

**Deuxième Partie :**  
**Transformations**  
**nucléaires**

**Unité 2**  
**8 H**

**Noyaux – masse & énergie**

النوى - الكتلة والطاقة



2<sup>ème</sup> Bac Sciences  
Physique

**I – Equivalence « masse – énergie » :**

**1– Relation d'Einstein :**

En 1905, **Einstein** pose les bases d'une théorie qui devait révolutionner la science : la **théorie de relativité**. Cette théorie formula *l'équivalence de la masse et l'énergie*.

Un corps, au repos, de masse  $m$  possède une énergie  $E$  est appelé **énergie de masse**, son expression est :  $E = m \cdot c^2$ . Son unité est Joule  $J$  avec  $c$  : célérité de la lumière dans le vide  $c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

- ↪ Cette relation montre que lorsqu'une masse d'un système varie avec la grandeur  $\Delta m$  au cours d'une transformation, la variation de son énergie de masse est :  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ .
- ↪ Lorsque la masse d'un système au repos diminue ( $\Delta m < 0$ ), son énergie de masse est également diminuée ( $\Delta E < 0$ ) : le système libère de l'énergie au milieu extérieur. Et
- ↪ lorsque la masse d'un système au repos augmente ( $\Delta m > 0$ ), son énergie de masse est également augmentée ( $\Delta E > 0$ ) : le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur.

**2– Unités de masse et d'énergie :**

L'unité d'énergie dans (S.I) est : **Joule  $J$** , mais dans la physique nucléaire on privilégie une unité bien adaptée à l'échelle du noyau : **l'électronvolt ( $eV$ )** et ses multiples telle que :  $1 \text{ eV} = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  et  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ .

La masse d'un noyau atomique est souvent exprimée dans une unité plus adaptée que le Kilogramme : **l'unité de masse atomique  $u$**  et égale au douzième ( $\frac{1}{12}$ ) de la masse d'un atome de **carbone 12**. ( On sait qu'une mole d'atome du **carbone 12** est constituée de  $N = 6,02 \cdot 10^{23}$  atomes et de masse  $12 \text{ g}$  ).

$$\text{Alors } 1u = \frac{1}{12} m(^{12}_6\text{C}) = \frac{M(^{12}_6\text{C})}{12 \cdot N_A} = \frac{12}{12 \times 6,02 \cdot 10^{23}} \text{ d'où } 1u = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

L'unité de masse atomique correspond donc à une énergie égale à :

$$E = m \cdot c^2 = 1u \cdot c^2 = 1,66054 \cdot 10^{-27} \times (299792458)^2 = 1,49242 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$\text{Ainsi : } E = \frac{1,49242 \cdot 10^{-10}}{1,602177 \cdot 10^{-13}} = 931,5 \text{ MeV} \text{ alors : } 1u = 931,5 \frac{\text{MeV}}{c^2}.$$

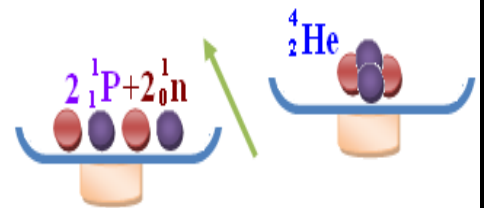
**II – Energie de liaison :**

**1– Le défaut de masse :**

Les mesures exactes ont montré que la masse du noyau est toujours inférieure à la somme des masses de ses nucléons.

Par exemple la masse du noyau d'Hélium  $^4_2\text{He}$  est :

$$m(^4_2\text{He}) = 6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \text{ mais la somme des masses de ses nucléons égale à : } 2m_p + 2m_n = 2 \times 1,6726 \cdot 10^{-27} + 2 \times 1,6750 \cdot 10^{-27} = 6,6952 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$



On conclut donc que la **masse du noyau d'Hélium** est **inférieure** à la **somme des masses** de ses **nucléons**.

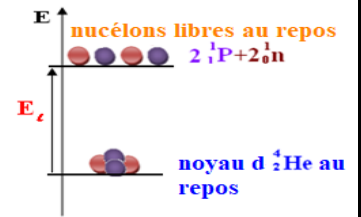
**Le défaut de masse  $\Delta m$  d'un noyau de symbole  ${}^A_ZX$  est égal à la différence entre la masse des nucléons qui constituent le noyau et la masse du noyau :**  
 $\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m$  avec  $\Delta m > 0$  et  $m$  la masse du noyau.

**Exemple :**  $\Delta m({}^4_2\text{He}) = 6,6952 \cdot 10^{-27} - 6,6447 \cdot 10^{-27} = 5,0520 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$ .

**2- Energie de liaison :**

Le **noyau** est **cohérent** en **raison** de **fortes forces d'interaction mutuelles**, et pour **séparer** ses **nucléons**, il faut lui **attribuer** une **énergie** appelée **énergie de liaison**.

**L'énergie de liaison  $E_l$  est l'énergie qu'il faut fournir au noyau, en repos, pour séparer ses nucléons constitutifs, et rester au repos :**  $E_l = \Delta m \cdot c^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - m({}^A_ZX)] \cdot c^2$   
 Avec  $\Delta m$  le défaut de masse.



**Exemple :**  $E_l({}^4_2\text{He}) = \Delta m({}^4_2\text{He}) \cdot c^2 = 5,0520 \cdot 10^{-29} \times (3 \cdot 10^8)^2 = 4,55 \cdot 10^{-12} \text{ J}$  .

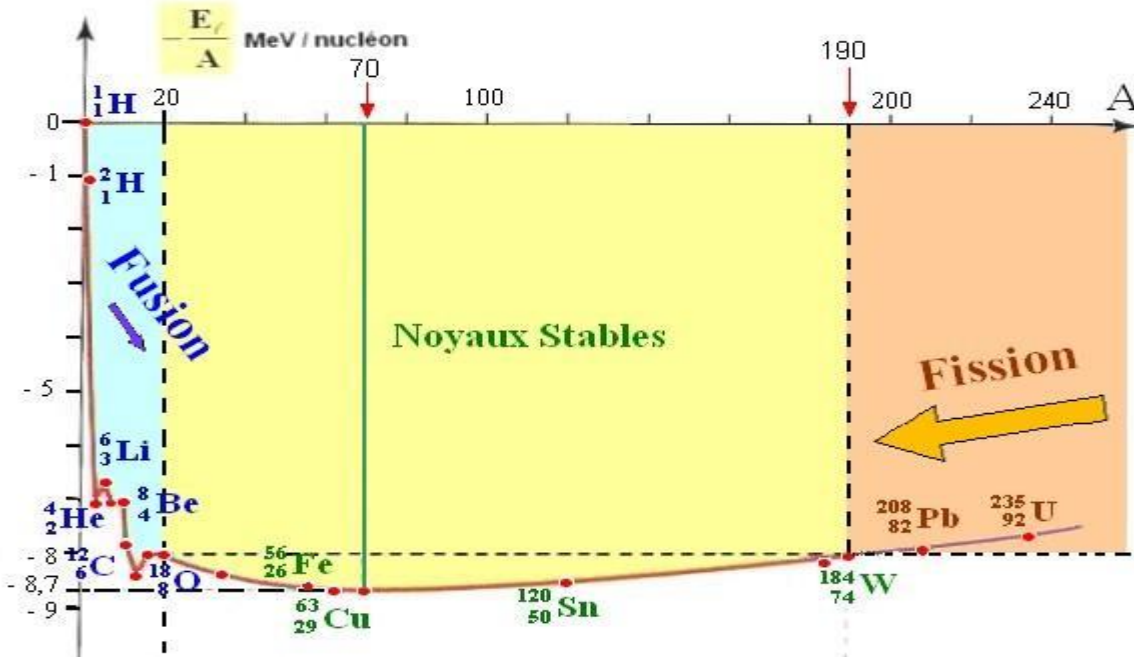
$$E_l = \frac{4,55 \cdot 10^{-12}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,84 \cdot 10^7 \text{ eV} = \mathbf{28,4 \text{ MeV}}$$

**3- Energie de liaison par nucléon :**

**L'énergie de liaison par nucléon  $\xi$  est défini par la relation :  $\xi = \frac{E_l}{A}$  telle que  $E_l$  l'énergie de liaison du noyau et  $A$  le nombre de nucléons.**  
**L'unité de  $\xi$  est : MeV/nucléon**  
**Plus l'énergie de liaison par nucléon est élevée plus le noyau est stable.**

**Exemple :**  $\xi({}^4_2\text{He}) = \frac{E_l}{4} = \frac{28,4}{4} = \mathbf{7,1 \text{ MeV/nucléon}}$  .

**4- Courbe d'Aston :**



Afin de comparer la **stabilité** de différents **noyaux atomique**, on trace la **courbe** représentant l'**opposé** de l'**énergie de liaison par nucléon** ( $-\xi$ ) en fonction du **nombre de nucléons A** (**courbe d'Aston**).

A partir de la **courbe**, on remarque pour :

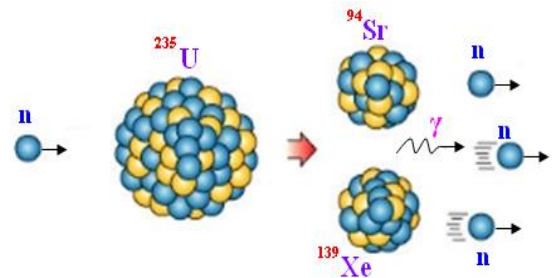
- **20 < A < 195** : On observe sur la **courbe** les **valeurs minimales** de ( $-\xi$ ), c-à-d ( $|\xi| \approx 8 \frac{MeV}{nucléon}$ ). Cette **zone** possède les **noyaux les plus stables**.
- **A < 20 et A > 195** : On observe que ( $-\xi$ ) est **faible** pour ces **noyaux**, ce qui confirme **leur instabilité** où ils peuvent être **transformés** en **noyaux stables** par **fission nucléaire** pour les **noyaux lourds** (A > 195) ou par **fusion nucléaire** pour les **noyaux légers** (A < 20).

### III – La fission et la fusion nucléaires : (Pour : SM et SP)

#### 1– La fission nucléaire :

##### 1-1- Définition :

La fission nucléaire est une réaction nucléaire dans laquelle un noyau lourd fissile (fissile) est divisé en deux noyaux légers après capture d'un neutron thermique.

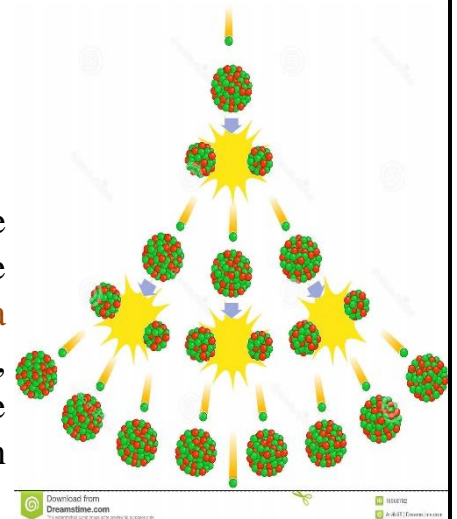


**Exemple :**  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{55}^{140}\text{Cs} + {}_{37}^{93}\text{Rb} + 3.{}_0^1\text{n}$  et  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{38}^{94}\text{Sr} + {}_{54}^{139}\text{Xe} + 3.{}_0^1\text{n} + \gamma$ .

##### 1-2- Réaction en chaîne :

Les neutrons résultants de la fission nucléaire peuvent :

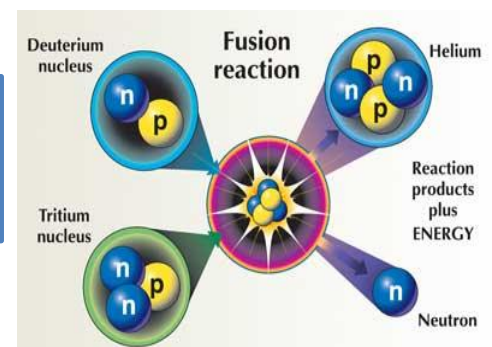
- ↪ Sort du milieu de réaction.
- ↪ Être capturé par des noyaux non fissile.
- ↪ Provoquer la fission d'autres noyaux, et contribuer à une **réaction en chaîne** pouvant se produire de manière **explosive** s'elle est **incontrôlée** (c'est ce qui se passe dans la **bombe nucléaire A**). Mais dans les **réacteurs nucléaires**, la **réaction en chaîne** est **contrôlée** de manière à ce que l'énergie soit produite de manière **systématique** (en absorbant les neutrons avec des **barres de cadmium**).



#### 2– La fusion nucléaire :

##### 2-1- Définition :

La fusion nucléaire est une réaction nucléaire provoquée, au cours de laquelle, deux noyaux légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd.



**Exemple :** Les réactions de fusion se produisent au cœur du soleil où la formation d'Hélium à partir de l'hydrogène, se fait en trois étapes :



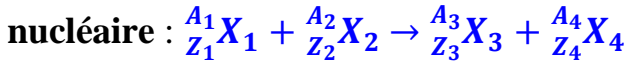
2-2- Conditions de la fusion nucléaire :

La fusion nucléaire n'est réalisée que si les deux noyaux ont l'énergie qui leur permet de vaincre les forces de l'interaction répulsives. Cette énergie nécessite une température élevée. Pour cette raison, la fusion s'appelle **réaction thermonucléaire**.

IV – Bilans de masse et d'énergie d'une réaction nucléaire :

1– Cas général :

On considère l'équation générale d'une réaction



Où X le symbole d'un noyau ou d'une particule.

Le bilan énergétique de cette réaction est :

$$E_l(X_1) + E_l(X_2) = E_l(X_3) + E_l(X_4) + \Delta E$$

Avec  $E_l$  l'énergie de liaison du noyau et  $\Delta E$  l'énergie de réaction et c'est une grandeur algébrique.

$\Delta E < 0$  La réaction est **exoénergétique**.

$\Delta E > 0$  La réaction est **endoénergétique**.

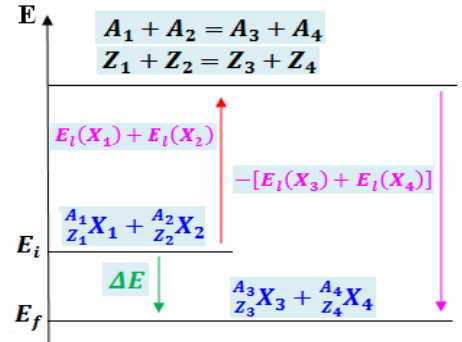
Donc  $\Delta E = [E_l(X_1) + E_l(X_2) - E_l(X_3) - E_l(X_4)]$

Selon la définition de l'énergie de liaison  $E_l({}_Z^AX) = [Zm_p + (A - Z)m_n - m({}_Z^AX)].c^2$

Et utilisant les lois de Soddy :  $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$  et  $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$

Donc  $\Delta E = [m(X_3) + m(X_4) - m(X_1) - m(X_2)].c^2$

Ainsi  $\Delta E = \Delta m.c^2 = [m(\text{produits}) - m(\text{réactifs})].c^2$ .



**Remarque :** L'énergie libérée au cours d'une réaction exoénergétique est :  $\xi_l = -\Delta E > 0$

2– Cas des réactions de fission et de fusion nucléaires : (Pour : SM et SP)

2-1- La fission nucléaire :

On considère l'équation de la fission nucléaire suivante :



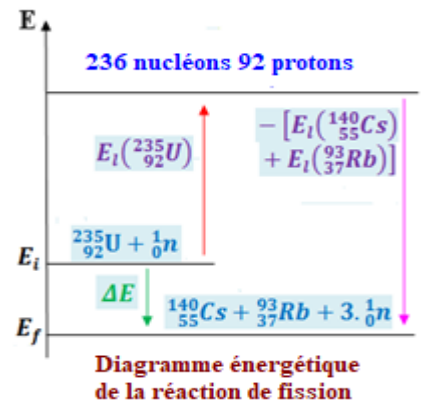
L'énergie de réaction est :

$$\Delta E = \Delta m.c^2 = [m(\text{produits}) - m(\text{réactifs})].c^2$$

$$\Delta E = [m({}_{55}^{140}\text{Cs}) + m({}_{37}^{93}\text{Rb}) + 3m({}_0^1\text{n}) - m({}_{92}^{235}\text{U}) - m({}_0^1\text{n})].c^2$$

${}_{92}^{235}\text{U}$	${}_{55}^{140}\text{Cs}$	${}_{37}^{93}\text{Rb}$	${}_0^1\text{n}$
234,99346	139,88711	92,90174	1,00866

Les masses des noyaux intervenant dans la réaction de fission (u)

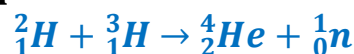


Donc  $\Delta E = \Delta m.c^2 = -2,7952.10^{-11}\text{J} = -174,46\text{MeV}$

Donc la fission d'un noyau d'Uranium 235 libère l'énergie :  $\xi_l = -\Delta E = 174,46\text{MeV}$

2-2- La fusion nucléaire :

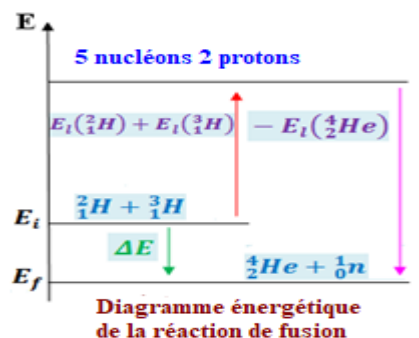
On considère l'équation de la fusion nucléaire suivante :



L'énergie de réaction est :

$$\Delta E = \Delta m.c^2 = [m(\text{produits}) - m(\text{réactifs})].c^2$$

$$\Delta E = [m({}^4_2\text{He}) + m({}^1_0\text{n}) - m({}^2_1\text{H}) - m({}^3_1\text{H})].c^2$$



${}^2_1\text{H}$	${}^3_1\text{H}$	${}^4_2\text{He}$	${}^1_0\text{n}$
2,01355	3,01550	4,00150	1,00866
<b>Les masses de noyaux impliquant dans la réaction de fusion (u)</b>			

Donc  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = -17,585 \text{ MeV} = -17,6 \text{ MeV}$

Donc la réaction de fusion libère l'énergie :  $\xi_l = -\Delta E = 17,6 \text{ MeV}$

**3- Applications sur les transformations nucléaires spontanées :**

Pour les transformations nucléaires spontanées,  $\Delta E$  est toujours négatif ( $\Delta E < 0$ ) et noté  $\xi_l$ , appelé énergie libérée. Cette énergie apparaît sous forme d'énergie cinétique acquise notamment par les particules émises.

**3-1- Radioactivité  $\alpha$  :**

L'équation de désintégration  $\alpha$  :  ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He}$

L'énergie libérée au cours la radioactivité  $\alpha$  est :

$$E = \Delta m \cdot c^2 = [m({}^4_2\text{He}) + m({}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}) - m({}^A_Z\text{X})] \cdot c^2$$

Exemple :  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$

Les masses de noyaux (u) sont :

${}^{226}_{88}\text{Ra}$	${}^{222}_{86}\text{Rn}$	${}^4_2\text{He}$
225,9770	221,9702	4,0015

$$E = [m({}^4_2\text{He}) + m({}^{222}_{86}\text{Rn}) - m({}^{226}_{88}\text{Ra})] \cdot c^2 = -4,94 \text{ MeV}$$

**3-2- Radioactivité  $\beta^-$  :**

L'équation de désintégration  $\beta^-$  est :  ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + {}^0_{-1}\text{e}^-$

L'énergie libérée au cours la radioactivité  $\beta^-$  est :

$$E = \Delta m \cdot c^2 = [m({}^0_{-1}\text{e}) + m({}^A_{Z+1}\text{Y}) - m({}^A_Z\text{X})] \cdot c^2$$

Exemple :  ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + {}^0_{-1}\text{e}^-$ . Les masses de noyaux (u) sont :

${}^{60}_{27}\text{Co}$	${}^{60}_{28}\text{Ni}$	${}^0_{-1}\text{e}$
59,9190	59,915	$5,49 \cdot 10^{-4}$

$$E = [m({}^0_{-1}\text{e}) + m({}^{60}_{28}\text{Ni}) - m({}^{60}_{27}\text{Co})] \cdot c^2 = -3,21 \text{ MeV}$$

**3-3- Radioactivité  $\beta^+$  :**

L'équation de désintégration  $\beta^+$  est :  ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + {}^0_1\text{e}^+$

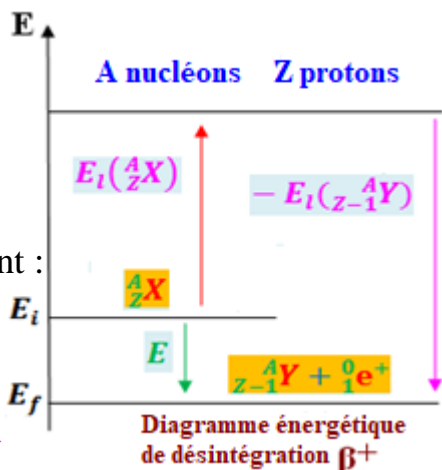
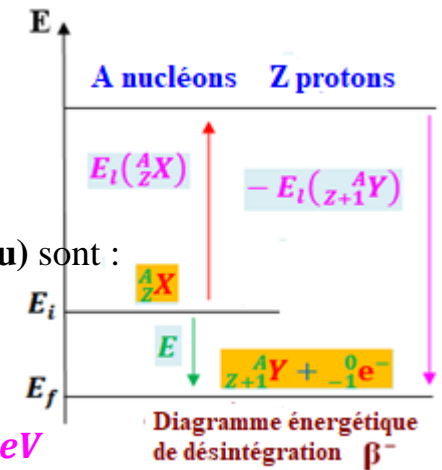
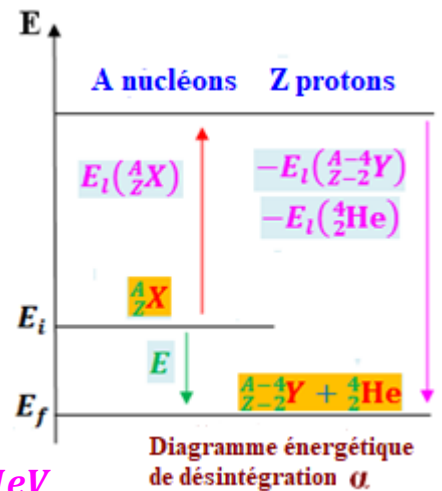
L'énergie libérée au cours la radioactivité  $\beta^+$  est :

$$E = \Delta m \cdot c^2 = [m({}^0_1\text{e}) + m({}^A_{Z-1}\text{Y}) - m({}^A_Z\text{X})] \cdot c^2$$

Exemple :  ${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^0_1\text{e}^+$ . Les masses de noyaux (u) sont :

${}^{13}_6\text{C}$	${}^{13}_7\text{N}$	${}^0_1\text{e}$
13,000062	13,001898	$5,49 \cdot 10^{-4}$

$$E = [m({}^0_1\text{e}) + m({}^{13}_6\text{C}) - m({}^{13}_7\text{N})] \cdot c^2 = -1,199 \text{ MeV}$$

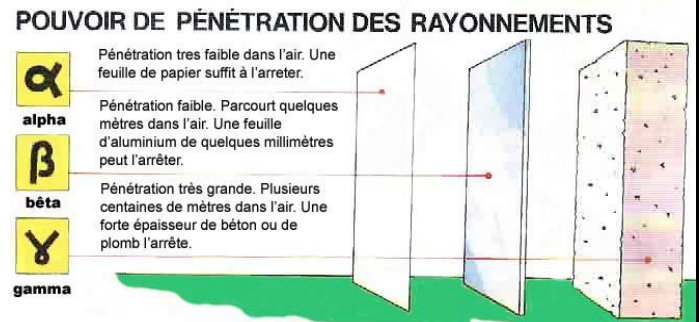
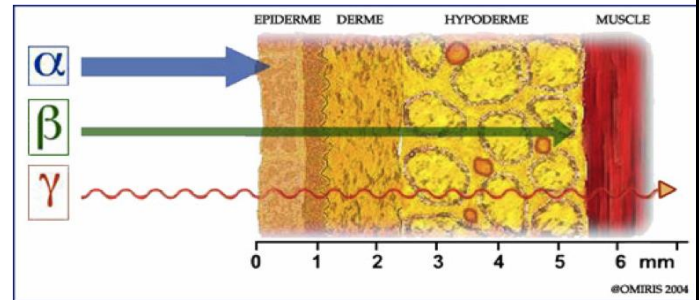


## V – Applications et dangers de la radioactivité :

### 1– Les effets biologiques de la radioactivité :

La **radioactivité** est accompagnée de l'émission de **particules** (les **particules  $\alpha$**  et  **$\beta$**  et le **rayonnement  $\gamma$** ) de **haute énergie**. Ces **particules** sont capables d'**arracher** des **électrons** aux **atomes** qu'ils rencontrent. Ces derniers, **ionisés**, sont **particulièrement réactifs** avec les **molécules** qui les entourent, comme par exemple les **molécules d'ADN** des **cellules vivants** :

- ⊕ L'**activité** de la **source radioactive**.
- ⊕ Le **type** de **source radioactive**.
- ⊕ La **durée d'exposition**.
- ⊕ La **proximité** de la **source**.



### 2– Applications de la radioactivité :

La **radioactivité** a des **multiples applications** dans **plusieurs domaines**, entre autres :

- ✎ **L'industrie** : la **production** de l'**énergie électrique**, la **recherche** de **nouveaux matériaux**, les **appareils** de **détection** et de **mesure ultrasensible**, la **conservation** des **aliments**....
- ✎ **L'agriculture** : élaboration de **nouvelles variétés végétales** par **transformations génétiques**, éliminer des **insectes** et des **micro-organismes nuisibles**...
- ✎ **La médecine** : le **diagnostic** et le **traitement**, utilisation de **traceurs radioactifs**, **analyse biochimique**, **radiothérapie**, **stérilisation** des **instruments médicaux**....

### 3– Les dangers de la radioactivité :

- ⊕ Nous savons que la **radioactivité**, **mal maîtrisée** ou utilisée à des **fin non pacifiques**, peut **gravement nuire**. Depuis **Hiroshima à 1945**, **radioactivité** rime avec **danger**. Après **Tchernobyl**, et aujourd'hui **Fukushima à 1986**, le **nucléaire fait peur**.
- ⊕ L'utilisation des **propriétés** de la **radioactivité** dans de **nombreux secteurs** est à l'origine de la **production** de **déchets radioactifs** qui, pour des raisons **techniques** ou **économiques**, ne peuvent être **réutiliser** ou **recyclés**. Ces **déchets** ont la **particularité** d'émettre des **rayonnements** pouvant présenter un **risque** pour l'**Homme** et l'**environnement**.