydrogène fusionnent pour former un noyau stable d'hélium. L'énergie dissipée par cette réaction est énorme et sert à maintenir en équilibre la masse solaire qui aurait tendance à s'effondrer sur elle-même mais qui est contrebalancée par la force d'expansion de la réaction de fusion nucléaire.

Les physiciens cherchent aujourd'hui à maîtriser la fusion de divers isotopes de l'hydrogène en vue de produire l'énergie colossale qui ne laisserait pas de déchets radioactifs indésirables. Mais il faudra attendre encore longtemps pour passer du rêve à la réalité !

Principe de la fusion nucléaire



Yuvanoe/CEA

La fusion de l'hydrogène en hélium est un phénomène complexe qui fait intervenir 2 isotopes de l'hydrogène, le Deutérium et le Tritium qui renferment respectivement 1 et 2 neutrons. Il faut une énergie colossale pour rapprocher ces 2 isotopes. Au centre du Soleil, la température de 15 millions de degrés permet d'amorcer cette réaction !

Table des matières

<i>Qu'est-ce que la radioactivité</i>	3
<i>Les rayons uraniques - Baptême de la radioactivité - Nature de la radioactivité</i>	
<i>De quoi la matière est-elle constituée</i>	5
<i>Les constituants de la matière selon les chimistes - L'atome semble constitué de vide - La proton identifié comme constituant du noyau - Découverte du neutron - Approche de l'architecture de l'atome - Niels Bohr s'en mêle - Un casse tête instructif - Suspicion de l'existence d'une force nouvelle - Puis les quarks sont apparus - Anatomie des protons et des neutrons - Mais à quoi servent les neutrons ? - Les quarks sont donc des briques élémentaires - La mystérieuse interactions forte qui emprisonne les quarks - L'interaction faible, une force perturbatrice - les atomes qui constituent notre environnement - Qu'est-ce qu'un isotope ?</i>	
<i>La décroissance radioactive</i>	17
<i>L'atome d'uranium n'est pas bien dans sa peau - Période ou demi-vie - Que sont donc ces mystérieuses particules ? - Folies autour de la radioactivité</i>	
<i>La fission de certains atomes</i>	21
<i>Les minéraux peuvent enregistrer la fission spontanée de ^{238}U - On peut provoquer la fission de certains atomes - Un amaigrissement incompréhensible - Mais que deviennent les neutrons ? - On peut tout de même influencer la chance - Comment fonctionne une centrale nucléaire ? - On peut aussi construire aussi une bombe atomique - Recette pour construire une bombe atomique - Les déchets nucléaires.</i>	
<i>La radioactivité naturelle</i>	28
<i>L'uranium est omniprésent - Mais attention tout de même au radon - Il y a aussi les rayons cosmiques.</i>	
<i>Détection et protection</i>	31
<i>Principe de la détection des particules - Les unités de mesure de la radioactivité - Effets physiologiques de la radioactivité - Comment s'en protéger - A quelles doses sommes nous exposés dans notre environnement ?</i>	
<i>Les déchets nucléaires</i>	35
<i>Mode de formation des déchets nucléaires - Le combustible nucléaire - Le combustible usagé Les principaux déchets - Usage de quelques isotopes radioactifs - Que faire des déchets nucléaire ? - Transport des déchets - Traitement - Que faire des déchets indésirables - Enfouissement ultime des déchets nucléaires - Recherches en cours - Les Argiles à Opalinus - L'Uranium dans le passé de la Terre - Un réacteur naturel, il y a près de 2 milliards d'années - Et l'énergie solaire ? - Le Soleil tire son énergie d'un gigantesque réaction nucléaire ! - La fusion nucléaire.</i>	