Chapitre I

Notions de physique nucléaire

1 Introduction

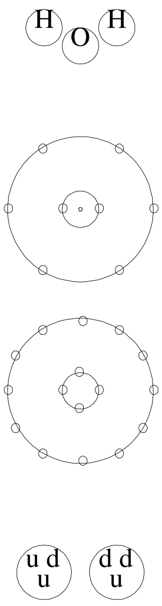
À la base de tout ce que l'on désigne par "nucléaire" il y a une science fondamentale, la *physique nucléaire*. Cette dernière s'insère dans un développement scientifique continu, qui comprend la chimie, la physique atomique, la physique nucléaire et la physique des particules. Nos connaissances dans ces différents domaines se sont surtout développées par curiosité, les applications venant ensuite, la plupart du temps. La figure 1 montre comment la physique nucléaire se situe dans la course vers l'infiniment petit (de haut en bas on passe par la chimie, la physique atomique, la physique des particules, etc...). Il semble bien que l'évolution de l'Univers a pris le chemin inverse (de bas en haut). On recommande ici la lecture du livre "Patience dans l'azur" de l'astrophysicien Hubert Reeves.

Depuis l'antiquité, les humains se sont posés des questions sur l'univers dans lequel nous vivons et dont nous faisons partie: comment est fait l'univers, quelles sont les lois qui régissent son comportement, d'où vient-il et que deviendra-t-il? Nous avons réalisé des progrès considérables dans cet effort de compréhension, mais nous sommes encore loin du but ultime, et on peut même se demander si un tel but pourra un jour être atteint.

Tout au long du chemin parcouru lors de cette recherche, des applications se sont développées. Ces applications comportent des aspects bénéfiques et des aspects néfastes (Fig. 2). Par exemple, la chimie permet la synthèse de nombreux produits permettant de combattre la maladie et d'augmenter l'espérance de vie, mais elle permet aussi la production d'explosifs et de gaz asphyxiants qui permettent de tuer. Le "nucléaire" n'échappe pas à ce dilemme, et comme sa première manifestation connue du public a été l'utilisation des armes nucléaires, il fait l'objet d'interrogations marquées d'une grande inquiétude. De nombreux citoyens ont l'impression que le sujet est d'une difficulté telle qu'ils sont incapables d'y comprendre quoi que ce soit, et qu'il s'agit d'un domaine réservé à quelques experts. L'un des buts de ce cours est de prouver le contraire: le citoyen ordinaire peut facilement acquérir les connaissances qui lui permettront de se faire une idée éclairée sur la question. Dans ce qui suit, on utilisera une méthode d'approche très descriptive et qualitative. Évidemment, cela ne suffirait pas à ceux ou à celles qui voudraient apporter leur contribution à l'avancement de nos connaissances dans le domaine.

2 Les atomes

Considérons un fragment de matière, par exemple un morceau de fer. Je peux le couper en deux, puis en quatre, et ainsi de suite, obtenant toujours des fragments plus petits. Puis-je continuer indéfiniment cette opération de fractionnement, éventuellement par la pensée si mes



Chimie
Molécule H^2O
Deux atomes H, un atome O

Physique atomique
Atome O
Un noyau, 8 électrons

Physique nucléaire
Noyau O
8 protons, 8 neutrons

Physique des particules
Proton : 2 quarks u et 1 quark d
Neutron: 1 quark u et 2 quarks d

outils de coupe deviennent inadéquats? Il y eut, dans l'antiquité, en Grèce, des philosophes assez hardis pour affirmer que non: on ne peut pas fractionner indéfiniment un fragment de matière car il arrive qu'on se trouve en présence d'une parcelle de matière insécable (Fig. 3). Le mot *atome* (qui signifie "qu'on ne peut pas couper") désigne une telle particule. Un atome de fer est la plus petite parcelle de fer qui puisse exister. Il en est de même pour les autres éléments chimiques: hydrogène, carbone, oxygène, calcium, cuivre, plomb, uranium, pour n'en citer que quelques uns.

À la fin du siècle dernier, on avait identifié un peu moins d'une centaine d'éléments chimiques. Il leur correspond autant d'espèces d'atomes (Fig. 4). Les atomes sont tellement petits que l'on ne peut les voir, même avec des microscopes puissants. Il existe tout de même des techniques qui permettent de les mettre en évidence, de les compter, de les mesurer, de les peser. Les dimensions des atomes sont de l'ordre de un cent millionième de centimètre, ce qui veut dire que sur une distance d'un centimètre on peut en aligner cent millions. Une quantité aussi petite s'écrit sous la forme 10^{-8} cm. D'autre part, dans un fragment de matière à notre échelle, il y a un très grand nombre d'atomes. Dans 12 grammes de carbone il y a un nombre d'atomes $\mathrm{N} = 6.023 \times 10^{23}$. Ce nombre N s'appelle le *nombre d'Avogadro*. On définit une *mole* comme la quantité de matière d'une espèce chimique déterminée qui contient N atomes. Pour un élément chimique, la *masse atomique*, est la masse, exprimée en grammes, d'une mole d'atomes. Par exemple, la masse atomique du carbone est 12, celle du plomb est 208. La masse d'un atome individuel s'obtient en divisant la masse atomique par le nombre d'Avogadro.

3 Les molécules

Les atomes sont, pour les chimistes, les particules *élémentaires* à partir desquelles on peut construire tous les corps qui existent dans l'univers. Donnons quelques exemples. Deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène s'unissent pour former une molécule d'eau, qui est la plus petite quantité d'eau qui peut exister. La molécule de méthane contient un atome de carbone et quatre atomes d'hydrogène. Il s'agit là de molécules particulièrement simples. Certaines molécules contiennent des centaines et même des milliers d'atomes. C'est le cas de plusieurs molécules qui sont à la base de la vie. Une molécule est désignée par un symbole qui précise son contenu atomique, par exemple OH_2 pour la molécule d'eau, CH_4 pour la molécule de méthane (Fig. 5).

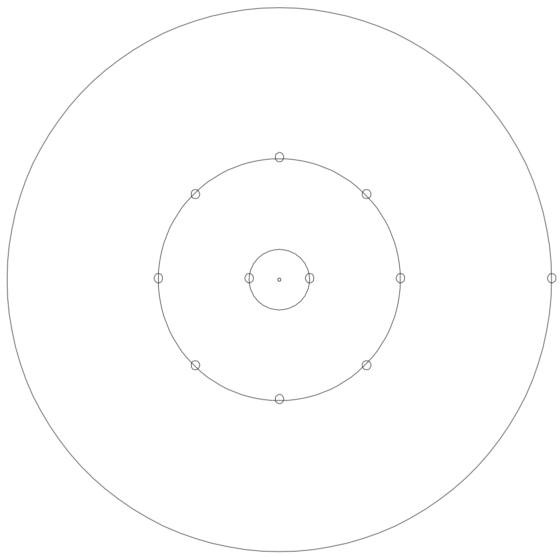
4 Les atomes sont complexes

Jusqu'ici, nous avons admis que les atomes sont des particules élémentaires. Il existerait donc une centaine de particules élémentaires, ce qui est beaucoup, et peu satisfaisant pour les scientifiques, qui aiment la simplicité. Vers la fin du siècle dernier apparut la première indication que les atomes ne sont pas des particules élémentaires indépendantes les unes des autres. En effet, certains éléments chimiques se ressemblent, et un chimiste russe, Mendeleïev, eut l'idée de classer les éléments chimiques, par masses atomiques croissantes, dans un tableau à caractère périodique (Fig. 6). Les éléments qui se ressemblent se retrouvent dans une même colonne, et le tableau de Mendeleïev comporte un certain nombre de lignes, ou périodes. Par exemple, les éléments lithium, sodium, potassium, rubidium, cesium, francium, qui appartiennent à la famille des *alcalins*, remplissent la première colonne. La dernière colonne contient des éléments gazeux que l'on trouve dans l'air en très petites quantités, d'où le nom de *gaz rares*: hélium, néon, argon, krypton, xénon, radon. Ils ont la propriété d'être chimiquement inactifs, ne se combinant à rien, pas même entre eux.

Pour que sa classification respecte les analogies entre éléments chimiques, Mendeleïev avait dû laisser plusieurs cases vides. Elles ont été comblées plus tard, suite à la découverte des éléments chimiques correspondants. La classification de Mendeleïev avait donc fait des prédictions qui devaient se réaliser. Une telle classification ne peut pas être l'effet du hasard, et on peut soupçonner que les atomes ne sont pas des particules élémentaires, mais sont plutôt construits à partir de particules plus petites. Un pas en avant fut franchi avec la découverte de *l'électron*. Ce dernier est une particule élémentaire très légère (la masse de l'électron est environ 2000 fois plus petite que la masse de l'atome le plus léger, l'atome d'hydrogène). L'électron porte une charge électrique négative égale à 1.6×10^{-19} Coulomb. Le courant électrique résulte d'une circulation d'électrons dans un matériau conducteur. Dans une lampe à incandescence ordinaire il passe environ 10^{19} électrons par seconde. En soumettant la matière à diverses actions on peut en faire sortir des électrons, par exemple en l'irradiant avec un faisceau de lumière de longueur d'onde appropriée (c'est l'effet photoélectrique, qui donne lieu à de nombreuses applications pratiques). On peut donc imaginer que les atomes contiennent des électrons. Mais comme les atomes sont électriquement neutres ils doivent aussi contenir de l'électricité positive. Ce fut le mérite du physicien Ernest Rutherford (qui fut professeur à McGill) de montrer que cette charge positive est concentrée dans un très petit volume appelé *noyau*. La charge positive du noyau équilibre la charge négative des électrons. Le noyau contient à peu près toute la masse de l'atome.

Alors que la dimension d'un atome est de l'ordre de 10^{-8} cm, la dimension du noyau est de l'ordre de 10^{-13} cm. Le volume de l'atome est donc pratiquement constitué par du vide. La densité de la matière nucléaire (contenue dans le noyau) est environ 10^{14} fois plus grande que celle de la matière que nous connaissons. Des expériences montrèrent que le nombre d'électrons présents dans un atome est aussi le numéro de l'élément chimique correspondant dans la classification périodique de Mendeleïev. Par exemple, un atome d'hydrogène contient un seul électron, et l'atome d'uranium en contient 92. On sait aussi que les électrons sont répartis sur des couches autour du noyau. Ces couches ne peuvent contenir chacune qu'un certain nombre d'électrons. On peut alors expliquer la classification de Mendeleïev. Les gaz rares correspondent à des couches complètes, ce qui explique leur inactivité chimique. Les alcalins ont un électron en dehors de couches complètes (Fig. 7). Les halogènes (fluor, chlore, brome, iode) ont leur dernière couche incomplète, il y manque un électron. Les réactions chimiques ne font intervenir que les électrons périphériques des atomes. Elles n'affectent pas le noyau.

Atome de sodium (Z = 11)



Au cours d'une réaction chimique les atomes ne sont pas détruits; ils changent seulement de partenaires. On dit que le nombre d'atomes de chaque espèce est *conservé*. Donnons un exemple, celui de la réaction de l'acide chlorhydrique (ClH) avec l'hydroxyde de sodium (NaOH). Une telle réaction est représentée par l'équation suivante:

$$\mathrm{ClH} + \mathrm{NaOH} \rightarrow \mathrm{ClNa} + \mathrm{OH_2} \tag{1}$$

On peut vérifier la conservation des atomes de chaque élément chimique (Table **??**):

nombre d'atomes	avant la réaction		après la réaction
atomes de chlore:	1	=	1
atomes de sodium:	1	=	1
atomes d'oxygène:	1	=	1
atomes d'hydrogène:	1 + 1	=	2

Table 1: Conservation des atomes dans une réaction chimique.

Ceci explique l'échec des *alchimistes* qui voulaient transmuter les éléments, c'est à dire transformer un élément en un autre (par exemple le mercure en or). Pour effectuer une transmutation il faut s'attaquer au noyau. C'est ce que font aujourd'hui les physiciens nucléaires.

Notons ici l'importance des lois de conservation, en chimie comme en physique. Elles nous disent quels sont les processus (physiques ou chimiques) qui peuvent se produire et ceux qui ne le peuvent pas.

5 Les ions

Dans certaines conditions, les atomes peuvent perdre des électrons ou en gagner (Fig. 8).

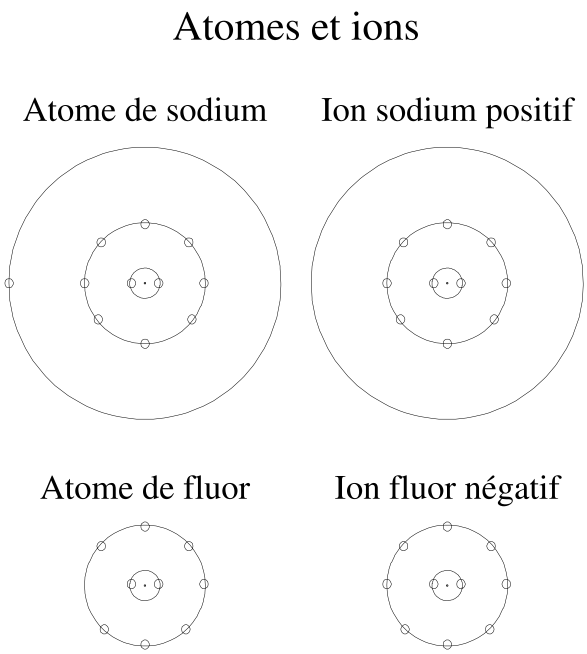
Un atome qui a perdu un électron constitue un ion positif, par exemple un ion sodium $\mathrm{Na^+}$. Un atome qui a gagné un électron constitue un ion négatif, par exemple un ion chlore $\mathrm{Cl^-}$. Les alcalins donnent facilement des ions positifs car leur électron le plus extérieur est peu lié. Les halogènes donnent facilement des ions négatifs car ils tendent à compléter leur couche extérieure. On peut avoir des ions plusieurs fois chargés, par exemple un atome de calcium qui perd deux électrons périphériques donne un ion calcium deux fois chargé positivement $\mathrm{Ca^{++}}$.

Certaines substances ont une structure ionique. Par exemple, un cristal de sel de cuisine (chlorure de sodium) est un assemblage d'ions $\mathrm{Na^+}$ et $\mathrm{Cl^-}$ disposés régulièrement suivant un réseau (Fig. 9).

La notion d'ionisation est importante pour la suite, en particulier lorsque nous parlerons de *rayonnements ionisants*.

6 Les interactions électromagnétiques

Ce sont les forces électriques qui sont en majeure partie responsables de l'existence des atomes. Le noyau, qui est positivement chargé, attire les électrons négatifs. Les forces magnétiques, qui



résultent des déplacements des charges électriques, jouent un rôle secondaire. Quant aux interactions gravitationnelles, elles sont parfaitement négligeables. On parle toujours d'interactions électromagnétiques parce que l'électricité et le magnétisme sont étroitement liés, ainsi que le montre la théorie unifiée de Maxwell des interactions électromagnétiques. Ces interactions donnent lieu à de nombreuses applications, bien connues, parmi lesquelles: l'énergie électrique, les télécommunications, les ordinateurs.

Pris dans son ensemble, l'atome est électriquement neutre. On peut se demander comment les atomes s'unissent pour former des molécules. Là encore ce sont les interactions électromagnétiques qui entrent en jeu. Il y a plusieurs possibilités. Par exemple, deux atomes neutres peuvent devenir un ion positif et un ion négatif après échange d'électrons. Ils subissent alors la force électrique d'attraction. Deux atomes peuvent s'approcher suffisamment pour mettre en commun des électrons, ce qui constitue une autre forme de liaison chimique.

7 Le noyau atomique

7.1 Les constituants du noyau: protons et neutrons

La physique nucléaire s'intéresse au noyau de l'atome. On sait, depuis 1932 (année de la découverte du neutron), que ce noyau a une structure complexe, construite à partir de deux sortes de particules, les *protons* et les *neutrons*. Pour le physicien nucléaire, le proton et le neutron sont deux particules qui se ressemblent beaucoup. Elles ont à peu près la même masse (environ 2000 fois la masse de l'électron). Elles se distinguent cependant par leur charge électrique: le proton porte une charge positive, alors que le neutron est électriquement neutre. Cette différence n'est pas très importante, car les forces électromagnétiques jouent un rôle secondaire en physique nucléaire.

7.2 Les isotopes

Pour l'atome, électriquement neutre, le nombre de protons présents dans le noyau est égal au nombre d'électrons que l'on trouve autour de ce noyau. Il est donc donné par le numéro atomique, numéro de l'élément dans la classification de Mendeleïev. On désigne ce nombre de protons par la lettre Z. Quant au nombre de neutrons, désigné par N, il peut prendre plusieurs valeurs pour un même élément chimique, et on arrive ainsi à la notion d'*isotopes*. Si deux noyaux contiennent le même nombre de protons mais des nombres de neutrons différents on dit que l'on a affaire à deux isotopes d'un même élément chimique (Fig. 10). Le mot *isotope* signifie "qui se trouve dans la même case" (de la classification périodique). Ainsi, on connaît plusieurs isotopes de l'uranium, les plus importants étant l'uranium 235 (^{235}U) et l'uranium 238 (^{238}U). L'uranium se trouve dans la case 92 de la classification périodique. L'atome d'uranium contient donc 92 électrons, et son noyau 92 protons. Le noyau d'uranium 235 contient 143 neutrons alors que le noyau d'uranium 238 contient 146 neutrons. Introduisons maintenant le nombre total de nucléons (encore appelé *nombre de masse*), et désigné par A, pour caractériser un isotope (le terme *nucléon* désigne indifféremment un proton ou un neutron). On a évidemment la relation:

$$\mathrm{A} = \mathrm{Z} + \mathrm{N} \tag{2}$$

On peut vérifier cette relation pour l'uranium (Table 1).

Isotope	Protons (Z)	Neutrons (N)	Nucléons (A)
^{235}U	92	143	235
^{238}U	92	146	238

Table 2: Deux isotopes de l'uranium.

Un élément chimique possède plusieurs isotopes, en nombre variable. Donnons quelques exemples, importants pour la suite du cours. L'hydrogène possède trois isotopes: l'isotope de masse 1 (^{1}H), appelé *protium* contient dans son noyau un proton seulement. L'isotope de masse 2 (^{2}H), appelé *deutérium* contient un proton et un neutron. L'isotope de masse 3 (^{3}H), appelé *tritium* contient un proton et deux neutrons (Table **??**). On utilise souvent les notations suivantes pour ces isotopes: H (A = 1); D (A = 2); T (A = 3)

L'eau ordinaire est formée de molécules OH_2, où H est un atome d'hydrogène léger (isotope 1). L'eau lourde est formée à partir de l'isotope de masse 2. Il existe deux molécules possibles, OHD et OD_2. On sait que l'eau lourde est utilisée dans les réacteurs nucléaires de la filière canadienne CANDU (CANada-Deutérium-Uranium).

Isotope	Protons (Z)	Neutrons (N)	Nucléons (A)
^{1}H (H)	1	0	1
^{2}H (D)	1	1	2
^{3}H (T)	1	2	3

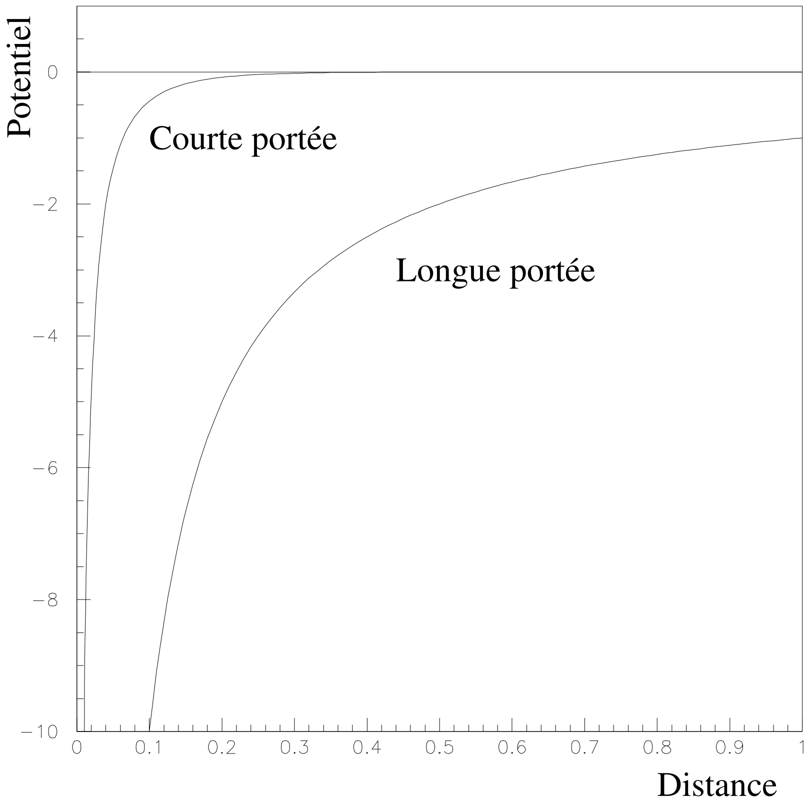
Table 3: Les trois isotopes de l'hydrogène.

On peut présenter tous les isotopes connus au moyen d'un tableau où l'on porte suivant l'horizontale le nombre de protons Z, et suivant la verticale le nombre de neutrons N (Figs. 11, 11a, 11b, 11c, 11d). On constate que les isotopes connus se situent à l'intérieur d'une région, appelée *vallée de stabilité*. Au début, il y a à peu près autant de protons que de neutrons, mais quand le noyau devient de plus en plus gros le nombre des neutrons dépasse celui des protons. On constate aussi que le diagramme prend fin lorsque le nombre de protons dépasse la valeur 100 environ. Il est possible de produire des noyaux au delà, mais ils sont très instables.

8 Les forces nucléaires

L'existence des noyaux atomiques ne peut se comprendre qu'en introduisant un nouveau type de forces: les *forces nucléaires*. En effet, les forces électriques ne peuvent expliquer la cohésion du noyau atomique: les protons, chargés positivement, se repoussent, et les neutrons, neutres, ne sont pas soumis aux forces électriques. Quant aux forces gravitationnelles, elles sont complétement négligeables. Il doit donc y avoir entre tous les nucléons, quelles que soient leur charges électriques, des forces d'attraction considérables. Ces forces sont maintenant bien connues car bien étudiées depuis le début de la physique nucléaire. Elles sont fortement attractives et essentiellement les mêmes pour les systèmes proton-proton, proton-neutron et neutron-neutron (on dit que les forces nucléaires sont indépendantes de la charge électrique). Les forces nucléaires font intervenir des énergies qui sont environ un million de fois plus grandes que pour les forces électromagnétiques. C'est pourquoi l'énergie que l'on peut tirer des noyaux atomiques (l'énergie nucléaire) est beaucoup plus grande que l'énergie que l'on peut tirer des atomes, par exemple par des réactions chimiques (combustion du charbon, du pétrole, etc...).

Pourquoi les forces nucléaires ne sont-elles pas observables dans la vie courante (à l'échelle macroscopique)? Elles sont pourtant beaucoup plus fortes que les forces gravitationnelles ou électromagnétiques, qui elles, nous sont beaucoup plus accessibles. C'est parce que les forces nucléaires sont de très courte portée, de l'ordre de 10^{-13} cm. C'est à dire qu'elles n'agissent entre deux noyaux que si ceux-ci se touchent. À l'opposé, les forces gravitationnelles et les forces électromagnétiques sont de longue portée et elles peuvent agir à des distance considérables. Les forces gravitationnelles, qui sont toujours attractives, agissent entre les corps célestes (le soleil et la terre, la terre et la lune, etc...). Les forces électromagnétiques sont la plupart du temps cachées car les objets que nous observons autour de nous sont presque toujours électriquement neutres (les charges électriques positives et négatives se compensent). Il est possible, cependant, d'électriser des objets (par frottement) et on peut alors observer les forces électriques à des distances macroscopiques.

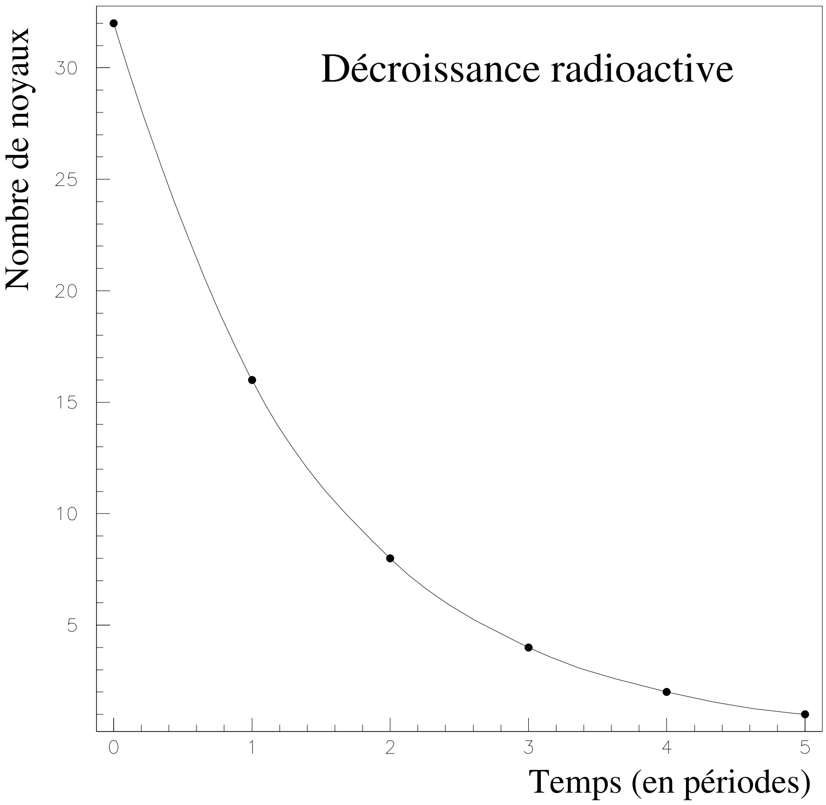


Aujourd'hui on admet que les forces nucléaires résultent des interactions entre les *quarks*, les constituents des nucléons.

9 La radioactivité

9.1 Instabilité, période radioactive

Seuls les noyaux qui sont au centre de la vallée de stabilité ont un caractère permanent. Les noyaux qui sont sur les bords de la vallée de stabilité et ceux qui sont à son extrémité (Z plus grand que 92) sont instables et se désintègrent par divers processus de radioactivité. On a d'abord découvert la *radioactivité naturelle* (Becquerel en 1897), puis la *radioactivité artificielle* (Frédéric et Irène Joliot-Curie en 1934). Il n'y a pas de différence fondamentale entre radioactivité naturelle et radioactivité artificielle. Dans les deux cas, les noyaux instables se désintègrent (on verra comment) suivant une loi de *décroissance radioactive* qui est caractérisée par une *période* ou *demi-vie* (désignée par la lettre T). Cette quantité représente le temps au bout duquel la moitié des noyaux se sont désintégrés. Supposons qu'à un certain instant nous ayions 16000 noyaux. Au bout d'une période nous n'en aurons plus que 8000, au bout de deux périodes 4000, au bout de trois périodes 2000, etc... jusqu'à disparition totale des noyaux (Fig. 12).



Les périodes radioactives sont très différentes les unes des autres et s'échelonnent entre des milliards d'années et des millièmes de seconde. On comprend mieux, maintenant, la distinction entre radioactivité naturelle et radioactivité artificielle. Les isotopes dont la période est très longue (de l'ordre de l'âge de l'univers) sont encore présents et constituent les radioéléments naturels. Ceux dont les périodes sont beaucoup plus courtes que l'âge de l'univers ont disparu depuis longtemps et n'existent pas à l'état naturel. Mais ils peuvent être reproduits au laboratoire: ce sont les radioéléments artificiels. Donnons quelques exemples de périodes radioactives (Table 12).

Isotope	Période	Abondance
^{238}U	4.51×10^9 ans	99.3%
^{235}U	0.71×10^9 ans	0.7%

Table 4: Périodes radioactives et abondances naturelles des isotopes de l'uranium.

L'uranium 238 a une période de 4.51 milliards d'années. L'uranium 235 a une période plus courte, 0.71 milliards d'années. On comprend pourquoi, de nos jours, l'uranium naturel ne contient plus que 0.7 % de l'isotope 235, pour 99.3 % de l'isotope 238. Il y a plusieurs milliards d'années, l'uranium naturel était beaucoup plus riche en son isotope 235 et ceci explique que la fission nucléaire (qui se produit avec l'isotope 235) ait pu se produire spontanément, donnant naissance à des réacteurs naturels (un phénomène extrêmement intéressant, qui s'est produit à Oklo, en Afrique). La table 5 donne la composition isotopique de l'uranium naturel en fonction du temps.

Temps (10^9 ans)	% ^{238}U	% ^{235}U
-6	49.98	50.02
-5	69.30	30.70
-4	83.71	16.29
-3	92.10	7.90
-2	96.36	3.64
-1	98.39	1.61
$\rightarrow$ 0	99.27	0.72
1	99.68	0.32
2	99.86	0.14
3	99.94	0.06
4	99.98	0.02
5	99.99	0.01
6	100.00	0.00

Table 5: Composition isotopique de l'uranium naturel en fonction du temps. Le temps t = 0 correspond à l'époque actuelle. Il y a six milliards d'années il y avait autant d'uranium 235 que d'uranium 238. Dans six milliards d'années l'uranium 235 aura pratiquement disparu.

Parmi les éléments à périodes plus courtes, citons le cobalt 60, qui est utilisé en radiothérapie: sa période est 5.26 ans. Le carbone 11, qui est important pour la médecine nucléaire, a une période de 20.3 minutes. Le carbone 14, qui est utilisé en archéologie pour dater des objets, a une période de 5730 ans.

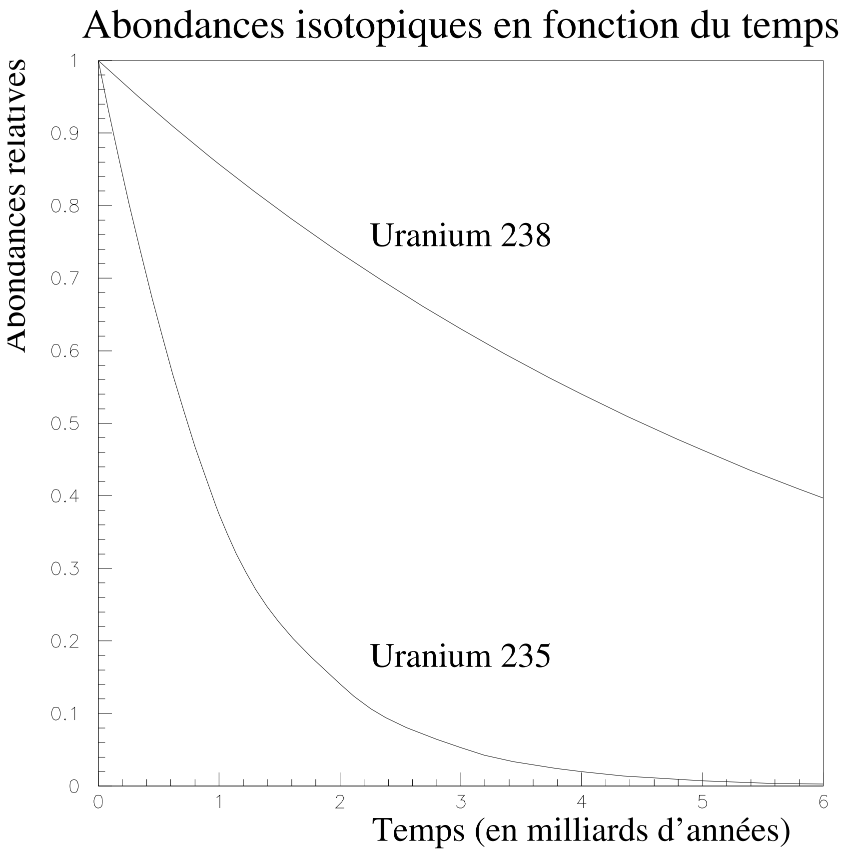
Examinons maintenant les différents mécanismes de désintégration radioactive. On en connaît trois, que l'on désigne par α, β et γ.

9.2 Activité radioactive

On définit l'*activité* d'une source radioactive à partir du nombre de désintégrations qui s'y produisent par seconde. On a d'abord utilisé comme unité le *curie*, défini comme l'activité d'une source de un gramme de radium. Un curie correspond à 3.7×10^{10} désintégrations par seconde. On utilise également les multiples et sous multiples du curie (voir appendice 1). Mais l'unité légale d'activité est maintenant le *becquerel*. Un becquerel correspond à une désintégration par seconde. Voici quelques exemples (Table 6).

9.3 Radioactivité α

Dans une radioactivité α le noyau se scinde en deux fragments très inégaux, un petit et un gros. Le petit fragment est une particule α, formée de deux protons et de deux neutrons, et qui est



donc en fait un noyau d'hélium 4. On peut représenter un tel processus par une équation:

$$^{238}\mathrm{U} \rightarrow\ ^{234}\mathrm{Th} +\ ^{4}\mathrm{He} \tag{3}$$

ou encore:

$$^{238}\mathrm{U} \rightarrow\ ^{234}\mathrm{Th} + \alpha \tag{4}$$

Les protons et les neutrons présents initialement dans le noyau d'uranium 238 se retrouvent dans les deux noyaux du système final. Il y avait 92 protons et 146 neutrons dans le noyau initial. On retrouve 90 protons et 144 neutrons dans le noyau de thorium 234, 2 protons et 2 neutrons dans la particule α. Les protons et les neutrons n'ont pas été détruits au cours de la désintégration, ils ont simplement changé de partenaires. Les physiciens nucléaires disent qu'il y a *conservation* du nombre de protons et du nombre de neutrons. On se rappelle qu'une loi de conservation analogue existeen chimie pour les atomes. Il faut noter que le mot "conservation" a ici une signification bien précise et quantitative. Faisons la vérification dans le cas de la désintégration de l'uranium 238 (Table 7):

Évidemment, il y a aussi conservation du nombre de nucléons (Table 8).

Au cours d'une telle désintégration, il y a libération d'énergie, au dépens de la masse du système. Cette masse diminue quand on passe de ^{238}U à ^{234}Th + α. L'énergie libérée se retrouve

Source	Activité (en curies)
Océans	5×10^{11} (^{40}K)
Croûte terrestre (500 premiers mètres)	10^{13} (^{40}K)
idem	10^{13} (U, Th et descendants)
Réacteur (en fonctionnement)	10^{10}
Réacteur (10 jours après arrêt)	10^{9}
Réacteur (40 ans après arrêt)	10^{7}

Table 6: Quelques exemples de sources radioactives et de leurs activités.

nombre de:	avant la réaction		après la réaction
protons	92	=	90 + 2
neutrons	146	=	144 + 2

Table 7: Conservation des protons et des neutrons dans la désintégration α de l'uranium 238.

sous forme d'énergie cinétique communiquée aux deux fragments, mais surtout à la particule α, qui est la plus légère. La particule α est donc propulsée à une vitesse considérable, de l'ordre du tiers de la vitesse de la lumière, soit environ 100 000 kilomètres par seconde. Cette particule α porte deux charges positives; en traversant la matière, elle ionise les atomes. On vient de rencontrer le premier exemple de rayonnement ionisant: le rayonnement α.

9.4 Radioactivité β

Passons maintenant à la radioactivité β. On constate que de nombreux noyaux se désintègrent en émettant des électrons. On sait que ces électrons sont accompagnés de particules neutres. Par exemple, le thorium 234 se désintègre de la manière suivante:

$$^{234}\mathrm{Th} \rightarrow \; ^{234}\mathrm{Pa} + \mathrm{e}^- + \overline{\nu}_e \tag{5}$$

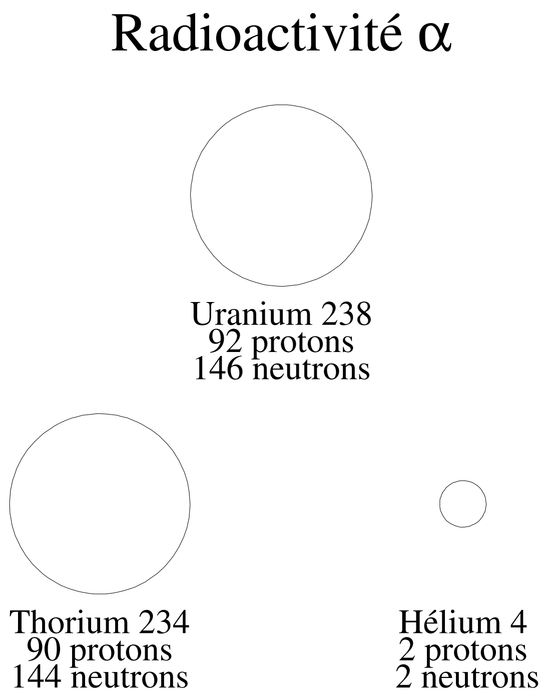
La particule neutre associée à l'électron est un antineutrino électronique, une particule difficilement détectable, et qui ne joue aucun rôle en ce qui concerne l'énergie nucléaire. Lors d'une désintégration β^- (ainsi appelée puisqu'il y a émission d'un électron négatif) le nombre de protons Z augmente de un et le nombre de neutrons N diminue de un (Table 9).

Tout se passe comme si à l'intérieur du noyau un neutron s'était transformé en proton, suivant:

$$\mathrm{n} \rightarrow \; \mathrm{p} + \mathrm{e}^- + \overline{\nu}_e \tag{6}$$

C'est bien ce qui se passe car le neutron libre subit effectivement cette désintégration (T = 12 minutes). La radioactivité β^- est un phénomène naturel parmi les noyaux lourds et quelques noyaux légers. Un autre exemple de radioactivité β^- naturelle est celle du ^{40}K (T = 1.28 milliards d'années):

$$^{40}\mathrm{K} \rightarrow \; ^{40}\mathrm{Ca} + \mathrm{e}^- + \overline{\nu}_e \tag{7}$$



nombre de:	avant la réaction		après la réaction
nucléons	238	=	234 + 4

Table 8: Conservation des nucléons dans la désintégration α de l'uranium 238.

et comme le potassium naturel contient un peu de potassium 40 cette radioactivité se produit dans notre propre corps. C'est l'une des causes naturelles d'exposition des organismes vivants aux rayonnements ionisants.

En plus de la radioactivité β^- naturelle il existe une radioactivité β^- artificielle. De nombreux isotopes radioactifs β^- peuvent être obtenus artificiellement comme produits de fission ou encore par des réactions nucléaires. C'est le cas du cobalt 60 qui est utilisé en médecine nucléaire, en radiothérapie. Il se désintègre suivant la réaction:

$$^{60}\mathrm{Co} \rightarrow\ ^{60}\mathrm{Ni} + \mathrm{e}^- + \overline{\nu}_e \tag{8}$$

Mais on a aussi découvert la radioactivité artificielle β^+, avec émission d'un *positron.* Cette dernière particule est identique à l'électron, sauf que sa charge électrique est positive. Le positron est l'*antiparticule* de l'électron. C'est une loi générale en physique, qui veut qu'à toute particule corresponde son antiparticule. Les antiparticules constituent l'*antimatière.* Un

nombre de:	avant la désintégration	après la désintégration
protons	90	91
neutrons	144	143
nucléons	234	234

Table 9: Protons, neutrons et nucléons dans la radioactivité β^-.

exemple de radioactivité β^+ est celle du carbone 11, un isotope important pour la médecine nucléaire:

$$^{11}\mathrm{C} \rightarrow \ ^{11}\mathrm{B} + \mathrm{e}^+ + \nu_e \tag{9}$$

Dans la radioactivité β^+ la particule neutre émise est un neutrino électronique. Cette fois, le nombre de protons Z diminue de un et le nombre de neutrons N augmente de un. Un proton du noyau s'est transformé en un neutron (Table 10).

nombre de:	avant la désintégration	après la désintégration
protons	6	5
neutrons	5	6
nucléons	11	11

Table 10: Protons, neutrons et nucléons dans la radioactivité β^+.

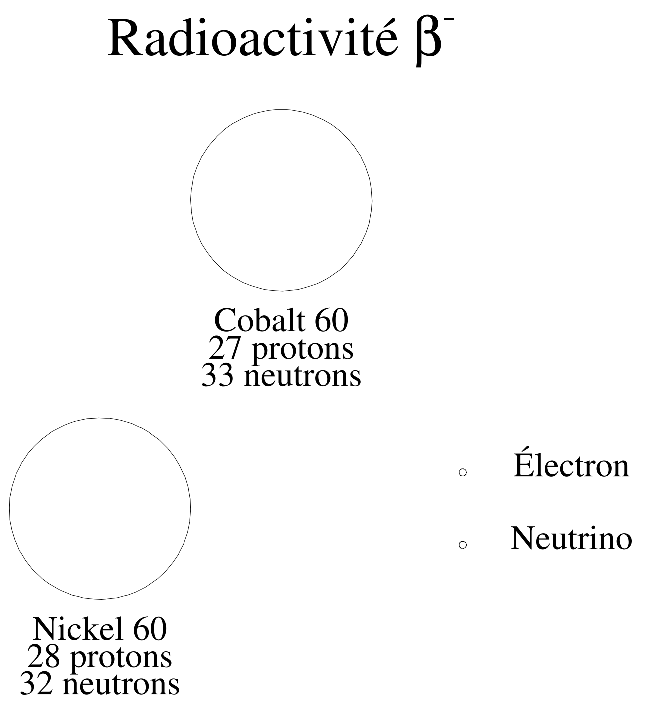
Dans la radioactivité β il n'y a pas conservation du nombre de protons, ni conservation du nombre de neutrons. Par contre il y a conservation du nombre de nucléons. Les deux noyaux qui sont reliés par une transition β sont des *isobares* (même nombre de nucléons A). Les processus α et β constituent des transmutations: on passe d'un élément chimique à un autre, par exemple du cobalt au nickel par désintégration β. Il faut se rappeler que les *alchimistes* avaient tenté de réaliser des transmutations, sans succès. On ne peut y arriver par des méthodes chimiques, car celles-ci n'affectent que les électrons autour des noyaux, mais pas les noyaux eux-mêmes.

La figure **??** résume les propriétés des désintégrations α, β^- et β^+.

10 L'émission γ

Très souvent, la radioactivité α et la radioactivité β sont accompagnées de l'émission γ. C'est parce que le noyau résultant d'une radioactivité α ou β se trouve souvent dans un *état excité*, ce qui veut dire qu'il possède par rapport à son état stable un excès d'énergie. Il va retourner à son état stable (on dit aussi *état fondamental*) en émettant un ou plusieurs rayons γ.

Le rayon γ appartient à la famille des *photons*, particules de lumière. C'est Einstein qui a émis l'hypothèse des photons, suivant laquelle la lumière est formée de particules électriquement neutres appelées photons. Un photon transporte une certaine quantité d'énergie E qui est reliée



à sa longueur d'onde λ par une relation due à Einstein:

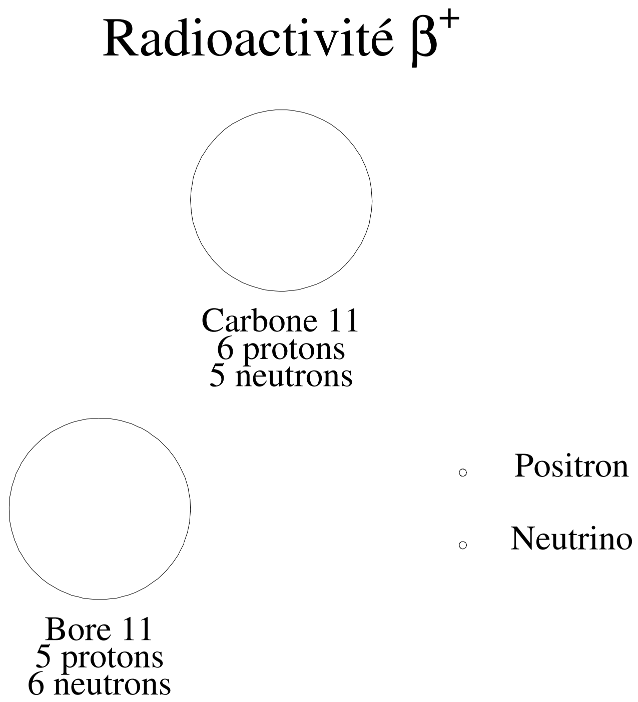
$$E = \frac{\hbar c}{\lambda} \tag{10}$$

où $\hbar$ et c sont deux constantes fondamentales de la physique, la constante de Planck et la vitesse de la lumière dans le vide. Les photons sont les *quanta* du champ électromagnétique et ces particules possèdent un spectre dont les longueurs d'onde vont des kilomètres aux dimensions des atomes et même des noyaux (Fig. 13 et table 11). L'unité d'énergie utilisée ici (l'électron-Volt ou eV) sera définie plus tard.

Du côté des grandes longueurs d'onde on trouve les ondes radio, qui sont utilisées pour les télécommunications,et dont les longueurs d'onde vont du kilomètre au mètre. Vers des longueurs d'onde plus courtes, on trouve les ondes Radar. Puis l'infrarouge, qui correspond à des longueurs d'onde de l'ordre du micron (10^{-6} mètre). L'oeil est sensible aux ondes lumineuses qui se situent dans une bande très étroite allant de 0.8 micron (le rouge) à 0.4 micron (le violet). Vers des longueurs d'onde plus courtes on trouve l'ultraviolet, puis les rayons X, de 100 angström à 1 angström environ (1 angström = 10^{-10} mètre), puis enfin les rayons γ avec des longueurs d'onde de l'ordre des dimensions des noyaux.

Un exemple d'émission γ: celle qui est associée à la désintégration β^- du cobalt 60:

$$^{60}\mathrm{Co} \rightarrow \ ^{60}\mathrm{Ni}^* + \mathrm{e}^- + \overline{\nu}_e \tag{11}$$



qui forme le nickel 60 dans un état excité (désigné par *). Ce nickel 60 excité retourne à l'état fondamental en émettant deux rayons γ en cascade (Fig. 14):

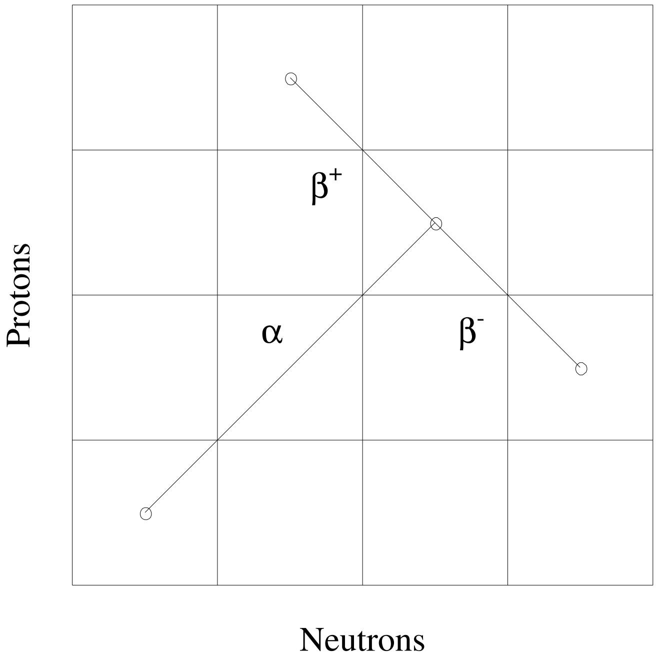
$$^{60}\mathrm{Ni}^{*} \rightarrow \ ^{60}\mathrm{Ni} + \gamma + \gamma \tag{12}$$

Ces deux rayons γ, désignés improprement par "les γ du cobalt" puisqu'en réalité ils appartiennent au nickel, sont utilisés en médecine nucléaire (radiothérapie) pour le traitement du cancer. On voit que contrairement aux radioactivités α et β l'émission γ ne cause aucune transmutation, puisque le nombre de protons et le nombre de neutrons ne sont pas modifiés. Il y a seulement un réarrangement des nucléons à l'intérieur du noyau. Nous verrons que les rayons γ, même s'ils sont électriquement neutres, peuvent ioniser les atomes.

11 Les séries radioactives

Il arrive fréquemment qu'une désintégration radioactive conduise à un noyau qui est lui même radioactif, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'on arrive à un noyau stable. On a affaire à une *série* radioactive, dont plusieurs exemples nous sont fournis par la radioactivité naturelle (Figs. 15, 15a, 15b, 15c, 15d). Le chef de file de la série est un noyau qui a une très longue période. Ses descendants peuvent avoir des périodes T plus ou moins longues, et même parfois très courtes.

Désintégrations α, β^+, β^-



Tous les descendants sont *en équilibre*, c'est à dire que dans un échantillon de matière leur nombre ne varie pas: la désintégration vers le noyau *fille* est compensée par la formation à partir du noyau *mère*. Les trois séries radioactives naturelles ont pour chefs de file ^{238}U (T = 4.51 $\times 10^9$ années), ^{232}Th (T = 14.1 x 10^9 années) et ^{235}U (T= 0.71 $\times 10^9$ années). À chaque étape dans la chaine, le nombre de nucléons A diminue de 4 (radioactivité α), ou ne change pas (radioactivité β ou émission γ). On s'attend donc à observer quatre séries radioactives (Table 12) avec des nombres de nucléons égaux à 4n, 4n+1, 4n+2, 4n+3. Voir aussi les figures à la fin du texte.

On n'a observé que trois séries radioactives naturelles. La quatrième a été recréée artificiellement. Son chef de file est le neptunium 237 (T = 2.14 $\times 10^6$ années). Elle avait disparu car la période de ^{237}Np est beaucoup plus courte que l'âge de l'univers. On comprend par cet exemple qu'il n'y a aucune différence fondamentale entre la radioactivité naturelle et la radioactivité artificielle.

Type de rayonnement	Origine	Longueur d'onde (en mètres)	Énergie (en eV)
Ondes radio	Antennes	10^4 à 10^{-1}	10^{-10} à 10^{-5}
Radar	Antennes	1 à 10^{-2}	10^{-6} à 10^{-4}
Micro-ondes	Antennes	1 à 10^{-3}	10^{-6} à 10^{-3}
Infrarouge	Atomes	10^{-2} à 0.8×10^{-6}	10^{-4} à 1
Visible	Atomes	0.8×10^{-6} à 0.4×10^{-6}	1 à 2
Ultra-violet	Atomes	0.4×10^{-6} à 10^{-9}	2 à 10^3
Rayons X	Atomes	10^{-7} à 10^{-11}	10 à 10^5
Rayons γ	Noyaux	10^{-10} à 10^{-14}	10^4 à 10^8

Table 11: Les rayonnements électromagnétiques.

Chef de file	Période	Nombre de nucléons
^{232}Th	14.1×10^9 ans	4n
^{237}Np	2.14×10^6 ans	4n+1
^{238}U	4.51×10^9 ans	4n+2
^{235}U	0.71×10^9 ans	4n+3

Table 12: Quatre séries radioactives.

12 Les réactions nucléaires

Elles se produisent à l'état naturel: par exemple, elles sont induites dans l'atmosphère terrestre par les rayons cosmiques, avec production de carbone 14:

$$\mathrm{n} + {}^{14}\mathrm{N} \rightarrow \mathrm{p} + {}^{14}\mathrm{C} \tag{13}$$

Mais on peut aussi les produire en laboratoire. Les premières réactions nucléaires furent observées en utilisant des particules α émises par des radioéléments naturels. Par exemple:

$${}^{4}\mathrm{He} + {}^{14}\mathrm{N} \rightarrow {}^{1}\mathrm{H} + {}^{17}\mathrm{O} \tag{14}$$

Sous le bombardement de particules α (des noyaux d'hélium 4) les noyaux d'azote 14 sont transmutés en oxygène 17 avec émission d'un proton (noyau d'hydrogène 1). Au cours de cette transmutation, il y a conservation du nombre de protons, du nombre de neutrons, et donc aussi du nombre de nucléons (Table 13).

nombre de:	avant la réaction		après la réaction
protons	2 + 7	=	1 + 8
neutrons	2 + 7	=	0 + 9
nucléons	4 + 14	=	1 + 17

Table 13: Conservation des protons, des neutrons et des nucléons dans une réaction nucléaire.

Pour qu'une telle réaction se produise il faut que les deux noyaux de l'état initial s'approchent jusqu'à sentir les forces nucléaires, de courte portée, ils doivent pratiquement se toucher. Mais, à grande distance, ils sont soumis à la force électrique, qui est répulsive (les noyaux sont chargés positivement) et de longue portée. Les deux noyaux doivent donc être projetés l'un contre l'autre avec une grande énergie cinétique. En général, un seul des deux noyaux possède cette énergie cinétique et vient frapper un noyau qui est au repos dans le laboratoire. On peut utiliser comme particules de bombardement les particules α émises par des noyaux radioactifs, ou encore toutes sortes de particules qui ont été accélérées par des appareils que l'on nomme *accélérateurs de particules*. Parmi ces derniers, on trouve le *cyclotron*, qui est utilisé pour produire des isotopes radioactifs utiles en médecine nucléaire. En effet, les produits d'une réaction nucléaire peuvent être soit stables, soit radioactifs. Par exemple, le carbone 11, un isotope radioactif très intéressant en médecine nucléaire, peut être produit par la réaction:

$$^{2}\mathrm{H} + \ ^{10}\mathrm{B} \rightarrow \ \mathrm{n} + \ ^{11}\mathrm{C} \tag{15}$$

Une façon abrégée de représenter cette réaction est:

$$^{10}\mathrm{B}\ (\mathrm{d,n})\ ^{11}\mathrm{C} \tag{16}$$

On utilise comme cible l'isotope 10 du bore et on le bombarde avec des deutons (noyaux de l'hydrogène 2). Un neutron est émis et on obtient l'isotope 11 du carbone. On connaît des centaines de réactions nucléaires, et on en trouve sans cesse de nouvelles. D'autre part, ces réactions nucléaires sont très importantes pour expliquer l'évolution de l'univers, en particulier la *nucléo-synthèse* qui explique comment tous les éléments chimiques de l'univers se sont formés, de même que la vie et la mort des étoiles. L'*astrophysique nucléaire* traite de ces problèmes.

13 La fission nucléaire

Il s'agit d'une réaction nucléaire d'un type particulier, et qui présente une grande importance du fait de ses applications (énergie nucléaire, armes nucléaires). La fission nucléaire a été découverte, un peu par hasard, à Berlin, juste avant la seconde guerre mondiale. On essayait alors de produire des éléments transuraniens, c'est à dire des éléments situés au-delà de l'uranium dans la classification périodique de Mendeleïev, donc avec des numéros atomiques supérieurs à 92. On avait trouvé une méthode efficace, consistant à faire capturer un neutron par un noyau lourd. Le noyau obtenu est alors instable par excès de neutrons, et il transforme un de ses neutrons en un proton par radioactivité β. On peut même avoir deux radioactivités β successives comme dans le cas suivant (capture radiative de neutron):

$$^{238}\mathrm{U}(\mathrm{n},\gamma)\ ^{239}\mathrm{U} \tag{17}$$

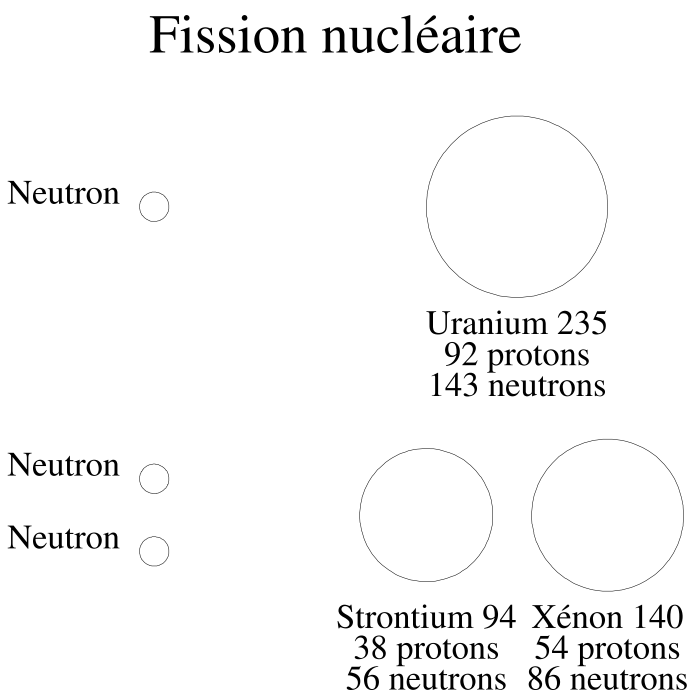
et ensuite:

$$^{239}\mathrm{U} \rightarrow \ ^{239}\mathrm{Np} + \mathrm{e}^- + \overline{\nu}_e \qquad (\mathrm{T} = 23.5\ \mathrm{min}) \tag{18}$$

$$^{239}\mathrm{Np} \rightarrow \ ^{239}\mathrm{Pu} + \mathrm{e}^- + \overline{\nu}_e \qquad (\mathrm{T} = 2.3\ \mathrm{j}) \tag{19}$$

On aboutit ainsi rapidement au plutonium 239, un transuranien dont le numéro atomique est Z = 94. Mais on découvrit, dans les débris de la réaction induite par un neutron sur de l'uranium, des éléments de nombres atomiques beaucoup plus petits que 92, en fait de l'ordre de la moitié. On a montré que le noyau responsable est l'isotope 235 de l'uranium, qui se divise en deux fragments à peu près égaux, par exemple:

$$\mathrm{n} +^{235}\mathrm{U} \rightarrow\ ^{94}\mathrm{Sr} +\ ^{140}\mathrm{Xe} + 2\mathrm{n} \tag{20}$$



Un telle cassure du noyau a reçu le nom de *fission*. Ce qui est important, c'est qu'elle est accompagnée de l'émission de plusieurs neutrons (deux dans l'exemple donné plus haut, mais parfois trois car il y a de nombreuses façons pour l'uranium 235 de fissionner). Nous verrons que c'est grâce à ces neutrons qu'une *réaction en chaine* (Fig. 16) est possible, dans certaines conditions, avec les applications que l'on connaît: la production d'énergie par fission nucléaire, les armes nucléaires à fission.

14 La fusion nucléaire

Alors que la fission est la cassure d'un noyau lourd en deux noyaux plus légers, la *fusion* est une réaction qui amalgame deux noyaux très légers pour en donner un plus lourd. Les plus importantes réactions de fusion sont celles que l'on obtient à partir des isotopes de l'hydrogène de masses 2 ou 3 (deutérium et tritium):

$$^{2}\mathrm{H} + {}^{2}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \mathrm{n} \tag{21}$$

$$^{2}\mathrm{H} + {}^{3}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + \mathrm{n} \tag{22}$$

Ces réactions se produisent avec la libération d'une grande quantité d'énergie. Il y a deux applications à la fusion nucléaire. C'est d'abord la *bombe thermonucléaire*, dont il existe dans le monde des stocks importants. C'est aussi la *fusion contrôlée*, qui pourra devenir une source d'énergie rentable si les recherches actuelles réussissent à la mettre au point. Les difficultés techniques sont considérables. Pour amorcer une réaction de fusion il faut amener les deux noyaux en contact, donc vaincre la répulsion électrique. Un accélérateur de particules ne permettrait pas de produire un nombre suffisant de réactions et ne serait pas rentable. Il reste la solution qui consiste à chauffer le plasma (constitué par des noyaux et des électrons). Mais pour vaincre la répulsion électrique il faut atteindre des températures de l'ordre du million de degrés. Il n'existe aucun matériau capable de contenir le plasma à de telles températures. Il faut utiliser un contenant immatériel, soit un champ magnétique. C'est le confinement magnétique. On peut aussi comprimer la matière en la soumettant à un rayonnement Laser suffisamment puissant.

14.1 L'astrophysique nucléaire

Le soleil est pour nous une source d'énergie. C'est sous forme de rayonnement électromagnétique (lumière visible, mais aussi rayons infra-rouges, ultraviolets, etc...) que cette énergie nous parvient. D'où le soleil tire-il son énergie? La seule hypothèse valable, qui a d'ailleurs été étayée par des observations expérimentales, est que le soleil tire son énergie de réactions de fusion nucléaire. Ces dernières ont pour résultat de transformer les noyaux d'hydrogène (des protons) en noyaux d'hélium. En simplifiant un peu, les réactions sont les suivantes:

$$\mathrm{p} + \mathrm{p} \rightarrow \mathrm{d} + \mathrm{e}^{+} + \nu_e \tag{23}$$

où deux protons fusionnent pour donner un deuton (noyau d'hydrogène lourd), puis:

$$\mathrm{d} + \mathrm{p} \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma \tag{24}$$

où un proton et un deuton fusionnent pour donner un noyau d'hélium de masse trois. Puis:

$$^{3}\mathrm{He} + {}^{3}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + \mathrm{p} + \mathrm{p} \tag{25}$$

Le bilan global est:

$$4\mathrm{p} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + 2\ \mathrm{e}^{+} + 2\nu_e + 2\gamma \tag{26}$$

Une signature de cette chaine de réactions est l'émission de neutrinos. Ceux-ci peuvent être détectés dans des laboratoires terrestres et donc peuvent apporter une confirmation de l'hypothèse faite sur l'origine de l'énergie solaire.

Remontant dans le temps, la cosmologie a pour ambition d'expliquer comment l'univers a évolué à partir d'un instant initial. La physique des particules a joué un rôle important puis a cédé sa place à la physique nucléaire. Les divers éléments chimiques ont été synthétisés par des réactions nucléaires. Tout cela est très bien exposé dans le livre de l'astrophysicien Hubert Reeves "Patience dans l'azur". L'existence de la radioactivité naturelle est une signature de cette évolution. Seul les radioéléments de très longue période sont encore présents. Mais il y a quelques milliards d'années la terre était beaucoup plus radioactive qu'aujourd'hui. L'uranium naturel était beaucoup plus riche en uranium de masse 235 et c'est ainsi que des réacteurs nucléaires à fission ont pu démarrer de façon naturelle. C'est le cas du réacteur d'Oklo, en Afrique, qui a fait l'objet d'études approfondies.

15 Notion de section efficace

C'est un fait expérimental que certaines réactions nucléaires se produisent plus facilement que d'autres. Pour quantifier cette propriété on définit la *section efficace.*

15.1 Définition

Pour comprendre qualitativement de quoi il s'agit, prenons un exemple concret: à la chasse il est plus facile de tuer un éléphant qu'un lapin. On dira que l'éléphant présente au tireur une section efficace plus grande que le lapin. Définissons d'abord la section efficace nucléaire géométrique comme la surface que le noyau présente au projectile. En fait, si le projectile a lui même une certaine étendue on définira la section efficace comme:

$$\sigma = \pi(\mathrm{R}_1 + \mathrm{R}_2)^2 \tag{27}$$

Les deux noyaux entrant en collision sont supposés sphériques et leurs rayons sont R_1 et R_2. Du point de vue de la mécanique classique il y aura collision si la distance d entre les centres des noyaux est telle que:

$$\mathrm{d} < \mathrm{R}_1 + \mathrm{R}_2 \tag{28}$$

Le centre du projectile se trouve alors à l'intérieur d'un cercle centré sur le noyau cible et de rayon $\mathrm{R}_1 + \mathrm{R}_2$, ce qui justifie notre définition.

En physique nucléaire on apprend que le rayon R d'un noyau est relié à son nombre de masse A par la relation:

$$\mathrm{R} = 1.2 \times 10^{-13}\mathrm{A}^{1/3}\ \mathrm{cm} \tag{29}$$

Ainsi la section efficace géométrique sera donnée par:

$$\sigma = 4.5 \times 10^{-26}(\mathrm{A}_1^{1/3} + \mathrm{A}_2^{1/3})^2\ \mathrm{cm}^2 \tag{30}$$

Considérons un noyau de nombre de masse $\mathrm{A}_1 = 50$ en collision avec un proton ($\mathrm{A}_2 = 1$). On trouve que $\sigma \approx 10^{-24}\ \mathrm{cm}^2$. On voit que le cm^2 est une unité de surface beaucoup trop grande pour caractériser des sections efficaces. On définit alors le *barn*:

$$\text{un barn} = 10^{-24}\mathrm{cm}^2 \tag{31}$$

On introduit aussi les sous-multiples du barn:

1 millibarn	(mb)	=	10^{-3}	barn
1 microbarn	(μb)	=	10^{-6}	barn
1 nanobarn	(nb)	=	10^{-9}	barn
1 picobarn	(pb)	=	10^{-12}	barn
1 femtobarn	(fb)	=	10^{-15}	barn

En réalité, les collisions nucléaires n'obéissent pas aux lois de la mécanique classique, et les sections efficaces peuvent être plus grandes (beaucoup plus grandes) ou plus petites (beaucoup plus petites) que les sections efficaces géométriques. D'autre part, il existe une section efficace pour toute réaction possible de deux noyaux. Par exemple, si l'on bombarde un noyau de ^{12}C avec des neutrons on pourra observer différentes réactions, chacune ayant une section efficace particulière (Table 14).

Réaction	Section efficace
^{12}C(n,p)^{13}N	σ(n,p)
^{12}C(n,2n)^{11}C	σ(n,2n)
^{12}C(n,d)^{11}B	σ(n,d)
^{12}C(n,α)^{9}Be	σ(n,α)

Table 14: Différentes sections efficaces pour une collision nucléaire.

Les sections efficaces peuvent être mesurées expérimentalement. En effet, le nombre de réactions qui se produisent, et que l'on peut observer, est proportionnel à la section efficace. La relation est la suivante:

$$n = N_f \sigma N_c L \tag{32}$$

avec les définitions suivantes:

n	Nombre de réactions produites
N_f	Nombre de particules dans le faisceau
σ	Section efficace de la réaction
N_c	Nombre de noyaux par cm^3 dans la cible
L	Épaisseur de la cible (supposée mince)

Série $A = 4n$

90													228 Th				232 Th
89												$\swarrow$		228 Ac		$\swarrow$	
88											224 Ra				228 Ra		
87										$\swarrow$							
86									220 Rn								
85								$\swarrow$									
84			212 Po				216 Po										
83		$\swarrow$		212 Bi		$\swarrow$											
82	208 Pb				212 Pb												
	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142

Série $A = 4n + 1$

93																			237 Np
92																233 U		↙	
91															↙		233 Pa		
90														229 Th					
89											225 Ac		↙						
88										↙		225 Ra							
87									221 Fr										
86								↙											
85							217 At												
84				213 Po		↙													
83	209 Bi		↙		213 Bi														
82		209 Pb		↙															
81			209 Tl																
	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144

Série $A = 4n + 2$

92																			234 U				238 U
91																		$\swarrow$		234 Pa		$\swarrow$	
90																	230 Th				234 Th		
89																$\swarrow$							
88															226 Ra								
87														$\swarrow$									
86													222 Rn										
85												$\swarrow$											
84			210 Po				214 Po				218 Po												
83		$\swarrow$		210 Bi		$\swarrow$		214 Bi		$\swarrow$													
82	206 Pb				210 Pb				214 Pb														
	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146

Série $A = 4n + 3$

92																			235 U
91															231 Pa			$\swarrow$	
90													227 Th		$\swarrow$		231 Th		
89												$\swarrow$		227 Ac					
88											223 Ra								
87										$\swarrow$									
86									219 Rn										
85								$\swarrow$											
84			211 Po				215 Po												
83		$\swarrow$		211 Bi		$\swarrow$													
82	207 Pb				211 Pb														
	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143

Classification des éléments

1 **H**																	**2** **He**
3 **Li**	**4** **Be**											**5** **B**	**6** **C**	**7** **N**	**8** **O**	**9** **F**	**10** **Ne**
11 **Na**	**12** **Mg**											**13** **Al**	**14** **Si**	**15** **P**	**16** **S**	**17** **Cl**	**18** **Ar**
19 **K**	**20** **Ca**	**21** **Sc**	**22** **Ti**	**23** **V**	**24** **Cr**	**25** **Mn**	**26** **Fe**	**27** **Co**	**28** **Ni**	**29** **Cu**	**30** **Zn**	**31** **Ga**	**32** **Ge**	**33** **As**	**34** **Se**	**35** **Br**	**36** **Kr**
37 **Rb**	**38** **Sr**	**39** **Y**	**40** **Zr**	**41** **Nb**	**42** **Mo**	**43** **Tc**	**44** **Ru**	**45** **Rh**	**46** **Pd**	**47** **Ag**	**48** **Cd**	**49** **In**	**50** **Sn**	**51** **Sb**	**52** **Te**	**53** **I**	**54** **Xe**
55 **Cs**	**56** **Ba**	**57-71** **La**	**72** **Hf**	**73** **Ta**	**74** **W**	**75** **Re**	**76** **Os**	**77** **Ir**	**78** **Pt**	**79** **Au**	**80** **Hg**	**81** **Tl**	**82** **Pb**	**83** **Bi**	**84** **Po**	**85** **At**	**86** **Rn**
87 **Fr**	**88** **Ra**	**89-103** **Ac**	**104** **Rf**	**105** **Db**	**106** **Sg**	**107** **Bh**	**108** **Hs**	**109** **Mt**	**110** **Nn**	**111** **Nn**	**112** *	**113** *	**114** *	**115** *	**116** *	**117** *	**118** *

Nn pas encore de nom
***** observation à confirmer