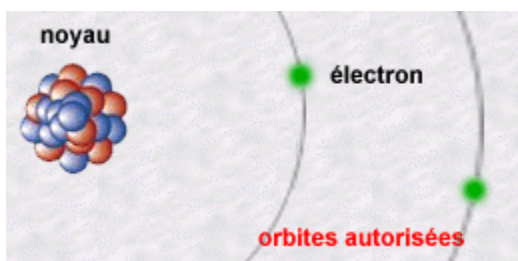
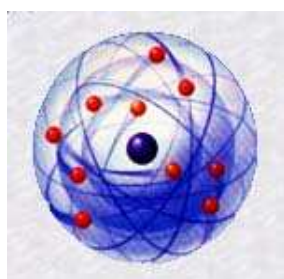


## CHAPITRE I : STRUCTURE DE L'ATOME ET SES CONSTITUANTS

### I.1 – CONSTITUTION DE L'ATOME

#### I.1.1 : Introduction.

La matière qui nous entoure est constituée d'**atomes**. L'atome du grec atomos = indivisible, insécable ; quantité de matière infiniment petite. L'atome est constitué de particules élémentaires : le **noyau** et un **cortège électronique**.



#### Le noyau

Le noyau est composé de **neutrons** et de **protons**, ce sont des nucléons. Les protons (notés **p**) et les neutrons (notés **n**) ont sensiblement la même masse, mais ils ont une charge différente. Le noyau étant composé de neutrons et de protons, il est donc chargé positivement. La charge électrique d'un proton est appelée charge élémentaire, on la note **e**. Avec :  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

La charge du noyau est égal au nombre de protons **Z** multiplié par la charge du proton, **e**.

$$(Q_{\text{noyau}} = Z \times e)$$

#### Le nuage électronique

Le nuage électronique est composé d'**électrons**, notés **e<sup>-</sup>**. L'électron est chargé négativement, de charge **-e** =  $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ . La masse de l'électron est : **m<sub>e</sub><sup>-</sup>** =  $9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$ , soit environ 2000 fois plus faible que celle des protons et des neutrons, elle sera souvent négligée.

La charge d'un nuage électronique est égale au nombre d'é **Z** multiplié par la charge de l'électron **(-e)**

$$Q_{\text{nuage}} = Z \times (-e)$$

Ici, on a utilisé les masses des particules au repos (C'est-à-dire à vitesse nulle). Lorsque ces particules se déplacent, elles peuvent acquérir des vitesses très élevées. D'où la masse :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad \text{Avec : } \begin{cases} m : \text{masse de la particule à la vitesse } V \\ M_0 : \text{masse de la particule à la vitesse } V = 0 \\ V : \text{vitesse de la particule en mouvement} \\ C : \text{célérité de la lumière} = 2.997924581 \cdot 10^8 \text{ m/s} \end{cases}$$

### I.1.2 : Représentation du noyau.

Le noyau le plus simple est celui de l'hydrogène. Il contient 1 seul proton. Le nombre de protons et neutrons caractérisent un type d'atomes que l'on définit par les valeurs :

$Z$  : appelé : numéro atomique ( le nombre de protons )

$A$  : appelé : nombre de masse (  $A = Z + N$  ) avec  $N$  : nombre de neutrons.

La formule  ${}_Z^AX$  : représente un nucléide de symbole chimique  $X$ .

Exemple : la formule  ${}_{6}^{12}C$  : définit le nucléide de carbone, dont le noyau est constitué de 6 protons et  $12 - 6 = 6$  neutrons.

### I.1.3 : Quantité de matière.

C'est une grandeur fondamentale pour le chimiste. L'unité de cette grandeur chimique est la mole ( *mole* ).

Une mole correspond à une collection de  $N$  entités chimiques identiques (atomes, ions, molécule, etc ).  $N_A$  : appelé nombre d'Avogadro :  $N_A = 6.0220943 \cdot 10^{23}$

### I.1.4 : Unité de masse atomique.

Les masses des particules élémentaires  $e$ ,  $p$ , et  $n$ , ne sont pas du tout à notre échelle. On utilise donc une unité de masse différente au kg mais mieux adaptée aux grandeurs mesurées c'est ( l'unité de masse atomique ou : u.m.a )

Avec :  $1 \text{ u.m.a} = \frac{1}{12}$  de la masse du carbone  ${}_{6}^{12}C$

$$1 \text{ u.m.a} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{12} \cdot \frac{1}{N_A} = \frac{10^{-3}}{6.0220943 \cdot 10^{23}} \quad \text{Soit : } 1 \text{ u.m.a} = 1.66056 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1.66056 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

<i>Particules</i>	<i>Proton</i>	<i>Neutron</i>	<i>Électron</i>
<i>Charge (coulomb)</i>	$1.6021892 \cdot 10^{-19}$	0	$-1.6021892 \cdot 10^{-19}$
<i>Masse (kg)</i>	$1.6726485 \cdot 10^{-27}$	$1.6749543 \cdot 10^{-27}$	$9.109534 \cdot 10^{-31}$
<i>Masse ( u.m.a)</i>	1.007276	1.008665	0.000549

### I.1.5 : nouvelles particules.

#### a- Les quarks

Enoncée pour la 1<sup>ère</sup> fois en 1964 par MURRAY GELL6MANN, détectés expérimentalement en 1975.

Les quarks sont des particules élémentaires appartenant au fermions ( spin demi-entier  $1/2$ ).

Les quarks du modèle standard peuvent être regroupés par génération.

<i>Génération.</i>	<i>Particules de charge fractionnaire – 1/3</i>	<i>Particule de charge fractionnaire + 2/3</i>
<i>1<sup>ère</sup> génération</i>	<i>Down</i>	<i>Up</i>
<i>2<sup>ème</sup> génération</i>	<i>Strange</i>	<i>Charmed</i>
<i>3<sup>ème</sup> génération</i>	<i>Botton</i>	<i>Top</i>

1<sup>ère</sup> génération : constitue la matière ordinaire.

2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> générations sont plus lourds et forment des particules toutes instables et se désintègrent en quarks de première génération.

Les quarks sont les composants des nucléons. Il existe deux types dans la **matière ordinaire (c.à.d. de première génération)**.

**Quarks up** (symbole = u) charge électrique  $Q = +2/3$

**Quarks down** (symbole = d) charge électrique  $Q = -1/3$

Les charges sont fractionnées car les nucléons sont toujours formés de 3 quarks.

<i>nucléons</i>	<i>quarks</i>	<i>Charges</i>
<i>proton</i>	$u + u + d$	$+\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$
<i>neutron</i>	$u + d + d$	$+\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$



$$\phi_{quarks} < 10^{-18} \text{ m}$$

$$\phi_{nucleons} = 410^{-15} \text{ m (FERMI)}$$

Les quarks sont reliés entre eux par une force appelée (**interaction forte**). La même qui lie les nucléons

Les quarks sont des particules sociables (ils se tiennent en paquet de 2 ou 3) pour former des particules appelées **hardons\***

Propriétés physiques	Quarks Up (u)	Quark Down (d)
Masse	1,5 à 4,0 $\text{MeV} \cdot \text{c}^{-2}$	4 à 8 $\text{MeV} \cdot \text{c}^{-2}$
Charge électrique	+2/3 e : +1,07 $\times 10^{-19} \text{ C}$	-1/3 e : -5,34 $\times 10^{-20} \text{ C}$

## b- les neutrinos.

Les neutrinos sont des particules élémentaires du modèle standard de la physique des particules appartenant aux **leptons\*** (fermions de spin  $1/2$ )

Leur existence à été postulée pour la première fois par WOLFGANG PAULI (1930) pour satisfaire le **principe de la conservation de l'énergie lors de la désintégration  $\beta$** .

En 1933, FERMI leur donne le nom de neutrinos en l'incorporant dans la théorie de l'interaction faible.

Les neutrinos sont des particules élémentaires stables, de charge électrique nulle et n'interagissent uniquement que par **interaction faible**.

Dans le modèle standard minimal, les neutrinos n'ont pas de masse. Toutefois, des expériences récentes (1998) ont montré que celle-ci bien que très petites, est différente de zéro.

Il existe 3 types de neutrinos (1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération).

- Le neutrinos électronique ou neutron-électron (1956)  
Symbole  $\nu_e$ , masse :  $m_{\nu_e} < 2.5 \text{ ev} \cdot \text{c}^{-2}$
- Les neutrinos muonique ou neutrino-muon (1990).  
Symbole  $\nu_\mu$ , masse :  $m_{\nu_\mu} < 170 \text{ kev} \cdot \text{c}^{-2}$
- Les neutrinos tauique ou neutrino-tau (2000)  
Symbole  $\nu_\tau$ , masse :  $m_{\nu_\tau} < 18 \text{ Mev} \cdot \text{c}^{-2}$

### Définitions :

**Fermions** : sont décrit par le modèle standard comme étant des particules de matière ayant un spin (moment cinétique intrinsèque) demi entier ou  $\frac{1}{2}$ .

**Hardons** : constituent des particules formées de quarks et antiquarks.

On distingue :

- Les baryons : formés de 3 quarks. (Exemples protons et neutrons).
- Les Mésons : formés d'un quark et d'un antiquark.

**Leptons** : particules élémentaires non soumis à l'interaction forte (c.à.d celle qui assure la liaison des noyaux d'atomes) et ne connaissent que l'interaction faible et l'interaction électromagnétique (pour les particules portant une charge électrique).

### *Les neutrinos, d'où viennent-ils ?*

- De l'espace interstellaire (les supernovas, les étoiles, le soleil)  
Le soleil émet environ  $700 \cdot 10^{12}$  neutrinos/s.m<sup>2</sup>
- Substances radioactives contenues dans la croûte et le manteau terrestre  
Environ  $20 \cdot 10^6$  neutrinos/s
- Notre corps, par la désintégration de l'isotope radioactif du potassium contenu dans nos os (Environ 4000/s pour une personne de 60 kg)
- Centrales nucléaires etc. ....

## I.2 : LES ISOTOPES.

### I.2.1 : Définition.

Nucléides qui possèdent le même numéro atomique  $Z$  mais différents par le nombre de masse  $A$

Exemples :  ${}^1_1\text{H}$     ${}^2_1\text{H}$     ${}^3_1\text{H}$     ${}^{235}_{92}\text{U}$     ${}^{238}_{92}\text{U}$

Les noyaux de ces isotopes ont la même charge mais différents par leurs masses.

- Isotopes naturels (H et U).
- Isotopes artificiels (produit par des réactions nucléaires contrôlées ou non contrôlées).

Ces isotopes peuvent être stables ou instables. Les isotopes instables se décomposent plus ou moins vite en donnant d'autres noyaux et en libérant de l'énergie. Ce phénomène est appelé radioactivité naturelle ou artificielle.

### I.2.2 : Composition isotopique :

Lorsqu'un élément possède plusieurs isotopes, le pourcentage de ces derniers constitue sa **composition isotopique**.

EX : Hydrogène.

	%	Masse (u.m.a)
${}^1_1\text{H}$ (Hydrogène)	99,985	1,007825
${}^2_1\text{H}$ (Deutérium)	0.015	2,01402
${}^3_1\text{H}$ (tritium)	$< = 10^{-5}$	3,015496

- Le tritérium est un isotope radioactif  $\beta$ .

Les deux isotopes  ${}^1_1\text{H}$  et  ${}^2_1\text{H}$  sont stables (Hydrogène naturel).

$$M_{H_{((naturel))}} = \frac{99,985 \cdot 1,007825 + 0,015 \cdot 2,01402}{100} = 1,007976 \text{ g/mole}$$

### I.3 : CARACTERE LACUNAIRE DE L'ATOME. ( Mis en évidence par RUTHERFORD en 1897)

Comparons le rayon du noyau de l'élément hydrogène avec le rayon de l'atome d'hydrogène ( noyau + électron).

$$\text{On a : } R_{\text{noy.hyd}} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ nm ( nm = nanomètre. avec } 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} \\ R_{\text{at.hyd}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ nm} = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Or le noyau d'hydrogène comporte 1 proton :

$$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad \rightarrow \quad \frac{m_p}{m_e} = 0,183615 \cdot 10^4 \quad \text{ou : } m_p = 1836 m_e$$

Comme le noyau d'hydrogène comporte 1 proton, on a :

$$m_{\text{noy}_{\text{hyd}}} = m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$



Ce qui donne la masse du *noyau* d'hydrogène est environ **1836** fois celle de *l'électron*

Un calcul simple, montre que le noyau est extrêmement dense comparé à la matière que nous connaissons.

Nous assimilerons le noyau à une sphère. Son volume est donc :

$$v_n = \frac{4}{3} \pi (r_n)^3 = \frac{4}{3} \pi (5 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-9})^3 = 5,48 \cdot 10^{-46} \text{ m}^3$$

Pour le noyau d'hydrogène  ${}^1_1\text{H}$ , la masse volumique est :

$$\rho_{n_H} = \frac{m}{v} = \frac{1,6726485 \cdot 10^{-27}}{5,48 \cdot 10^{-46}} = 3,196 \cdot 10^{18} \text{ kg/m}^3 = 3,196 \cdot 10^9 \text{ t/cm}^3$$

Cette valeur comparée à la masse volumique d'un métal très dense comme le platine,  $\rho = 21 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  Montre clairement, l'énorme densité du noyau par rapport à celle de la matière qui nous entoure.

Un tel état de la matière n'existe pas sur notre planète, cependant on le trouve dans les étoiles massives (étoiles à neutrons).

Ce calcul, illustre le résultat de l'expérience de RUTHERFORD (1911) qui montre que la matière à une structure lacunaire (immense vide peuplé par des zones extrêmement denses qui sont les noyaux. D'où la quasi-totalité de la matière est concentrée dans le noyau

### **I.4. ENERGIES DE LIAISON ET DE COHESION DES NOYAUX.**

#### **I.4.1 : Energie de liaison des nucléons.**

C'est l'énergie nécessaire à la formation d'un noyau quelconque à partir des particules.

On considère la réaction suivante  $Z + N \rightarrow {}^A_ZX + E$  Si  $E$  est négative, alors le noyau est stable.

Bilan de masses.

$$\Delta m = m_2 - m_1$$

avec :  $m_1$  : masses du proton + neutron

$m_2$  : masse du noyau = masse de l'atome – masse de l'électron

$$m_1 = Z m_p + (A-Z) m_n$$

$$m_2 = m_{\text{noy}} = (m_{\text{at}} - Z m_e) \rightarrow \Delta m = m_2 - m_1 = (m_{\text{at}} - Z m_e) - (Z m_p + (A-Z) m_n)$$

$$\Delta m = m_{\text{at}} - \{ Z (m_p + m_e) + (A - Z) m_n \}$$

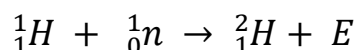
Formation ( création d'un noyau ),  $\Delta m < 0$

$\Delta m$  = dissipation de masse = défaut de masse.

Généralisation :

*La formation d'un atome nécessite une énergie négative (l'énergie d'un atome est inférieure à la somme de celles de ces constituants indépendants)*

Exemple 1 : Energie de formation d'un noyau de deutérium  ${}^2_1\text{H}$



$$m_1 = m_p + m_n = 1,007276 + 1,008665 = 2,015941 \text{ uma}$$

$$m_2 = \text{masse atome } {}^2_1\text{H} - \text{masse } e = 2,014102 - 0,000549 = 2,013553 \text{ uma}$$

$$\Delta m = m_2 - m_1 = 2,013553 - 2,015941 = - 0,002381 \text{ uma}$$

$\Delta m < 0$  ,  $\Delta E < 0 \rightarrow \{ \text{perte de masse le noyau de deutérium est plus stable que l'ensemble des deux nucléons isolés} \}$

La réaction de formation du noyau de deutérium se fait avec libération d'énergie qui peut être reliée à la perte de masse par l'équation D'EINSTEIN.

$$E = \Delta m \cdot C^2$$

$E$  : en joule (j)

$\Delta m$  : en kg

Pour le deutérium :

$$\Delta E = \Delta m \cdot C^2 = 0,002387 \cdot 1,66056 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2$$



$$\Delta E = 2,53 \cdot 10^{-13} \text{ j} = 1,5791 \cdot 10^6 \text{ ev} = 1,5791 \text{ Mev}$$

Exemple 2. *Energie de liaison du noyau de fer  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ ,  $m_{\text{Fe}} = 55,935 \text{ uma}$ .*

Réaction. :  $Z + N \rightarrow {}^A_Z\text{Fe} + E$

Bilan de masse :

$$\Delta m = 55,935 - \{26 (1,007276 + 0,002381) + (56 - 26) \cdot 1,008665\}$$

$$\Delta m = -0,576 \text{ u.m.a}$$

Energie :  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = -0,576 \cdot 1,66056 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2$

$$\Delta E = -8,608 \cdot 10^{-11} \text{ joules} = -5,37265 \cdot 10^8 \text{ ev} = -537,265 \text{ Mev}$$

Remarque : En utilise souvent comme unité d'énergie l'électron volt ( ev) avec :

$$1 \text{ ev} = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ j}$$

Ou :  $1 \text{ Mev} = 10^6 \text{ ev} = 1,6021892 \cdot 10^{-13} \text{ j}$

Application : calculer l'équivalent d'énergie  $\Delta E$  de l'u.m.a en Mev.

$$1 \text{ u.m.a} = 1,66056 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 1,66056 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 14,945 \cdot 10^{-11} \text{ j}$$

En Mév on a :

$$\Delta E = 14,945 \cdot 10^{-11} / 1,6021892 \cdot 10^{-13} = 932,78 \sim 933 \text{ Mév}$$

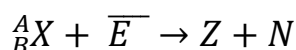
$$\Delta m \rightarrow \Delta E$$

$$1 \text{ uma} \rightarrow 933 \text{ Mév}$$

#### I.4.2 : Energie de cohésion dans le noyau :

C'est l'énergie nécessaire à la destruction d'un noyau.

Soit la réaction :



Avec  $\overline{E}$  : Energie positive (  $\overline{E} = -E$  )

Bilan de masse :

$$\Delta m = \{ Zm_p + (A - Z)m_n \} - m_{\text{noy.at } \frac{A}{Z}X} = \{ Zm_p + (A - Z)m_n \} - \{ m_{\text{at.}\frac{A}{Z}X} - Z \cdot m_e \}$$

$$\Delta m = \{ Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n \} - m_{\text{at } \frac{A}{Z}X}$$

La destruction d'un noyau nécessite une énergie positive. Cette énergie peut être utilisée (en partie) lors d'une réaction nucléaire qui transforme le noyau.

Energie de cohésion du noyau = - énergie de liaison noyau.

Exemple. Deutérium.  $\bar{E} = -E = +2.53 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

I.4.3 : Equivalence masse – Energie.

Relation d'EINSTEIN

En 1905, en élaborant la théorie de la relativité restreinte, EINSTEIN postule que la masse est une forme que peut prendre l'énergie.

Postulat d'Einstein.

Un système de masse  $m$  possède lorsqu'il est au repos, une énergie

$$E = m \cdot c^2 \quad \text{avec :} \begin{cases} E : \text{énergie du système en joule} \\ m : \text{masse du système en kg} \\ C : \text{vitesse de la lumière dans le vide} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \end{cases}$$

Si le système est animé d'une vitesse  $V$  d'où une énergie cinétique  $\frac{1}{2} \cdot m_0 V^2$

L'énergie totale du système est donc composée de l'énergie au repos et de l'énergie cinétique.

$$E = m_0 c^2 + \frac{1}{2} \cdot m_0 V^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \cdot c^2 = m \cdot c^2$$

Conséquence.

Si le système (au repos) échange de l'énergie avec le milieu extérieur (par rayonnement ou par transfert thermique par exemple) sa variation d'énergie  $\Delta E$  et sa variation de masse  $\Delta m$  sont liées par la relation :

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

**Remarque.**

- Si  $\Delta m < 0$  alors  $\Delta E < 0$  le système fournit de l'énergie au milieu extérieur.
- Si  $\Delta m > 0$  alors  $\Delta E > 0$  le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur.

**I.4.4 : Energie de liaison par nucléon.**

**Définition** : C'est le quotient de son énergie de liaison par le nombre de nucléons.

On la note :  $E_a$

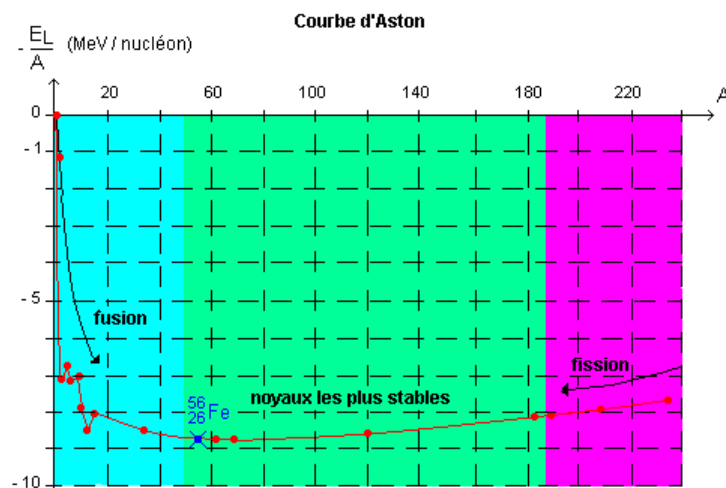
$$E_a = \frac{E}{A} \quad \text{Avec : } \begin{cases} E_a : \text{Energie de liaison par nucléon en Mev/nucléon} \\ E : \text{Energie de liaison du noyau en Mev} \\ A : \text{Nombre de nucléons du noyau.} \end{cases}$$

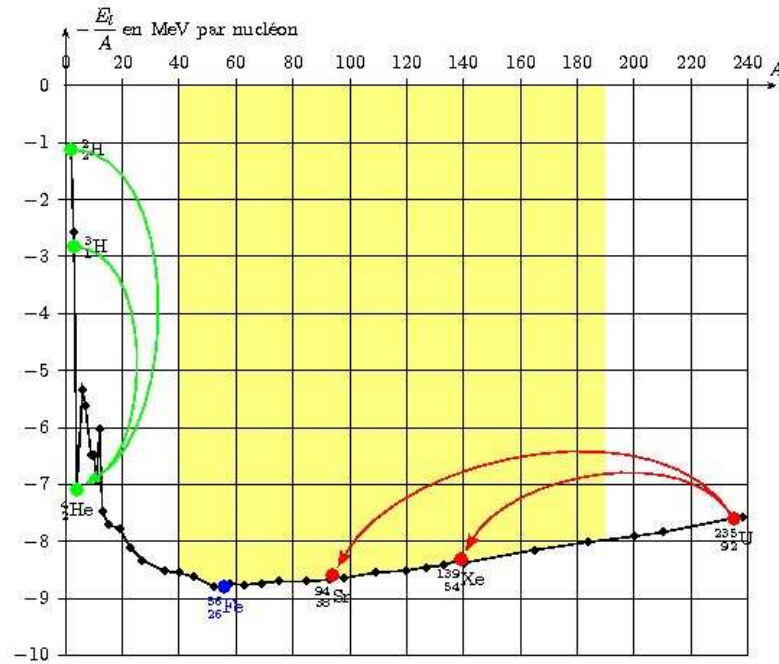
**Remarque :**

$E_a$  : permet de comparer la stabilité des noyaux entre eux. Les noyaux dont l'énergie de liaison par nucléon est la plus grande sont les plus stables.

**Courbe d'ASTON.**

Courbe  $E_a = f(A)$  permet de visualiser facilement les noyaux les plus stables puisque ceux-ci se trouvent en bas du graphe.





### Exploitation de la courbe d'Aston : domaines de la fission et de la fusion

Pour  $50 < A < 80$ , la courbe présente un minimum très aplati qui correspond donc aux noyaux les plus stables. Les extrémités de la courbe correspondent aux noyaux les plus instables :

- un noyau très lourd ( $A > 100$ ), bombardé par une particule adéquate peut se casser en deux noyaux plus légers : c'est la **fission nucléaire** ;
- un noyau léger peut donner un noyau plus lourd (possédant une énergie de liaison par nucléon plus grande) : c'est la **fusion nucléaire**.

**Remarque** : Voir paragraphe radioactivité artificielle (fission et fusion nucléaires)

**Fin du chapitre**