

Radioactivité et physique nucléaire

Chapitre 15,2

1 Le noyau atomique

1.1 Description du noyau

- Un noyau est constitué de *nucléons* de deux types : les *protons* et les *neutrons*.
- Le *nombre de protons* contenus dans le noyau est désigné par la lettre Z ; c'est le *numéro atomique*. Un noyau à Z protons porte la charge électrique $+Ze$.
- Le *nombre de nucléons* du noyau est désigné par la lettre A ; c'est le *nombre de masse*.
- Le nombre de neutrons du noyau est : $N = A - Z$.
- Pour caractériser les 1500 types de noyaux (dont 325 sont naturels), on utilise la représentation :



Remarques : On peut généraliser l'écriture précédente à d'autres particules que les noyaux. Le nombre Z représente alors la mesure algébrique de la charge électrique, l'unité de charge étant la charge positive élémentaire $+e$.

Nom	Symbol
Proton	$_{1}^{1}p$
Neutron	$_{0}^{1}n$
Particule α	$_{2}^{4}\text{He}$
Électron	$_{-1}^{0}e$
Positron	$_{1}^{0}e$

Tableau 1. Quelques particules à connaître.

1.2 Noyaux isotopes

- Les noyaux de même numéro atomique Z appartiennent *au même élément chimique*. Le noyau a d'ailleurs le même symbole que cet élément.

Ainsi le noyau $_{17}^{37}\text{Cl}$ appartient à l'élément chlore représenté dans la nature par tous les édifices possédant 17 protons dans leur noyau.

- Des noyaux de même numéro atomique Z et de nombre de masse A différents sont dits *isotopes*. Ces noyaux appartiennent au même élément chimique et ils ne diffèrent les uns des autres que par leur nombre de neutrons.

Les atomes correspondants aux isotopes d'un même élément ont le même cortège électronique : leurs propriétés chimiques sont pratiquement identiques. C'est pour cela qu'en chimie il est inutile de distinguer par exemple les atomes de noyaux $_{17}^{35}\text{Cl}$ et $_{17}^{37}\text{Cl}$.

Les noyaux isotopes du même élément peuvent avoir des « propriétés nucléaires » voisines, différentes, très différentes. Ainsi nous verrons que $_{92}^{235}\text{U}$ se fragmente lorsqu'il est frappé par un neutron alors que ce n'est pas le cas du noyau isotope $_{92}^{238}\text{U}$.

1.3 Stabilité des noyaux

- Tous les noyaux ne sont pas stables. Certains peuvent subir une transformation nucléaire spontanée : ces noyaux sont *radioactifs*.
- Il existe environ 300 noyaux stables. Il est commode de placer ces noyaux sur un diagramme où le nombre de protons Z est en abscisse et le nombre de neutrons $N = A - Z$ est en ordonnée.

L'ensemble des points de coordonnées Z et N détermine la « Vallée de stabilité ».

- Pour $Z < 20$, les points représentatifs se situent au voisinage de la droite $N = Z$: *les noyaux stables comportent autant de protons que de neutrons* (par exemple $^{12}_6\text{C}$).
- Ensuite les noyaux stables comportent plus de neutrons que de protons.

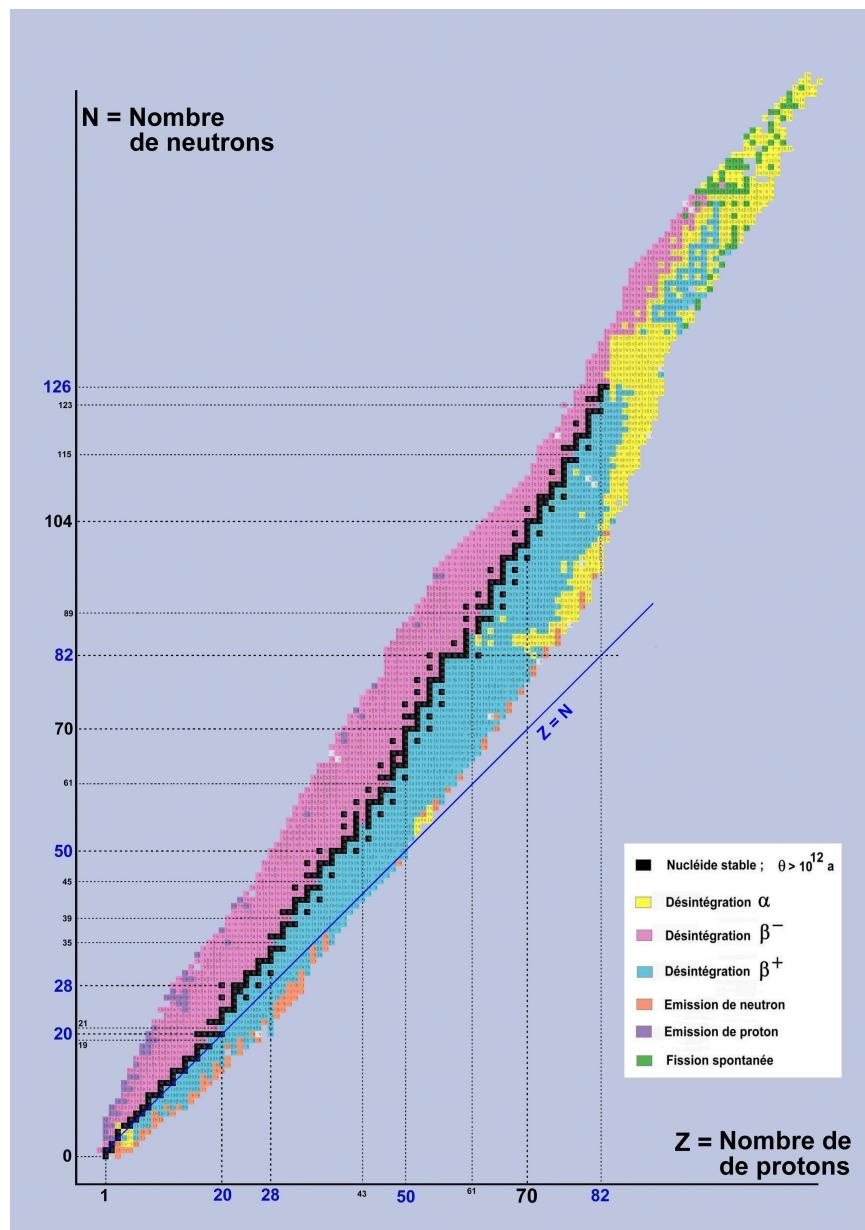


Figure 1. Diagramme de Ségrè.

1.4 Interprétation de la stabilité des noyaux

Deux types de forces interviennent au niveau du noyau :

- des forces répulsives dues aux interactions électrostatiques entre les protons, ces forces ont tendance à éloigner les protons les uns des autres ;
- des forces attractives dues à un type d'interaction appelé *interaction forte*. Ces forces attractives s'exercent entre tous les nucléons (protons ou neutrons).

En raison de la faible portée de l'interaction forte ($\approx 5 \text{ fm}$), chaque nucléon n'est attiré que par ses proches voisins, indépendamment de la taille du noyau, contrairement à la répulsion électrostatique, de portée infinie.

Dans un noyau stable, les forces attractives l'emportent très nettement, elles assurent la cohésion du noyau.

2 Les différents types de radioactivité

La radioactivité naturelle découverte par Becquerel en 1896 et la radioactivité artificielle découverte par Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1934 sont *des réactions nucléaires spontanées*.

Définition. La radioactivité, terme inventé vers 1898 par Pierre Curie, est un phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables se désintègrent spontanément en d'autres noyaux, avec dégagement d'énergie sous forme de divers rayonnements.

2.1 Propriétés de la radioactivité

La radioactivité est un phénomène :

- *aléatoire* : il est impossible de prédire quel noyau va se désintégrer et à quel moment.
- *inéluctable* : tout noyau est destiné à se désintégrer un jour ou l'autre.
- *insensible à l'environnement extérieur* : en particulier, les conditions de température et de pression n'influent pas sur l'aptitude ou pas d'un noyau à se désintégrer.

2.2 Les lois de conservation

Toutes les réactions nucléaires obéissent à des lois de conservation. Dans ce chapitre, nous utiliserons *les lois de conservation du nombre de nucléons, de la charge électrique et de l'énergie*.

Soit l'interaction entre les particules ${}_{Z_1}^{A_1}X_1$ et ${}_{Z_2}^{A_2}X_2$, qui aboutit à l'obtention d'autres particules ${}_{Z_3}^{A_3}X_3$ et ${}_{Z_4}^{A_4}X_4$.

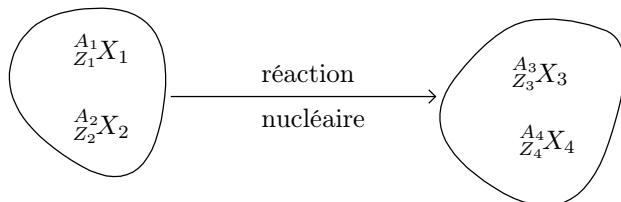


Figure 2. Les particules peuvent être des noyaux, des électrons, des protons, des neutrons, des photons, des neutrinos, ...

Conservation du nombre de nucléons. Au cours de cette réaction nucléaire, un ou des protons peuvent se transformer en un ou des neutrons et inversement. Mais on constate toujours que *le nombre de nucléons est globalement conservé* :

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$

Conservation de la charge électrique. Lorsqu'un système nucléaire évolue, *sa charge électrique globale reste inchangée*.

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$

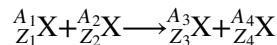
Conservation de l'énergie. *L'énergie d'un système isolé reste constante.* Lors d'une réaction nucléaire on a donc :

$$\Delta E = E_f - E_i = 0$$

2.3 Équation nucléaire

- Les noyaux qui interviennent dans une réaction nucléaire sont très souvent entourés d'électrons avec lesquels ils constituent des ions ou des atomes.
Nous ne nous occuperons pas des cortèges électroniques entourant ces noyaux qui jouent la plupart du temps un rôle négligeable.

- Pour traduire une réaction nucléaire, on écrit une équation nucléaire qui doit respecter la conservation du nombre de nucléons et la conservation de la charge électrique :



avec $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$ et $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$.

2.4 Les différents types de radioactivité

2.4.1 La radioactivité α

- Les particules α sont des noyaux d'hélium ${}_2^4He$; elles portent donc la charge électrique $+2e$.
- En émettant une particule α , le noyau émetteur se transforme en un autre noyau de nom différent :

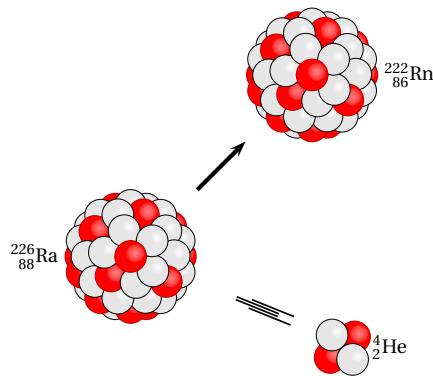


Figure 3.

La radioactivité α est caractéristique des noyaux lourds (grand nombre de nucléons). *Dans le noyaux fils, chaque nucléon est en moyenne plus fortement lié à ses voisins que dans le noyaux père.*

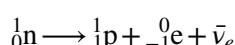
Note. Les particules α sont facilement arrêtées (par quelques centimètres d'air ou par une feuille de papier), elles ne sont donc *pas très pénétrantes*. Elles sont par contre *fortement ionisantes*. Après avoir perdu la majeure partie de son énergie cinétique, en particulier par création d'ions sur son passage, une particule α capte deux électrons et devient un atome d'hélium.

Exercice 1. L'uranium 238, l'uranium 234, le radium 226, le polonium 210, le bismuth 212 et le tungstène 180 sont émetteurs α . Écrire les équations de désintégration de chacun de ces noyaux.

2.4.2 La radioactivité β^-

La radioactivité β^- concerne les noyaux présentant *un excès de neutrons par rapport aux isotopes stables* (**déplacement vertical vers le haut dans le diagramme de Segrè, fig. 1**).

Un neutron est converti en proton par l'intermédiaire de l'*interaction faible* et une particule β^- (un électron) et un anti-neutrino sont émis et quittent le noyau :



La radioactivité β^- se traduit par l'émission :

- d'électrons lancés à grande vitesse ;
- d'anti-neutrinos $\bar{\nu}_e$ se propageant à la vitesse de la lumière ;
- éventuellement de rayons γ provenant de la désexcitation du noyau fils créé.

L'équation nucléaire s'écrit :

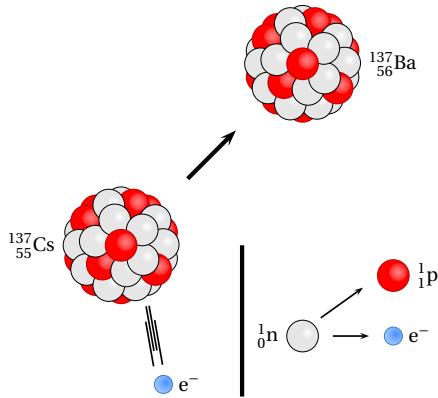
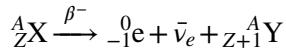


Figure 4.

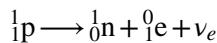
Note. Les particules β^- sont *assez pénétrantes*, il faut quelques millimètres d'aluminium ou de plomb, ou une dizaine de mètres d'air pour les arrêter.

Exercice 2. Les noyaux de phosphore 32, carbone 14, tritium 3H , tungstène 185, bismuth 214 et potassium 40 sont émetteurs β^- . Écrire les équations de désintégration de chacun de ces noyaux.

2.4.3 La radioactivité β^+

La radioactivité β^+ concerne les noyaux présentant *un déficit de neutrons par rapport aux isotopes stables* (**déplacement vertical vers le bas dans le diagramme de Segrè**, fig. 1).

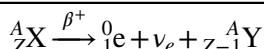
Un proton est converti en neutron par l'intermédiaire de l'*interaction faible* et une particule β^+ (un positron) et un neutrino sont émis et quittent le noyau :



La radioactivité β^+ se traduit par l'émission :

- de positrons lancés à grande vitesse ;
- de neutrinos ν_e se propageant à la vitesse de la lumière ;
- éventuellement de rayons γ provenant de la désexcitation du noyau fils créé.

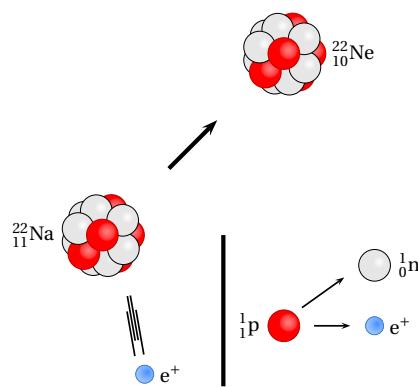
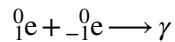
L'équation nucléaire s'écrit :



Note.

- La radioactivité β^+ ne s'observe généralement qu'avec des éléments artificiels.

- Les positrons β^+ ont une durée de vie relativement courte car ils rencontrent rapidement des électrons et s'annihilent alors selon l'équation :



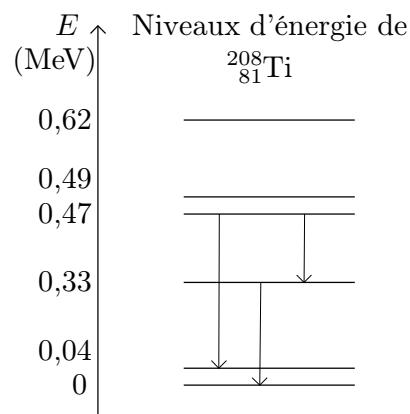
Exercice 3. Les noyaux de néon 19, de carbone 11, de fluor 18, de potassium 40 et de sodium 21 sont émetteurs β^+ . Écrire les équations de désintégration de chacun de ces noyaux.

2.4.4 La désexcitation γ

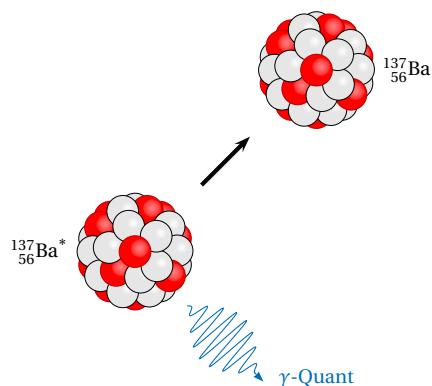
Après une émission α , β^- ou β^+ , le noyau fils peut être produit dans un état excité. Il retourne alors dans son état fondamental en libérant l'énergie excédentaire sous forme de *photons* de grande énergie.

Ces photons correspondent à des rayonnements électromagnétiques γ .

Chaque noyau a un spectre de raies γ bien déterminé. Les énergies mises en jeu au cours des transitions nucléaires sont considérablement plus élevées que celles qui interviennent dans les transitions des électrons de valence des atomes. *Elles ont en commun le fait d'être quantifiées.*



Note. Le rayonnement γ est très pénétrant, une vingtaine de centimètres de plomb ou plusieurs mètres de béton sont nécessaires pour s'en protéger.

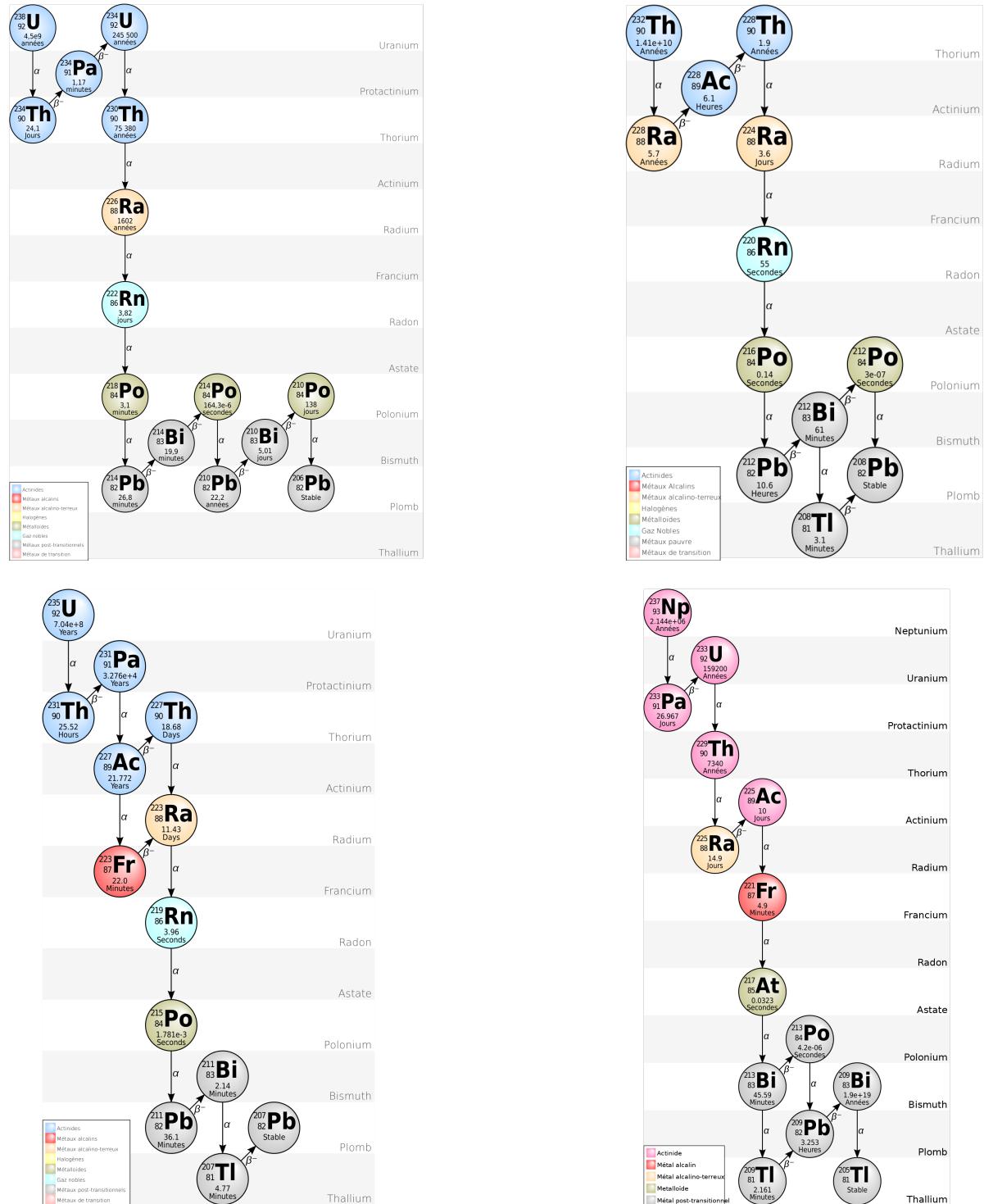


2.5 Familles radioactives

La radioactivité entraîne la transformation d'un noyau en un autre noyau. Si ce dernier est lui-même radioactif, il se transforme à son tour et ainsi de suite jusqu'à ce que le noyau obtenu ne soit plus radioactif, mais stable.

L'ensemble des noyaux issus d'un même noyau père reçoit le nom de **famille radioactive**, *la filiation radioactive étant le processus de transformation.*

Les éléments radioactifs naturels ont été classés en quatre familles : *famille du neptunium, famille de l'uranium 238, famille de l'uranium 235 et famille du thorium.*



Note. On remarquera que certains noyaux se désintègrent soit par désintégration α , soit par désintégration β^- . On n'observe pas d'émission β^+ naturelle.

3 Activité d'une source

Définition. L'activité d'un échantillon radioactif est le nombre de désintégrations qui se produisent par unité de temps dans cet échantillon. L'activité se mesure en becquerel (Bq). 1 becquerel correspond à une désintégration par seconde.

4 Les réactions nucléaires provoquées

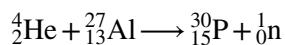
Il est possible de provoquer des réactions nucléaires. Ces réactions nucléaires peuvent :

- conduire à des *noyaux artificiels* aux propriétés parfois intéressantes. Ce sont les réactions de transmutation ;
- dégager d'énormes quantités d'énergie. Ce sont les réactions de *fission et de fusion*.

4.1 Les transmutations

Frédéric et Irène Joliot-Curie observèrent, en 1934, qu'une plaque d'aluminium soumise à un rayonnement α , devenait une source radioactive émettrice β^+ . Ils venaient de découvrir la *radioactivité artificielle* et d'observer pour la première fois l'émission d'un rayonnement β^+ .

L'équation nucléaire traduisant la transmutation d'un noyau $^{27}_{13}\text{Al}$, provoquée par le choc d'une particule α , est :



$^{30}_{15}\text{P}$ est un émetteur β^+ .

Note. Les transmutations provoquées permettent d'obtenir de nouveaux noyaux (en particulier les noyaux lourds pour lesquels $Z \geq 93$). On utilise souvent comme projectiles des neutrons provenant d'un réacteur.

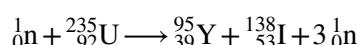
4.2 Les fissions nucléaires

4.2.1 Définition

- Un noyau est dit *fissile* si un neutron de faible énergie cinétique (moins de 0,1 eV) peut provoquer sa fission.
- Un noyau fissile à connaître : l'uranium ^{235}U , contenu en faible quantité (0,7% en masse) dans l'uranium naturel (le reste est essentiellement l'uranium ^{238}U non fissile).
- Des noyaux artificiels peuvent être fissiles (par exemple le plutonium ^{239}Pu , formé dans les réacteurs nucléaires à partir de ^{238}U).

4.2.2 La réaction de fission

Exemple à partir de la fission de l'uranium Il n'existe pas qu'un seul type de fission. De façon générale, on peut dire que sous l'action d'un neutron, le noyau lourd ^{235}U se fragmente en deux noyaux moyens et en deux ou trois neutrons :



Les noyaux moyens formés sont généralement émetteurs β^- .

4.2.3 Réaction en chaîne

Les neutrons libérés par la fission d'un noyau peuvent à leur tour provoquer la fission d'autres noyaux fissiles, et ainsi de suite... Une réaction en chaîne peut s'établir (cf. figure 5, page 10).

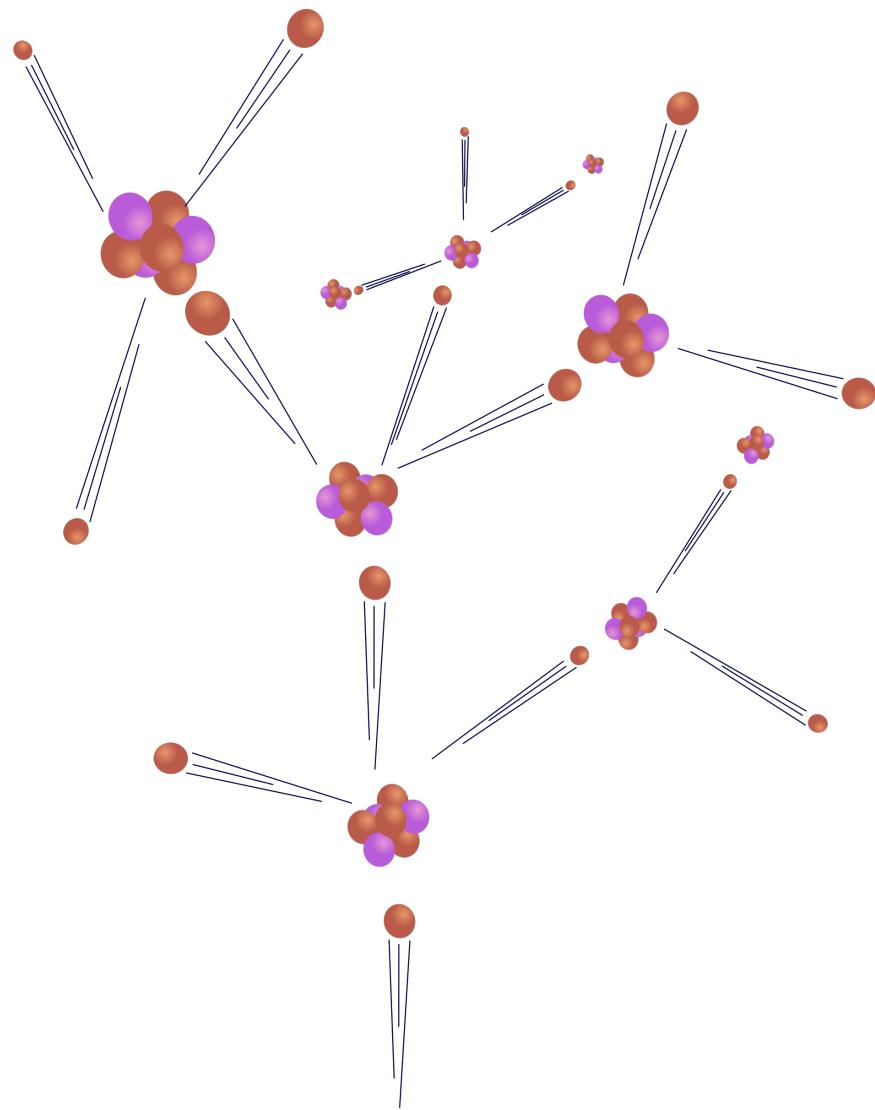


Figure 5. Illustration de la réaction en chaîne.

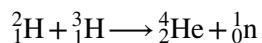
4.3 La fusion nucléaire

4.3.1 Définitions

La réaction de fusion nucléaire consiste à produire un noyau à partir de deux ou plusieurs noyaux légers. Les noyaux légers les plus utilisés sont ceux appartenant à l'élément hydrogène ${}_1^1\text{H}$, ${}_1^2\text{H}$ ou ${}_1^3\text{H}$.

4.3.2 La réaction de fusion

Cette réaction est très difficile à réaliser car elle nécessite le rapprochement de deux noyaux positifs. La réaction de fusion la plus utilisée (et étudiée) actuellement a pour équation :



4.3.3 Réalisation de la réaction de fusion

Pour permettre le rapprochement des noyaux l'agitation thermique doit être très importante. La température doit donc être proche de 10^8 K . À cette température, les atomes n'existent plus, on obtient un mélange de noyaux et d'électrons appelé *plasma*.

Ce plasma doit être relativement dense, il faut donc le *confiner*.