



Module M3 : ATOMISTIQUE

Filières :

SCIENCE DE LA MATIERE

CHIMIE (SMC1)

Chapitre I :

Structure de la matière

Pr. Nouredine EL AOUAD

I. Introduction Générale :

Selon l'encyclopédie en ligne Wikipédia la **chimie** est une Science de la nature qui étudie la **matière** et ses transformations, et plus précisément :

1. les éléments chimiques à l'état libre, **atomes** >> **liaisons chimiques** >> **composés moléculaires**.

2. les **processus** qui changent ou modifient l'identité de ces particules, dénommées **réactions chimiques**, transformation, interaction, etc.

3. les **mécanismes réactionnels** intervenant dans les processus chimiques ou les équilibres physiques.

4. les **phénomènes fondamentaux** observables en rapport avec les forces de la nature qui jouent un rôle chimique.

- La **théorie atomique** est une théorie sur la nature de la matière selon laquelle la matière est composée d'unités discrètes appelées atomes qui a supplanté les anciennes croyances que la matière peut être décomposée en divisions infiniment petites : La notion de grain de matière « **atomos** » a été introduite par Démocrite. Mais pendant 2000 ans aucune expérience n'est venue étayer cette hypothèse.

- **Avant Jésus** : le mot grec « Atomos » = *insécable* = Indivisible : particule, constituant essentiel de la matière caractéristique d'un élément chimique.

L'Atome >> Particule indestructible = جسيم غير قابل للتدمير !!

- **Dorénavant** : l'atome, Constituant fondamental de la matière est lui-même constitué des particules fondamentales Protons, Neutrons et Electrons.

L'atome >> Particule destructible ou divisible

- Un corps constitué d'atomes de même espèce est appelé corps simple ou **élément chimique**.

- C'est l'avènement de la chimie quantitative à la fin du XVIII^{ème} siècle qui va constituer un tournant décisif (Boyle, Lavoisier). Mais, l'avènement majeur pour la discontinuité de la matière on le doit au chimiste Proust J. lorsqu'on 1799 il énonça la loi qui porte son nom : « les éléments se combinent suivant des proportions définies pour donner un composé ».

- Dalton J. (1766-1844) a montré que la loi de Lavoisier peut être expliquée si on admet que la matière est formée d'atomes.

- Perrin J. (1870-1942 ; Prix Nobel 1926) proposa un modèle planétaire de l'atome :

- Masse fortement chargée positive = soleil
- Une multitude de corpuscules négatifs = planètes.
- Thomson J. (1856-1940) ; Prix Nobel 1906) propose que l'atome serait une boule d'électricité positive à l'intérieur de laquelle gravitent les électrons.
- Rutherford E. (1871-1937 ; Prix Nobel 1908, ancien étudiant de J. Thomson), par le biais d'une expérience qui est restée célèbre, prouva que l'atome présente une structure lacunaire et que la charge positive est concentrée dans un petit volume. Il adopta alors le modèle de Perrin.

Définition :

- L'**atomistique** est l'étude descriptive de l'atome et permet la description de la répartition des électrons
- Etude des conséquences de cette répartition sur les propriétés physico-chimiques des éléments

L'atomistique consiste en l'étude de la composition de l'atome ainsi que de leurs propriétés.

II. Constituants de l'atome :

La matière est formée à partir de particules élémentaires : **les atomes**.

L'atome est une entité de matière infiniment petite, il est formé de protons et de neutrons (eux-mêmes formés de particules, à priori fondamentales, qui sont appelées les quarks) qui sont localisés dans le noyau de l'atome et d'électrons (particules élémentaires) qui gravitent autour du noyau.

Particule	Proton (p)	Neutron (n)	Electron (e-)
Découverte	1919 Rutherford	1932 Chadwick	1897 Thomson
Masse	$1,672623 \cdot 10^{-27}$ Kg 1,007276 uma	$1,674229 \cdot 10^{-27}$ Kg 1,008665 uma	$9,109389 \cdot 10^{-31}$ Kg $5,5 \cdot 10^{-4}$ uma
Charge	$1,602 \cdot 10^{-19}$ C +e	0	$1,602 \cdot 10^{-19}$ C -e

Il est clair que la quasi-totalité (99,9 %) de la masse d'un atome est concentrée dans son noyau. Le nombre de neutron est noté N et celui des protons est noté Z. La charge du noyau vaut donc +Ze. Les électrons dans un atome neutre sont au nombre Z.

Un atome est symbolisé par



X est l'élément considéré

Z est le nombre de proton = Numéro atomique

A est le nombre de masse (Z + nombre de neutron N)

q est le nombre de charge

III- Quelques définitions

a- Elément :

Un élément est l'ensemble des atomes ayant le même numéro atomique. Le type d'élément est donc caractérisé par Z.

Exemple : ${}^6_3\text{Li}$, ${}^7_3\text{Li}$.

b- Nucléon :

Du fait que les protons et les neutrons sont des particules du noyau on les appelle nucléons.

c- Nucléide ou nuclide :

Toute espèce de noyau est caractérisée par le couple (A, Z) on l'appelle nucléide ou nuclide.

Exemples : ${}^{56}_{26}\text{Fe}^{2+}$ ${}^{56}_{26}\text{Fe}^{3+}$ (même nucléide)

${}^{35}_{17}\text{Cl}$ ${}^{35}_{17}\text{Cl}^-$ (même nuclide)

${}^{35}_{17}\text{Cl}$ et ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ (deux nucléides différents).

Remarque : il existe des milliers de nucléides ; 331 existent dans la nature et les autres sont obtenus artificiellement.

d- Isotopes :

Ce sont des atomes de même numéro atomique Z et de nombre de masse A différent. Un élément peut avoir un ou plusieurs isotopes.

Exemples : ${}^1_1\text{H}$ (hydrogène) ; ${}^2_1\text{H}$ (deutérium D) ; ${}^3_1\text{H}$ (tritium T).

${}^6_3\text{Li}$ ${}^7_3\text{Li}$ ${}^7_3\text{Li}^+$
 ${}^{16}_8\text{O}$ ${}^{17}_8\text{O}$ ${}^{18}_8\text{O}$

Remarque : L'écriture ${}_Z^A X^q$ a été généralisée à toutes les particules de l'atome ;

proton : ${}_1^1 p$ neutron : ${}_0^1 n$ électron : ${}_{-1}^0 e$.

e. Isotones :

Des éléments qui ont le même nombre de neutrons (Z différents, A différents, N identiques)

Exemple : le Carbone 13 et l'Azote 14

f. Isobares :

Deux éléments qui possèdent le même nombre de nucléons (Z différents, A identiques)

Exemple : Carbone 14 et l'azote 14


g. La mole et Nombre d'Avogadro (constante d'Avogadro)

La mole est le nombre d'atomes de carbone contenus dans 12 g de Carbone 12. Ce nombre vaut $6,022 \cdot 10^{23}$. Ce nombre noté N_A est appelé nombre d'Avogadro.

N. B. : En effet, il s'agit d'une constante son unité est mol^{-1} ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

h. Unité de masse atomique (symbole uma)

La masse de l'atome est de l'ordre de 10^{-26} kg (masse très faible) d'où l'introduction de l'unité de masse atomique (u.m.a) pour éviter ces puissances négatives. Un atome de Carbone 12 est 12 fois plus lourd qu'un atome ${}^1\text{H}$, on lui a attribué la masse 12 u.m.a.. Or la masse d'une mole de ${}^{12}\text{C}$ c'est-

à-dire $6,022 \cdot 10^{23}$ atomes de C est 12 g  la masse d'un atome de ${}^{12}\text{C}$ est $\frac{12}{N_A}$ g.

Donc $1 \text{ u.m.a.} = \frac{1}{12} \times$ la masse d'un atome de ${}^{12}\text{C}$.

$$1 \text{ u.m.a.} = \frac{1}{12} \times \frac{12}{N_A} = \frac{1}{N_A} \text{ g} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g.}$$

I. La masse Molaire :

La masse d'une mole d'atomes d'un élément est appelée la masse molaire de l'atome.

J. La masse atomique :

La masse atomique est égale à la somme des masses des constituants de l'atome :

$$m_{\text{atome}} = Zm_e + Zm_p + Nm_n \text{ (en kg).}$$

K. Abondance naturelle

Pour un élément donné il peut exister plusieurs isotopes. L'abondance naturelle d'un isotope est le pourcentage en nombre d'atomes de cet isotope. Cette abondance est équivalente à la fraction molaire de cet isotope.

Tableau : Abondance Naturelle de quelques éléments

Élément	Masse atomique	Nucléide	Masse exacte	Abondance relative (%)
H	1,00797	¹ H	1,00783	99,985
		² H ou ² D	2,01410	0,0151
C	12,01115	¹² C	12,00000	98,90
		¹³ C	13,00336	1,10
N	14,0067	¹⁴ N	14,0031	99,63
		¹⁵ N	15,0001	0,37
O	15,9994	¹⁶ O	15,9949	99,76
		¹⁷ O	16,9991	0,04
		¹⁸ O	17,9992	0,20
P	30,974	³¹ P	30,974	100
S	32,064	³² S	31,9721	95,03
		³³ S	32,9715	0,75
		³⁴ S	33,9679	4,22
		³⁶ S	35,9671	0,02

Remarque :

- Si le nombre de protons d'un noyau détermine son élément chimique, le nombre de neutrons détermine son isotope.
- Dans le cas d'un élément naturel constitué de plusieurs isotopes, la masse est la moyenne pondérée des masses des différents isotopes.

$$M_{\text{moy}}({}_Z X) = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times M_i)}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_i$ sont les abondances (en %) des différents isotopes de l'élément

$M_1, M_2, M_3, \dots, M_i$ leurs masses respectives.

Exemple : le chlore se trouve sous deux isotopes $^{35}_{17}\text{Cl}$ et $^{37}_{17}\text{Cl}$ de masses atomiques respectives de 34,96 u.m.a. et 36,96 u.m.a. L'abondance naturelle du chlore $^{35}_{17}\text{Cl}$ est de 75,4% et celle du $^{37}_{17}\text{Cl}$ est de 24,6% (en nombre d'atomes). La masse atomique du chlore naturel est :

$$M = \frac{34,96 \times 75,4 + 36,96 \times 24,6}{100} = 35,45 \text{uma}$$

• La masse atomique (en u.m.a.), la masse molaire atomique (en g/mol) et la masse atomique relative (masse d'un atome sur l'unité de masse atomique) s'expriment par le même nombre.

IV- Energie de cohésion du noyau

La question qui peut se poser est comment des particules de même charge (protons) forment-elles un ensemble condensé au lieu de s'écarter par répulsion électrostatique ?

L'expérience montre que la masse de l'atome est toujours plus faible que la somme des masses des particules qui le constituent. Ce défaut de masse correspond à une énergie de stabilisation qui rend l'atome plus stable que ses particules séparées. En effet, d'après la relation d'Einstein $E = mC^2$ il y a équivalence entre masse et énergie.

Exemple : Calculer la masse théorique du cuivre $^{63}_{29}\text{Cu}$ en u.m.a. et comparer la avec la valeur expérimentale qui est de 62,9296 u.m.a. Conclure.

$$M_{\text{Cu}} = N.m_n + Z.m_p + Z.m_e \approx N.m_n + Z.m_p = (34 \times 1,008665 + 29 \times 1,007276) = 63,5056 \text{ uma.}$$

Conclusion : $M_{\text{Cu}}(\text{exp}) < M_{\text{Cu}}(\text{cal})$. La perte de masse correspond à une stabilisation. $\Delta m = 63,5056 - 62,9296 = 0,576 \text{ u.m.a.}$

$$\text{Soit } \Delta m = 0,576 / 6,022 \cdot 10^{23} = 9,5649 \cdot 10^{-25} \text{ g} = 9,5649 \cdot 10^{-28} \text{ Kg.}$$

$$\text{Or } E = \Delta m \cdot C^2 = 9,5649 \cdot 10^{-28} \times (3 \cdot 10^8)^2 = 8,608 \cdot 10^{-11} \text{ J.}$$

$$\text{Or } 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \text{ et } 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$E = 8,608 \cdot 10^{-11} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 5,38 \cdot 10^8 \text{ eV} = 538 \text{ MeV/atome.}$$

N. B. : L'énergie correspondante à 1 u.m.a. ($1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$) est :

$$1,66 \cdot 10^{-27} \times (3 \cdot 10^8)^2 = 1,494 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 933,75 \cdot 10^6 \text{ eV} \approx 933,8 \text{ MeV.}$$

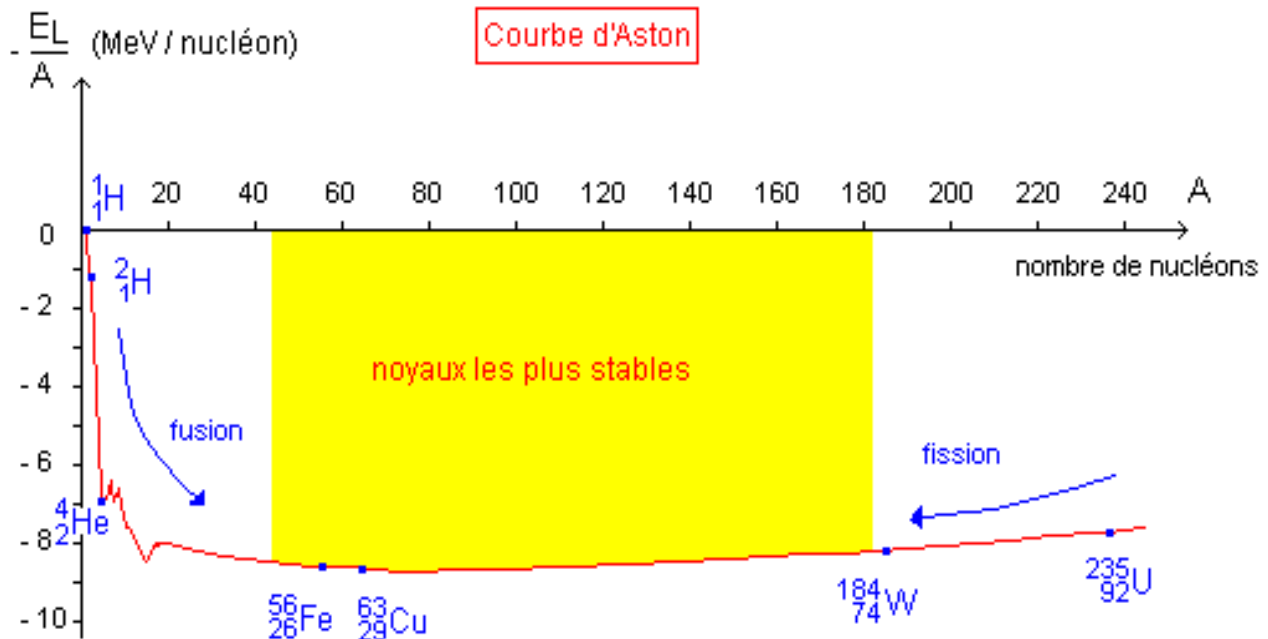
En pratique l'énergie de cohésion du noyau augmente avec le nombre de nucléons. Pour comparer la stabilité des nucléides on rapporte l'énergie de cohésion à un nucléon (E/A).

Exemple: ^3_1H $E/A = 2,71 \text{ MeV/nucleon}$

$${}^4_2\text{He} \quad E/A = 7,13 \text{ MeV/nucleon}$$

$${}^{238}_{92}\text{U} \quad E/A = 7,57 \text{ MeV/nucléon.}$$

Remarque : Un noyau sera d'autant plus stable que son énergie de cohésion sera grande (en valeur absolue).



Energie de cohésion par nucléon

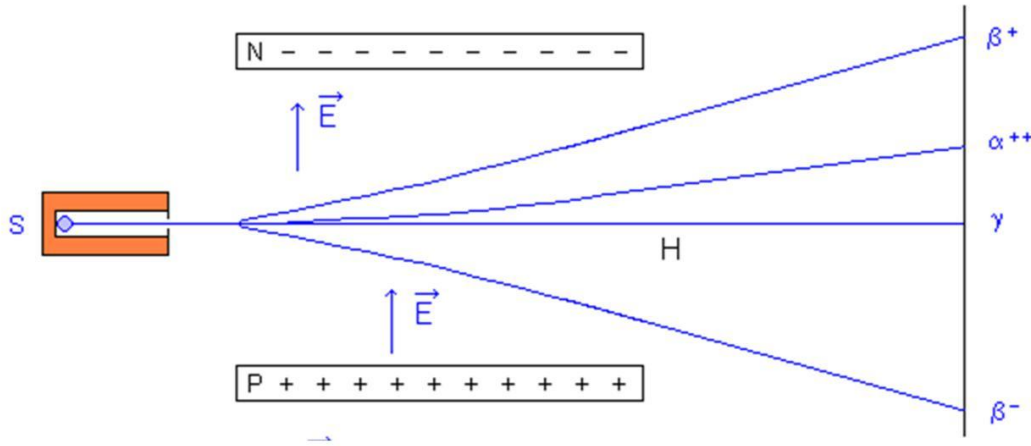
V. Réactions nucléaires

V. 1. Définition de la radioactivité :

La **radioactivité** est un phénomène physique de stabilisation de noyaux atomiques instables, au cours duquel, à tout instant, une fraction fixe et caractéristique des noyaux présents se transforme spontanément en d'autres atomes : **désintégration**.

Cette désintégration se produit en émettant simultanément des particules matérielles (électron, noyau d'hélium, neutron...) et de l'énergie (photons et énergie cinétique).

V. 2. Les quatre principaux types de rayonnement radioactif



1. Les particules α^{++} sont des noyaux d'hélium positif (${}^4_2\text{He}^{++}$) notés ${}^4_2\text{He}$

Ces particules de masse importante, formées de deux protons et de deux neutrons, sont déviées légèrement par un champ magnétique ou électrique.

Leur pouvoir de pénétration est faible : Quelques centimètres d'air ou une mince feuille de papier d'aluminium suffisent à les arrêter.

2. Les particules β^- sont des électrons, notés ${}^0_{-1}\text{e}$.

Ces particules de faible masse sont facilement déviées par un champ électrique ou magnétique, dans le sens opposé de la déviation des particules alpha.

Leur grande vitesse leur procure un pouvoir de pénétration supérieur à celui des particules alpha : Il faut plusieurs mètres d'air ou quelques centimètres d'aluminium pour les arrêter.

3. Les particules β^+ sont des positrons (ou positons), encore appelés antiélectrons (antiparticules des électrons), notés ${}^0_{+1}\text{e}$.

Ces positons ont la même masse que les électrons mais une charge électrique opposée.

Leur pouvoir de pénétration propre est très faible car ils s'annihilent lorsqu'ils rencontrent un électron en donnant naissance à un rayonnement γ .

4. Les rayons γ sont des rayonnements électromagnétiques de grande énergie et de faible longueur d'onde : $E = h \times c / \lambda$

Leur pouvoir de pénétration est très élevé : ils peuvent s'enfoncer dans plus de trente centimètres de plomb. Ces rayons γ sont très dangereux pour l'homme.

Tableau récapitulatif : Les caractéristiques particules radioactives

Emission	Nature	Symbole	Masse (uma)	Charge (e)
Particule α	Noyau d'Hélium ${}^4_2\text{He}^{++}$	${}^4_2\text{He}$	4,0015	+ 2 e
Particule β^-	Electron ${}^0_{-1}\text{e}$	${}^0_{-1}\text{e}$	0,000549	- e
Particule β^+	Positon ${}^0_{+1}\text{e}^+$	${}^0_{+1}\text{e}$	0,000549	+ e
Rayon γ	Rayonnement électromagnétique	γ	<u>0</u>	<u>0</u>

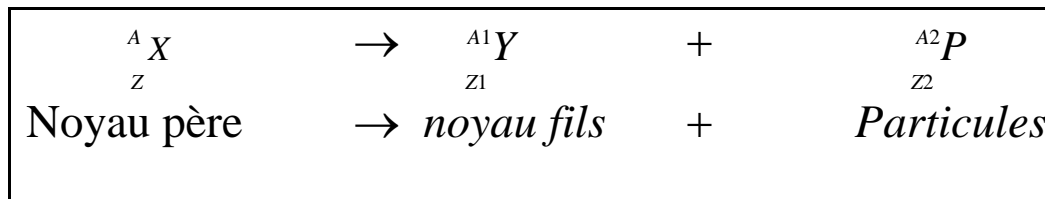
Avec : $e = 1,600217733 \times 10^{-19} \text{ C}$; l'unité de masse atomique $1 \text{ u.m.a.} = 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$

On peut distinguer deux types de radioactivité : La radioactivité naturelle et la radioactivité artificielle

V. 2. Désintégrations radioactives

a. Définition

La radioactivité ou la désintégration radioactive est la transformation spontanée d'un noyau atomique instable en un autre noyau atomique plus stable. Le premier est appelé noyau père et le second noyau fils. Cette transformation s'accompagne de l'émission d'une particule variante selon le type de désintégration et d'un rayonnement électromagnétique.



- La radioactivité est une réaction dite nucléaire car elle concerne le noyau de l'atome par opposition aux réactions chimiques qui ne concernent que le cortège électronique sans modifier le noyau.

b. Propriétés

- La désintégration radioactive est aléatoire, on ne peut pas prévoir la date de la désintégration d'un noyau.
- Elle est spontanée, elle se produit sans aucune intervention extérieure.
- Elle ne dépend ni de son environnement chimique, de l'espèce chimique qui contient le noyau radioactif, ni des conditions extérieures (pression ou température).

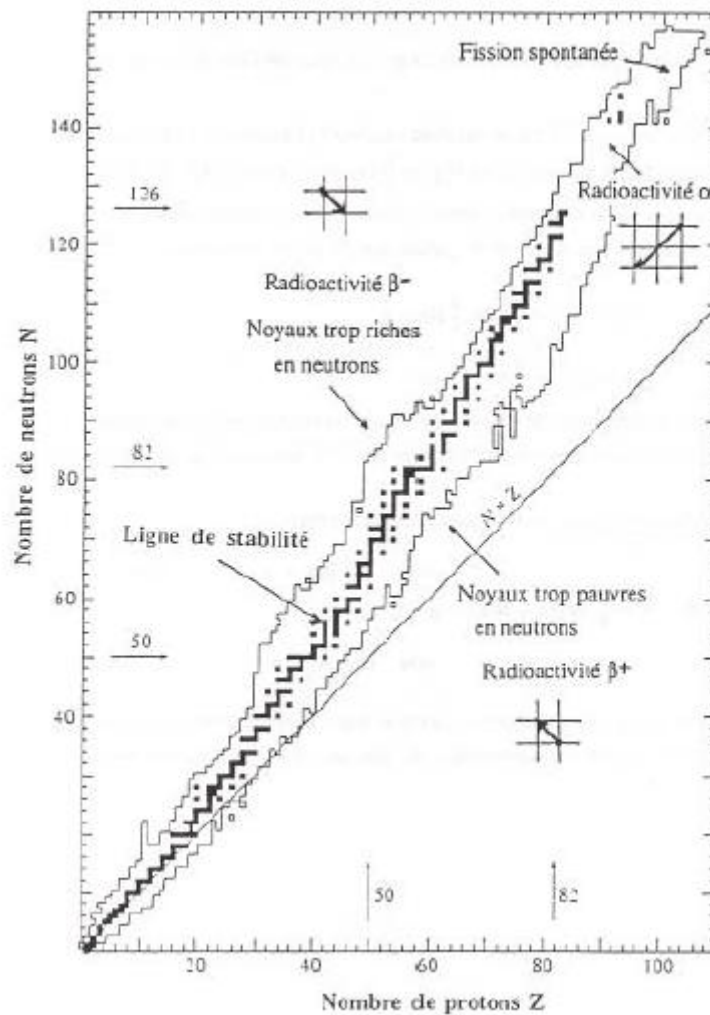
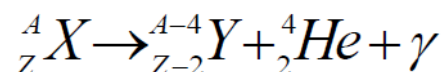


Figure : Déplacement sur la carte des noyaux lors des désintégrations radioactives

d. Radioactivité α (concerne les noyaux lourds $A > 180$)

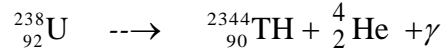
Le noyau père ${}^A_Z X$ émet un noyau d'hélium ${}^4_2 \text{He}$.

Le noyau fils ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ se rapproche de la vallée de stabilité.



Exemple : L'Uranium 238 (noyau père), le Thorium 234 (noyau fils)

:

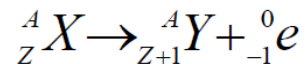


e. Radioactivité β^- : $N > Z$

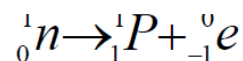
Le noyau père ${}_Z^A X$, situé au-dessous de la zone de stabilité, possède trop de **neutrons** par rapport au nombre de protons ($N > Z$). Il subit une transmutation en transformant un neutron en proton, avec émission d'un électron ${}_{-1}^0 e$.

Le noyau fils ${}_{Z+1} X$ se rapproche de la vallée de stabilité.

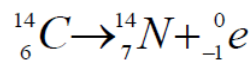
L'équation de cette réaction nucléaire spontanée s'écrit :



L'émission d'un électron ${}_{-1}^0 e$ doit être précédée de la transformation suivante :



Exemple:

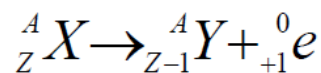


f. Radioactivité β^+ : $Z > N$

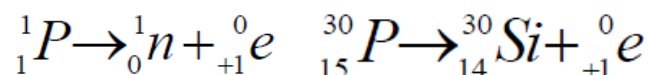
Le noyau père ${}_Z^A X$, situé au-dessus de la zone de stabilité, possède trop de **protons** par rapport au nombre de neutrons. Il subit une **transmutation** en transformant un proton en neutron, avec émission d'un positon ${}_{+1}^0 e$.

Le noyau fils ${}_{Z-1} X$ se rapproche de la vallée de stabilité.

L'équation de cette réaction nucléaire s'écrit :

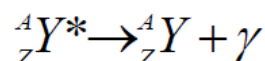


L'émission d'un positon ${}_{+1}^0 e$ doit être précédée de la transformation suivante :



g. Emission de rayonnement γ

Le noyau fils engendré par radioactivité α , β^- , β^+ se trouve le plus souvent dans un état excité, noté ${}_Z^A Y^*$. Il se désexcite en donnant un noyau stable ${}_Z^A Y$ et un rayonnement γ :



Exemple : La production du noyau fils excité ${}^A_Z N^*$. ${}^{14}_7 N^*$ est suivie de l'émission du rayonnement γ , avec désexcitation du noyau fils : ${}^{14}C \rightarrow {}^{14}N^* + {}^0_{-1}e$ et ${}^{14}N^* \rightarrow {}^{14}N + \gamma$

V. 3. Lois de conservation : Lois de Soddy

Lors d'une désintégration nucléaire, il y a conservation du nombre de charge Z et du nombre de nucléons A.

- Loi de conservation du nombre de nucléons** : la somme des nombres de nucléons de la particule émise et du noyau fils est égale au nombre de nucléons A du noyau père : $A = A_1 + A_2$
- Loi de conservation de la charge électrique** : la somme des nombres de charges de la particule émise et du noyau fils est égale au nombre de charge Z du noyau père : $Z = Z_1 + Z_2$

V. 4. Evolution temporelle d'une population de noyaux

La probabilité que présente un noyau radioactif de se désintégrer pendant l'unité de temps s'appelle la constante radioactive λ . Elle s'exprime comme l'inverse d'un temps, en s^{-1} .

Ce caractère probabiliste fait qu'un ne connaît jamais le moment où un noyau donné va se désintégrer. Par contre, on peut statistiquement prédire le comportement d'un grand nombre de noyaux.

V. 4. 1 Loi de décroissance

Dans un échantillon de matière radioactive constitué de noyaux radioactifs d'une espèce donnée, le nombre de noyaux va décroître au cours du temps, et sera noté $N(t)$. Si on appelle N_0 le nombre de noyaux initialement présents.

	${}^A_Z X$	\rightarrow	${}^{A1}_{Z1} Y$	$+ {}^{A2}_{Z2} P$
A t=0	N_0		0	
A t > 0	$N(t)=N_0-x$		x	

L'expérience montre que la vitesse de désintégration est d'ordre 1

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \times (N_0 - x) \xrightarrow{\text{Par intégration}} \text{Log} \frac{(N_0 - x)}{N_0} = -\lambda \times t$$

On a alors la relation : $N(t) = N_0 \times e^{-\lambda t} = N_0 \times e^{-t/\tau}$

✓ λ est la constante radioactive (en s^{-1}). Elle caractérise un radionucléide.

✓ $\tau = 1/\lambda$ est la constante de temps (en s).

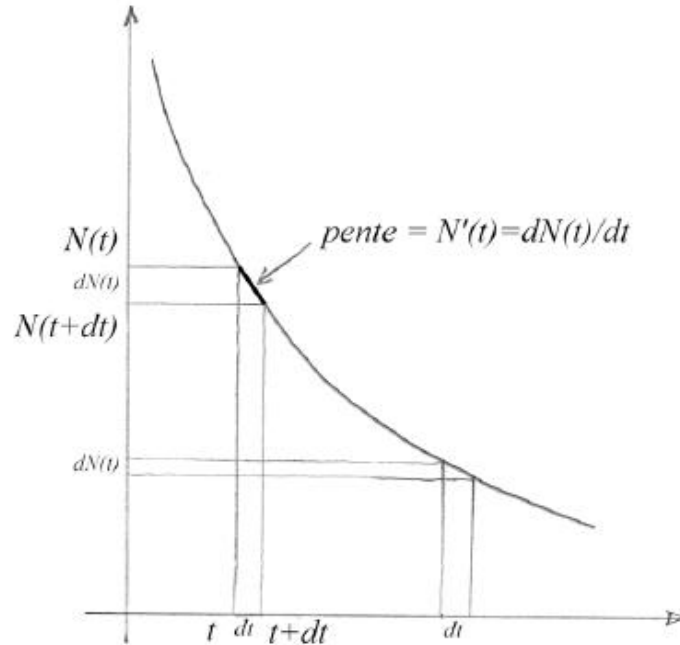


Figure : Illustration de la variation du nombre de noyaux $N(t)$ sur un tout petit intervalle de temps dt .

V. 4. 2. Période radioactive ou Demi-vie $t_{1/2}$

C'est la durée au bout de laquelle la moitié du nombre de noyaux radioactifs initialement présents dans un échantillon s'est désintégrée :

$$X = N_0 / 2 \implies N(t_{1/2}) = N_0 / 2$$

$$\text{Log } N(t_{1/2}) / N_0 = -\lambda \times t_{1/2} = \text{Log } N_0 / 2 \times N_0$$

$$\underline{\underline{T_{1/2} = \text{Log } 2 / \lambda = \tau_x \text{ Log } 2}}$$

V. 4. 3. Activité d'une Source

On appelle activité, notée $A(t)$, le nombre de désintégrations par unité de temps. On calcule l'activité en multipliant la probabilité qu'a un noyau de se désintégrer par unité de temps (λ) par le nombre de noyaux :

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

L'unité : La période s'exprime en Becquerel (**Bq**), qui correspond à une désintégration par seconde.

On trouve une autre unité historique, le Curie (**Ci**) qui correspond à $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq.

V. 5. Fission et fusion nucléaires

V. 5. 1. Réactions nucléaires provoquées :

Définition : Une réaction nucléaire est dite provoquée lorsqu'un noyau cible est frappé par un noyau projectile et donne naissance à de nouveaux noyaux.

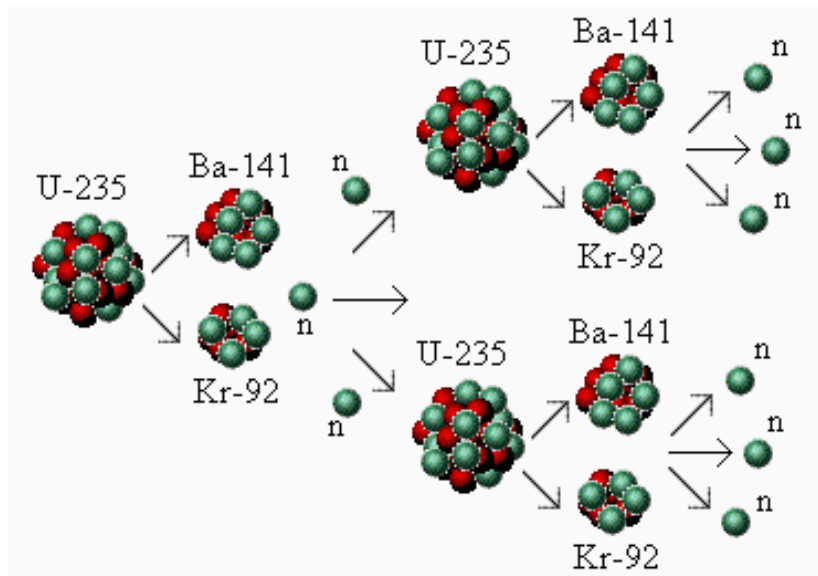
Les lois de conservation de Soddy sont vérifiées.

Exemple : Expérience de Rutherford en 1919 : le bombardement de noyaux d'azote avec des particules α provoque la formation de noyaux d'oxygène et de protons.

V. 5. 2 La fission nucléaire : réaction en chaîne :

Définition : La fission est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle un noyau lourd "fissile" donne naissance à deux noyaux plus légers.

Exemple : Plusieurs réactions de fission de l'uranium 235 sont possibles

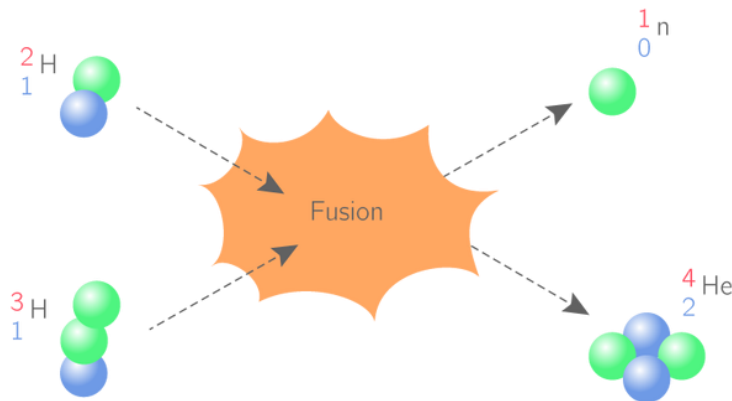
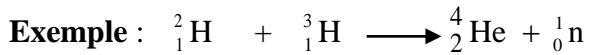


Les neutrons émis lors de la fission peuvent provoquer la fission d'autres noyaux. Si le nombre de neutrons émis lors de chaque fission est supérieur à 1, une réaction en chaîne peut se produire et devenir rapidement incontrôlable (bombe à fission : bombe "A" d'Hiroshima).

Dans une centrale nucléaire, la réaction en chaîne est contrôlée par des barres mobiles qui plongent dans le réacteur entre les barres de "combustible" pour absorber une partie des neutrons émis. On peut ainsi contrôler la quantité d'énergie produite par les réactions de fission.

V. 5. 3 La fusion nucléaire :

Définition : La fusion nucléaire est une réunion de deux noyaux légers pour former un noyau plus lourd.



L'énergie libérée au cours d'une fusion est considérable.

La fusion n'est possible que si les deux noyaux possèdent une grande énergie cinétique pour vaincre les forces de répulsion électriques.

La fusion se produit naturellement dans les étoiles. Dans une bombe thermonucléaire (appelée bombe H), la fusion nucléaire est incontrôlée et explosive. Elle est très intéressante pour produire de l'énergie, mais on ne la maîtrise pas suffisamment pour produire de l'électricité