

# Le Noyau :

## I. Introduction

*Rappel* : Les rayons X sont émis par le cortège électronique de l'atome alors que la radioactivité se passe au niveau du noyau.

**Noyau = nuclide / nucléide**

### A. Historique de l'atome et du noyau

♥ *Antiquité Grecque, vers 400 av JC :*

La **notion de noyau** apparaît avec **Démocrite**. Il pense que la matière est composée de **particules élémentaires invisibles et indivisible**, qu'il nomme **atomes**. Pour Démocrite, les atomes sont éternels et immuables (on est loin de la notion de radioactivité).

Cette théorie **s'oppose à celle d'Aristote**, qui pense que la matière est composée de **4 éléments** (le feu, la terre, l'eau et l'air). Comme Aristote est plus influent que Démocrite, c'est sa théorie qui a beaucoup de succès, et on abandonne un peu celle de Démocrite.

♥ *1805 :*

L'hypothèse de Démocrite est reprise par **John Dalton**, qui pense que l'atome se limite à une **sphère dure pleine de matière**. Les réactions chimiques sont alors expliquées comme les assemblages et les réarrangements d'atomes et de molécules.

♥ *1897 :*

**Thomson découvre les composants de l'atome**, il met en évidence la présence **d'électrons**, et montre que ces particules sont **chargées négativement** avec une **masse très faible** (=1% de la masse de l'atome).

Globalement l'atome est neutre, donc si les électrons sont négatifs il faut compenser avec une charge positive. Thomson est à l'origine du modèle « pudding au raisins » :

« Les électrons sont répartis dans l'atome comme des petits raisins secs dans un pudding. La pâte du pudding a globalement une charge positive, et on trouve au milieu ces petits électrons qui ont une charge négative »

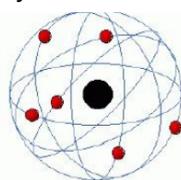
♥ *20<sup>ème</sup> siècle :*

Les modèles de l'atome évoluent, on voit apparaître deux zones distinctes :

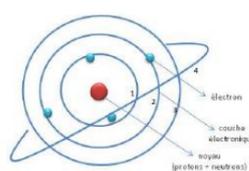
- Le **noyau**, qui contient les charges positives
- Le **nuage électronique**, qui contient les charges négatives

Différents modèles vont ensuite cohabiter, avec notamment le **modèle de Rutherford** (les électrons sont répartis dans un nuage autour du noyau) et le **modèle de Bohr** (avec la notion de couches électroniques).

Ces deux modèles vont être mis à défaut par des observations expérimentales, et d'autres modèles verront le jour (et continuent d'évoluer aujourd'hui).



Le « nuage d'électron » du modèle de Rutherford



Le modèle « en couches » de Bohr

Le tutorat est gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.



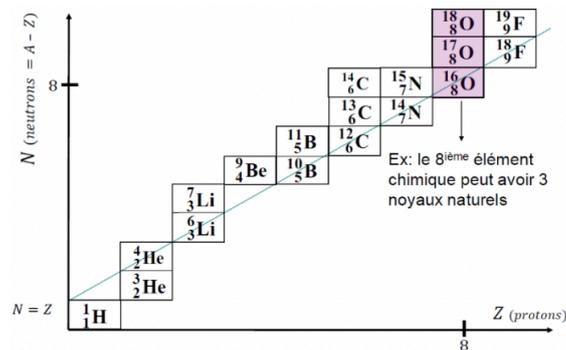
C'est aussi la **classification périodique des éléments** (ou classification de Mendeleïev). Elle est beaucoup plus utilisée en chimie qu'en physique nucléaire (et est donc dite « chimique »).

Les éléments y sont classés par Z croissant, donc en fonction du nombre de protons. Ce nombre est indissociable de l'élément chimique.

Dans cette classification, dans une même colonne on va retrouver les **éléments ayant des propriétés similaires**, on parle de **famille d'éléments**.

♥ En fonction du  $N (=A - Z)$ , la **table des nuclides** :

Cette classification est bien plus utilisée en physique nucléaire : elle tient compte du **nombre de neutrons** et permet de caractériser les différentes formes du noyau en fonction de Z et N.



On place en abscisses le nombre de **protons Z** et en ordonnées le nombre de neutrons **N**.

La table des **nucléides permet de répertorier tous les noyaux** : naturels comme radioactifs !

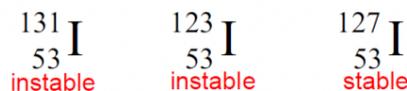
Exemple : l'oxygène : il est composé de  $Z = 8$  protons, et il existe sous trois formes :

- $^{16}_8\text{O}$ , qui a 8 protons et 8 neutrons, qui est stable, donc le plus répandu.
- $^{17}_8\text{O}$ , qui a 8 protons mais 9 neutrons, et est instable.
- $^{18}_8\text{O}$ , qui a 8 protons et 10 neutrons, et est instable également.

On voit donc l'importance de faire apparaître le nombre de neutrons, afin de faire apparaître les variétés isotopiques d'un même élément.

Définitions :

♥ **Isotopes** : Deux nucléides avec le **même nombre de protons Z** mais des **A différents**. Ils sont indiscernables chimiquement.



♥ **Isobares** : Deux nucléides ayant le **même nombre de masse A** mais des **Z différents**. Ce sont donc deux éléments chimiques différents.



♥ **Isotones** : Deux nucléides qui ont le **même nombre de Neutrons (A et Z différents)**. Ce sont donc deux éléments chimiques différents.

Tut'souviens : Isotopes → même nombre de Protons

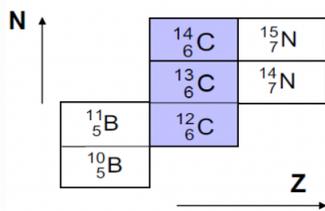
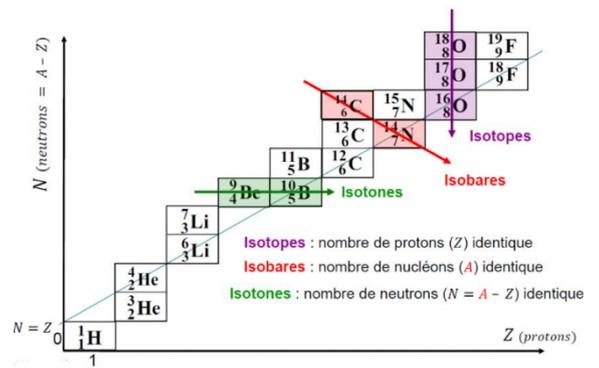
Isobares → même A

Isotones → même N

Ces éléments peuvent être retrouvés dans la table des nuclides : (graphique)

♥ Abondance isotopique :

Correspond à la **fraction molaire de chaque isotope**, exprimé en %. La majorité des éléments chimiques existent à l'état naturel sous la forme d'un mélange de plusieurs isotopes.



Exemple : le carbone :

$$^{12}_6\text{C} = 98,89 \%$$

$$^{13}_6\text{C} = 1,11 \%$$

$$^{14}_6\text{C} = \text{Traces}$$

La somme des abondances isotopiques d'un même élément chimique est égale à 100 % ++

### B. Les nucléons

**A = nombre de nucléons** = nombre de masse

A correspond à la **valeur entière la plus proche de la masse d'un atome**, puisque chaque nucléon a une masse d'à peu près 1u, et que la masse des électrons est négligeable.

Exemples :  $^{14}_7\text{N} \quad \mathcal{M}(14, 7) = 14,003 \text{ u}$

$^{16}_8\text{O} \quad \mathcal{M}(16, 8) = 15,994 \text{ u}$

Conventions d'écriture :  $\mathcal{M}$  = masse de l'atome ++

$M$  = masse du noyau ( $M = \mathcal{M}(A, Z) - Z m_e$ ) ++

$\Delta M$  = défaut de masse du noyau = énergie de liaison

Le défaut de masse correspond à l'**énergie de liaison**, grâce à l'équivalence masse-énergie :

$$E = mc^2 \text{ +++}$$

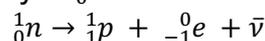
On a ainsi l'énergie de liaison :  $E_d = \Delta M \times c^2$

L'énergie est alors en Joules (J), la différence de masse en kg, et la célérité en m/s.

**1 u correspond à 931,5 MeV/c<sup>2</sup>**, on peut donc exprimer l'énergie de liaison en MeV grâce à une autre formule qui prend en compte la différence de masse en u.

On a deux types de nucléons :

- Le **proton**, qui existe à l'état libre (ex : dissociation acide) :  $^1_1\text{p}$  ou  $^1_1\text{H}$  ou  $\text{H}^+$
- Le **neutron**, instable en dehors du noyau  $^1_0\text{n}$ . Il se dissocie alors selon la réaction :



Avec un temps de demi-vie de 10 minutes environ. Il se désintègre en un proton, un électron et un antineutrino. Ça correspond à la radioactivité  $\beta^-$ .

On peut remarquer qu'il y a une légère différence de masse entre le neutron et le proton : le neutron est légèrement plus lourd (0,14%). Les stabilités de l'univers dépendent en grande partie sur cette différence de masse, elle est donc fondamentale.

Particule	Charge (e=1,6.10 <sup>-19</sup> C)	A	Masse (u)	Masse (Mev/c <sup>2</sup> )
$^1_1\text{p}$	+1	1	1,00728	938,28
$^1_0\text{n}$	0	1	1,00866	939,56
$^0_{-1}\text{e}$	-1	0	0,00055	0,511

**C. Les particules élémentaires**

Les particules élémentaires sont classées en 2 types et 3 familles (dans le modèle standard). On ne s'intéressera qu'à la première famille dite ordinaire (I), qui concerne la matière qui nous entoure (≠ rayonnements cosmiques, pour les familles II et III).

Dans la famille I, on retrouve donc 2 types de particules :

- Les **Quarks** : **u** (=up) et **d** (down). Ils sont prisonniers de particules plus grandes, et ne peuvent pas se déplacer librement.

Ces particules sont chargées :  $u = +\frac{2}{3}e, d = -\frac{1}{3}e$

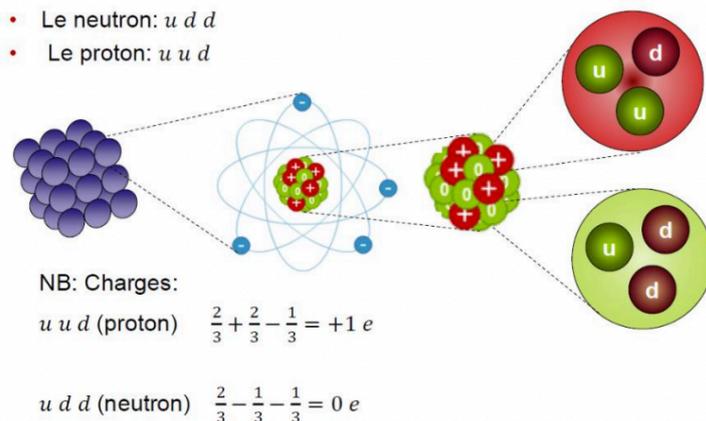
- Les **leptons** : **électron** et **neutrino de l'électrons** (=antineutrino), et peuvent se déplacer librement dans l'espace car ils ne sont pas confinés dans le noyau.

Toutes ces particules ont une **masse très faible** (particulièrement le neutrino).

On retrouve aussi des particules d'interaction, les **bosons** (dont on parlera plus tard).

Les nucléons ne sont pas les particules les plus élémentaires de la matière : ils sont eux-mêmes **composés de Quarks** :

	I	II	III	
mass.	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	1/2	1/2	1/2	0
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptons	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	~0.17 MeV/c <sup>2</sup>	~15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>
	0	1/2	1/2	0
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>
-1	1	1	±1	
1/2	1/2	1/2	1	
<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson	
				<b>Bosons de gauge</b>



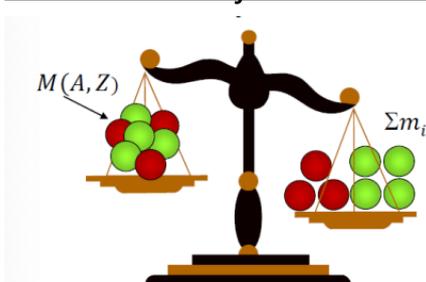
On voit que les **Quarks** expliquent la charge du proton et du neutron ++ :

- Proton : 2 quarks up et 1 quark down:  $u + u + d = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1e$
- Neutron : 1 quark up et 2 quarks down :  $u + d + d = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0e$

**III. Energie de liaison et défaut de masse :**

**A. Définition :**

La masse d'un noyau constitué est inférieure à la somme des masses de ses nucléons +++



$$M(A, Z) < \sum m_i$$

Il existe donc ce qu'on appelle un **défaut de masse ΔM**, qui correspond à la différence de masse des nucléons pris séparément et la masse de ce noyau :

$$\Delta M(A, Z) = \sum m_i - M(A, Z)$$

**Point important :**

Souvent en énoncé on donnera la **masse de l'atome** : ( $\mathcal{M}$ ) qui n'est pas la même chose que la masse du noyau ( $M$ ) !

$$M(A, Z) = \mathcal{M}(A, Z) - Zm_e$$

Donc il faut théoriquement adapter la formule du défaut de masse quand on nous donne la masse de l'atome dans l'énoncé (théoriquement car le prof considère que la masse des électrons ne changeait pas grand-chose, donc à l'examen on peut considérer que les valeurs sont suffisamment éloignées pour éviter les ambiguïtés selon que l'on tienne compte des électrons ou non).

$$\Delta M(A, Z) = \sum m_i - M(A, Z) = \sum m_i - (\mathcal{M}(A, Z) - Zm_e) = \sum m_i + Zm_e - M(A, Z)$$

(oui ça peut faire peur comme ça mais prenez la égalité par égalité et vous allez voir que c'est pas si compliqué)

(En gros en plus de la masse des protons et des neutrons ( $\sum m_i = Nm_n + Zm_p$ ) on **ajoute la masse des électrons** et on **soustrait la masse de l'atome** au lieu de celle du noyau)

Autre astuce : Dans l'énoncé vous pouvez avoir la masse de l'atome d'Hydrogène  $\frac{1}{2}H$ . Cet atome contient un proton et un électron, donc en multipliant  $M(\frac{1}{2}H)$  par  $Z$  on obtient déjà le  $Zm_p + Zm_e$  (=masse des protons + masse des électrons), il n'y a ensuite qu'à ajouter la masse des neutrons  $Nm_n$ .

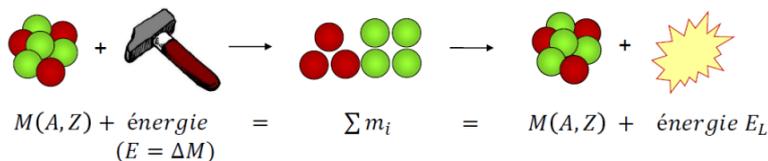
Cette différence de masse est liée à l'énergie de liaison entre les nucléons dans le noyau, donné par l'équivalence masse énergie d'Einstein :

$$E = \Delta mc^2$$

Avec  $E$  en Joules,  $\Delta m$  en kg et  $c = 3 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$

$$E_L = 931,5 \times \Delta M$$

Avec  $E$  en MeV, et  $\Delta M$  en u



Schématiquement, on voit qu'il faut apporter de l'énergie à un noyau pour séparer ses nucléons. Cette énergie correspond à l'**énergie de liaison**.

A l'inverse, quand on veut former un noyau (en assemblant les nucléons), celui-ci **aura une masse plus faible que la somme des masses des différents nucléons pris séparément**, et de l'énergie sera libérée (= énergie de liaison). Ce phénomène est à l'origine du nucléaire (que l'on verra plus tard).

## B. Généralisation des notions de défaut de masse et énergie de liaison

A tout groupe cohérent de particule correspond un défaut de masse, qui est lié à l'énergie de liaison des particules entre elles.

On a vu qu'au niveau du noyau, ce défaut de masse était lié à l'énergie de liaison des nucléons.

On peut aussi s'intéresser au **défaut de masse de l'atome** en entier :

La masse d'un atome constituée est inférieure à la somme des masses de son noyau et de ses électrons pris séparément

$$\mathcal{M}(A, Z) < M(A, Z) + Zm_e$$

On va alors calculer le défaut de masse de l'atome dans sa globalité :

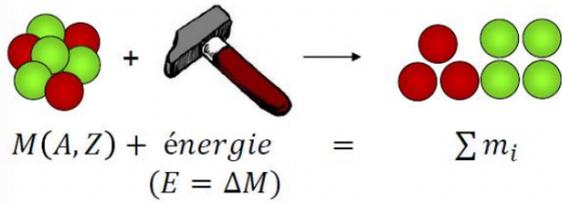
$$\Delta \mathcal{M}_e(A, Z) = M(A, Z) + Zm_e - \mathcal{M}(A, Z) = E_{le}$$

Ce défaut de masse à l'échelle de l'atome correspond donc à **l'énergie de liaison** entre le noyau et les électrons.

Ordre de grandeur des énergies de liaisons selon l'échelle :

	Noyau Nucléons	Atome Électrons	Molécules Atomes
Énergie de liaison	MeV	keV	eV (4 pour C – H)

C. Conclusion :

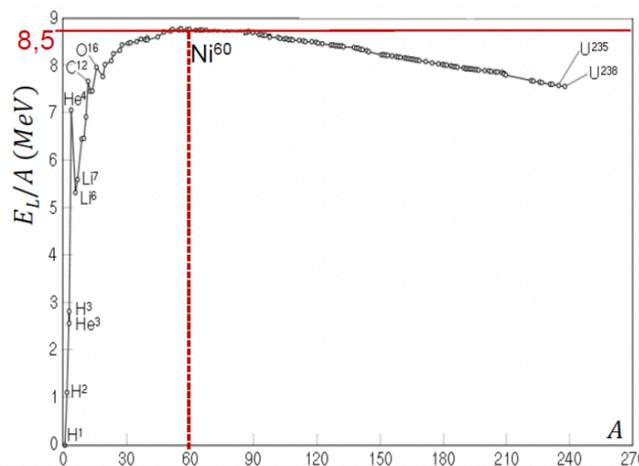


L'énergie de liaison des nucléons d'un noyau est l'énergie qu'il faut fournir pour le dissocier. L'énergie apportée est alors transformée en masse. L'énergie de liaison des nucléons est de l'ordre du MeV, celle des électrons du keV et celle des atomes entre eux de l'eV.

IV. Facteurs de stabilité nucléaire

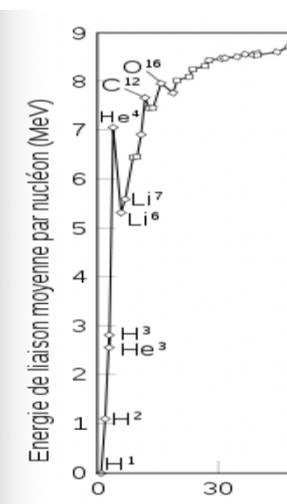
A. Energie de liaison par nucléons

Le premier facteur de stabilité est l'énergie de liaison des nucléons. Pour mieux comparer les différents noyaux entre eux, on va rapporter l'énergie de liaison globale du noyau au nombre de masse (=nombre de nucléons), on obtient alors l'énergie de liaison par nucléons,  $E_L/A$



On a en abscisse le nombre de masse et en ordonnée l'énergie de liaison par nucléon.

L'énergie de liaison varie entre 1 et 8,5 – 9 MeV. Plus cette énergie de liaison augmente, plus le noyau va être stable.



L'énergie de liaison va augmenter avec le A jusqu'à un maximum de 8,5 MeV pour le Ni<sup>60</sup> (le prof a actualisé son cours et a dit que le maximum se trouverai plutôt vers 8,8, mais il évitera les ambiguïtés à ce niveau-là !)

Ensuite, A va augmenter jusqu'au U<sup>238</sup> mais l'énergie de liaison va légèrement diminuer pour ces noyaux plus lourds.

Au niveau des noyaux les plus légers :

On remarque une absence de régularité de  $E_L/A$ , avec des pics correspondant à une augmentation ponctuelle de  $E_L/A$  pour certains noyaux, et donc une grande stabilité.

C'est dû à des combinaisons avec des « nombres magiques », c'est-à-dire lorsque Z ou A vaut 2, 8, 20, 50, 82...

Exemple :  $He^4$  est très stable car il est doublement magique, il est composé de deux protons et de deux neutrons.

Même chose pour le  $O^{16}$ , composé de 8 protons et 8 neutrons.

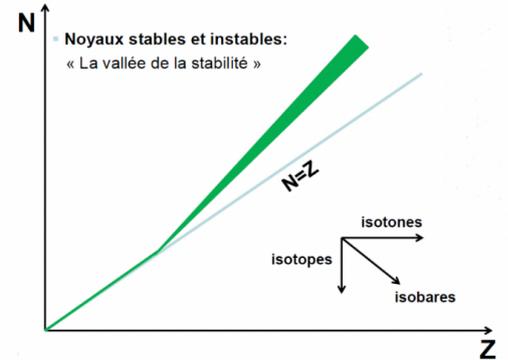
Le  $Pb^{208}$  est un noyau très lourd et pourtant particulièrement stable, car aussi doublement magique avec ses 82 protons et 126 neutrons.

**B. Nombre de neutrons :**

Un second facteur de stabilité du noyau est le **nombre de neutrons**. On peut voir sur ce graphique en abscisses le **nombre de charge Z** et en ordonnées le **nombre de neutrons N**.

Les noyaux stables sont représentés en vert, dans ce qu'on appelle la vallée de la stabilité.

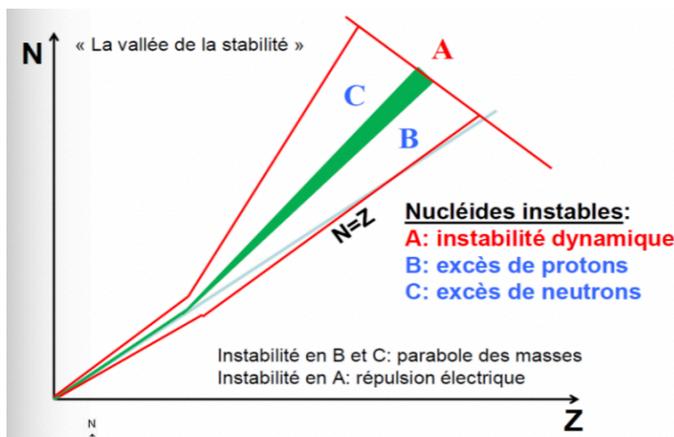
- Pour les noyaux légers,  $A < 20$  : ils sont stables si et seulement s'ils ont un **nombre de neutron égal au nombre de protons**, ils sont donc sur la première bissectrice telle que  $N = Z$ .
- Pour les noyaux lourds,  $A > 20$  : ils sont stables quand ils ont un **nombre de neutrons plus élevés que leur nombre de protons**. Ils se situent donc sur la première bissectrice telle que  $N > Z$ .



Explication pour les noyaux lourds :

Dans le noyau, s'il n'y avait que des **interactions fortes (forces d'attraction)** entre les nucléons, cela suffirait à assurer la stabilité des noyaux lourds. Mais il y a aussi des **interactions électriques coulombienne (forces répulsives)** entre ces nucléons, comme les protons sont chargés positivement.

Pour compenser les forces répulsives, il faut augmenter les forces attractives, et cela se passe par une **augmentation du nombre de neutrons !**



On voit les noyaux stables dans la vallée de la stabilité, avec une énergie de liaison supérieure à celle des noyaux avoisinants.

Les noyaux qui se trouvent en dehors de cette vallée de stabilité sont instables, c'est-à-dire radioactifs. Cela est dû à :

- Un **excès de protons ou de neutrons**, ce qui va mener à des transformations radioactives isobariques.
- Un **excès de nucléons**, le noyau est trop lourd et les forces répulsives l'emportent sur les forces attractives, on est dans la zone d'instabilité

dynamique, ce qui va conduire à des transformations radioactives  $\alpha$ .

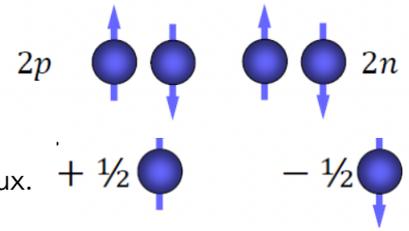
**C. Parité du nombre de nucléons**

Le dernier facteur de stabilité des noyaux, c'est la **parité proton/neutron**.

Z	N	A	Nbre de noyaux stables
pair	pair	pair	166
pair	impair	impair	55
impair	pair	impair	51
impair	impair	pair	5

On remarque que la grande majorité des noyaux stables ont un **nombre de protons et de neutrons qui est pair**. Il y a très peu de noyau stable dont le nombre de protons et de neutrons sont impairs. On peut voir que cette parité a des conséquences directes sur la stabilité des noyaux.

*Interprétation* : Les nucléons possèdent un spin de soit +1/2 soit de -1/2. Ils tournent ainsi sur leur axe avec une orientation en fonction de leur spin.



Du fait ce ces deux spins, les nucléons vont avoir tendance à se regrouper par paires avec un spin opposé, afin de se compenser entre eux.

La **parité du nombre de nucléons favorise ainsi la stabilité du noyau**.

## V. Forces nucléaires

Les forces nucléaires sont liées aux interactions des nucléons entre eux et au sein du noyau. Ces forces sont responsables de la **stabilité** ou de **l'instabilité** du noyau. L'intensité de ces forces va correspondre à l'énergie moyenne de liaison au sein du noyau.

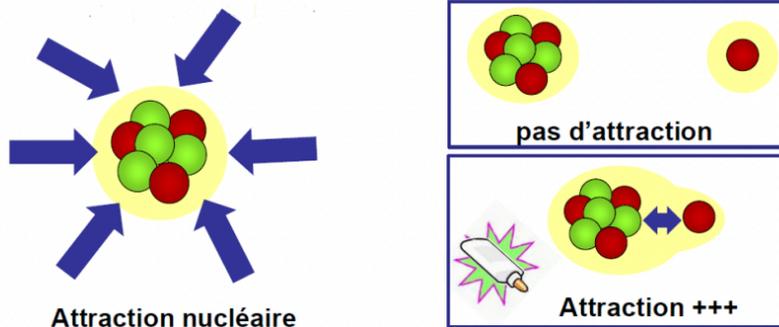
### A. Interaction forte (force nucléaire spécifique)

Il s'agit d'une **force attractive qui assure la cohésion du noyau**.

Elle est 100 à 1000 fois plus importante que la force électrostatique, et elle s'exerce à des distances faibles, entre 1 et  $2 \cdot 10^{-15}m$ .

Cette énergie correspond à la **masse perdue par les nucléons**.

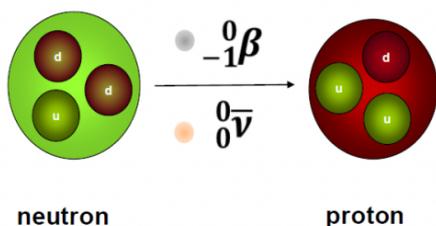
Cette interaction correspond à la mise en commun des particules d'interaction (les bosons) que sont les **gluons**.



### B. Interaction faible (force nucléaire spécifique)

Cette interaction, **discrète** et de **faible intensité**, s'exerce également à très courte distance ( $10^{-15} m$ ), à l'intérieur même des nucléons.

Elle est fondamentale car **elle peut changer la composition d'un noyau** en changeant un proton en un neutron (ou vice versa), ce sont les transformations isobariques (on les reverra dans le cours sur la radioactivité).



On a ici l'exemple d'un neutron transformé en proton grâce à la transformation d'un quark down en un quark up par le changement de la charge électrique.

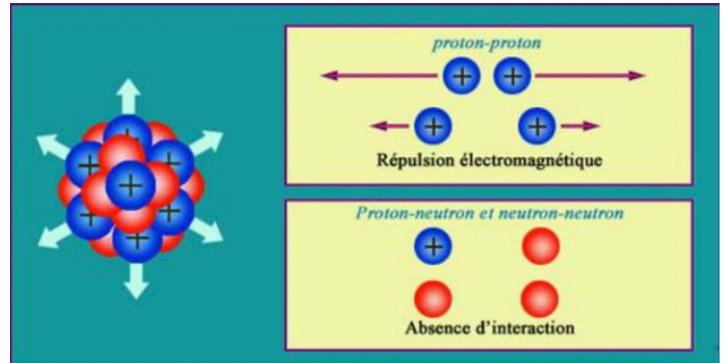
On aura alors l'émission d'une particule  $\beta^-$  et d'un antineutrino.

### C. Force électrostatique (non spécifique du noyau)

**Loi de Coulomb** : « L'intensité de la force électrostatique entre deux charges électriques est **proportionnelle au produit des deux charges** et est **inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges**. La force est portée par la droite passant par les deux charges »

La force électrostatique est donc de type **coulombien en  $1/r^2$** , non spécifique au noyau. La distance entre les nucléons (et plus particulièrement les protons) étant **très faible**, **cette force est assez forte**, mais moins que l'interaction forte.

Cette force concerne les **protons** (car ils sont chargés) et est **répulsive** (car les charges de même signe se repoussent). Elle **explique l'excès de neutron des noyaux lourds**, afin de compenser cette force électrostatique.

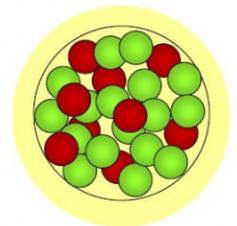


## VI. Modèles nucléaires

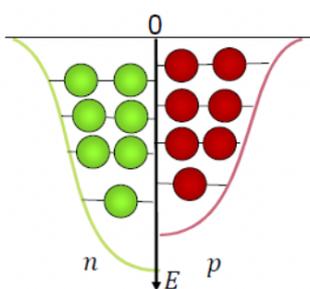
Différents modèles ont été imaginés pour décrire l'organisation des nucléons au sein du noyau, ces modèles ayant évolués au fil du temps.

### A. Modèle de la goutte sphérique

C'est un modèle très simple où **le noyau est assimilé à un liquide constitué de nucléons**. Ces derniers sont confinés dans cette goutte par l'**interaction forte (=attractive)**. Ce modèle est considéré comme **incompressible, sphérique** et permettant une **densité homogène des charges**.



### B. Modèle en couches



Ce modèle est plus complexe et est analogue à celui des atomes. Les nucléons sont caractérisés par des nombres quantiques. Ils sont ainsi **répartis en couches**, remplies successivement avec un nombre maximal de nucléons par couche. Les protons et les neutrons sont rangés dans un système différent.

Ce modèle permet d'expliquer différents phénomènes :

- **La stabilité particulière des noyaux à « nombre magique »**, par le remplissage complet des couches.  
*Exemple* :  ${}^4_2\text{He}$ , doublement magique, dont les deux neutrons et deux protons saturent leur première couche respective.
- **L'existence d'un niveau fondamental et de niveaux excités**, avec retour par émission de photons, ce sont les transformations isomériques.

## VII. Réaction de fission et de fusion nucléaire

Pour expliquer cette partie, il faut revenir à la loi d'équivalence masse-énergie.

Pour rappel au niveau des nucléons, la masse d'un noyau constitué est inférieure à la somme des masses de l'ensemble de ses nucléons pris séparément.

Le tutorat est gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.

A l'inverse pour assembler le noyau à partir de ses éléments, de l'énergie va être libérée, entraînant une **perte de masse**.

Qu'est-ce qui se passe à l'échelle des noyaux lors de la fusion ou de la fission ?

- Le phénomène de **fusion** consiste à **fusionner deux petits noyaux pour en faire un de taille plus importante**. Le noyau obtenu est **plus léger**, ce qui traduit une libération d'énergie.
- La **fission** part **d'un gros noyau que l'on fissionne en deux noyaux plus petits**. Le système final aura une **masse plus faible** que le système initial. On obtient donc également une perte de masse, donc une libération d'énergie.

La fusion et la fission sont donc deux phénomènes qui aboutissent à une perte de masse globale et à une libération d'énergie. Cela peut paraître **contradictoire** en comparaison avec ce qui a été vu avant avec les nucléons, d'autant plus que dans la fission on sépare un noyau en plusieurs éléments, alors que dans la fusion on forme un noyau à partir de plus petits noyaux préexistants.

**Au niveau des nucléons:**

① Gain de masse = consommateur d'énergie.

② Perte de masse = libération d'énergie.

$M(A, Z)$

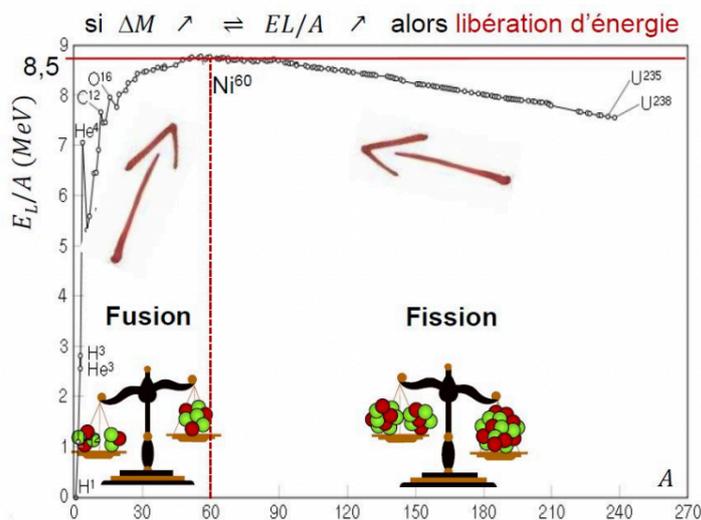
$m_i$

**Au niveau de noyaux ?**

Fusion de 2 petits ?

Fission d'un gros ?

Pour expliquer cette contradiction, il faut revenir sur le graphique représentant l'énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de masse.



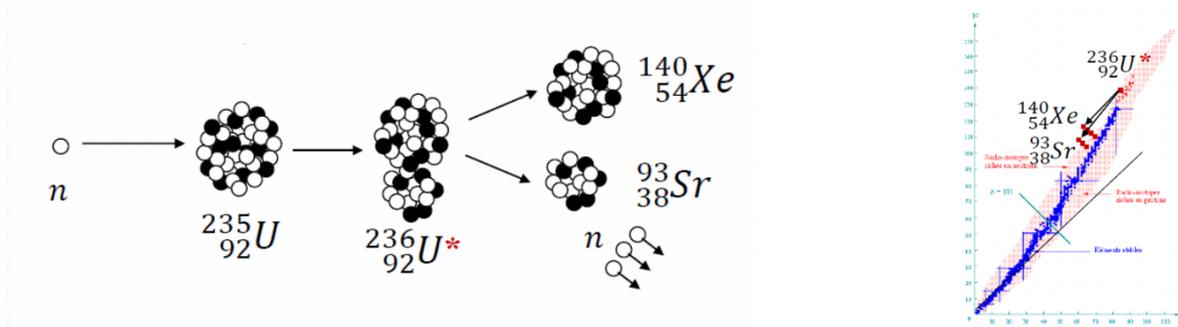
Ce qu'il faut retenir, c'est qu'une **augmentation de l'énergie de liaison par nucléon  $E_L/A$  signifie que le défaut de masse augmente aussi**, on a donc une **libération d'énergie**.

Ainsi, dans le cas de la fusion, qui concerne des petits noyaux, les noyaux obtenus auront une  **$E_L/A$  importante**, donc une **perte de masse avec libération d'énergie**.

Dans le cas de la fission, qui concerne les gros noyaux, on obtient également **des noyaux avec une  $E_L/A$  plus importante**, donc on a aussi **une perte de masse avec libération d'énergie**.

**A. Fission nucléaire**

On va prendre l'exemple de l'uranium 235, utilisé quand les centrales nucléaires pour produire de l'énergie.



La première étape est de bombarder un noyau d'uranium 235 par un neutron, afin d'obtenir de l'uranium-236, particulièrement instable du fait de son excédent de nucléons.

Pour retrouver un état de stabilité, le noyau père (l'uranium-236) va se désintégrer en deux noyaux fils : le Strontium-93 et le Xénon-140, ainsi que 3 neutrons.

Au cours de ce processus, de l'énergie va être libérée, et cette énergie peut être calculée.

$E_{L/A}$	$0$	$+$	$\frac{235}{92}U$	$\rightarrow$	$\frac{140}{54}Xe$	$+$	$\frac{93}{38}Sr$	$+$	$3\frac{1}{0}n$
			7,5		8,2		8,5		0
			$\times 235$		$\times 140$		$\times 93$		
$E_L (\Delta M)$	0		1762,5		1148		790,5		0
	<b>Total avant = 1762,5 MeV</b>				<b>après = 1938,5 MeV</b>				
	$\Delta E_L = 1938,5 - 1762,5 = 176 MeV$								

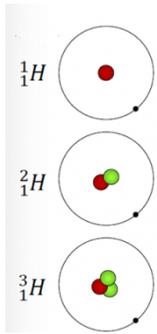
Pour calculer cette énergie libérée, on se base sur **les énergies de liaison par nucléon** :

1. On multiplie chaque élément par le nombre de nucléons pour obtenir l'énergie de liaison globale (sauf si dans l'énoncé on a déjà les énergies de liaisons globales, on n'a alors pas besoin de cette étape).
2. On additionne les énergies de liaison de chaque côté afin d'avoir les **totaux d'énergies de liaison avant et après la transformation**.
3. On calcule la **différence d'énergie de liaison** afin d'obtenir l'énergie libérée (ici 176 MeV).

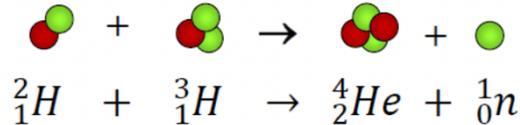
**B. Fusion nucléaire**

L'atome d'hydrogène possède plusieurs isotopes :

$^1_1H$ , la forme classique de l'hydrogène,  $^2_1H$ , pour le deutérium, et  $^3_1H$ , pour le tritium.



On va ici parler de la fusion de deux atomes d'hydrogène en un atome d'Hélium, réaction essentielle permettant au soleil de produire de l'énergie.



Cette réaction de fusion s'effectue entre le noyau de **deutérium** et un noyau de **tritium**, on obtient ainsi un atome **d'Hélium** et un proton.

On peut là aussi calculer l'énergie libérée par cette réaction, de la même manière que pour la

$E_{L/A} \text{ (MeV)}$	$^2_1\text{H}$	+	$^3_1\text{H}$	→	$^4_2\text{He}$	+	$^1_0\text{n}$
	1		2,8		7		0
$E_L (\Delta M)$	$\frac{\times 2}{2}$		$\frac{\times 3}{8,4}$		$\frac{\times 4}{28}$		

Total avant = 10,4 MeV      après = 28 MeV

$\Delta E = 28 - 10,4 = 17,6 \text{ MeV libérés}$

fission.

La méthodologie est la même, et l'énergie libérée est de 17,6 MeV.

*Point important sur les calculs d'énergie libérée :*

On a vu la méthode en partant des énergies de liaison par nucléon. C'est la méthode du diapo, qu'il faut savoir appliquer +++

Mais il existe une autre méthode, en **partant des masses de chaque élément**. Elle n'est pas donnée dans le diapo mais il faut quand même savoir l'appliquée (déjà tombée)

- Pour la première méthode, on trouve l'énergie libérée en faisant la différence entre l'énergie globale avant et après la réaction.

Or, on connaît la **loi d'équivalence masse/énergie** +++++ (qui dit donc qu'une masse est une énergie et qu'une énergie est une masse).

- Donc avec la deuxième méthode, on calcule le défaut de masse entre avant et après la transformation.

Pour cela, on multiplie la masse de chaque élément par sa quantité (si on a 3 neutrons émis on multiplie la masse du neutron par 3) et on additionne les masses de chaque côté. On a ainsi la **masse globale avant et après la réaction**. On soustrait alors les deux et on **obtient le défaut de masse**, que l'on utilise avec la loi d'équivalence masse/énergie, afin de trouver l'énergie libérée.

### MAIS ATTENTION AUX UNITÉS +++

Car on a deux formules pour la loi d'équivalence masse/énergie :

- $E_L = \Delta m c^2$ , avec E en Joules,  $\Delta m$  en kg, et  $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- $E_L = \Delta m \times 931,5$ , avec E en MeV et  $\Delta m$  en u

(La plupart du temps, les masses dans l'énoncé seront en u → on utilise la deuxième formule, et vous aurez une énergie en MeV)

Si on vous demande une énergie en joules, mais que vous avez les masses en u, il faudra **faire la conversion à la fin du calcul** (une fois que vous aurez l'énergie libérée en MeV).

Pour rappel :  $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$  (Pour passer de l'eV au J on multiplie par  $1,6 \cdot 10^{-19}$  +++

Exemple avec la fusion du deutérium et du tritium :

On donne (en u) : m(deutérium)=2,0141 // m(tritium) = 3,0160 // m(Hélium) = 4,0026 // m(neutron) = 1,009

	${}^2_1\text{H}$	+	${}^3_1\text{H}$	→	${}^4_2\text{He}$	+	${}^1_0\text{n}$
<b>Masse (u)</b>	2,0141		3,0160		4,0026		1,009
<b>Masses totales (u)</b>	5,0301				5,0116		
<b>ΔM (u)</b>	$\Delta M = 5,0301 - 5,0116 = 0,0185 \text{ u}$						
<b>E libérée (MeV)</b>	$E(\text{libérée}) = 931,5 \times 0,0185 = 17,6 \text{ MeV}$						

C. Applications

♥ La fission :

Il y a deux types de fission : **induite** et **spontanée**.

La **fission spontanée** est une fragmentation de noyau naturelle, sans intervention extérieure. Elle est possible uniquement pour les noyaux très lourds. La fission spontanée de l'uranium-235 existe dans la nature mais

est **très lente** vu que la demi-vie de l'uranium-235 est de plusieurs millions d'année. On va donc **induire sa fission** en le bombardant de neutrons comme on l'a vu précédemment.

*Explosives*

*Contrôlées*

Bombe A

Centrale nucléaire



*Exemple d'application :*

- D'abord dans la *bombe nucléaire* utilisée par les Américains à Hiroshima, qui contenant de l'Uranium-235

- Également dans le civil, avec les *centrales nucléaires* qui produisent de l'électricité par la fission de l'Uranium.

♥ Fusion :

La **fusion** existe à l'état naturel mais il lui faut un environnement avec énormément d'énergie, elle n'est donc présente qu'au niveau du soleil.

Elle a également une application militaire, avec la *bombe H pour Hydrogène*, qui utilise la réaction de fusion. Elle est constituée de deux étages, un contenant des noyaux lourds subissant des fissions nucléaires, ce qui permet de faire augmenter suffisamment la température et l'énergie de la bombe afin que les isotopes de l'hydrogène dans l'autre étage puissent effectuer leurs réactions de fusion, libérant l'énergie principale de la bombe H. Elle est **nettement plus destructrice qu'une bombe nucléaire à l'uranium**, car elle libère nettement plus d'énergie.

Il y a aussi une application scientifique : les *réacteurs thermonucléaires ITER*, qui sont destinés à produire de **l'électricité** en utilisant la fusion. C'est le plus gros projet de recherche scientifique au monde, il y a des équipes internationales qui collaborent dessus et ça se passe sur le site de Cadarache à côté d'Aix en Provence.

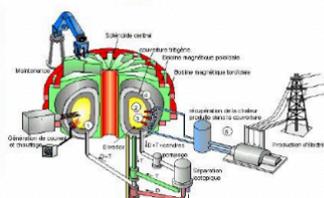
Soleil



Bombe H



ITER



International Thermonuclear Reactor