



JUILLET 2019

COURS  
UE3A

Introduction au chapitre  
RAYONNEMENTS IONISANTS  
(R.I)

PARTIE 1 :  
Rappels de Cours

## PHYSIQUE NUCLEAIRE

Depuis 1896, date à laquelle H. Becquerel réussit à impressionner une plaque photographique en l'absence de lumière, le physicien a fortement progressé dans le domaine de la physique nucléaire et ses applications.

La radioactivité (propriété pour certains éléments de se transformer en d'autres éléments) est une propriété du noyau ; elle n'est donc pas affectée par la combinaison chimique dans laquelle intervient l'élément radioactif.

### Historique :

- ◆ 1896 : Découverte fortuite de la Radioactivité naturelle de l'uranium par Henri Becquerel. Il met en évidence les rayonnements émis par l'uranium naturel.
- ◆ 1898-1899 : Découverte de 2 autres éléments radioactifs, le polonium et le radium, isolés par Pierre et Marie Curie.
- ◆ 1919 : Première transmutation artificielle par Lord Ernest Rutherford :
$${}^1_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^8_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$$
- ◆ 1934 : Production d'éléments radioactifs artificiels par Irène et Frédéric Joliot Curie.
- ◆ 1942 : Radioactivité : production de rayonnement et de chaleur spontanément par certains éléments.
- ◆ 1946 : Bombes atomiques sur Hiroshima et Nagasaki.

### I- Structure de la matière.

#### A- Connaissances générales.

Quel que soit l'état (solide, liquide ou gazeux) la matière est constituée de substances résultant de l'association de molécules identiques pour les corps purs ou différentes pour les corps composés.

Les molécules sont elles-mêmes obtenues par la réunion de plusieurs atomes, identiques ou non.

Les quelques 109 éléments identifiés à ce jour se répartissent en fonction de leur structure électronique et de leurs propriétés chimiques dans le tableau périodique de Mendeleïeff. Chaque case de ce tableau correspond à un atome parfaitement défini.

L'atome est constitué par un noyau autour duquel gravitent les électrons ; le noyau est lui-même constitué par des nucléons : protons et neutrons.

Un atome quelconque X est caractérisé par deux nombres :

- A : représente le nombre total de nucléons dans le noyau, on l'appelle aussi nombre de masse puisque c'est le noyau qui renferme pratiquement toute la masse de l'atome.
- Z : correspond au nombre de protons contenus dans le noyau, on lui donne aussi le nom de numéro atomique, car c'est son numéro d'ordre dans la classification périodique.

C'est Z qui détermine le nom de l'atome ; la différence  $N = A - Z$  correspond au nombre de neutrons. Par convention, on a adopté l'écriture suivante :

A = nombre de nucléons

Z = nombre de protons X : symbole de l'atome.

Les caractères A (avec  $A = Z + N$ ) et Z inscrits à gauche du nom de l'atome concernent uniquement le noyau, la partie de droite est réservée aux électrons et aux liaisons chimiques.

Comme l'atome est électriquement neutre, il y a Z électrons tournant autour d'un noyau renfermant Z protons.

**Constituants du nucléon.**

On pense à l'heure actuelle que les protons et les neutrons sont composés de constituants encore plus élémentaires, que l'on appelle les quarks (les électrons apparaissant expérimentalement, du moins pour l'instant, comme véritablement élémentaires).

Au début des années 1960, on a supposé qu'il y avait 3 types de quarks, notés :

u (up)                  d (down)                  s (strange).

(Voir les charges au tableau suivant).

D'autres types c (charme) et b (beauté) ont été découverts depuis. L'existence de charges fractionnaires peut paraître surprenante, mais semble être liée à des propriétés de symétrie très fondamentales.

Quark	u	d	s	c	b
Charge	$2e/3$	$-e/3$	$-e/3$	$2e/3$	$-e/3$
Spin	$h/2$	$h/2$	$h/2$	$h/2$	$h/2$

Parmi toute une classe de particules (les hadrons), sensibles à l'interaction nucléaire, le neutron et le proton seraient donc constitués de 3 quarks (qui se lient par l'intermédiaire de gluons) :

- udd : pour le neutron.

- uud : pour le proton.

On pense maintenant qu'il existe encore un autre type de quark t (top), et également que l'on ne pourra jamais observer les quarks de façon isolée, mais seulement combinés à l'état de particules composites, comme dans le cas des nucléons.

**B- Les unités de la physique atomique.**

On définit l'unité de masse atomique (uma) comme le  $1/12^{\text{ème}}$  de la masse de carbone 12.

Comme une mole d'atome de carbone 12 a pour masse 12 g, on a donc :

$$1 \text{ uma} = \frac{1}{12} \cdot \frac{12}{N} = \frac{1}{N} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g avec } N = \text{nombre d'Avogadro} = 6,02 \cdot 10^{23}.$$

**- Unité d'énergie.**

On utilise fréquemment l'électronvolt (eV) qui correspond à l'énergie cinétique acquise par un électron soumis à une différence de potentiel de 1 volt.

D'où : **1 eV = 1,6. 10<sup>-19</sup> J.**

**- Equivalence masse-énergie.**

La relation d'Einstein **E = Δm.c<sup>2</sup>** permet de convertir les unités de masse en unités d'énergie et réciproquement. Par exemple, on peut calculer que :

$$1 \text{ uma} = 931,5 \text{ MeV}/c^2.$$

**C- Les particules élémentaires.**

**L'électron.**

- Particule vraiment élémentaire.

- Appartient aux fermions (nombre quantique de spin :  $\pm 1/2$ ).

Il y a 2 classes de particules : Fermions (spin :  $\pm 1/2$ ) et les Bosons (spin : nul ou entier).

Electron :  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg.}$

$$m_e \cdot c^2 = 511 \text{ keV.}$$

$$q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

**Le neutron.** Conformément à la notation générale  ${}^A_Z X$ , il a pour notation  ${}^1_0 n$ . Sa charge est nulle, et sa masse a pour valeur :

$$m_n = 1,008664 \text{ uma.}$$

$$m_n = 1,8748 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

$$m_n \cdot c^2 = 939,57 \text{ MeV.}$$

$$m_n = 1839 \text{ m.e.}$$

A l'extérieur du noyau, le neutron est radioactif et se désintègre en donnant un proton, un électron et un antineutrino (électronique) selon la réaction :  ${}^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + {}^0_{-1} e + {}^0_0 \bar{\nu}_e$   
Chaque 12,8 mn, la moitié des neutrons présents disparaît (période  $T = 12,8 \text{ mn}$ )

**Le proton.** Il a pour symbole  ${}^1_1 p$ , c'est le noyau de l'atome d'hydrogène ; on peut donc aussi le représenter par l'écriture  ${}^1_1 H^+$ . Sa masse est légèrement plus petite que celle du neutron et vaut :

$$m_p = 1,007276 \text{ uma.}$$

$$m_p = 1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

$$m_p \cdot c^2 = 938,28 \text{ MeV.}$$

$$m_p = 1836 \text{ m.e.}$$

Sa charge positive a pour valeur celle de l'électron :  $q = e = 1,62 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$

Contrairement au neutron, le proton est stable hors du noyau (ou du moins ayant une durée de vie supérieure à l'âge de l'Univers).

Parmi les quelques 2000 noyaux atomiques distincts correspondant tous à l'écriture générale  ${}^A_Z X$ , les distributions des neutrons et des protons permettent de définir des familles particulières de nucléides, on distingue :

- **Les isotopes.**

Ce sont des éléments qui ont même numéro atomique  $Z$  et donc même nom et mêmes propriétés chimiques, par contre, le nombre de masse  $A$  est différent d'où un nombre de neutrons différents. Il en résulte des propriétés physiques différentes des noyaux, en particulier certains sont radioactifs : on dit alors que ce sont des radio-isotopes.

Par exemple, l'hydrogène a 3 isotopes :  ${}^1_1 H$  (hydrogène).

$${}^2_1 H \text{ (deutérium).}$$

$${}^3_1 H \text{ tritium (radioactif).}$$

- **Les isobares.**

Ils présentent la curiosité mathématique d'avoir le même nombre de masse  $A$  avec des numéros atomiques  $Z$  différents ; ils n'ont aucune propriété commune.

Par exemple :  ${}^{14}_6 C$  et  ${}^{14}_7 N$ .

- **Les isotones.**

Ils ont le même nombre de neutrons  $N = A - Z$ , sans que cela entraîne des propriétés spéciales. Par exemple :  ${}^{14}_6 C$ ,  ${}^{15}_7 N$  et  ${}^{16}_8 O$ .

- **Les isomères.**

Ce sont des éléments absolument identiques ; seule une différence d'énergie permet de les distinguer ; l'un se trouve à un niveau d'énergie métastable ( $m$ ) supérieur à l'autre.

Par exemple :  ${}^{80m}_{35} Br$  avec le  ${}^{80}_{35} Br$  :  ${}^{80m}_{35} Br \rightarrow {}^{80}_{35} Br + \gamma$

$${}^{99m}_{43} Tc \text{ avec le } {}^{99}_{43} Tc : {}^{99m}_{43} Tc \rightarrow {}^{99}_{43} Tc + \gamma$$

Relation entre les nucléons :

La population relative entre les protons et les neutrons obéit à des lois qui permettent de prévoir si un élément sera stable ou non.

Pour les atomes de faible masse atomique ( $Z < 15$ ) le nombre de protons équilibre le nombre de neutrons. Lorsque  $Z$  augmente, le nombre de neutrons devient légèrement excédentaire.

Remarque :

- Il y a plus de 1200 nucléides artificiels ce qui correspond à peu près à 1500 atomes différents.
- Dans la nature, on trouve 90 éléments autour de nous et 325 noyaux naturels différents dont 274 stables et 51 instables (dont à peu près 25 existent depuis la formation de la Terre : 4,5 Milliards d'années).
- La densité d'un noyau ne dépend pas de  $A$ .
- La distribution des protons et des neutrons est uniforme.
- Le noyau étant assimilé à une sphère de rayon  $R$ , on a la relation :  
$$R = R_0 \cdot A^{1/3} \text{ avec } R_0 = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m} = 1,4 \text{ Fermi.}$$
- $A$  = nombre de masse du noyau de l'atome.
  - Si  $A$  est sans unité :  $A$  = nombre de nucléons du noyau.
  - Si  $A$  est en g :  $A$  = masse d'une mole d'atomes.
  - Si  $A$  est en uma :  $A$  = masse d'un atome.

Connaissant  $A$  pour un atome quelconque, on peut donc en déduire le nombre de nucléons, la masse d'une mole et la masse d'un atome.

**II- Stabilité – Instabilité nucléaire.**

**1- Le défaut de masse.**

Pour tous les nucléides, la somme des masses des nucléons liés à l'intérieur du noyau est inférieure à la somme des masses des nucléons pris séparément ( $\Delta m > 0$ ); cette différence de masse  $\Delta m$  s'appelle le défaut de masse :

$$\Delta m = (N \cdot m_n + Z \cdot m_p) - m_{\text{noyau.}}$$

Avec :  $m_{\text{noyau}}$  = masse du noyau.

$N$  = nombre de neutrons de ce noyau.

$Z$  = nombre de protons de ce noyau.

$m_n$  = masse du neutron.

$m_p$  = masse du proton.

Remarque :

masse de l'atome  $\approx$  masse du noyau ( $m_{\text{électron}} \ll m_{\text{proton}}$ ) =  $A$  (uma).

masse d'un atome =  $m_{\text{noyau}} + Z \cdot m_{\text{électron}}$

**2- Energie de liaison.**

Le défaut de masse correspond à l'énergie de liaison  $L$  assurant la cohésion des nucléons dans le noyau; la relation d'Einstein permet de calculer sa valeur :  $E_{\text{liaison}} = \Delta m \cdot c^2$

On peut donc exprimer indifféremment la masse en uma ou en MeV, on établit sans difficulté la relation :

$$1 \text{ uma} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

Remarque : L'équivalent énergétique de 1 uma étant 931,5 MeV. On écrit souvent :

$$1 \text{ uma} = 931,5 \text{ MeV.}$$

On compare la stabilité des différents noyaux en calculant en MeV/nucléon leur énergie moyenne de liaison.

Si on porte sur un diagramme les valeurs obtenues, on note un maximum de stabilité à 8,7 MeV/nucléon pour des noyaux ayant un nombre de masse aux environs de 60 ; ils correspondent aux éléments particulièrement stables (Nickel et Fer constituant le cœur de la Terre).

Les éléments les plus stables sont ceux pour lesquels  $E_l/A$  est le plus grand.

Les éléments les plus légers pourront acquérir davantage de stabilité en fusionnant, d'où libération d'énergie. C'est le principe de la bombe H ou plus pacifiquement des réacteurs à plasmas.

De même les éléments les plus lourds se rapprocheront du maximum de stabilité par fission, la libération d'énergie brutale donnera la bombe A, ou si elle est contrôlée, un réacteur nucléaire (pile atomique) utilisée pour la production d'électricité.

#### **\* Fission nucléaire (Bombe A).**

L'éclatement de noyaux lourds en noyaux de masses atomiques moyennes est obtenu en les bombardant avec des particules légères, neutrons le plus souvent, animées de grandes vitesses.

On peut obtenir par exemple la réaction :  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{36}^{91}\text{Kr} + {}_{56}^{142}\text{Ba} + 3 {}_0^1\text{n}$

La somme des masses dans le second membre est inférieure à celle du premier membre, la différence correspond à l'énergie nucléaire énorme, libérée au cours de la réaction de fission.

**Remarque 1 :** Chaque fois qu'un neutron fait éclater un noyau d'uranium, 3 neutrons sont libérés qui sont théoriquement capables de casser un atome d'uranium 235 et ainsi de suite. Cette réaction va donc s'effectuer de plus en plus vite : c'est la réaction en chaîne.

Dans une pile atomique les neutrons produits sont en partie absorbés pour contrôler la réaction.

**Remarque 2 :** Dans la nature, l'isotope 235 de l'uranium n'est présent qu'à 0,7% dans les minerais, le reste étant de l'uranium 238 qui ne subit pas de fission et absorbe les neutrons. Il faut donc séparer ces 2 isotopes.

#### **\* Fusion nucléaire (Bombe H).**

On peut la réaliser si l'on réussit à vaincre la répulsion électrostatique qui va s'exercer entre les noyaux légers. Cela n'est réalisé que si l'on peut les animer de vitesses très grandes, c'est à dire obtenir une température très élevée (de l'ordre de 20 millions de degrés).

Naturellement, cette température qui conduit à un état de plasma (mélange d'électrons et de noyaux positifs de très grandes vitesses) n'est obtenue que dans les étoiles.

Expérimentalement, cette température peut être atteinte pendant un temps très court en faisant exploser une bombe atomique ou sous l'effet d'une impulsion Laser.

La réaction de fusion obtenue est :  ${}_1^3\text{H} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He}$

Elle est génératrice d'une énergie considérable, mais pour l'instant ; on ne connaît pas encore le moyen de contrôler une telle réaction.

### **3- Le diagramme de stabilité neutron-proton.**

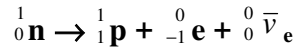
Pour tous les nucléides existants, si l'on porte sur un diagramme le nombre de neutrons  $N = (A - Z)$  en fonction du nombre de protons  $Z$ , on obtient une répartition suivant une ligne de stabilité qui s'écarte insensiblement de la première bissectrice.

Tous les nucléides placés sur une même verticale sont des isotopes (même  $Z$ ).

Tous les nucléides placés sur une même horizontale sont des isotones (même  $N$ ).

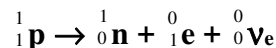
Enfin tous les nucléides placés sur une même perpendiculaire à la première bissectrice sont des isobares (même A).

Les nucléides instables par excès de neutrons sont placés au-dessus de la ligne de stabilité ; ils s'en approcheront grâce à une réaction nucléaire interne qui transforme un neutron en proton selon le schéma :



L'électron négatif émis par le noyau correspond à la radioactivité  $\beta^-$ , il est accompagné de l'émission d'un antineutrino  ${}^0_0\bar{\nu}_e$ .

Les nucléides installés par excès de protons sont situés sous la ligne de stabilité, ils s'en approchent par une réaction nucléaire interne qui change un proton en neutron selon le processus :



L'électron positif libéré par le noyau correspond à la radioactivité  $\beta^+$ , il est accompagné de l'émission d'un neutrino  ${}^0_0\nu_e$  de masse négligeable (mais non nulle).

Les éléments les plus lourds sont situés à l'extrémité de la ligne de stabilité auront une énergie interne insuffisante pour assurer la cohésion de tous les nucléons, ce sera la zone de la fission spontanée et de la radioactivité  $\alpha$ .

#### **4- Les liaisons des nucléons dans les noyaux.**

Dans les noyaux, pour des distances de l'ordre du Fermi il existe entre les nucléons, des forces d'attraction nucléaire très fortes et supérieures aux forces de répulsion électrostatique, elles assurent la cohésion du noyau.

On a pu mettre en évidence une nouvelle particule : le méson  $\pi$  qui permet de réaliser de véritables liaisons entre les nucléons, comme l'électron le fait entre les atomes pour les liaisons chimiques.

#### **Energie de liaison.**

Elle est mise en évidence par le fait que la masse du noyau est inférieure à la somme des masses de ses différents nucléons. Ce défaut de masse  $\Delta m$  représente une quantité d'énergie  $W = \Delta m.c^2$ .

W a une valeur très grande et représente l'énergie de liaison ou énergie nécessaire pour éloigner les uns des autres et à l'infini les différents nucléons.

#### **Forces nucléaires.**

Si elles sont très importantes, elles n'ont qu'un rayon d'action très limité (de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-15}$  m). Les protons, seules particules chargées du noyau, vont être, de plus, soumis à des forces répulsives de Coulomb (inférieures en module aux forces de liaison).

Il existe un équilibre entre les forces attractives et répulsives. La stabilité de l'atome est due à un puits de potentiel (minimum bordé par 2 barrières de potentiel).

### **III- Les différents types de radioactivité.**

#### **A- La radioactivité $\alpha$ .**

C'est une radioactivité particulière naturelle ou provoquée, elle est caractérisée par l'expulsion à partir d'un gros atome d'un noyau d'Hélium  ${}^4_2\text{He}^{++}$  que l'on note  ${}^4_2\alpha$ . Elle concerne les noyaux lourds ( $A > 200$ ).

De façon générale, la réaction est :  ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\alpha$

La variation de masse  $\Delta m$  au niveau du noyau s'écrit en fonction des masses des atomes notées  $M$  :

$$\Delta m = M_{(X)} - M_{(Y)} - M_{(He)}$$

En effet, le bilan de la réaction fait disparaître la masse des électrons.

Démonstration :

$$\begin{aligned} \Delta m &= \text{masse noyau (X)} - \text{masse noyau (Y)} - \text{masse noyau (He)} \\ &= (M_{(A, Z)} - 2m_e) - (M_{(A-4, Z-2)} - (Z-2).m_e) - (M_{(4, 2)} - 2m_e) \\ &= M_{(A, Z)} - M_{(A-4, Z-2)} - M_{(4, 2)} - Z.m_e + Z.m_e - 2m_e + 2m_e \\ &= M_{(A, Z)} - M_{(A-4, Z-2)} - M_{(4, 2)} \end{aligned}$$

Si  $\Delta m > 0$ , la réaction  $\alpha$  est possible et la particule est émise avec une énergie cinétique :  $E_c = \Delta m.c^2$

Les émissions de particules  $\alpha$  se font selon des énergies bien précises et donnent de ce fait des spectres de raies (spectres discontinus).

Dans une désintégration  $\alpha$ , la particule  $\alpha$  emporte la quasi-totalité de l'énergie libérée (le noyau Y n'emporte que 2% de l'énergie libérée).

Les énergies sont comprises entre 4 MeV et 10 MeV environ. La transformation radioactive est une évolution vers un état de plus grande stabilité, elle est donc exoénergétique.

Un gros noyau a une énergie moyenne de liaison de 7,5 MeV/nucléon, mais les nucléons situés en périphérie sont moins liés, environ 6 MeV/nucléon.

Dans ces conditions, 2 neutrons et 2 protons s'uniront facilement pour former un noyau d'hélium qui représente une structure plus stable à 7 MeV/nucléon d'énergie de liaison moyenne.

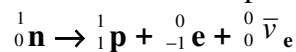
La différence d'énergie  $E = 4.(7 - 6) = 4$  MeV sera l'énergie emportée par la particule  $\alpha$ , elle correspond aussi au bilan des masses  $\Delta m$  déjà vu.

Les particules  $\alpha$  sont très ionisantes du fait de leur taille et de leur double charge positive  ${}^4_2\alpha^{++}$ .

Elles ont un très rectiligne et court dans la matière avec une vitesse relativement faible ne dépassant pas 20 000 km/s.

### **B- La radioactivité $\beta^-$ (émission d'un négaton).**

C'est une radioactivité particulière naturelle ou provoquée caractérisée par l'expulsion d'un électron d'un noyau qui possède un excès de neutrons par rapport au nombre de protons.



Il s'agit d'une réaction isobarique puisque le nombre de masse A ne change pas.

De façon générale, on a :  ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}_e$

La condition d'émission de la radioactivité  $\beta^-$  est donnée par le bilan des masses.

$$\Delta m = M_{(X)} - M_{(Y)}$$

$\Delta m$  est la variation de masse du noyau et  $M$  représente la notation de la masse des atomes. Le bilan global fait disparaître la masse des électrons.



Démonstration :

$$\begin{aligned} \Delta m &= \text{masse noyau (X)} - \text{masse noyau (Y)} - \text{masse électron} \\ &= (\mathbf{M}_{(A, Z)} - Z.m_e) - (\mathbf{M}_{(A, Z+1)} - (Z+1).m_e) - m_e \\ &= \mathbf{M}_{(A, Z)} - \mathbf{M}_{(A, Z+1)} - Z.m_e + (Z+1).m_e - m_e \\ &= \mathbf{M}_{(A, Z)} - \mathbf{M}_{(A, Z+1)} \end{aligned}$$

Si  $\Delta m > 0$ , l'émission radioactive  $\beta^-$  peut se faire.

Il y a deux particules  $\beta^-$  et  ${}^0_0\bar{\nu}_e$  qui se partagent de façon aléatoire (variable) l'énergie de la réaction, d'où un spectre d'émission continu de la radioactivité  $\beta^-$ .

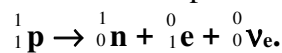
Il s'étend de 0 (quand le  ${}^0_0\bar{\nu}_e$  emporte toute l'énergie de la réaction) à  $E_{\max}$  (quand le  ${}^0_0\bar{\nu}_e$  n'emporte aucune énergie). On a donc :  $E_{\max} = E_{\beta^-} + E_{\bar{\nu}_e}$ .

Les  $\beta^-$  ont une vitesse voisine de celle de la lumière  $c = 3.10^8$  m/s (pour une énergie  $E_{\beta^-} = 1$  MeV la particule est émise avec une vitesse  $v = 0,94.c$ ), leur pouvoir ionisant est plus faible que celui des particules  $\alpha$ , mais leur trajectoire est plus longue (pouvoir pénétrant important) et plus sinueuse.

**C- La radioactivité  $\beta^+$  (émission d'un positon).**

C'est aussi une radioactivité particulière, mais uniquement artificielle.

Elle se produit lorsque les noyaux ont un excès de protons par rapport aux neutrons.



Il s'agit d'une réaction isobarique puisque le nombre de masse A ne change pas, en effet la



La condition d'émission de la radioactivité  $\beta^+$  est donnée par le bilan des masses

$$\Delta m = \mathbf{M}_{(X)} - \mathbf{M}_{(Y)} - 2m_e$$

Démonstration :

$$\begin{aligned} \Delta m &= \text{masse noyau (X)} - \text{masse noyau (Y)} - \text{masse électron} \\ &= (\mathbf{M}_{(A, Z)} - Z.m_e) - (\mathbf{M}_{(A, Z-1)} - (Z-1).m_e) - m_e \\ &= \mathbf{M}_{(A, Z)} - \mathbf{M}_{(A, Z-1)} - Z.m_e + (Z-1).m_e - m_e \\ &= \mathbf{M}_{(A, Z)} - \mathbf{M}_{(A, Z-1)} - 2m_e \end{aligned}$$

$\Delta m$  est la variation de masse du noyau et  $\mathbf{M}$  représente la notation de masse des atomes.

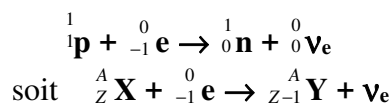
Le bilan des masses doit être supérieur à 2 fois la masse de l'électron au repos :

$$\mathbf{M}_{(A, Z)} - \mathbf{M}_{(A, Z-1)} > 2m_e \quad (\text{avec } m_e = 511 \text{ keV})$$

Pour que la réaction soit possible. Si cette condition n'est pas obtenue, il peut se produire un autre phénomène qui conduit au même résultat : c'est la Capture Electronique (C.E).

**Capture électronique (C.E).**

Le noyau capte un électron, le plus souvent d'une couche K selon ce schéma :



Démonstration :

$$\begin{aligned} \Delta m &= \text{masse noyau (X)} + \text{masse électron} - \text{masse noyau (Y)} - \text{Energie de liaison de l'électron K} \\ &= (M_{(A, Z)} - Z.m_e) + m_e - (M_{(A, Z-1)} - (Z-1).m_e) - \text{Energie de liaison de l'électron K} \\ &= M_{(A, Z)} - M_{(A, Z-1)} - Z.m_e + m_e + (Z-1).m_e - \text{Energie de liaison de l'électron K} \\ &= M_{(A, Z)} - M_{(A, Z-1)} - \text{Energie de liaison de l'électron K} \end{aligned}$$

Dans le cas de l'émission  $\beta^+$ , comme dans celui de l'émission  $\beta^-$ , on a toujours deux particules qui se partagent de façon aléatoire l'énergie libérée au cours de la réaction.

On a donc un spectre continu avec :  $E_{\max} = E_{\beta^+} + E_{ve}$

Dans le cas de la C. E, à la suite de la réaction de capture par le noyau d'un électron de la couche K, il y a réarrangement électronique avec émission de fluorescence X, d'où apparition d'un spectre de raies (spectre discontinu) correspondant aux transitions parfaitement définies entre les niveaux énergétiques quantifiés des électrons.

Lorsque les  $\beta^+$  entrent en contact avec les électrons, il se produit une réaction d'annihilation (disparition de matière) pour libérer 2 rayonnements  $\gamma$  de 0,511 MeV chacun (qui correspond à la masse de l'électron qui est 0,511 MeV) émis à  $180^\circ$  l'un de l'autre.

Cette double émission  $\gamma$  est aussi une caractéristique de la radioactivité  $\beta^+$ .

**D- La radioactivité  $\gamma$ .**

Contrairement aux différents types de radioactivité déjà vus, il n'y a pas d'émission de matière à partir du noyau, mais émission d'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique.

La radioactivité  $\gamma$  peut être pure lors du passage dans une transition isomérique d'un niveau métastable à un niveau stable. Mais la plupart du temps, la radioactivité  $\gamma$  résulte de la désexcitation d'un noyau produit à la suite d'une émission radioactive  $\alpha$  ou  $\beta$ .

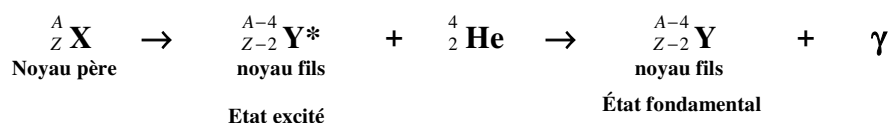
Le noyau peut se trouver dans des états d'énergie quantifiés. L'état stable correspond à une énergie minimale  $E_s$ . Les états excités correspondent à des énergies plus importantes  $E_1, E_2, E_3, \dots$ .

Lorsqu'une désintégration d'un des types précédents se produit, le noyau se retrouve souvent dans un état excité  $E_i$ .

Lorsqu'il passe à un niveau d'énergie  $E_f$  plus faible ( $E_i > E_f$ ) un rayonnement  $\gamma$  est alors émis ; sa fréquence  $\nu$  est donnée par :  $h \nu = E_i - E_f$ .

Les photons  $\gamma$  dont l'énergie ne dépasse jamais quelques MeV résultent de transitions de nucléons entre des niveaux énergétiques parfaitement définis dans les noyaux ; ils ont donc un spectre de raies d'origine nucléaire (spectre discontinu).

Dans certains cas, l'excédent d'énergie est directement communiqué à un électron qui est expulsé ; ce phénomène porte le nom de Conversion Interne (C.I), il entraîne un réarrangement électronique, d'où un spectre de raies d'origine électronique (spectre discontinu) :



**E- Lois de conservation des réactions nucléaires.**

Ces lois sont au nombre de 6, mais les 4 plus importantes que l'on peut vérifier sur les réactions de désintégration précédentes sont :

- Conservation de la charge :  $\sum Z = \text{constante}$ . Ce principe est valable quelle que soit la complexité des phénomènes intervenant.
- Conservation du nombre de nucléons :  $\sum A = \text{constante}$ .
- Conservation de la quantité totale de mouvement. Cette loi est toujours vérifiée pour toute réaction nucléaire.
- Conservation de l'énergie : l'énergie totale du système (énergie au sens large, c'est à dire masse + énergie cinétique) reste constante au cours des réactions nucléaires.

En toute rigueur, on doit ajouter dans le second membre de toute réaction nucléaire, un terme  $\Delta W$  correspondant à la différence entre les énergies des masses au repos du premier et du second membre.

Si  $\Delta W > 0$ , la réaction est exoénergétique.

Si  $\Delta W < 0$ , la réaction est endoénergétique.

**IV- Lois quantitatives de la radioactivité.**

**A- Définitions.**

**L'activité A.**

C'est le nombre de désintégrations par unité de temps :

$$A = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2}{T} \cdot \frac{m}{A} \quad (A = \text{activité d'une masse } m \text{ qui se désintègre})$$

$$m = N \cdot \frac{A}{\lambda} \quad (A = \text{masse d'une mole d'atomes et } N = \text{nombre d'atomes})$$

L'unité de radioactivité est le Becquerel (Bq), anciennement l'unité était le Curie (Ci) qui représentait la radioactivité de 1 g de radium en équilibre avec ses descendants radioactifs :

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq.}$$

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration par seconde.}$$

$\lambda =$  Constante radioactive =  $\ln 2 / T =$  probabilité de désintégration d'un noyau.

$$\lambda = \ln 2 / T$$

L'évolution dans le temps d'un ensemble d'éléments radioactifs est régie par les lois des probabilités.

Soit N = Nombre de noyaux susceptibles de se désintégrer.

**La période T.**

C'est le temps au bout duquel la moitié des atomes initiaux  $N_0$  est désintégrée.

Pour une période :  $N(t = T) = \frac{N_0}{2}$

Pour n périodes :  $N(t = nT) = \frac{N_0}{2^n}$

**La vie moyenne  $\tau$ .**

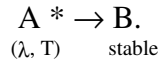
C'est la probabilité de vie ou vie moyenne d'un atome parmi le nombre d'atomes existant à un instant origine arbitraire. C'est le temps au bout duquel :

Pour un temps  $t = \tau$  :  $N(\tau) = \frac{N_0}{e}$

Pour un temps  $t = n\tau$  :  $N(n\tau) = \frac{N_0}{e^n}$

**B- Loi de filiation simple.**

On considère un élément père A\* radioactif caractérisé par  $\lambda$  et T, se désintégrant pour donner un élément fils B stable :



La loi de désintégration est sous sa forme différentielle :  $\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$

et sous sa forme intégrée :  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

$N_0$  = nombre de noyaux présents à l'instant initial  $t = 0$ .

$t$  = temps écoulé.

$\lambda$  = constante radioactive.

Elle se traduit par une courbe de décroissance exponentielle typique.

Le nombre de noyaux n désintégrés de A et donc créés de B a pour valeur :

$$n(t) = N_0 - N = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda t})$$

A partir de la relation  $N = N_0 e^{-\lambda t}$  et si l'on multiplie les deux membres par  $\lambda$ , on obtient une formule de même type mais en terme d'activité :  $A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$

avec :  $A_0$  = activité du père à l'instant initial  $t = 0$ .

$A$  = activité du père à l'instant  $t$ .

Pour un temps  $t = T$  :  $A(T) = \frac{A_0}{2}$

Pour un temps  $t = nT$  :  $A(nT) = \frac{A_0}{2^n}$



**EXEMPLES**

**QCM D'ENTRAÎNEMENT.**

**(Voir solution à la fin des énoncés).**

**Chaque QCM comporte une ou plusieurs réponses exactes.**

**QCM 1 :** Quelle(s) proposition(s) est(sont) exacte(s) ?

- A. Le proton est une particule instable à l'état libre.
- B. Le neutron est une particule instable à l'état libre.
- C. Les protons sont constitués de trois quarks identiques.
- D. Les neutrons sont constitués de trois quarks identiques.
- E. La radioactivité  $\beta^-$  est due à l'instabilité des noyaux pourvus d'un excès de neutrons

**QCM 2 :** La masse d'un électron est :

- A. Egale à celle du noyau d'hydrogène.
- B. Egale environ à 1/2000 masse de l'atome d'hydrogène.
- C. Toujours inférieure à celle du photon.
- D. Supérieure à celle du positon.
- E. Inférieure à celle du neutron.

**QCM 3 :** Quelle(s) proposition(s) est(sont) exacte(s) ?

- A. 1 uma = 1/12 de la masse d'un atome de carbone 12.
- B. 1 uma = 931,5 eV.
- C. La radioactivité est inversement proportionnelle à la période radioactive.
- D. 1 eV = 1,6. 10<sup>-19</sup> J.
- E. 1 J = 1,6. 10<sup>-19</sup> eV.

**QCM 4 :** Quelle(s) proposition(s) est(sont) exacte(s) ?

- A. L'énergie rayonnée par le Soleil provient de réactions de fission.
- B. L'énergie rayonnée par le Soleil provient de réactions de fusion.
- C. Pour pouvoir effectuer une réaction de fusion, les deux noyaux doivent posséder une énergie cinétique importante.
- D. L'énergie libérée par nucléon est plus importante dans une réaction de fission que dans une réaction de fusion.
- E. L'énergie libérée par nucléon est plus importante dans une réaction de fusion que dans une réaction de fission.

**QCM 5 :** Quelle(s) proposition(s) est(sont) exacte(s) ?

- A. Les noyaux de  ${}_{53}^{123}I$ ,  ${}_{53}^{127}I$ ,  ${}_{53}^{131}I$  et  ${}_{53}^{132}I$  sont des isomères.
- B. Les noyaux de  ${}_{19}^{30}K$  et  ${}_{20}^{40}Ca$  sont des isotopes.
- C. Les noyaux de  ${}_{27}^{60}Co$ ,  ${}_{28}^{61}Ni$ ,  ${}_{29}^{62}Cu$  et  ${}_{30}^{63}Zn$  sont des isotones.
- D. Les noyaux de  ${}_{18}^{40}Ar$ ,  ${}_{19}^{40}K$  et  ${}_{20}^{40}Ca$  sont des isobares.
- E. Les noyaux de  ${}_{94}^{243}Pu$ ,  ${}_{95}^{243}Am$  et  ${}_{96}^{243}Cm$  sont des isomères.

**QCM 6 :** Deux atomes isobares ont :

- A. Le même nombre de neutrons.
- B. Le même nombre d'électrons.
- C. Le même nombre de protons.
- D. Le même nombre de masse.
- E. Les mêmes propriétés chimiques.

**QCM 7 :** Un noyau  ${}^A_Z X$  se désintègre pour donner un noyau  ${}^A_{Z-1} Y$  :

- A. C'est une réaction isomérique.
- B. C'est une réaction isobarique.
- C. C'est obligatoirement une émission  $\beta^-$ .
- D. C'est obligatoirement une émission  $\beta^+$ .
- E. Plusieurs particules différentes sont émises en même temps.

**QCM 8 :** La transformation radioactive par capture électronique :

- A. Est une transformation isomérique.
- B. Est due à un excès de protons.
- C. Est due à un excès de neutrons.
- D. Produit des rayons X.
- E. Produit des  $\beta^+$ .

**QCM 9 :** Une transformation radioactive isobarique :

- A. Peut donner des rayons  $\alpha$ .
- B. Peut donner des rayons  $\beta^-$ .
- C. Peut donner des rayons  $\gamma$ .
- D. Conserve les propriétés chimiques du noyau.
- E. Modifie le nombre de masse du noyau.

**QCM 10 :** Quel(s) est(sont) le(s) rayonnement(s) de particules «directement ionisant(s)» ?

- A.  $\beta^-$ .
- B. Ondes radio.
- C. Rayon X.
- D.  $\gamma$ .
- E.  $\alpha$ .

**QCM 11 :** Quel(s) est(sont) le(s) rayonnement(s) de particules légères chargées ?

- A.  $\gamma$ .
- B.  $\alpha$ .
- C. Rayon X.
- D.  $\beta^-$ .
- E. Neutrons.

**QCM 12 :** Un rayon gamma est caractérisé par :

- A. Masse = 0 , charge = 0.
- B. Masse = 0 , charge = +1.
- C. Masse = 0,511 MeV , charge = 0.
- D. Masse = 0,511 MeV , charge = +1.
- E. Masse = 0,511 MeV , charge = -1.

**QCM 13 :** Pour réaliser une scintigraphie rénale, on injecte à un patient une molécule marquée au technétium 99m, dont la période est de 6 heures. Quelle masse de technétium doit-on utiliser pour injecter une activité de 2 mCi ?

- A. 0,105 pg.
- B. 1,37  $\mu$ g.
- C. 0,38 ng.
- D. 0,38  $\mu$ g.
- E.  $1,02 \cdot 10^{-20}$  g.

**QCM 14 :** Dire qu'un élément radioactif a une activité de 74 MBq, cela signifie qu'il se désintègre :

- A.  $74 \cdot 10^9$  noyaux/s.
- B.  $74 \cdot 10^6$  noyaux/mn.
- C.  $44,4 \cdot 10^9$  noyaux/mn.
- D.  $4,44 \cdot 10^6$  noyaux/h.
- E.  $2,66 \cdot 10^{11}$  noyaux/h.

**QCM 15 :** La masse du noyau  ${}^{60}_{27}\text{Co}$  est égale à 59,918961 uma. Calculer l'énergie moyenne de liaison par nucléon du noyau :

On rappelle que  $m_n = 1,008664$  uma et  $m_p = 1,007276$  uma.

- A. 524,8 MeV.
- B. 8,75 MeV.
- C. 7,89 MeV.
- D. 19,43 MeV.
- E. 8,16 MeV.

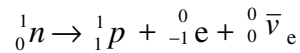


**REPONSES**  
**QCM D'ENTRAINEMENT.**

**QCM 1 :** B E

udd : pour le neutron.

uud : pour le proton.



**QCM 2 :** B E

positon  ${}^0_{+1}e$

proton  ${}^1_1H = {}^1_1p$

**QCM 3 :** A C D

$$A = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2}{T} \cdot N \cdot \frac{m}{A}$$

**QCM 4 :** B C E

La réaction de fusion :  ${}^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + {}^0_{+1}e + {}^0_0\nu_e$

**QCM 5 :** C D

- Isomères : Mêmes A, Z et N.

- Isotopes : Même Z.

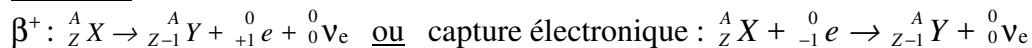
- Isotones : Même N.

- Isobares : Même A.

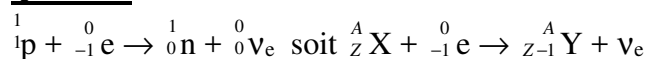
**QCM 6 :** D

C'est le nombre Z qui donne le nom de l'élément et détermine ses propriétés chimiques.

**QCM 7 :** B E



**QCM 8 :** B D



Dans le cas de la capture électronique, à la suite de la réaction de capture par le noyau d'un électron de la couche K, il y a réarrangement électronique avec émission de fluorescence X, d'où apparition d'un spectre de raies (spectre discontinu) correspondant aux transitions parfaitement définies entre les niveaux énergétiques quantifiés des électrons.

**QCM 9 :** B C

Même nombre de masse A pour les noyaux père et fils.

**QCM 10 :** A E

Les rayonnements sont directement ionisants quand ils sont constitués de particules chargées.

**QCM 11 :** D

**QCM 12 :** A

Rayonnement (REM)  $\gamma$  : pas de masse, ni de charge.



**QCM 13 : C**

A partir de la relation :  $A = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2}{T} \cdot \frac{m}{A} \Leftrightarrow m = \frac{A \cdot T \cdot A}{\ln 2} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 6 \cdot 3600 \cdot 99}{\ln 2 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}$   
Donc  $m = 3,8 \cdot 10^{-10} \text{ g} = 0,38 \text{ ng}$ .

**QCM 14 : E**

$A = 74 \cdot 10^6 \text{ Bq} = 74 \cdot 10^6 \text{ désintégrations/s} = 74 \cdot 10^6 \cdot 60 \text{ désintégrations/mn}$   
 $= 74 \cdot 10^6 \cdot 3600 \text{ désintégrations/h}$

**QCM 15 : B**

On sait que le défaut de masse au niveau du noyau  $\Delta m = (N \cdot m_n + Z \cdot m_p) - m_{\text{noyau}}$

$\Delta m = (33 m_n + 27 m_p) - m_{\text{noyau}} = 0,563403 \text{ uma}$

$E_{\text{liaison}} = \Delta m \cdot c^2 = 524,81 \text{ MeV}$

Donc  $\frac{E_{\text{liaison}}}{A} = 8,75 \text{ MeV/nucléon}$

