

# Physique nucléaire, relativité et plasmas

## Notes de cours

Professeur : Étienne Gravier  
Etienne.Gravier@univ-lorraine.fr  
Auteur : Louis-Guillaume Dubois  
Louis-Guillaume.Dubois@supelec.fr

5 novembre 2014

### Table des matières

<b>I</b>	<b>Historique</b>	<b>3</b>
<b>II</b>	<b>Relativité restreinte</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Composition des vitesses dans la mécanique classique</b>	<b>6</b>
1.1	Transformation de Galilée . . . . .	6
1.2	Problème de la vitesse de la lumière . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Composition des vitesses en relativité restreinte</b>	<b>7</b>
2.1	Postulats . . . . .	7
2.2	Cas particulier : $x' = 0$ . . . . .	7
2.3	Calcul de $\gamma$ . . . . .	7
2.4	Composition des vitesses . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Conséquences</b>	<b>9</b>
3.1	Deux évènements . . . . .	9
3.2	Contraction des longueurs . . . . .	9
3.3	Dilatation des durées . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Équivalence Masse-Énergie</b>	<b>10</b>
4.1	Énergies totales et quantités de mouvement . . . . .	10
4.2	Énergies cinétiques . . . . .	10
<b>III</b>	<b>Généralités sur les noyaux – Radioactivité</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Introduction</b>	<b>12</b>
5.1	L'énergie de la matière . . . . .	12
5.2	Interactions élémentaires . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Structure du noyau – Dimension</b>	<b>12</b>
6.1	Structure de l'atome . . . . .	12
6.1.1	Description . . . . .	12
6.1.2	Nucléons . . . . .	13
6.2	Isotopes . . . . .	13
6.3	Unités . . . . .	13
6.3.1	Unité de masse atomique . . . . .	13
6.3.2	Électron-Volt . . . . .	13
6.4	Volume et masse . . . . .	13

6.5	Énergie de liaison . . . . .	14
6.5.1	Définition . . . . .	14
6.5.2	Défaut de masse et énergie de liaison . . . . .	14
6.6	Rapport $E_l/A$ . . . . .	14
6.7	Atome . . . . .	14
<b>7</b>	<b>Radioactivité – Modes de désintégration</b>	<b>15</b>
7.1	Stabilité . . . . .	15
7.1.1	Principes . . . . .	15
7.1.2	Exemples . . . . .	15
7.2	Radioactivité $\beta^-$ . . . . .	15
7.3	Capture Électronique . . . . .	15
7.3.1	Matière et Antimatière . . . . .	16
7.4	Radioactivité $\alpha$ . . . . .	16
7.5	Radioactivité $\beta^+$ . . . . .	16
7.6	Bilan . . . . .	16
7.7	Désintégration $\alpha$ et énergie . . . . .	16
7.7.1	Énergie libérée . . . . .	16
7.7.2	Évaluation de l'énergie cinétique . . . . .	17
7.8	Loi de décroissance . . . . .	18
7.8.1	Loi générale de désintégration . . . . .	18
7.8.2	Filiations radioactives (chaînes radioactives) . . . . .	19
7.9	Datation par carbone 14 . . . . .	20
7.9.1	Principe . . . . .	20
7.9.2	Activation. Création de radioéléments artificiels . . . . .	22
<b>IV</b>	<b>Réactions nucléaires. Fission. Fusion</b>	<b>22</b>
<b>8</b>	<b>Introduction</b>	<b>22</b>
8.1	Expérience historique . . . . .	23
8.2	Énergie . . . . .	23
<b>9</b>	<b>Lois de conservation</b>	<b>23</b>
9.1	Conservation de la charge électrique . . . . .	23
9.2	Conservation du nombre de nucléon . . . . .	23
9.3	Conservation de l'énergie . . . . .	23
9.4	Conservation de la quantité de mouvement . . . . .	23
<b>10</b>	<b>Fusion nucléaire</b>	<b>23</b>
10.1	Premiers noyaux . . . . .	23
10.2	Cycle proton/proton . . . . .	24
10.3	Fusion de l'Hélium . . . . .	24
10.4	Évolutions possibles . . . . .	24
10.5	Fusion de l'Oxygène . . . . .	24
10.6	Fusion du Silicium . . . . .	24
<b>11</b>	<b>Fission nucléaire</b>	<b>24</b>
11.1	Causes de la fission . . . . .	24
11.2	Noyau fissile . . . . .	25
11.3	Noyau fertile . . . . .	25
11.4	Fission de l' ${}^{235}_{92}\text{U}$ . . . . .	25
11.4.1	Forme des réactions . . . . .	25
11.4.2	Exemples de produits de fission . . . . .	25
11.4.3	Neutrons émis . . . . .	25
11.4.4	Neutrons retardés . . . . .	25
11.4.5	Énergie libérée . . . . .	26

<b>V Principe de fonctionnement d'un réacteur nucléaire</b>	<b>26</b>
12 Réaction principale	26
13 Neutrons	26
13.1 Classification des neutrons	26
13.2 Diminution des pertes	26
13.2.1 Masse critique	26
13.2.2 Géométrie du réacteur	26
13.2.3 Objectif	27
13.2.4 Moyens	27
14 Filières	27
14.1 Eau et Uranium naturel	27
14.2 Eau lourde et Uranium naturel	27
14.3 Carbone (graphite) et Uranium naturel	28
14.4 Eau et Uranium enrichi (à 2,5% en $^{235}_{92}U$ )	28
15 Cinétique de la réaction en chaîne	28
15.1 Notations	28
15.2 Variation du nombre de fissions	28
15.3 Régime de fonctionnement	28
15.3.1 Objectif	28
15.3.2 Contrôle du régime	28
<b>VI Radioprotection</b>	<b>28</b>
16 Présentation	29
16.1 Radioactivité	29
16.2 Mesures de la radioactivité	29
17 Nouvelles grandeurs utilisées	29
17.1 Le Gray	29
17.2 Dose équivalente	29
17.3 Dose efficace	30
18 Risques	30
18.1 Estimations des risques	30
18.2 Ordres de grandeur	30
18.3 Exemples	30
18.3.1 Tchernobyl	30
18.3.2 Fukushima (12.03.2011)	30
19 Comment se protéger ?	30
19.1 Écrans	30
20 Déchets nucléaires liés à la fission	31

## Première partie

# Historique

### Moyen-Âge : découverte de la pechblende

Un minerai particulier est signalé en Saxe : la **pechblende**, mais pendant longtemps il n'a présenté que peu d'intérêt : on pensait qu'il ne contenait que du fer et du zinc. En réalité ce minerai est constitué de dioxyde d'uranium  $UO_2$ . De nos jours on trouve l'uranium au Congo, au Canada, en Russie, au Kazakhstan, en Namibie et au Niger.



pechblende

## 1789 : découverte de l'Uranium par Klaproth

Un chimiste allemand, Martin Heinrich Klaproth (1743–1817), annonce en 1789 l'existence dans la penchblende d'un métal nouveau qu'il appelle **uranium**, en référence à la planète Uranus découverte 8 ans plus tôt.

Cependant ce métal restera sans grand intérêt pendant encore un siècle. Il a longtemps été considéré inoffensif.

Cet élément possède une radioactivité très faible, difficilement détectable sans instrument précis. On compte dans l'uranium 99,3% de  $^{238}\text{U}$ , dont la période de demi-vie s'étend sur 4,5 milliards d'années, et 0,7% de  $^{235}\text{U}$ , dont la période est de 810 millions d'années.



Klaproth

## 1895 : découverte des rayons X par Röntgen

Le physicien allemand Röntgen (1845–1923) découvre un rayonnement, qu'il nomme rayons X car il ne sait pas de quoi il s'agit. En 1901 il recevra le prix Nobel pour cette découverte.

En 1896 il effectuera la première radiographie sur la main d'un de ses collègues.

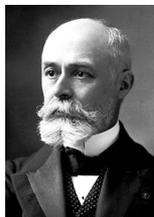


première radiographie

## 1896 : découverte de la radioactivité par Becquerel

Antoine-Henri Becquerel (1852–1928), physicien français, membre dès 1889 de l'Académie des Sciences qu'il a beaucoup correspondu avec Henri Poincaré, travaille à partir de 1896 sur la fluorescence des sels d'uranium, en conjecturant un phénomène analogue aux rayons X. Un jour il range dans un tiroir, au contact d'une plaque photo, des sels qui n'ont pas été exposés à la lumière. La plaque photo a été impressionnée. Il en déduit que ces sels émettent leur propre rayonnement.

C'est Marie Curie, au cours de sa thèse, qui donnera le nom de « radioactivité » à ce phénomène. Elle et Becquerel recevront ensemble le prix Nobel en 1903.



Becquerel

## Marie Curie (1867–1934)

Née à Varsovie, elle entre en Sorbonne en 1891 après que sa ville natale a été annexée par la Russie, qui a interdit aux femmes l'accès à l'université. Après avoir épousé en 1894 Pierre Curie, elle commence en 1897 sa thèse sur les rayonnements découverts par Becquerel. Elle isole deux nouveaux éléments : le **polonium** et le **radium**. Plusieurs tonnes de penchblende sont nécessaires pour un kilogramme de radium.

Son mari meurt en 1906. Pendant la première guerre mondiale elle crée les premières voitures de radiologie. En 1934 elle décède d'une leucémie. En 1944 l'élément 96 sera baptisé Curium en sa mémoire.



Marie Curie

## 1900 : Découverte des rayons $\alpha$ et $\beta$ par Rutherford

Le physicien anglais Ernest Rutherford (1871–1937) identifie les rayons  $\alpha$  et  $\beta$ . Il est considéré comme le père de la physique nucléaire. En 1911 il propose une nouvelle structure de l'atome, opposé au modèle de Thomson : un noyau constitué de charges positives autour duquel évoluent des charges négatives. En 1919 il réussit à voir la première réaction nucléaire : la transformation d'un noyau d'azote en noyau d'oxygène, grâce aux particules  $\alpha$ .



Rutherford

## 1904 : René Blondlot et les rayons N

En 1904, René Blondlot (1849–1930), physicien nancéen reconnu, croit découvrir des rayons qu'il appelle rayons N en référence à sa ville de Nancy. Il s'agit de l'une des plus grandes erreurs expérimentales du  $xx^e$  siècle : ces rayons n'existent pas, mais, de bonne foi, il réussit à persuader ses collègues, et reçoit un prix de l'Académie des Sciences.

Cependant en 1905 un Américain, Robert Wood, visite son laboratoire et enlève ce qui est supposé créer les rayons N : les mêmes résultats sont observés.

## 1905 : Albert Einstein et l'« année miraculeuse de la physique »

Au début du  $xx^e$  siècle, Albert Einstein (1879–1955), qui ne trouve pas de poste à l'université, obtient en 1902 un travail à l'office des brevets de Bern en Suisse. En 1905 il publie quatre articles très importants :

**Mars 1905** : Publication d'un article sur l'effet photovoltaïque ;

**Mai 1905** : Article sur le mouvement brownien (preuve théorique de l'existence des atomes) ;

**Juin 1905** : Bases de la relativité restreinte ;



Einstein

**Septembre 1905 :**  $E = mc^2$ .

En 1913 il est nommé à l'Académie des Sciences de Prusse. Il milite en 1914 contre la guerre. Il établit la théorie de la relativité générale en 1915. En 1933 il quitte l'Allemagne pour les États-Unis. Sa lettre à Roosevelt est envoyée en août 1939. Il meurt là-bas d'un rupture d'anévrisme.

### **1938 : fission de l'uranium, Hahn et Meitner**

Otto Hahn et Lise Meitner réalisent la fission de l'uranium en 1938.

### **1939 : détection des neutrons de la fission, Joliot et Curie**

En janvier 1939, Frédéric Joliot et Irène Curie (la fille de Marie) détectent les neutrons émis par la fission de l'uranium, ce qui rend possible une réaction en chaîne. Ils calculent la masse critique. Joliot, directeur du CNRS, est un des créateur du CEA.

### **1941 : lancement du projet Manhattan**

Avec l'entrée en guerre des États-Unis est lancée le projet Manhattan. En 1942, Groves (militaire) et Oppenheimer (physicien) seront à la tête du projet Manhattan, sur lequel travailleront 300 000 personnes en 1945.

### **1942 : première réaction en chaîne, Szilard et Fermi**

Léo Szilard (1898–1964) a eu l'idée dès 1933 de la réaction en chaîne, qu'il réussit à effectuer avec Enrico Fermi (1901–1954) en 1942.

La pile de Fermi, réalisée à Chicago cette année-là, est la première centrale productrice d'électricité.

### **6 août 1945 : Hiroshima**

La bombe *Little Boy*, à base de  $^{235}\text{U}$ , transportée par Paul Tibbets dans son avion *Enola Gay*, fait 70 000 morts immédiats, et 140 000 morts au total.

### **9 août 1945 : Nagasaki**

La bombe composée d'un cœur en plutonium entouré d'explosif fait 40 000 morts immédiats.

### **15 août 1945 : capitulation du Japon**

### **1948 : Zoé, première pile française**

### **1951 : premier réacteur industriel aux États-Unis**

### **1952 : explosion de la bombe H**

La bombe H s'appuie sur la fusion de l'hydrogène. Sa première explosion a eu lieu sur l'atoll de Bikini en 1952. Son avantage est de ne créer que peu de déchets nucléaires.

### **1954 : premier réacteur industriel en URSS**

### **1956 : première centrale française à Marcoule**

### **1974 : la France choisit le nucléaire**

La France décide alors de construire treize nouvelles centrales.



Meitner et Hahn



Joliot et Curie



Fermi



Nagasaki



Centrale de Marcoule



IRM

**1980 : utilisation de l'IRM**

**1986 : accident de Tchernobyl**

**De nos jours**

En 2005 le monde compte 440 réacteurs nucléaires en fonctionnement, dont 59 pour la France, répartis dans 19 centrales, qui ont chacune une puissance de près d'un GW, ce qui représente pour la France 80% de l'électricité produite.

En mars 2011 a lieu l'accident de la centrale de Fukushima.

## Deuxième partie

# Relativité restreinte

La relativité **restreinte** s'appelle ainsi car elle ne s'applique qu'en l'absence de gravitation, et, plus généralement, d'accélération.

En revanche, la relativité **générale** est valable en présence de gravitation.

## 1 Composition des vitesses dans la mécanique classique

### 1.1 Transformation de Galilée

Un voyageur marche à 5 km/h dans un wagon qui se déplace lui-même à 100 km/h par rapport aux rails. On considère alors deux systèmes  $S$  et  $S'$  :

Premier système de référence	$S$	attaché aux rails	horloge $H \rightarrow t$
Deuxième système de référence	$S'$	attaché au wagon	horloge $H' \rightarrow t'$

$S'$  est en translation rectiligne uniforme par rapports à  $S$ . Donc  $S'$  et  $S$  sont tous deux des référentiels **inertiels** ou **galiléens**.

Soit  $w'$  la vitesse du voyageur par rapport au wagon. Pour mesurer cette vitesse, un observateur lié à  $S'$  mesure la distance  $\Delta x'$  parcourue par le voyageur pendant l'intervalle de temps  $\Delta t'$ .

Ainsi  $w' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = 5$  km/h.

Soit  $v$  la vitesse du train par rapport aux rails, et  $w$  celle du voyageur par rapport aux rails. Un observateur lié à  $S$  fait la mesure :  $w = \frac{\Delta x}{\Delta t} = 105$  km/h .

On a bien :  $w = v + w'$ , où :

$w$	vitesse absolue
$v$	vitesse d'entraînement
$w'$	vitesse relative

Il s'agit de la loi de composition des vitesses en mécanique classique, ou **transformation de Galilée**. Le temps  $y$  est absolu :  $t = t'$ .

### 1.2 Problème de la vitesse de la lumière

Que se passe-t-il pour la lumière ? Considérons  $P$ , position d'un flash lumineux qui se propage. Un observateur lié à  $S'$  mesure la vitesse  $w' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = c = 299\,792\,458$  m/s. Un autre observateur, lié à  $S$ , mesure  $w = \frac{\Delta x}{\Delta t} = c$ , soit la même vitesse !

Cette fois  $w \neq v + w'$  : **la loi de transformation galiléenne ne s'applique plus**.

En réalité, la constance de  $c$ , vitesse de la lumière dans le vide, quel que soit le référentiel a été démontrée en 1887 par l'expérience de Michelson et Morley, expérience confirmée par la suite.

## 2 Composition des vitesses en relativité restreinte

### 2.1 Postulats

**Deuxième postulat de la relativité restreinte** : la vitesse de la lumière ne présente jamais de valeur relative. Dans le vide (ou dans l'air) cette vitesse est égale à  $c$  dans tous les référentiels d'inertie.

Or  $c = \frac{d}{t}$ . Il faut donc trouver une nouvelle loi d'addition des vitesses.

**Premier postulat de la relativité restreinte** : les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels d'inertie.

### 2.2 Cas particulier : $x' = 0$

**Cadre de l'étude** On reprend l'exemple précédent, avec les référentiels  $S$  et  $S'$  :  $Ox'$  a un mouvement rectiligne parallèle à  $Ox$ , de vitesse constante  $v$  par rapport à  $S$ .  $S$  et  $S'$  sont donc toujours des référentiels d'inertie.

**Introduction de  $\gamma$**  Soit  $P$  la position d'un point quelconque, repéré en  $S$  par  $x$ , et en  $S'$  par  $x'$ . Un horloge dans  $S$  donne le temps  $t$ , une autre dans  $S'$  donne le temps  $t'$ .

À  $t = t' = 0$  on considère que  $O \equiv O'$ . Ainsi,  $x' = 0 \Rightarrow O \equiv O'$ . Dans le cas où  $x' = 0$ , on a alors  $x = x_0 = vt$ , en effet  $O'$  caractérise le mouvement de  $S$  par rapport à  $S'$ .

On suppose que  $x'$  est une fonction polynomiale en  $x$ . Alors, comme  $x'_{(x=x_0)} = 0$ ,  $x'$  admet  $(x - x_0)$  en facteur. Donc il existe  $\gamma$  fonction polynomiale en  $x$  telle que :  $x' = \gamma(x - x_0)$ . D'où :

$$\boxed{x' = \gamma(x - vt)} \quad (1)$$

### 2.3 Calcul de $\gamma$

En mécanique classique,  $\gamma = 1$ . Mais que vaut  $\gamma$  dans le cas de la relativité restreinte ? Utilisons le postulat que  $c \equiv \text{constante}$ .

Soit  $P$  un point lumineux émis à  $t = t' = 0$  en  $O \equiv O'$ . On a alors :

$$\text{dans } S' : x' = ct' \quad (2)$$

$$\text{dans } S : x = ct \quad (3)$$

Plutôt qu'une relation du type  $x' = f(x, t)$ , on voudrait établir une relation de la forme  $t' = f(t, x)$ . On cherche alors  $a$  et  $b$  tels que :

$$t' = at + bx \quad (4)$$

L'équation (1) donne alors :

$$(1) \xrightarrow{(3)} x' = \gamma \left( ct - v \frac{x}{c} \right) \xrightarrow{(2)} ct' = \gamma \left( ct - v \frac{x}{c} \right) \xrightarrow{(4)} c(at + bx) = \gamma \left( ct - v \frac{x}{c} \right)$$

D'où, par identification,  $a = \gamma$  et  $b = -\frac{\gamma v}{c^2}$ .

Ainsi, d'après (4),

$$\boxed{t' = \gamma \left( t - \frac{v}{c^2} x \right)} \quad (5)$$

Or la vitesse  $v$  est relative aux deux systèmes :  $S'$  est en droit de se considérer au repos et de voir  $S$  se déplacer par rapport à lui avec la vitesse  $-v$ . C'est le principe de réciprocité des vitesses. On a alors, en supposant que  $\gamma(-v) = \gamma(v)$  :

$$x = \gamma(x' + vt') \quad (6)$$

$$t = \gamma \left( t' + \frac{v}{c^2} x' \right) \quad (7)$$

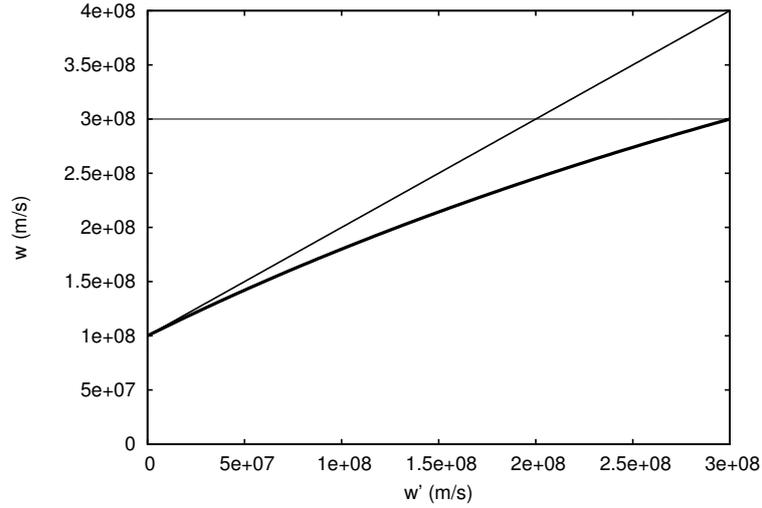


FIGURE 1 –  $w = f(w')$ , cf. eq (9), pour  $v = 1 \times 10^8$  m/s, d'après les transformations de Galilée (trait fin) et de Lorentz (trait large)

Ainsi, (1) s'écrit :

$$x' = \gamma(x - vt) \stackrel{(6) \text{ et } (7)}{=} \gamma^2 x' \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

Cela est vrai pour tout  $x' \neq 0$ , d'où  $1 = \gamma^2(1 - \frac{v^2}{c^2})$ . Ainsi :

$$\boxed{\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}} \quad (8)$$

On observe que  $\gamma$  est paire en  $v$ , ce qui est cohérent avec l'hypothèse qui nous a permis d'écrire les équations (6) et (7).

### Conclusion

- Si  $v \ll c$ , alors  $\gamma \approx 1$  et on retrouve la transformation galiléenne.
- Sinon,  $\gamma \neq 1$ , et on doit appliquer une **transformation de Lorentz**.

## 2.4 Composition des vitesses

Maintenant, considérons  $P$  animé d'une vitesse  $w'$  par rapport à  $S'$ .

$$\begin{aligned} x' &= w't' \\ \Rightarrow_{(1) \text{ et } (5)} \gamma(x - vt) &= w'\gamma \left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \\ \Rightarrow x \left(1 + w' \frac{v}{c^2}\right) &= t(w' + v) \end{aligned}$$

Or  $w$  vitesse de  $P$  par rapport à  $S$  vérifie  $x = wt$ , d'où la **nouvelle loi de composition des vitesses**

$$\boxed{w = \frac{w' + v}{1 + w' \frac{v}{c^2}}} \quad (9)$$

### Cas particuliers

- Si  $w' \ll c$  et  $v \ll c$  alors  $w \approx w' + v$  (transformation de Galilée);
- si  $w' = c$  alors  $w = c$ ;
- de même, si  $v = c$  alors  $w = c$ .

### 3 Conséquences

#### 3.1 Deux évènements

On considère deux évènements, repérés,

- dans  $S$ , par  $(x_1, t_1)$  et  $(x_2, t_2)$  ;
- dans  $S'$ , par  $(x'_1, t'_1)$  et  $(x'_2, t'_2)$ .

On définit alors les durées et les distances :

- $\Delta x = x_2 - x_1$
- $\Delta t = t_2 - t_1$
- $\Delta x' = x'_2 - x'_1$
- $\Delta t' = t'_2 - t'_1$

D'après (1), on a

$$\Delta x' = \gamma (\Delta x - v \Delta t) \quad (10)$$

De même, d'après (5), on a aussi

$$\Delta t' = \gamma \left( \Delta t - \frac{v}{c^2} \Delta x \right) \quad (11)$$

#### 3.2 Contraction des longueurs

Soit un corps de longueur  $\Delta x$  dans  $S$ ,  $\Delta x'$  dans  $S'$ . On fait une photo à un instant  $t = t_1 = t_2$ . On a  $\Delta x = x_2 - x_1$ . Ainsi, d'après (10), avec  $\Delta t = 0$  :

$$\Delta x' = \gamma \Delta x = \frac{\Delta x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Au final on obtient  $\Delta x' > \Delta x$  : un objet qui mesure  $\Delta x'$  dans  $S'$  paraît contracté dans  $S$ .

#### 3.3 Dilatation des durées

D'après (11), par symétrie,

$$\Delta t = \gamma \left( \Delta t' + \frac{v}{c^2} \Delta x' \right) \quad (12)$$

Pour deux évènements localisés au même endroit dans  $S'$ , on a  $x' = x'_1 = x'_2$  donc  $\Delta x' = 0$ . Ainsi (12) donne :

$$\Delta t = \gamma \Delta t' = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

D'où au final  $\Delta t > \Delta t'$  : il y a dilatation des durées pour l'observateur en  $S$  ; on parle de « retard » des horloges mobiles, retard qui a pu être observé sur les horloges des avions.

**Exemple des muons** Un autre exemple de ce phénomène concerne les muons qui pénètrent dans l'atmosphère avec une vitesse très élevée : le temps perçu par les muons n'est pas le même que celui que nous percevons.

**Paradoxe des jumeaux de Langevin** On considère deux jumeaux, A et B. A reste sur la Terre, alors que B voyage avec la vitesse  $v$  à travers l'espace. On pose  $v = 0,99 c$ .

D'après la relativité restreinte, si pour l'horloge de A, la durée du voyage est de  $\Delta t = 14$  ans, pour l'horloge de B, cette durée n'a été que de  $\Delta t' \approx 2$  ans.

Ainsi, pendant que le voyageur B a vieilli de deux ans, A a vieilli de 14 ans. Mais, au retour de B, sera-t-il réellement plus jeune que A ?

Un aller-retour nécessite des accélérations : des changements de vitesse. Donc la relativité restreinte ne s'applique plus. Il faut faire appel à la relativité générale pour répondre à cette question.

**Exemple du train** Un observateur est fixe dans  $S'$ , référentiel lié au wagon. Il considère l'horloge suivante : entre 2 miroirs, séparés par une longueur  $L$ , un photon fait des aller-retours. Chacun de ces aller-retours correspond à une période de l'horloge :  $\Delta t' = \frac{2L}{c} = \frac{d'}{c}$ , où  $d' = 2L$ .

Cette fois l'observateur est fixe dans  $S$ , référentiel lié aux rails. Le wagon est en translation à la vitesse  $v$  par rapport à  $S$ . L'observateur mesure  $\Delta t = \frac{d}{c}$

Or on a  $d > d' = 2L$ , donc on a aussi  $\Delta t > \Delta t'$ .

## 4 Équivalence Masse-Énergie

### 4.1 Énergies totales et quantités de mouvement

On considère un corps en mouvement de translation rectiligne uniforme de vitesse quelconque par rapport à  $S'$ .

Si on lui applique une force  $F$  sur une distance  $\Delta x'$ , son énergie varie de  $\Delta E' = F \Delta x'$ . Ainsi :

$$\Delta x' = \frac{\Delta E'}{F}$$

On se place maintenant dans  $S$ . Or, d'après le premier postulat, la force  $F$  est invariante :  $F \equiv F'$ . On a donc aussi :

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{F}$$

De même, pour la quantité de mouvement, d'après le PFD,  $F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\Delta p'}{\Delta t'}$ , donc :

$$\Delta t = \frac{\Delta p}{F} \text{ et } \Delta t' = \frac{\Delta p'}{F}$$

On porte ces longueurs et ces durées dans (10) et (11).

Alors  $\frac{\Delta E'}{F} = \gamma(\frac{\Delta E}{F} - v \frac{\Delta p}{F})$ , donc on obtient finalement :

$$\Delta E' = \gamma(\Delta E - v \Delta p)$$

De même,  $\frac{\Delta p'}{F} = \gamma(\frac{\Delta p}{F} - \frac{v}{c^2} \frac{\Delta E}{F})$ , ainsi on obtient :

$$\Delta p' = \gamma(\Delta p - \frac{v}{c^2} \Delta E)$$

Après avoir établi les équations symétriques, on obtient en fin de compte :

$$\boxed{E' = \gamma(E - vp)} \quad (13)$$

$$\boxed{p' = \gamma(p - \frac{v}{c^2} E)} \quad (14)$$

### 4.2 Énergies cinétiques

**Utilisation d'un cas particulier** On utilise un cas particulier : si le corps a une vitesse  $v$  par rapport à  $S$ , il doit être au repos dans  $S'$ . Alors l'énergie cinétique dans  $S$  s'écrit  $E'_c = 0$ , et  $p' = 0$ .

On pose l'énergie totale  $E' = 0 + E'_0$  (somme de l'énergie cinétique et de l'énergie au repos, sorte d'énergie potentielle ou interne). On ne sait pas à quoi elle est égale pour le moment.

L'équation (13) donne :  $0 + E'_0 = \gamma(E - vp)$ .

L'équation (14) donne :  $0 = \gamma(p - \frac{v}{c^2} E)$  d'où  $p = \frac{v}{c^2} E$ .

Ainsi on obtient les relations suivantes :

$$E'_0 = \gamma \left( E - \frac{v^2}{c^2} E \right)$$

$$E = \frac{E'_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (15)$$

$$p = \frac{v}{c^2} \frac{E'_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16)$$

On utilise le fait que, quand  $v \ll c$ , on doit retrouver la mécanique classique, notamment  $p = m_0 v$ , où  $m_0$  est la masse du corps au repos.

Or, quand  $v \ll c$ ,

$$p = \frac{v}{c^2} \frac{E'_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx \frac{v}{c^2} E'_0 = m_0 v$$

On obtient alors :  $E'_0 = m_0 c^2$ .

Or  $E'_0$  ne dépend ni de  $v$ , ni de  $w$  ou  $w'$ , on a donc :

$$\boxed{E_0 = E'_0 = m_0 c^2} \quad (17)$$

qui est l'énergie du système au repos, l'énergie « potentielle »  $E_0$ .

**Masse et vitesse** Ainsi, d'après (16) et (17),  $p = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} v$ .

Donc, en posant :

$$\boxed{m = \gamma m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}} \quad (18)$$

on a bien  $p = mv$ .

On observe alors que la masse augmente quand  $v$  augmente :  $m \rightarrow \infty$  quand  $v \rightarrow c$ .

**Énergie totale** Par (15) et (17), on a l'égalité :  $E = \gamma m_0 c^2$ . Puis, d'après (18), l'énergie totale s'écrit :

$$\boxed{E = mc^2} \quad (19)$$

**Énergie cinétique relativiste** On a, par définition,  $E = E_c + E_0$ , d'où  $E_c = E - E_0 = mc^2 - m_0 c^2$ , soit :

$$\boxed{E_c = m_0 c^2 (\gamma - 1)} \quad (20)$$

**Cas particulier : lois classiques** Quand  $\frac{v}{c} \rightarrow 0$ ,  $E_c \approx m_0 c^2 (1 + \frac{v^2}{c^2} - 1) = \frac{1}{2} m_0 v^2$ , et on retrouve bien l' $E_c$  de la mécanique classique.

### Remarques

- Aux faibles vitesses, l'énergie totale s'écrit :  $E \approx m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2$
- Pour le photon,  $v = c$ , soit  $m \rightarrow \infty$  d'après l'équation (18), mais en fait,  $m_0 = 0$  (la masse au « repos » du photon est nulle, mais cela ne signifie pas grand chose car un photon est toujours à la vitesse  $c$ ), donc  $m = 0$  pour tout  $v$ .
- on peut écrire l'énergie totale sous la forme  $E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$

**Exemple** On considère un proton ( $m_0 = 1,67.10^{-27}$  kg) à la vitesse  $v_1 = 299\,000$  km/h. Alors  $E_{c1} = 2,45 \cdot 10^{-9}$  J = 15,3 GeV et  $m_1 = 16,3 m_0$ .

On double son énergie : désormais  $E_{c2} = 30,6$  GeV

Alors  $v_2 = 299\,730$  km/s et  $m_2 = 32,3 m_0$ .

## Troisième partie

# Généralités sur les noyaux – Radioactivité

## 5 Introduction

### 5.1 L'énergie de la matière

Matière solide : énergie « gelée » car  $E = mc^2$  Dans 1 kg de matière on a  $E = 900$  milliards de milliards de Joules. C'est l'équivalent de la consommation totale d'énergie en France pendant trois jours.

Domaine	Chimie	Physique nucléaire	Physique des hautes énergies
Ordre de grandeur	$\approx eV$	$\approx MeV$	$\approx GeV$
Liaisons concernées	électrons-noyaux	protons-neutrons	entre quarks

**Chimie** : brûler du pétrole, c'est casser les liaisons entre les molécules. L'énergie de liaison entre molécules est libérée. Le défaut de masse est très faible et représente  $\approx 10^{-7}\%$  de la masse de la molécule.

**Physique nucléaire** : énergie de liaison entre protons et neutrons. L'énergie récupérée représente à peu près 1% de la masse du noyau. 10 millions de fois plus que pour la simple combustion.

**Physique des hautes énergies : liaisons entre quarks**

**Quark up (u)** :  $\frac{2}{3} e$

**Quark down (d)** :  $-\frac{1}{3} e$

**Neutron** : udd

**Proton** : uud

### 5.2 Interactions élémentaires

Les forces qui lient entre elles les particules sont appelées les *interactions élémentaires*. Elles sont au nombre de quatre :

**interaction gravitationnelle** : en  $\frac{1}{r^2}$ , portée infinie. Une particule élémentaire interviendrait : le graviton, qui serait le vecteur de l'information, et qui aurait une masse proche de 0, sans charge (indétectable?).

**interaction électromagnétique** : de portée infinie (phénomènes chimiques, électriques...) Son vecteur est le photon, de masse nulle.

**interaction faible** : de courte portée, elle est peu observable au quotidien, étrangère à nos sens. Elle explique pourquoi un neutron peut se transformer en proton (radioactivité  $\beta^-$ ). Ses vecteurs sont les bosons (lourds).

**interaction forte** : lien entre les protons et les neutrons dans le noyau. Sa portée est très courte ( $\approx 10^{-15}$  m). Ses vecteurs sont les mésons ( $\approx 300 \times m_{e^-}$ ).

## 6 Structure du noyau – Dimension

### 6.1 Structure de l'atome

#### 6.1.1 Description

L'atome est caractérisé par le symbole chimique  $X$ , il contient  $Z$  électrons,  $Z$  variant de 1 à 92 dans la nature. Ce sont les  $Z$  électrons qui donnent à l'atome ses propriétés chimiques.

**Taille**  $\approx 10^{-10}$  m

**Masse de l'électron**  $m_{e^-} = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg

**Taille du noyau**  $10^{-15}$  à  $10^{-14}$  m

**Densité du noyau**  $\approx 100\,000$  fois celle de l'atome.

### 6.1.2 Nucléons

**Protons** Dans un noyau, il y a  $Z$  protons (l'atome est électriquement neutre). Le proton a été mis en évidence par Blackett en 1926.

$Z$  est appelé *numéro atomique*.

**Neutrons** Il y a aussi dans un atome  $N$  neutrons. Le nombre  $A = Z + N$  est appelé le *nombre de masse*.

Neutrons et protons sont appelés les *nucléons*.

Représentation :  ${}_Z^A X$ .

#### Remarques

- Écrire  $Z$  est souvent superflu car l'information se retrouve dans  $X$ .
- En dehors du noyau, le proton a une durée de vie infinie.
- En dehors du noyau, le neutron a une durée de vie de 12 minutes.

## 6.2 Isotopes

Si on a le même  $Z$  et des  $A$  différents, il s'agit d'*isotopes* qui ont les mêmes propriétés chimiques mais des propriétés nucléaires différentes.

#### Exemple

- ${}_1^1 H$  : un proton, aucun neutron : l'Hydrogène
- ${}_1^2 H$  : un proton, un neutron : le Deutérium
- ${}_1^3 H$  : un proton, deux neutrons : le Tritium (instable)

## 6.3 Unités

### 6.3.1 Unité de masse atomique

La valeur des masses est petite. On utilise l'unité de masse atomique (u ou uma).

$1 \text{ u} = \frac{1}{12}$  de la masse d'un atome de Carbone 12.

D'où  $1 \text{ u} = 1,660\,538\,782 \cdot 10^{-27}$  kg

### 6.3.2 Électron-Volt

Calculons l'énergie associée à cette masse :

$$E = 1,66 \cdot 10^{-27} \times (3 \cdot 10^8)^2 = 1,492 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 931,5 \text{ MeV}.$$

On exprime souvent les masses en MeV (abus de langage, en fait,  $\frac{MeV}{c^2}$ ). On a :  $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$ .

#### Exemples

- $m_e = 0,000\,548\,58 \text{ u} = 0,511 \text{ MeV}/c^2$
- $m_p = 1,007\,276 \text{ u} = 938,272 \, 3 \text{ MeV}/c^2$
- $m_n = 1,000\,866 \, 5 \text{ u} = 939,565 \, 6 \text{ MeV}/c^2$

## 6.4 Volume et masse

- La masse du neutron  $m_n$  est légèrement supérieure à celle du proton.
- Un neutron  $n$  va pouvoir se désintégrer en un proton +  $e^-$  + ...  
La différence de masse est 2,53 fois celle de l' $e^-$  : radioactivité  $\beta^-$ .

**Volume** En première approximation, le noyau est sphérique. Soit  $R_0$  le rayon du proton :  $V_0 \approx \frac{4}{3}\pi R_0^3$ .

Pour les autres noyaux, le volume est proportionnel au nombre de masse  $A$ .

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = AV_0 = A\frac{4}{3}\pi R_0^3$$

D'où

$$R \approx A^{\frac{1}{3}}R_0$$

où  $1,07 \text{ fm} < R_0 < 1,5 \text{ fm}$ .

**Masse volumique**

$$\rho \approx \frac{M_{n \text{ ou } p}}{\frac{4}{3}\pi R_0^3}$$

La masse volumique est constante pour tous les noyaux : on a  $\rho \approx 10^{17} \text{ kg/m}^3$ .

## 6.5 Énergie de liaison

### 6.5.1 Définition

L'énergie de liaison est le « ciment » des nucléons à l'intérieur du noyau.

Soit  $M(A, Z)$  la masse du noyau  ${}^A_Z X$ . En notant  $m_p$  et  $m_n$  masses d'un proton et du neutron libres, on a :

$$M(A, Z) < Zm_p + (A - Z)m_n$$

La différence de masse se retrouve alors dans l'énergie de liaison.

### 6.5.2 Défaut de masse et énergie de liaison

On définit le *défaut de masse* par :

$$\Delta M(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n - M(A, Z)$$

Alors, l'énergie de liaison du noyau s'écrit :

$$E_l(A, Z) = \Delta M(A, Z)c^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - M(A, Z)]c^2$$

**Exemple : le deutérium**  ${}^2_1 H$   $M(2, 1) = 2,013553 \text{ u}$

$$m_p + m_n = 2,015941 \text{ u}$$

$$\Delta M(2, 1) = 0,002388 \text{ u} = 2,22 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

$$E_l(2, 1) = \Delta M(2, 1)c^2 = 2,22 \text{ MeV}$$

## 6.6 Rapport $E_l/A$

Plus il y a de nucléons, plus l'énergie de liaison est importante. Par exemple, celle de l'uranium 238 est de 1801,2 MeV. On voit donc que l'énergie de liaison  $E_l$  n'est pas un bon indicateur de la force de liaison des nucléons.

Le rapport  $\frac{E_l(A, Z)}{A}$  est un meilleur indicateur : plus ce rapport est grand, plus la liaison a une énergie importante.

Noyau	$E_l/A$ (MeV/nucl)
${}^2_1 H$	1,11
${}^4_2 He$	7,08
${}^{238}_{92} U$	7,57

## 6.7 Atome

Soit  $M_{at}(A, Z)$  la masse de l'atome  ${}^A_Z X$ . On a

$$M_{at} < M(A, Z) + Zm_e$$

On définit l'énergie de liaison de l'atome

$$\epsilon_l = [M(A, Z) + Zm_e - M_{at}(A, Z)]c^2$$

Pour le deutérium,  $\epsilon_l = 13,6 \text{ eV}$ . On a  $\frac{\epsilon_l}{E_l} = 6.10^{-6}$ . De même, pour l'uranium :  $\frac{\epsilon_l}{E_l} = 2, 8.10^{-15}$   
L'énergie de liaison des électrons est très inférieure à celles des nucléons.

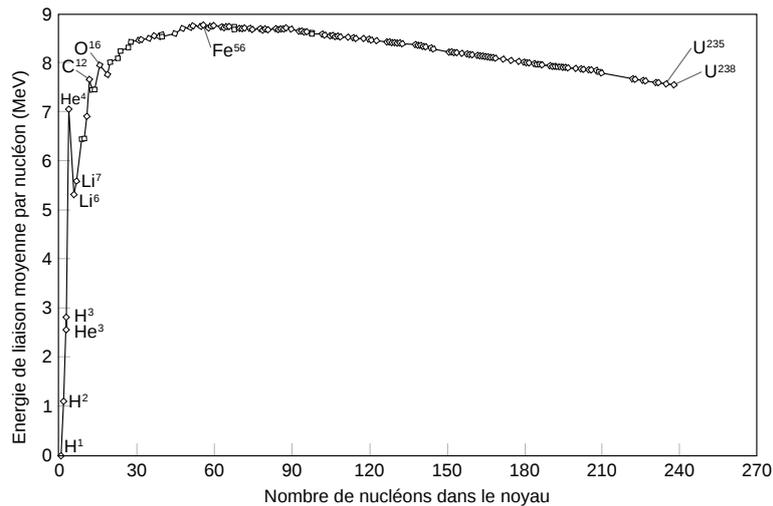


FIGURE 2 – Énergie de liaison des noyaux naturels stables

## 7 Radioactivité – Modes de désintégration

### 7.1 Stabilité

#### 7.1.1 Principes

Un noyau donné recherche l'état le plus stable. Il faut pour cela environ autant de neutrons que de protons, voire un peu plus de neutrons.

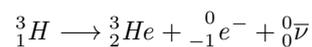
Si il y a trop de neutrons, ils vont se transformer en protons, et inversement.

#### 7.1.2 Exemples

Élément	N	Z	stabilité	radioactivité
Hydrogène	0	1	stable	
Deutérium	1	1	stable	
Tritium	2	1	instable	$\beta^-$ cf. 7.2
Helium (particule $\frac{4}{2}\alpha$ )	2	2	stable	
Lithium	4	3	stable	
Lithium	5	3	instable	$\beta^-$ cf. 7.2
Béryllium	3	4	instable	CE <sup>1</sup> cf. 7.3
Béryllium	4	4	instable	$\frac{4}{2}\alpha$ cf. 7.4
Béryllium	5	4	stable	
Bore	4	5	instable	$\beta^+$ cf. 7.5

### 7.2 Radioactivité $\beta^-$

À cause d'un excès de neutrons, le tritium est radioactif. Un neutron va se transformer en proton :

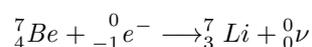


${}^0_0\bar{\nu}$  : antineutrino, cf. 7.3.1.

Il s'agit de radioactivité  $\beta^-$  : il y a émission d'un  $e^-$ .

### 7.3 Capture Électronique

Dans le cas par exemple du  ${}^7_4Be$ , il y a désintégration par capture électronique (CE) :



( $\nu$  : neutrino)

---

1. Capture électronique

### 7.3.1 Matière et Antimatière

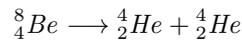
Hypothèse actuelle : lors du Big Bang, matière et anti-matière étaient présents en quantité égales. À chaque particule de matière était associée une particule d'antimatière, de même masse mais de charge opposée.

matière	antimatière
proton	antiproton
électron $e^-$	positron $e^+$
photon	photon
graviton	graviton
neutrino $\nu$	antineutrino $\bar{\nu}$

Pourquoi cette rareté actuellement ? Non symétrie de l'Univers ? Cela fait l'objet de recherches.

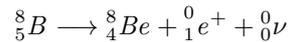
### 7.4 Radioactivité $\alpha$

Par exemple, dans le cas du Béryllium  ${}^8_4Be$ . Il y a émission d'une particule  $\alpha$ , autre nom de l'hélium 4 :  ${}^4_2He$ .



### 7.5 Radioactivité $\beta^+$

Le Bore  ${}^8_5B$  est instable, émission d'un positron (même masse que l'électron, mais charge positive, cf. 7.3.1), et transformation d'un proton en un neutron :



Ensuite le  ${}^8_4Be$  va se désintégrer (cf. 7.4).

### 7.6 Bilan

Radioactivité	Forme de la réaction
$\beta^-$ : excès de neutrons	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e^- + {}^0_0\bar{\nu}$
$\beta^+$ : excès de protons	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_1e^+ + {}^0_0\nu$
Capture électronique	${}^A_ZX + {}^0_{-1}e^- \longrightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_0\nu$
$\alpha$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A-4_{Z-2}Y + {}^4_2He$

### 7.7 Désintégration $\alpha$ et énergie

#### 7.7.1 Énergie libérée

Elle est de :

$$Q = [-M(4, 2) - M(A - 4, Z - 2) + M(A, Z)] c^2$$

Pour que la désintégration puisse se faire naturellement, il faut que  $Q > 0$ .

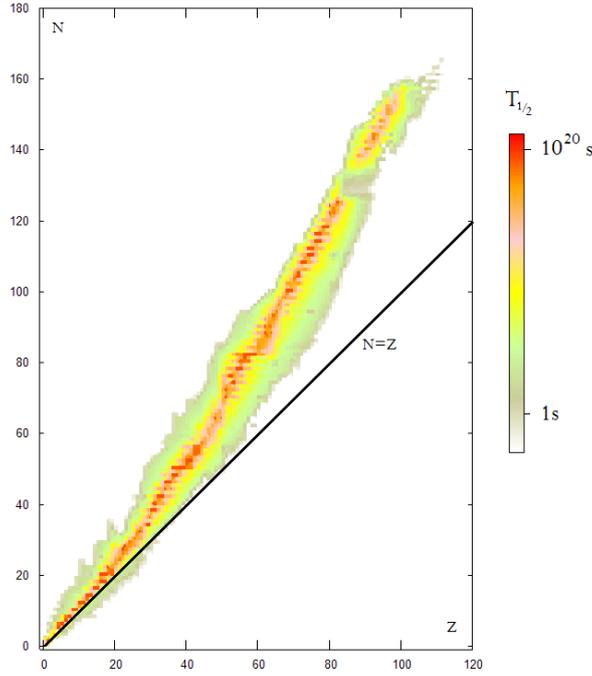


FIGURE 3 – Isotopes stables (en rouge)

### 7.7.2 Évaluation de l'énergie cinétique

Expérimentalement, l'énergie cinétique des particules  $\frac{4}{2}\alpha$ , noté  $T_\alpha = E_{c_\alpha}$  est comprise entre 2 MeV et 9 MeV. Ceci est faible devant l'énergie de masse des  $\frac{4}{2}\alpha$  :  $E_0 \approx 4\,000$  MeV.

On peut donc utiliser :

$$E_{c_\alpha} = \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2$$

Si les particules  $\frac{4}{2}\alpha$  et  $Y$  (cf. 7.6) sont dans leur état fondamental, alors :

$$Q = E_{c_\alpha} + E_{c_Y}$$

De plus, on suppose  $X$  au repos avant la désintégration. En appliquant la loi de conservation de la quantité de mouvement :

$$M_Y v_Y = M_\alpha v_\alpha$$

$$E_{c_Y} = Q - E_{c_\alpha} = Q - \frac{1}{2} M_\alpha v_\alpha^2$$

$$E_{c_Y} = Q - \frac{1}{2} M_\alpha \left( \frac{M_Y}{M_\alpha} \right)^2 v_Y^2$$

$$E_{c_Y} = Q - \frac{1}{2} \frac{M_Y^2}{M_\alpha} v_Y^2$$

$$E_{c_Y} = Q - \frac{M_Y}{M_\alpha} E_{c_Y}$$

$$E_{c_Y} = \frac{M_Y}{M_\alpha + M_Y} Q$$

Ainsi, si  $X$  est un noyau lourd,  $M_Y \gg M_\alpha$  donc  $E_{c_Y} \approx 0$  et  $Q \approx E_{c_\alpha}$ .

Pour  $A$  grand, pour avoir un noyau stable, il faut que  $N$  soit légèrement supérieur à  $Z$  (cf. figure 3).

## 7.8 Loi de décroissance

### 7.8.1 Loi générale de désintégration

À  $t = 0$ , on considère  $N_0$  noyaux radioactifs.

Les noyaux se transforment, donc le nombre  $N$  de noyaux diminue.

On cherche à évaluer la variation  $dN$  de noyaux sur un temps très court  $dt$ . On obtient :

$$dN = -\lambda N dt$$

où  $\lambda$  est la *constante radioactive*, typique du noyau radioactif considéré, d'unité la  $s^{-1}$ .

Ainsi :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

Donc

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

On définit la période  $T$  telle que :

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

Donc

$$T = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

**Remarque**  $N(t) = N_0 \times 2^{-\frac{t}{T}}$

**Radioactivité** On dit qu'un noyau est radioactif quand on peut mesurer sa période, c'est-à-dire quand :

$$10^{-16} s < T < 10^{30} s$$

**Activité** L'activité  $\mathcal{A}$  représente le nombre de désintégrations par unité de temps.

$$\mathcal{A} = \lambda N$$

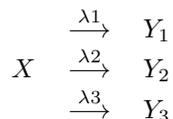
Donc  $\mathcal{A} = \left| \frac{dN}{dt} \right|$  dans le cas d'une seule population de noyaux radioactifs.

$$\mathcal{A}(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

#### Unités

- Le Becquerel, 1 Bq = 1 désintégration/s.  
Unité peu appropriée aux mesures (corps humain,  $\approx 8000$  Bq)
- Le Curie. 1 Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq  
Activité de 1kg de Radon 226 ( $T = 1620$  ans)

**Désintégrations multiples** Pour un noyau radioactif, il peut y avoir plusieurs types de désintégrations possibles. Par exemple :

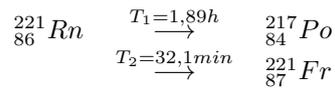


Alors

$$\lambda = \sum_i \lambda_i$$

et on appelle *rapport d'embranchement*  $a_i = \frac{\lambda_i}{\lambda}$ .

**Exemple :**  ${}_{86}^{221}\text{Rn}$

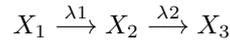


$$\lambda_1 = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1} \text{ et } \lambda_2 = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$$

$$\lambda = 4,62 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$$

$$T = 25 \text{ min}$$

### 7.8.2 Filiations radioactives (chaînes radioactives)



Chaîne radioactive à trois corps.  $X_3$  est stable.

À  $t = 0$ , on compte  $N_{10}$  atomes de  $X_1$ , et aucuns de  $X_2$  et de  $X_3$ .

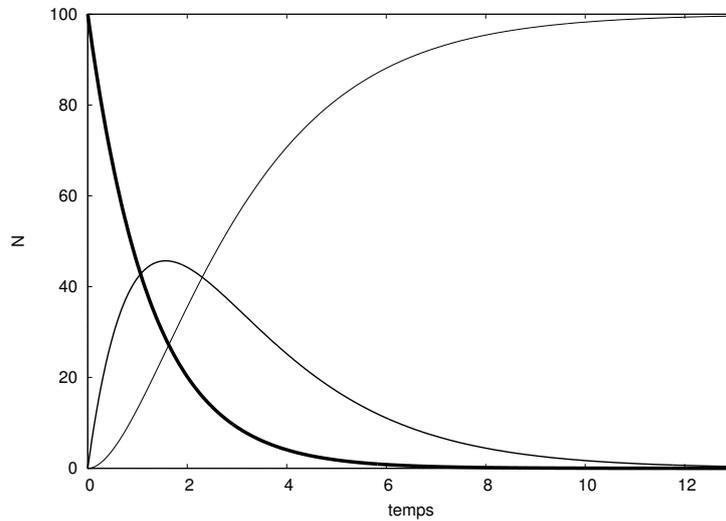


FIGURE 4 -  $N_1$  en trait gras,  $N_2$  en trait intermédiaire et  $N_3$  en trait fin.

**Évolution** Que valent  $N_1$ ,  $N_2$  et  $N_3$ ,  $t$  secondes plus tard ?

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

d'où

$$N_1(t) = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

Pour  $N_2$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

D'où

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

Puis  $\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2$

**Autre méthode** Au départ,  $N_{10}$  noyaux.

$$N_{10} = N_1(t) + N_2(t) + N_3(t)$$

Ainsi

$$N_3(t) = N_{10}(1 - e^{-\lambda_1 t}) - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_{10}(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

**Remarque**  $N_1$  est une fonction monotone décroissante.

$N_3$  est une fonction monotone croissante.

On se demande si  $\exists t_{max} t.q \frac{dN_2}{dt}(t_{max}) = 0$ . Après résolution :

$$t_{max} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)$$

On observe que pour  $t = t_{max}$ ,  $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2$ .

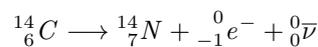
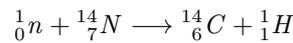
**Remarque** Cas particulier :  $T_1 \gg T_2$ . La cinétique de la chaîne radioactive est gouvernée par l'élément 1. Cf. figure 5.

Si  $T_2 \gg T_1$  c'est l'élément 2 qui gouverne la chaîne. Cf. figure 6.

## 7.9 Datation par carbone 14

### 7.9.1 Principe

**Origine du  $^{14}C$**  Le  $^{14}C$  est radioactif, de période 5730 ans. Il provient du rayonnement cosmique selon la réaction :



**Principe de la datation** On observe, dans l'atmosphère à l'équilibre un rapport constant  $\frac{{}^{14}C}{{}^{12}C} \approx 1,2 \cdot 10^{-12}$

Les plantes, les êtres vivants absorbent des molécules de  $CO_2$  avec  $\frac{{}^{14}CO_2}{{}^{12}CO_2} \approx 1,2 \cdot 10^{-12}$

À la mort de l'échantillon, l'absorption de  $CO_2$  s'arrête. Alors le  $^{14}C$  se désintègre, sa quantité diminue. Le rapport  $\frac{{}^{14}C}{{}^{12}C}$  diminue donc dans l'échantillon.

**Calcul** Un gramme de carbone naturel a une activité de :  $A_0 = \lambda N = \frac{0,963}{5730 \times 365,25 \times 24 \times 3600} \times \frac{12 \cdot 10^{-3}}{10} \times 6,02 \cdot 10^{23} \times 1,2 \cdot 10^{-12}$ , soit  $A_0 = 0,23 \text{ Bq} = 13,8 \text{ désintégrations/min}$ .

On pose  $t = 0$  à la mort de l'échantillon. Alors  $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$ . D'où  $t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{A_0}{A} \right)$

Enfin on obtient  $t_{ans} = 19000 \log_{10} \frac{A_0}{A(t)}$

**Inconvénients de la méthode** hypothèse de la constance dans le temps du rapport  $\frac{{}^{14}C}{{}^{12}C} = 1,2 \cdot 10^{-12}$  (flux de neutrons dans l'atmosphère toujours à peu près le même).

Méthode vérifiée jusqu'à 9000 ans.

Fiabilité théorique : 40 000 ans.

**Radioactivité naturelle : Potassium 40** Ce potassium radioactif (radioactivité  $\beta^-$ ) est présent dans nos os.

Le corps humain génère naturellement 100 rayonnements  $\beta^-$  par seconde et par kg

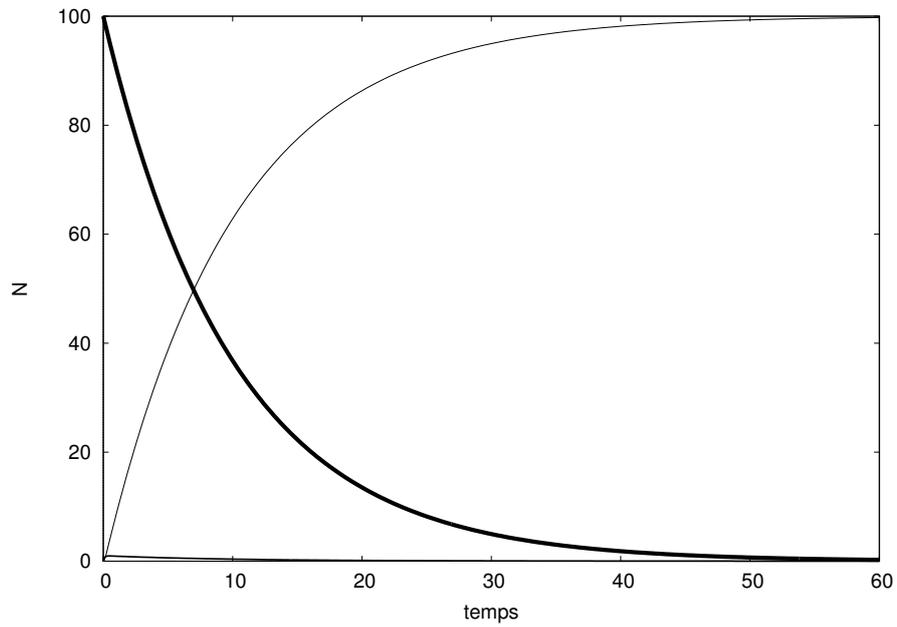


FIGURE 5 – Chaîne radioactive à trois éléments.  $T_1 \gg T_2$ .  $N_1$  en trait gras,  $N_2$  en trait intermédiaire et  $N_3$  en trait fin.

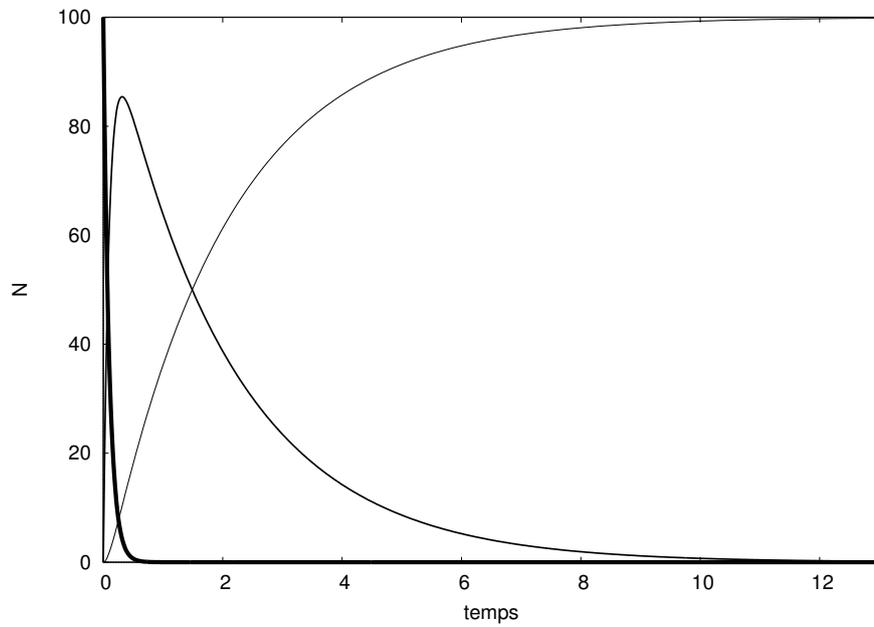
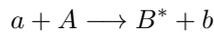


FIGURE 6 – Chaîne radioactive à trois éléments.  $T_2 \gg T_1$ .  $N_1$  en trait gras,  $N_2$  en trait intermédiaire et  $N_3$  en trait fin.

### 7.9.2 Activation. Création de radioéléments artificiels



- a : particules incidentes
- A : cible
- n : nombre de noyaux  $B^*$  radioactifs créés
- N : nombre de noyaux cibles A

**Section efficace  $\sigma$**  La section efficace  $\sigma$  est la fraction de particules par  $m^2$  qui réagit avec un noyau cible. Elle correspond à une probabilité de réaction. Cette probabilité est de  $\frac{\sigma}{S}$ .

**Ordre de grandeur** Surface du disque qui représente la taille du noyau.

$$\sigma \approx \pi R_0^2 A^{2/3}$$

Pour  $A = 50$ ,  $\sigma = 10^{-24} \text{cm}^2$

Attention :  $\sigma$  peut être très différent pour deux noyaux différents.

**Le barn** On définit une nouvelle unité : le barn.

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{cm}^2$$

#### Évolution du nombre de noyaux cibles

$$\frac{dN}{dt} = -\sigma\Phi N$$

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

Soit  $\lambda$  la constante de désintégration de  $B^*$ .

$$\frac{dn}{dt} = +\sigma\Phi N - \lambda n$$

Cf. résultats sur les chaînes radioactives (7.8.2 page 19).

$$n(t) = \frac{\sigma\Phi N_0}{\lambda - \sigma\Phi} (e^{-\sigma\Phi t} - e^{-\lambda t})$$

En général,  $N \approx N_0$  et  $T_\lambda \ll T_{\sigma\Phi}$  : il est beaucoup plus difficile de créer  $B^*$  que pour  $B^*$  de se désintégrer.

**Activité**  $\mathcal{A} = \lambda n \approx \sigma\Phi N_0 (1 - e^{-\lambda t})$

	Élément radioactifs artificiels	période
<b>Exemples</b>	Tritium	12,3 ans
	$^{15}\text{O}$ (imagerie médicale)	2 min
	Cobalt 60	5,27 ans
	Césium 137 (curiethérapie)	30,2 ans
	$^{239}\text{Pu}$ (fission)	24 100 ans

## Quatrième partie

# Réactions nucléaires. Fission. Fusion

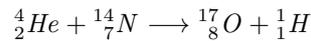
## 8 Introduction

Réaction nucléaire : interaction entre deux noyaux, ou entre une particule et un noyau, ou entre deux particules.

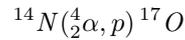
Un des deux doit avoir suffisamment d'énergie pour initier la réaction.

## 8.1 Expérience historique

Première réaction nucléaire : Rutherford en 1919. Bombardement de l'azote par des particules alpha.



S'écrit aussi :



## 8.2 Énergie

Une réaction peut être exothermique (énergie libérée) ou endothermique (énergie consommée).

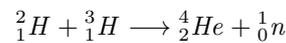
$$1 + 2 \longrightarrow 3 + 4$$

$$Q = (M_1 + M_2 - M_3 - M_4)c^2$$

$Q > 0$  : réaction exothermique

$Q < 0$  : réaction endothermique

**Exemple** Fusion Deutérium-Tritium



$$Q = (\Delta M)c^2 = \dots = -E_l(2, 1) - E_l(3, 1) + E_l(4, 2)$$

$$Q = -2,2 - 8,5 + 28,3 = 17,6 \text{ MeV}$$

Réaction exothermique : dégage de l'énergie.

## 9 Lois de conservation

### 9.1 Conservation de la charge électrique

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$

### 9.2 Conservation du nombre de nucléon

(peut être faux pour les très hautes énergies)

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$

### 9.3 Conservation de l'énergie

(Souvent, pour les basses énergies,  $T_i = \frac{1}{2}m_i v_i^2$  et  $T_i \ll m_i c^2$ )

$$Q = T_3 + T_4 - T_1 - T_2$$

### 9.4 Conservation de la quantité de mouvement

En considérant que la particule (2) est au repos :

$$m_1 \vec{v}_1 = m_4 \vec{v}_4 + m_3 \vec{v}_3$$

## 10 Fusion nucléaire

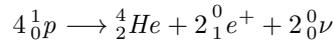
### 10.1 Premiers noyaux

D'après la théorie, peu après le Big-Bang, les premiers noyaux se forment : ce sont des  ${}^1_1\text{H}$ .

## 10.2 Cycle proton/proton

La gravitation rapproche les protons : la barrière coulombienne est vaincue : il y a fusion des protons. Ce phénomène a lieu de nos jours dans les étoiles.

Globalement, le cycle proton/proton donne :



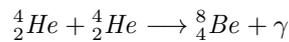
Pour le Soleil, ce cycle proton/proton durera 12 milliards d'années.

**Remarques** Si  $M_{\text{étoile}} \approx 0,3 M_{\text{soleil}}$  alors cela durerait 800 milliards d'année.

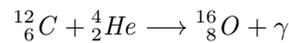
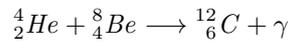
Dans le Soleil, chaque seconde, 600 MT d'hydrogène fusionnent (transformés en He)

## 10.3 Fusion de l'Hélium

Si  $M_{\text{étoile}} > 0,3 M_{\text{soleil}}$ , la fusion de l'He commence. La température est de  $10^8$  K.



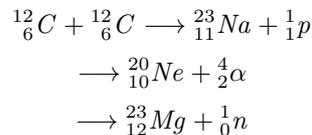
(Le Béryllium émet ensuite deux particules  $\frac{4}{2}\alpha$ )



Cela dure 200 millions d'années pour le Soleil. Pour le Soleil, le processus de fusion s'arrêtera là.

## 10.4 Évolutions possibles

Si  $M_{\text{étoile}} > 6 M_{\text{soleil}}$ , le processus peut continuer (200 ans) :



Fusion du Ne donnant du Mg ne dure qu'un an.

## 10.5 Fusion de l'Oxygène

La fusion de l'Oxygène donne du Si, P, S (5 mois)

+  $\frac{4}{2}\alpha$ , n  $\longrightarrow$  Cl, Ar, K, Ca, Titane

## 10.6 Fusion du Silicium

Cela correspond aux derniers instants d'une étoile. La température est de  $T = 3$  milliards de Kelvin

Ce processus dure  $\approx 1$  jour

${}^{28}_{14}Si$  jusqu'à  ${}^{26}_{14}Fe$

Processus endothermique, effondrement de l'étoile (la gravitation l'emporte). Donne une supernova.

# 11 Fission nucléaire

## 11.1 Causes de la fission

Les noyaux peuvent se casser :

- seuls, c'est la fission **spontanée** ;
- à l'aide d'un neutron (capture), c'est fission **induite**.

**Fission spontanée** Pour  $Z \geq 110$ . N'existe plus naturellement sur Terre.

## 11.2 Noyau fissible

On appelle *noyau fissible* un noyau qui conduit à une fission après capture d'un neutron thermique (l'énergie cinétique de ce neutron est faible).

Il en existe quatre :

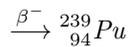
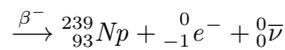
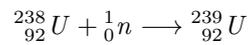
- ${}_{92}^{235}\text{U}$ ,  $T = 7.10^8$  ans (le seul naturel)
- ${}_{92}^{233}\text{U}$ ,  $T = 1,6.10^5$  ans
- ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ,  $T = 2,4.10^4$  ans
- ${}_{94}^{241}\text{Pu}$ ,  $T = 14$  ans

$$Q_{fission} \approx M(A, Z) - 2M\left(\frac{A}{2}, \frac{Z}{2}\right)$$

## 11.3 Noyau fertile

C'est un noyau qui conduit à un noyau fissible artificiel, après capture d'un neutron.

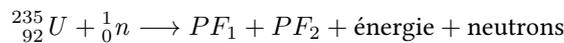
**Exemple**



*Pu* noyau fissible : on dit que  ${}_{92}^{238}\text{U}$  est fertile.

## 11.4 Fission de ${}_{92}^{235}\text{U}$

### 11.4.1 Forme des réactions



Il existe 40 réactions possibles donnant deux PF (produits de fissions), sauf dans un cas sur 5000 qui en donne trois.

PF :  $80 < A < 110$  (« légers »)

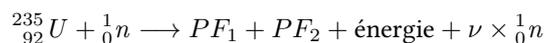
$125 < A < 155$  (« lourds »)

Les PF se retrouvent au-dessus de la courbe de stabilité : radioactivité  $\beta^-$ .

### 11.4.2 Exemples de produits de fission

- Iode  ${}_{53}^{131}\text{I}$ ,  $T \approx 7$  jours
- Césium  ${}_{55}^{137}\text{Cs}$ ,  $T \approx 30$  ans
- Xénon  ${}_{54}^{135}\text{Xe}$ , « poison » car section efficace grande
- Samarium  ${}_{62}^{149}\text{Sm}$ , « poison », car idem

### 11.4.3 Neutrons émis



$\nu = 2$  ou  $3$  neutrons émis par réaction

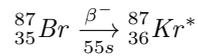
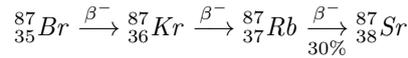
$\bar{\nu} = 2,416$  neutrons par fission de  ${}_{92}^{235}\text{U}$

Ce sont des neutron « immédiats » ou « prompts ».

### 11.4.4 Neutrons retardés

Il existe des neutrons dits *retardés* (proportion  $6,5.10^{-3}$ ) qui proviennent des PF

## Exemple



C'est un neutron retardé (émis 80s après la fission)

En moyenne, pour tous les neutrons retardés,  $\bar{\tau}_r = 13\text{s}$  (cf. exercice 1).

### 11.4.5 Énergie libérée

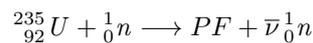
$\approx 200$  MeV/fission.

3,  $1.10^{10}$  fissions/s pour une puissance de 1 W.

## Cinquième partie

# Principe de fonctionnement d'un réacteur nucléaire

## 12 Réaction principale



$$\bar{\nu} = 2,416$$

Pour obtenir la réaction (régime *critique*), il faut que :

$$\frac{N_{\text{fissions}}}{N_{\text{neutrons}}} = \frac{1}{2,416}$$

## 13 Neutrons

### 13.1 Classification des neutrons

- $N_{\text{fissions}} = N_f$  : servent à l'entretien de la réaction, vont entraîner  $N_f$  fissions.
  - $N_{\text{capturés}} = N_c$  : interaction avec le combustible, mais sans fission, ou interaction avec les autres éléments : modérateur, poisons, ...
  - $N_p$  : pertes, fuites à l'extérieur du réacteur.
- Le nombre total de neutrons est :

$$N_n = N_f + N_c + N_p$$

$$\frac{N_f}{N_c} = \frac{N_f}{N_n - N_f - N_p} = \frac{\frac{N_f}{N_n}}{1 - \frac{N_f}{N_n} - \frac{N_p}{N_n}} \approx \frac{0,42}{1 - 0,42 - \frac{N_p}{N_n}} \approx \frac{0,42}{0,58 - \frac{N_p}{N_n}}$$

### 13.2 Diminution des pertes

#### 13.2.1 Masse critique

Pour diminuer les pertes, augmenter la taille du réacteur. Il existe une **masse critique** en dessous de laquelle la perte de neutrons est trop importante. Pour l'  ${}_{92}^{235}\text{U}$  la masse critique est de 50kg. Pour  ${}_{92}^{238}\text{U} + {}_{92}^{235}\text{U}$  à 15% : 600 kg.

#### 13.2.2 Géométrie du réacteur

La géométrie idéale est la sphère. En réalité pour un réacteur le réacteur est de forme cylindrique, avec un rapport diamètre/hauteur optimisé.

### 13.2.3 Objectif

Dans un réacteur :  $\frac{N_p}{N_n} \approx 10$  à 15 %.

Donc  $\frac{N_f}{N_c} \approx 1$  : objectif à atteindre pour produire de l'énergie (entretenir la réaction).

### 13.2.4 Moyens

Dans le cœur, les neutrons interagissent avec :

${}^{235}_{92}\text{U}$	– captures $\rightarrow$ fissions (section efficace $\sigma_f$ )
	– captures stériles (section efficace ${}^5\sigma_c$ )
${}^{238}_{92}\text{U}$	– captures fertiles (section efficace ${}^8\sigma_c$ , donne $Pu$ )
	– fissions rapides (négligeables)

**Première idée : neutrons rapides** Il s'agit d'utiliser :  $U_{\text{naturels}} + N_{\text{fissions}}$  (rapides) à 1 MeV. L'Uranium naturel est un mélange de 0,72% de  ${}^{235}_{92}\text{U}$  et 99,28% de  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .

On obtient alors :

- ${}^8\sigma_c = 0,1$  barn
- $\sigma_f = 1$  barn
- ${}^5\sigma_c$  négligeable

Mais  $\frac{N_f}{N_c} = \frac{0,72\sigma_f}{99,28{}^8\sigma_c} = 0,07$ , ce qui est très loin de 1 : **pas de fonctionnement possible** (pas de *divergence* possible)

**Deuxième idée : neutrons thermiques** On utilise cette fois des neutrons *thermiques* (ralentis). Les sections efficaces changent alors considérablement :

- ${}^8\sigma_c = 2,7$  barn
- $\sigma_f = 550$  barn
- ${}^5\sigma_c = 100$  barn.

**Modérateur** Nous avons besoin d'un matériau pour ralentir les neutrons : un *modérateur* : il doit ralentir les neutrons tout en les absorbant le moins possible.

Ainsi  ${}^m\sigma_c$  doit être faible.

Le modérateur est soit liquide, soit solide, pour qu'il prenne le moins de volume possible à l'intérieur du réacteur.

On obtient alors :

$$\frac{N_f}{N_c} = \frac{\sigma_f N}{{}^5\sigma_c N + {}^8\sigma_c N + {}^m\sigma_c R_m} \text{ où } {}^5N : \text{proportion de matière } {}^{235}_{92}\text{U} \text{ et } R_m : \text{rapport de modération} = \frac{\text{volume modérateur}}{\text{volume combustible}}$$

#### Les différents types de modérateurs

Modérateur	${}^m\sigma_c$	Nb de chocs pour un neutron 1 MeV $\rightarrow$ 1 neutron thermique
eau	0,66	$\approx 20$
eau lourde $D_2O$	0,001	$\approx 36$
C (graphite)	0,034	$\approx 115$

## 14 Filières

### 14.1 Eau et Uranium naturel

$$\frac{N_f}{N_c} = 0,74, \text{ divergence impossible.}$$

### 14.2 Eau lourde et Uranium naturel

$$\frac{N_f}{N_c} = 1,15, \text{ divergence possible, filière CANDU :}$$

CAN : Canada, D : eau lourd (Deutérium), U : Uranium.

### 14.3 Carbone (graphite) et Uranium naturel

$\frac{N_f}{N_c} = 0,95$ , filière UNGG (il faut que les pertes soient inférieures à 10%). C'est la pile de Fermi (1942).

### 14.4 Eau et Uranium enrichi (à 2,5% en $^{235}_{92}U$ )

$\frac{N_f}{N_c} = 2$  (90% de la production d'électricité nucléaire mondiale)

Deux filières : filière REB ou BwR : réacteur à eau bouillante (Russie par ex.)

Filière REP (PWR) : réacteur à eau pressurisée.

**Combustible neuf** U : 3,9% d' $^{235}_{92}U$  et 96,8% d' $^{238}_{92}U$

**Au bout de trois ans** 95,7% d' $U$  : 0,7% d' $^{235}_{92}U$  et 95% d' $^{238}_{92}U$  ainsi que 0,9% de  $Pu$  et des PF (3,4%).

## 15 Cinétique de la réaction en chaîne

### 15.1 Notations

$$k = \frac{\text{nb de fissions à une génération donnée}}{\text{nb de fission à la génération suivante}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{N_2}{N_3}$$

Variation relative :

$$\rho = \frac{\delta N}{N} = \frac{N_2 - N_1}{N_1} = \frac{1}{k} - 1$$

Une réaction est soit :

- critique :  $k = 1$
- surcritique :  $\rho > 0$  soit  $k < 1$
- sous critique :  $\rho < 0$  soit  $k > 1$

### 15.2 Variation du nombre de fissions

$\tau$  : temps entre 2 générations ( $25\mu s$ , soit 40 000 générations/s)

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\delta N}{\delta t} = \frac{\rho N}{\tau}$$

$$N(t) = N_0 e^{\frac{\rho}{\tau} t}$$

Si  $\rho > 0$  le nombre de fissions augmente exponentiellement

Si  $\rho < 0$  le nombre de fissions diminue exponentiellement

### 15.3 Régime de fonctionnement

#### 15.3.1 Objectif

On souhaite se placer en régime critique ( $k = 1, \rho = 0$ )

Avec  $k = 1,001$ , le nombre de neutrons est multiplié par 2,  $3.10^{17}$  en 1s. Il faut donc être très précis dans la maîtrise de  $k$ .

#### 15.3.2 Contrôle du régime

Il est impossible de contrôler le nombre de neutrons immédiats (prompts). On se place alors en régime sous-critique avec les neutrons prompts.

Pour atteindre  $k = 1$  (régime critique) on agit sur les neutrons retardés ( $\bar{\tau}_r = 13s$ , on a le temps de les contrôler).

C'est l'action sur ces neutrons qui permet le contrôle et le pilotage du réacteur. Pour cela on utilise des barres de contrôle (en Cadmium) ainsi que les « poisons » (comme le Xénon, cf. 11.4.2 page 25).

# Sixième partie

## Radioprotection

### 16 Présentation

#### 16.1 Radioactivité

Un noyau instable (radioactif) subit une transformation pour atteindre une configuration stable.

Radioactivité :

- $\frac{4}{2}\alpha$
- $\beta$
- $\gamma$  : grains d'énergie (photons), le noyau ne change pas de nature dans ce cas.

#### 16.2 Mesures de la radioactivité

**Le Becquerel** 1 Bq : une désintégration par seconde.

Mais cette unité ne tient pas compte de la nature du rayon, de son énergie. En effet les particules émises se propagent, elles rencontrent de la matière, et déposent leur énergie, et la matière peut s'échauffer, mais peut aussi être modifiée. Il a donc fallu élaborer d'autres grandeurs et d'autres unités.

### 17 Nouvelles grandeurs utilisées

#### 17.1 Le Gray

Notre organisme est le siège en permanence de destructions et reconstructions cellulaires. Si le rayonnement tue une cellule, peu grave : elle est recréée. Mais si le rayonnement est massif, on aura une lésion massive du tissu cellulaire, et donc une perturbation. Au-delà d'un certain seuil d'irradiation, on a des effets à coup sûr : des **effets déterministes**. Ces effets déterministes (fortes doses d'irradiations) sont mesurés par le **Gray (gy)**.

$$1\text{gy} \equiv 1 \text{ Joule absorbé par kg de matière cible} \equiv 1\text{J/kg}$$

- Pour une dose inférieure à 300 mgy, il n'y a aucun effet déterministe sur le tissu.
- Pour une dose supérieure à 5 000 mgy ou 5 gy, il y a une chance sur deux de survie.
- Pour une dose supérieure à 15 gy, mort certaine.

#### 17.2 Dose équivalente

**Autres formes de dégâts** Peut se produire une irradiation de la molécule d'ADN, qui ne provoque pas forcément la mort de la molécule, mais une mutation possible de l'ADN. Le système immunitaire peut certes repérer et réparer cette mutation, mais l'échec est possible. Si cette mutation prolifère, c'est le début d'une cancérisation. La probabilité varie avec la dose reçue : La mutation n'est pas certaine. Il y a donc un **effet probabiliste ou stochastique**.

Pour estimer cette probabilité, on tient compte de l'énergie déposée par kg de matière, mais on tient compte également de la nature du rayon (effets biologiques divers). Si on a affaire à des neutrons, on multiplie par 5 à 20 (neutrons à 1 MeV) l'énergie déposée.

$$J.kg^{-1} : gy \times \text{facteur lié au rayon} \Rightarrow \text{Sievert (Sv)}(J.kg^{-1})$$

Ces facteurs sont :

Type d'émission	Photons	$\beta$	Neutrons	Protons	$\frac{4}{2}\alpha$
Facteur de qualité Q	1	1	5 à 20	5 à 10	20

**Dose équivalente** Cela correspond à la **dose équivalente**. Son unité est toujours le Sievert.

### 17.3 Dose efficace

Cette fois on prend en compte un deuxième facteur correctif, lié à la nature du tissu irradié. C'est la **dose efficace**. Ce facteur est, par exemple, pour la peau et les os, de 1, alors que pour la moelle osseuse, le colon, ou l'estomac, de 12.

## 18 Risques

### 18.1 Estimations des risques

- Environ 0,005% par mSv de risque de développer un cancer.
- En dessous de 100 mSv, cette loi surestimerait le risque.
- De 100 à 1000 mSv, les risques de cancer croissent régulièrement et sont scientifiquement établis.
- 100 mSv : risque de 0,5%
- 1000 mSv : risque de 5%
- 6 Sv : dose mortelle

**Remarques** Sur une population de 100 000 personnes, 20 000 à 25 000 personnes vont développer un cancer (toutes causes confondues). Si cette population est soumise à une irradiation de 100 mSv, on aura (0,005%/mSv) 500 cas supplémentaires dus à cette irradiation.

### 18.2 Ordres de grandeur

- 2 mSv : dose de radioactivité terrestre reçue par an (Uranium, Potassium, Radon) ;
- 0,4 mSv : radioactivité due aux rayonnements cosmiques ( $^{14}\text{C}$ , Tritium) ;
- 0,3 mSv : radio des poumons (rayons X) ;
- 0,1 mSv : voyage en avion, voyage en altitude ;
- un scanner : jusqu'à 10 mSv ;
- travailleurs du nucléaire : plafond de 100 mSv sur 5 ans, sans dépasser 50 mSv en un an.

### 18.3 Exemples

#### 18.3.1 Tchernobyl

Bilan 15 ans après la catastrophe : 44 morts rapides et 234 cas d'irradiation à forte dose. Pour les liquidateurs (population de 600 000 personnes) : de 10 à 500 mSv (à peu près 1% de cancers en excès attendus). Pour la population : 135 000 habitants proches évacués. 10 mSv, et 0,1% de cancers en plus. Pour les 3 700 000 personnes vivant dans des zones légèrement contaminées : 7 mSv/an en moyenne.

#### 18.3.2 Fukushima (12.03.2011)

14.03.2011 : 167 Sv/h au niveau du réacteur (enceinte de confinement)  
3.04.2011 : à 5 km de la centrale, 112  $\mu\text{Sv/h}$   
167 travailleurs de Tepco ont reçu des doses supérieures à 100 mSv  
Villes alentours : entre 10 et 50 mSv. Jusqu'à 30 km de la centrale, entre 100 et 200 mSv parfois observés.

## 19 Comment se protéger ?

Trois mots-clés : Distance, Temps, Écrans.

### 19.1 Écrans

- $\alpha$  : arrêtés par une feuille de papier ;
- $\beta$  : feuille de métal ;
- $\gamma$  : plusieurs cm de plomb ;
- neutrons : importante épaisseur de béton, d'eau ou de paraffine.

## 20 Déchets nucléaires liés à la fission

En France, 1 kg de déchet nucléaire par habitant et par an est produit. Sur ce kilogramme, 990 grammes dont la période est inférieure à 300 ans. Il reste 10 grammes qui ont une durée de vie très longue, ce sont les plus préoccupants. Cela représente 600 tonnes par an.

La France possède un cycle ouvert : on traite les déchets (retraitement) en séparant les différents constituants chimiquement. Dans une tonne de combustible usé (après 3 ans dans un REP), l'Uranium est présent à 95,3% et le Plutonium est présent à 1%. Ces éléments-là sont valorisables. Les produits de fissions représentent 3,7%.