

## I. La radioactivité

Lorsque un noyau subit une transformation aboutissant à un autre noyau en émettant des particules et parfois un rayonnement électromagnétique, ce phénomène est appelé « radioactivité ».

La radioactivité a été découverte par hasard en 1896 par Antoine Henri Becquerel (1852-1908). En rangeant des sels d'uranium avec une plaque photographique vierge et au bout de quelques jours, a remarqué que cette plaque porte la trace d'un rayonnement alors que les sels sont restés à l'abri de la lumière. Becquerel en tire deux conclusions :

- l'uranium émet naturellement un rayonnement qui lui est propre,
- l'intensité de ce rayonnement persiste dans le temps.

Il se demande d'où l'uranium peut tirer son énergie avec une telle persistance, Henri Becquerel vient de **découvrir la radioactivité**.

Plus tard Marie curie et son époux Pierre, leur donnent le nom de radioactivité (du latin radius, rayon). En 1898, le couple découvre deux éléments radioactifs encore inconnus, le polonium et le radium. On distingue deux radioactivités : naturelle et artificielle.

### I.1. La radioactivité naturelle

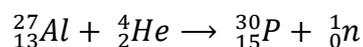
On parle de « radioactivité naturelle » pour désigner les sources non produites par les activités humaines, comme celle issue du radon, de la terre, ou du rayonnement cosmique. Actuellement les principaux radionucléides naturels sont le potassium 40 et ceux issus des trois familles radioactives de l'uranium 238, de l'uranium 235 et du thorium 232. Ces éléments radioactifs se retrouvent dans l'air, dans le sol, dans l'eau et dans les organismes vivants dont l'homme.. On peut représenter la désintégration naturelle d'un nucléide comme suit :  
nucléide père → nucléide fils + radiation nucléaire

où le terme «nucléide» désigne un atome d'un isotope particulier.

### I.2. La radioactivité artificielle

La radioactivité artificielle est l'ensemble des phénomènes de transmutation des radioisotopes créés artificiellement en bombardant des éléments stables (aluminium, béryllium, iode, etc.) avec divers faisceaux de particules (neutron, proton, particule  $\alpha$ , deutéron).

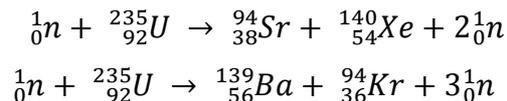
Cette radioactivité a été découverte par Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie, dans une expérience de production du phosphore 30, en bombardant l'aluminium 27 avec une particule  $\alpha$  provenant, généralement, d'une source de radium.



Une réaction nucléaire est provoquée lorsqu'un noyau projectile frappe un noyau cible et donne naissance à deux nouveaux noyaux. Une réaction nucléaire artificielle peut être fusion ou fission.

### I.2.1. Réaction de fission nucléaire

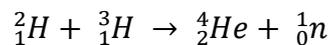
Elle se produit lors de la rencontre d'un neutron lent ( $E_c = 0.1 \text{ MeV}$ ), dit neutron thermique, avec un noyau fissile tel l'uranium 235; qui provoque la naissance de deux noyaux plus légers.



L'énergie libérée est de 200 MeV/atome. La fission de 1g d'uranium équivaut la combustion de 3 tonne de charbon. Une réaction de fission va donner naissance à des noyaux fils mais aussi à des neutrons, ceux-ci pouvant aller rencontrer d'autres noyaux, on obtient alors une réaction en chaîne.

### I.2.2. Réaction de fusion nucléaire

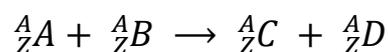
Pour avoir une fusion nucléaire, il faut que deux noyaux légers s'unissent pour donner naissance à un noyau plus lourd.



Ces noyaux légers sont cette fois-ci composés de neutrons et de protons, ainsi, il leur faut une très grande énergie pour vaincre les forces de répulsion : On porte alors le milieu à très haute température ( $10^8 \text{ K}$ ). En conséquence, la réaction de fusion est appelée réaction thermonucléaire..

### I.2.3. Bilan de masse et d'énergie d'une réaction nucléaire

Soit une réaction nucléaire quelconque d'équation :



Il y a deux façon de calculer l'énergie libérée par la transformation nucléaire :

- En utilisant la **variation de masse** :

$$\Delta E = [(m(\text{A}) + m(\text{B})) - (m(\text{C}) + m(\text{D}))] \times c^2$$

- En utilisant les **énergies de liaison** des noyaux et d'après la définition de  $E_l$  :

$$\Delta E = [E_l(\text{A}) + E_l(\text{B})) - (E_l(\text{C}) + E_l(\text{D}))]$$

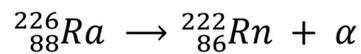
#### Exemple :

1. Écrire l'équation de désintégration du radium  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$
2. Calculer l'énergie libérée lors de la désintégration :  
d'un noyau de radium 226 (en MeV)

Noyau	Masse (u)
Radium	225,9770
Radon	221,9702
Hélium	4,0015

$$c = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

1. Equation de désintégration du radium



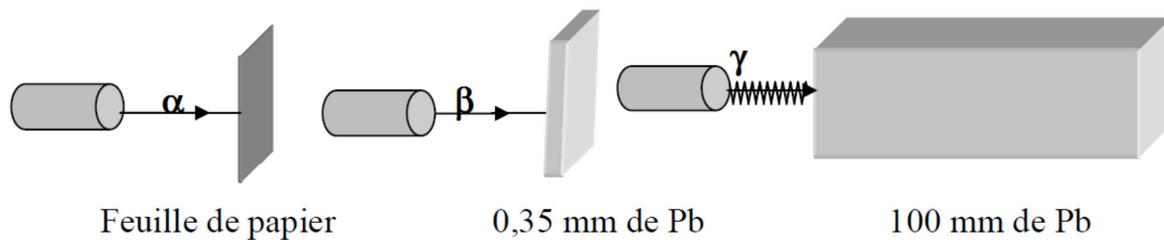
2. Energie libéré :

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = (225,9770 - (4,0015 + 221,9702)) \cdot 1.66054 \cdot 10^{-27} \cdot (2.9979 \cdot 10^8)^2$$

$$\Delta E = 0,0053 \cdot 931,5 = 4,9369 \text{ MeV}$$

### I.3. Radiations nucléaires

Les rayons alpha, bêta et gamma sont des noyaux d'hélium, des électrons (et positrons) et des photons, respectivement, émis lors de la désintégrations radioactives des nucléides radioactifs. Ces radiation ont différents pouvoirs pénétrants (Figure I.1).

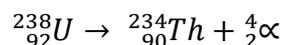


**Figure I.1** : Pouvoirs pénétrants des radiations nucléaires α, β, γ

#### I.3.1. Rayons alpha (α)

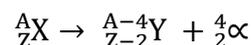
Il s'agit d'un flux de noyaux d'hélium  ${}^4_2\text{He}^{+2}$  ou  ${}^4_2\alpha$

Exemple



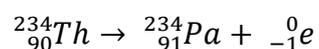
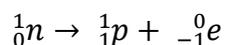
Malgré leur grande énergie (2 et 8 MeV), les particules α ne pénètrent que superficiellement dans la matière (10 cm dans l'air, 0,1 mm dans l'eau, 0,05 mm dans le Pb, la peau les arrête).

Une règle générale : l'élément radioactif (X) se transforme en un autre élément également radioactif ou stable (Y) suivi d'émission d'une particule α:

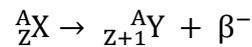


#### I.3.2. Rayons bêta (β<sup>-</sup>)

Ce sont des électrons (β<sup>-</sup>,  ${}^0_{-1}e$ ) issus de la transformation d'un neutron en proton :



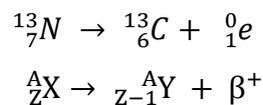
Une règle générale : l'élément radioactif (X) se transforme en un autre élément également radioactif ou stable (Y) suivi d'émission d'une particule  $\beta$



Les rayons  $\beta$  peuvent traverser une épaisseur de 2 à 3 mm d'aluminium.

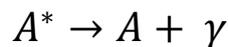
### I.3.3. Rayons béta ( $\beta^+$ , ${}^0_1e$ )

Elle ne concerne que les noyaux radioactifs artificiels. Elle affecte les noyaux ayant trop de protons par rapport au nombre de neutrons. Un proton du noyau père se transforme en neutron en émettant une particule appelée positon ou positron ( $\beta^+$ ).



### I.3.4. Rayons gamma ( $\gamma$ )

Ils sont constitué par une radiation électromagnétique, possèdent une énergie qui varie de 0.01 à 10 MeV et ils sont très pénétrants, ils sont arrêté que par 10 cm de Pb. Ces rayonnements, proviennent lors d'un retour à l'état stable (fondamental) d'un noyau (désexcitation), donc l'émission des rayons  $\gamma$  ne change ni A ni Z.

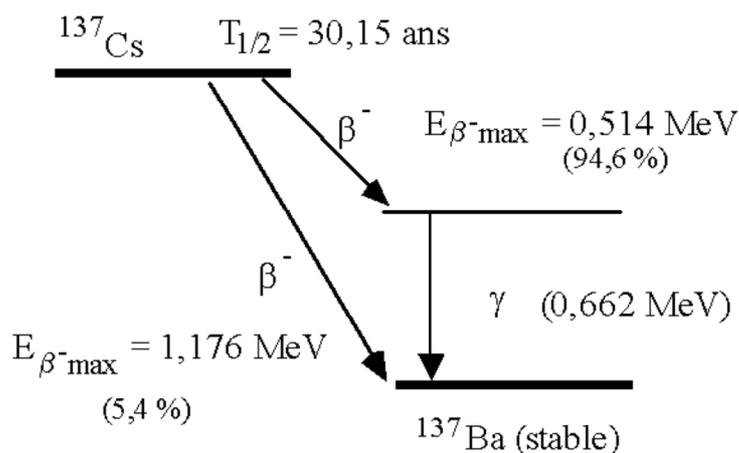


$A^*$  noyau excité

A noyau désexcité

## I.4. Familles radioactives

La désintégration par paliers  $\alpha$  et  $\beta$  se fait jusqu'à l'obtention d'un noyau stable.



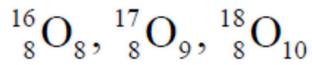
C'est une série ou famille de nucléides radioactifs qui se distinguent par le nombre de masse :

- Famille de l'uranium  $A = 4n + 2$ , où n est un entier naturel.  ${}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{206}_{82}Pb$

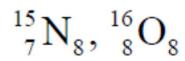
- Famille de l'actino-uranium,  $A = 4n + 3$       ${}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{82}^{207}Pb$
- Famille du thorium,  $A = 4n$                       ${}_{90}^{232}Th \rightarrow {}_{82}^{208}Pb$

En plus des radioéléments naturels faisant partie de ces trois familles, il existe cinq autres éléments radioactifs naturels de très longue période : le potassium 40, le rubidium 87, le samarium, le lutétium, le rhénium..

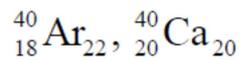
Les noyaux ayant le même nombre  $Z$  de protons s'appellent des **isotopes** :



Les noyaux ayant le même nombre  $N$  de neutrons s'appellent des **isotones** :



Les noyaux ayant le même nombre  $A$  de nucléons s'appellent des **isobares** :



## I.5. Cinétique de désintégration radioactive

### I.5.1. Lois de décroissance radioactive

Loi de décroissance radioactive décrit l'évolution temporelle du nombre de noyaux radioactifs d'un échantillon. La cinétique de désintégration d'un élément radioactif (N) est un processus de premier ordre.

$$N \xrightarrow{\lambda} X$$
$$V = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$
$$V = -\frac{dN}{N} = \lambda * dt$$

on déduit, en intégrant, le nombre N de radionucléides existant encore au temps t :

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow$$
$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \Rightarrow$$
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

$N_0$  : nombre de noyaux à  $t=0$

$\lambda$  : constante de désintégration ( $s^{-1}$ ), elle ne dépend que de la nature des noyaux radioactifs et est indépendante de la température.

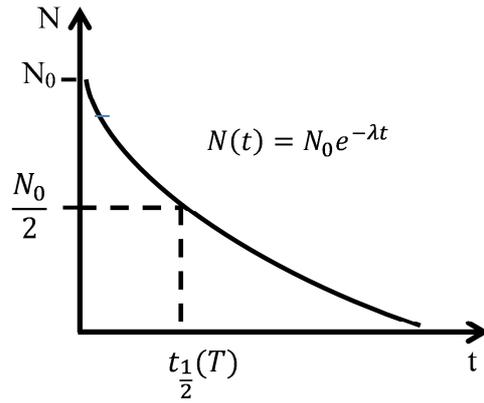
Etant donné que le nombre d'atomes d'un radionucléide est proportionnelle à sa masse, le  $N_t$  et  $N_0$  peuvent être remplacés par la masse du radionucléide à l'instant t (symbolisée par  $m_t$ ) et  $t=0$  (symbolisé par  $m_0$ ) respectivement:

$$m(t) = m_0 e^{-\lambda t}$$

Ces équations montrent que la diminution du nombre d'atomes de radionucléide avec le temps est exponentielle. En effet, toute quantité qui est proportionnelle au nombre d'atomes peut également être substitué dans ces équations.

### I.5.2. Période radioactive

La période T (temps de demi-vie  $t_{1/2}$ ) est le temps au bout duquel le nombre de noyaux initialement présent a été divisé par un facteur 2 (Figure I.2).



**Figure I.2 :** Courbe de décroissance d'un nucléide

Nous avons

$$N(T) = N_0 e^{-\lambda T} \text{ et } N(T) = \frac{N_0}{2} \Rightarrow$$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \Rightarrow$$

$$2 = e^{\lambda T} \Rightarrow \lambda T = \ln 2 \Rightarrow$$

Donc 
$$T = t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Exemples de période :

$^{14}\text{C}$  : 5730 ans

$^{18}\text{Ne}$  : 1672 ms

$^{235}\text{U}$  : 703,8 millions d'années

### I.5.3. Activité

l'activité « A » est La quantité fondamentale de désintégration radioactive, elle signifie le nombre de désintégrations par unité de temps. L'unité de mesure anciennement utilisée est le curie (Ci), c'est introduit en 1930, il correspond à  $3,7 \times 10^{10}$  désintégrations par seconde. Depuis 1975, l'unité recommandée au niveau international est le becquerel (Bq) définie comme 1 désintégration par seconde (1 dps).

L'activité, étant la mesure de la vitesse de désintégration, est lié au nombre d'atomes radioactifs N par l'expression suivante::

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda * N \quad (1)$$

Nous avons

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Donc (1) devient

$$A(t) = \lambda * N_0 * e^{-\lambda t} \quad (2)$$

A l'état initial on écrit

$$A_0 = \lambda * N_0$$

Donc la relation (2) s'écrit comme suivant :  $A(t) = A_0 * e^{-\lambda t}$

la désintégration radioactive produit habituellement des particules de rayonnement ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) ou des photons ( $\gamma$ ) qui peuvent être détectées avec une certaine probabilité. Dans des conditions favorables, l'activité observée  $A'$  ainsi déterminé sera proportionnelle à l'activité réelle (aussi appelé: activité absolue)  $A$ :

$$A' = A * \eta$$

Où  $\eta$  ( $\leq 1$ ) est l'efficacité de la détection

### Exemple :

- 1) Calculer l'activité initiale d'un échantillon de radium 226 de masse  $m = 1,0$  g.  $\lambda = 4,3 \cdot 10^{-4}$  an<sup>-1</sup>
- 2) Calculer l'activité de cet échantillon 1000 ans plus tard.

*Solution :*

- 1) Masse d'un noyau de radium 226,  $m = 226$  u =  $226 \times 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg

$$\text{Nombre de noyaux : } N = \frac{1 \times 10^{-3}}{226 \times 1,67 \times 10^{-27}} = 2,7 \times 10^{21} \text{ noyaux}$$

$$\lambda = \frac{4,3 \times 10^{-4}}{365 \times 24 \times 3600} = 1,36 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

$$A = 1,36 \times 10^{-11} \times 2,7 \times 10^{21} = 3,6 \times 10^{10} \text{ Bq.}$$

$$3) A(t) = A_0 * e^{-\lambda t} \Rightarrow A(1000 \text{ ans}) = 3,6 \times 10^{10} \times e^{-1,36 \times 10^{-11} \times 1000}$$

$$A = 2,3 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

### I.5.4. Désintégration indépendante (mélange de radionucléides)

Si nous constatons que le tracé logarithmique de l'activité en fonction du temps n'est pas une ligne droite, alors ceci est une indication que l'échantillon contient plus d'un radionucléide. Afin de déterminer les constantes de désintégration individuels du mélange, il faut mesurer l'activité en fonction du temps, à condition que les demi-vies sont modérément long et comparables entre elles. L'activité  $A$  d'un mélange de radio-isotopes est égale à la somme des activités des composants :

$$A = \sum_j A_j = \sum_j A_{0j} e^{-\lambda_j t} = \sum_j A_j N_{0j} e^{-\lambda_j t}$$

Si l'on considère une source comportant deux radio-isotopes, on a:

$$A = \lambda_1 N_{01} e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 N_{02} e^{-\lambda_2 t}$$

Si les demi-vies (ou  $\lambda_j$ ) sont assez différentes tout en étant ni trop longues ni trop courtes et si les activités initiales (ou  $N_{0j}$ ) sont comparables, le tracé de la variation de l'activité en

fonction du temps  $A = f(t)$  sur graphique semi-logarithmique permet de déterminer, de façon relativement précise, les deux constantes radioactives.

## I.6. Applications de la radioactivité

### I.6.1. Datation au carbone 14

La période d'un radionucléide est une constante indépendante du nombre de nucléide ou la température de la source radioactive, pour cette raison elle est utilisée pour déterminer l'âge des roches ou des pièces archéologiques. La datation par carbone 14 se fonde ainsi sur la présence, dans tout organisme vivant, de radiocarbone en infime proportion ( $1,3 \cdot 10^{-12}$  pour le rapport C14/C total). A partir de l'instant où meurt un organisme, les échanges avec l'extérieur cessant, la quantité de radiocarbone qu'il contient décroît au cours du temps selon une loi exponentielle connue. Un échantillon de matière organique issu de cet organisme peut donc être daté en mesurant le rapport C14/C total.

#### Exemple

Un fragment d'os ancien contient 80 g de carbone (essentiellement du carbone 12) a une activité de 0,75 Bq. Quel est l'âge de ce fragment d'os ?

- le carbone 12 est stable ;
- La période du carbone 14 :  $T = 5,7 \cdot 10^3$  ans ;
- La masse d'un noyau carbone 12 :  $m = 12 \text{ u} = 12 \times 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$

*Solution :*

On calcule le nombre de noyau de carbone 12 :

$$\text{Nombre de noyaux : } N(\text{C12}) = \frac{80 \times 10^{-3}}{12 \times 1,67 \times 10^{-27}} = 4 \times 10^{24} \text{ noyaux}$$

On calcule le nombre de noyau de carbone 14 initial  $N_0(\text{C14})$  :

Nous avons

$$\frac{^{14}\text{C}}{\text{C}_t} \Rightarrow N(\text{C14}) = 4 \times 10^{24} \times 1,3 \times 10^{-12} = 5,2 \times 10^{12} \text{ noyaux}$$

On calcule le nombre de noyau de carbone 14 actuel  $N(\text{C14})$  :

$$\text{L'activité : } A = \lambda N \Rightarrow N = \frac{A}{\lambda}$$

$$\text{Or } \lambda = \frac{\ln 2}{T} \Rightarrow N = \frac{A \times T}{\ln 2} \Rightarrow$$

$$N(\text{C14}) = \frac{0,75 \times 5,7 \times 10^3 \times 365 \times 24 \times 3600}{\ln 2} = 1,9 \times 10^{11} \text{ noyaux}$$

Finalement on calcule l'âge du fragment d'os

Nous avons :

$$A = A_0 * e^{-\lambda t} \Rightarrow N = N_0 * e^{-\lambda t}$$

$$\Rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t = -\frac{\ln 2}{T} * t$$

$$t = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{\ln 2} * T = \frac{\ln \left[ \frac{1,9 \times 10^{11}}{5,2 \times 10^{12}} \right]}{\ln 2} \times 5,7 \times 10^3 = 2,7 \times 10^4 \text{ ans}$$

Donc l'âge du fragment d'os égale à 270000 années.

### **I.6.2. Traitement du cancer**

Bien que des niveaux élevés de rayons X et le rayonnement nucléaire provoquent le cancer, un tel rayonnement peut également être utilisé pour tuer des cellules cancéreuses, qui sont particulièrement sensibles aux radiations du fait de leur taux de croissance élevé. L'utilisation de radiations nucléaires de cette manière est appelée radiothérapie. Le but de la radiothérapie est de délivrer une dose aussi élevée que possible au tissu malin sans provoquer de graves blessures aux tissus sains environnants.

### **I.6.3. Radioisotopes comme traceurs**

Les radioisotopes ont les mêmes réactions chimiques que les isotopes non radioactifs du même élément, mais ils ont l'avantage que leur position peut être localisée à l'aide du matériel de détection approprié. Les rayonnements peuvent être utilisés de différentes manières:

- comme outils de suivi : des marqueurs (atomes radioactifs) étant introduits dans un milieu, il est ensuite aisé de détecter les rayonnements qu'ils émettent et de suivre leur devenir (applications en médecine, sciences, chaîne alimentaire, environnement ...),
- en imagerie : l'atténuation d'un faisceau lors de sa traversée de la matière dépend des matériaux traversés et de leurs épaisseurs (investigations en médecine, sciences, industrie ...),

### **I.6.4. Profit énergétique (réacteur nucléaire)**

Un réacteur nucléaire est un ensemble de dispositifs comprenant une enceinte enfermant un « cœur (réaction de fission) » dans lequel une réaction en chaîne peut être initiée, modérée et contrôlée par des agents humains via des protocoles et des dispositifs de modération de la fission nucléaire et d'évacuation de la chaleur. L'énergie thermique est transformée, par la suite, en énergie électrique.

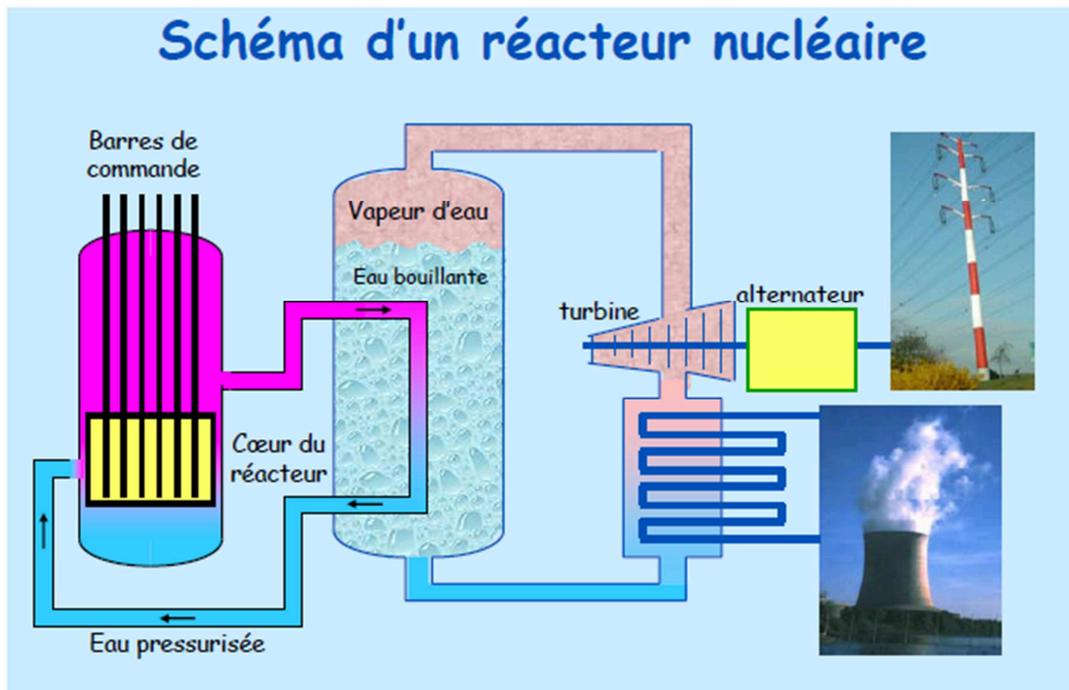


Figure I.3 : Schéma d'un réacteur nucléaire

### I.6.5. Armes nucléaires

L'énergie de l'atome est produite soit par la fission de certains noyaux atomiques lourds soit par la fusion de certains noyaux atomiques légers selon le type de bombe :

- La « bombe A » est une bombe atomique dite à fission puisqu'elle résulte de la fission nucléaire des noyaux tels que l'uranium 235 ou le plutonium 239 lorsque ils rencontrent un neutron.. Il est nécessaire de déclencher une réaction en chaîne pour obtenir une explosion nucléaire : pour cela, il faut disposer d'une quantité suffisante de matière fissile.
- La « bombe H » est une bombe à hydrogène dite à fusion. En effet, elle résulte de la fusion nucléaire entre deux noyaux tels que le deutérium et le tritium (qui sont des isotopes de l'hydrogène). La fusion thermonucléaire est réalisée en portant les éléments à très haute température.

### I.7. Dangers

- La radiation peut engendrer des effets sur la santé humaine :
  - Les symptômes initiaux de l'irradiation sont : nausée, vomissement, diarrhée, fièvre, céphalée, érythème.
  - Le risque de cancer
- Destruction massive (effet de la chaleur, souffle de l'explosion, brûlures)

- Destruction ou modification de la physiologie animale et végétale (effet des radiations sur les cellules).
- Contamination de l'environnement due aux déchets et aux poussières nucléaires
- Risques de fuite de radiations des réacteurs nucléaires.

## 1.9. Formation des éléments chimiques

### 1. Définitions de base

- a. **Cosmologie** est la branche de l'astrophysique qui étudie l'origine, la nature, la structure et l'évolution de l'univers.
- b. **Univers** : est l'ensemble de tout ce qui existe, régi par un certain nombre de lois.
- c. **Le Big Bang** (« Grand Boum ») est un modèle cosmologique utilisé par les scientifiques pour décrire l'origine et l'évolution de l'univers. issu d'une dilatation rapide il y a 13,8 milliards d'années proposé en 1929.
- d. **Le rayonnement fossile** Il nous parvient aujourd'hui de régions qui se trouvent actuellement à plus de 45 milliards d'années-lumière de la Terre, et sa température n'est que de 2,78 K environ.
- e. **Le fond diffus cosmologique** (découvert par hasard en 1964) : est le nom donné à un rayonnement électromagnétique observé dans toutes les directions du ciel et dont le pic d'émission est situé dans le domaine des micro-ondes

### 2. La nucléosynthèse

On appelle nucléosynthèse l'ensemble des processus qui conduisent à la formation (ou synthèse) des éléments chimiques (noyaux atomiques plus précisément) dans l'Univers. La nucléosynthèse est un phénomène fondamental qui explique la répartition et l'abondance des éléments chimiques dans l'Univers.

#### 2. Les réactions nucléaires à l'origine de la nucléosynthèse

##### 2.1. Fusion de noyaux

##### 2.2. Capture de neutrons

est une réaction nucléaire dans laquelle un noyau atomique absorbe un ou plusieurs neutrons ce qui conduit à la formation d'un noyau plus lourd

##### 2.3. Photodésintégration

Des photons de très haute énergie interagissent avec des noyaux atomiques lourds en les brisant en noyaux plus légers

##### 2.4. Spallation

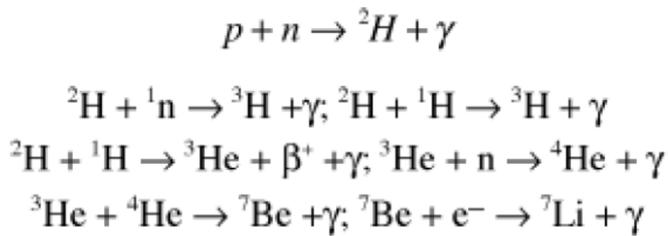
Des particules de très grande énergie entrent en collision avec des noyaux lourds en les brisant en noyaux plus légers

#### 3. Les différents types de nucléosynthèses dans l'Univers

##### 3.1. La nucléosynthèse primordiale

La nucléosynthèse primordiale s'est manifestée à l'échelle de l'Univers tout entier, durant les premières dizaines de minutes suivant le Big Bang. Alors, protons et neutrons pourront se lier pour former les premiers noyaux légers de l'Univers. Elle est responsable de la formation des noyaux

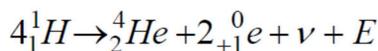
légers, principalement l'hélium 4 mais également le deutérium, une petite partie du lithium et des traces de béryllium. Aucun élément plus lourd n'a été créé durant cette période ;



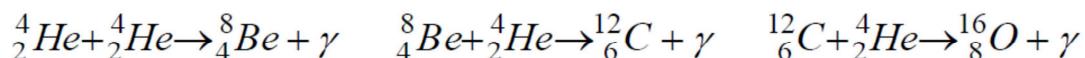
La nucléosynthèse primordiale va durer 15min car la température de l'Univers aura baissé et ne sera plus suffisante pour permettre aux réactions de fusion de se produire. L'Univers sera alors composé de 75 % d'hydrogène, 25 % d'hélium et des traces (0,01 %) d'autres éléments légers formés durant cette étape (deutérium, tritium, hélium 3, lithium 7). C'est la composition actuelle de l'Univers qui a donc été acquise durant cette courte étape qui a duré entre 3' et 15' après le Big-Bang.

### 3.2. La nucléosynthèse stellaire

Les étoiles sont des boules de gaz composées essentiellement d'hydrogène et d'hélium au coeur de lesquelles se produisent des réactions nucléaires qui en font une source de lumière et de chaleur. Elles naissent de la contraction d'un nuage de gaz et de poussières (les nébuleuses gazeuses). La nucléosynthèse stellaire a lieu dans les étoiles, et se déroule durant toute leur existence, les étoiles synthétisent la plupart des éléments entre le lithium et le fer

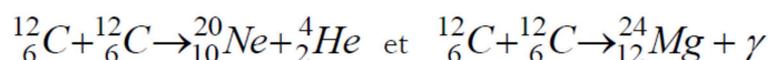


Lorsque la température du coeur de l'étoile atteint 100 millions de degrés, la fusion des noyaux d'hélium se déclenche et donne naissance à des noyaux de carbone et d'oxygène selon les réactions suivantes :

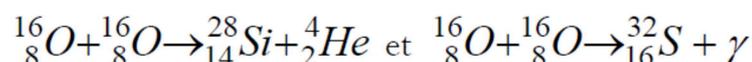


(Le béryllium n'est pas stable à l'intérieur des étoiles et se transforme instantanément en carbone)

Lorsque la température atteint 800 millions de degrés, les noyaux de carbone 12 fusionnent pour donner naissance au néon 20 et au magnésium 24 selon les réactions :

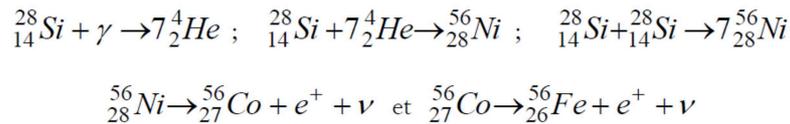


A 2 milliards de degrés, les noyaux d'oxygène 16 fusionnent en silicium 24 et en soufre 32 selon les réactions :

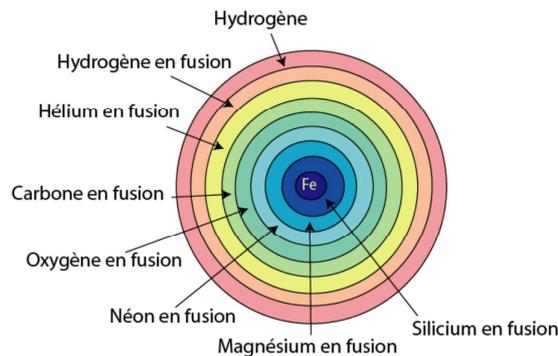


La combustion de l'oxygène est la dernière phase de fusions d'éléments identiques au coeur de l'étoile.

A des températures supérieures à 3 milliards de degrés, les noyaux de silicium sont brisés par les photons (qui sont très énergétiques à ces températures colossales, photodésintégration) qui libèrent des particules (protons, neutrons et noyaux d'hélium 4) qui sont ensuite capturés par les noyaux de  $^{28}\text{Si}$  présents pour former tous les éléments jusqu'au fer, le noyau le plus stable dans l'Univers.

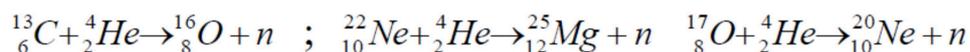


La structure de l'étoile est alors composée d'un noyau de fer enveloppée de couches concentriques dont la composition correspond du centre vers l'extérieur aux produits de fusion successifs : silicium, soufre, oxygène, néon, carbone et hélium. L'enveloppe externe est composée d'hydrogène et d'hélium

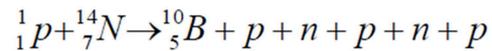


### 3.3. La nucléosynthèse explosive

La supernova disperse dans l'espace toutes les couches supérieures de l'étoile (enrichies en éléments lourds). Des neutrons rapides seront émis lors de cette explosion et vont se combiner aux éléments présents pour former tous les éléments chimiques plus lourds que le fer. C'est la nucléosynthèse explosive.



**3.4. La nucléosynthèse de spallation cosmique,** Dans le milieu interstellaire, des particules de grande énergie (protons, noyaux d'hélium 4) qui forment le rayonnement cosmique peuvent entrer en collision avec des noyaux de carbone, d'oxygène et d'azote. Ces collisions engendrent des réactions de spallation qui conduisent à la formation des éléments légers lithium, béryllium et bore



#### 4. L'abondance des éléments chimiques dans l'Univers

- Les éléments de numéro atomique pair sont plus abondants que ceux de numéro atomique impair : L'abondance des éléments de numéro atomique pair par rapport à ceux de Z impair est la marque de la fusion des noyaux d'hélium de masse 4, puis de noyaux multiples de 4, plus stables.
- Une abondance importante des éléments H et He par rapport aux autres éléments : L'abondance de l'hydrogène et de l'hélium s'explique par le fait que ces deux éléments ont été synthétisés lors de la nucléosynthèse primordiale
- Un déficit considérable des éléments de faible masse Li, Be, B : s'explique par le fait que ces éléments sont détruits au sein des étoiles et sont formés par spallation