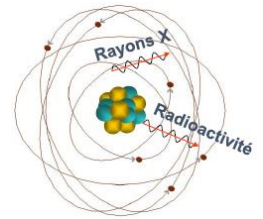


LE NOYAU

1- Introduction

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

Synonymes de noyau : **nuclide** / **nucléide**

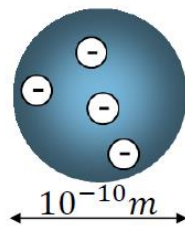


1.1- Historique de l'atome et du noyau

- Antiquité Grecque, vers 400 av JC : La notion d'atome apparaît de façon intuitive avec **Démocrite**, pour qui la matière est composée de **particules élémentaires indivisibles et invisibles**, qu'il va nommer **atomes**. Il pense que ces atomes sont **éternels** et **immuables**, on est encore très loin de la notion de radioactivité. Cette théorie s'oppose à celle d'**Aristote**, très influent à l'époque, pour qui la matière est composée de **4 éléments** : le feu, l'air, l'eau et la terre. C'est la croix d'Aristote, théorie avec beaucoup de succès, qui va pousser à l'abandon de la théorie de Démocrite.

- 1805 : Cette théorie de l'atome est reprise par **John Dalton**, qui le représente comme une **sphère dure pleine de matière**. On explique alors les réactions chimiques comme les assemblages et les réarrangements d'atomes et de molécules.

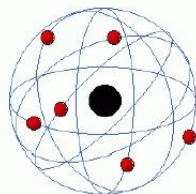
- 1897 : **Thomson** est le premier à découvrir les **composants de l'atome**, mettant en évidence la présence des électrons en montrant que ce sont des particules chargées négativement avec une masse très faible, représentant 1% de la masse l'atome. L'atome étant globalement neutre, il faut donc compenser avec des charges positives. Il est ainsi à l'origine du **modèle de l'atome en pudding au raisin** : les électrons sont répartis dans l'atome comme des petits raisins secs dans un pudding, la pâte du pudding a donc une charge globalement positive, et à l'intérieur on retrouve les raisins correspondants aux électrons avec une charge négative.



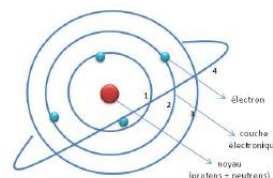
- XX^{ème} siècle : Les modèles de l'atome vont très nettement évoluer, en faisant apparaître **2 zones distinctes**, le **noyau** d'un côté avec les charges positives, et le **nuage électronique** d'un autre côté contenant les charges négatives. Plusieurs modèles vont alors cohabiter :

- Le modèle de **Rutherford**, pour qui les électrons sont répartis dans un **nuage autour du noyau**
- Le modèle de **Bohr**, qui fait intervenir la notion de **couches électroniques**, occupées par des électrons d'énergies bien définies

Ces deux modèles vont être mis à défaut par les observations expérimentales et d'autres modèles plus sophistiqués verront le jour, ils continuent d'ailleurs d'évoluer à l'heure actuelle.

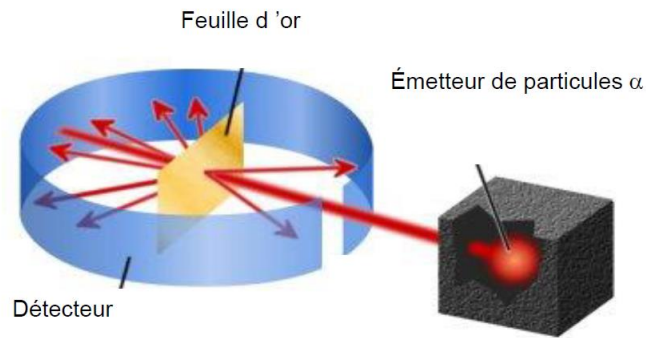


Le « nuage d'électron »
du modèle de Rutherford



Le modèle « en
couches » de Bohr

1.2- L'expérience de Rutherford (1911)



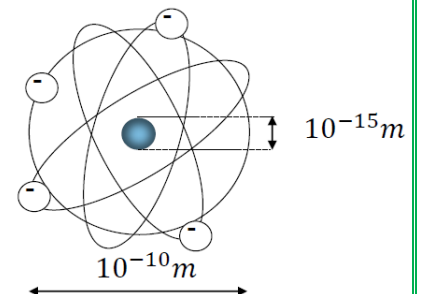
Cette expérience a permis de comprendre la structure de l'atome.

Rutherford a pris de l'uranium radioactif émetteur de particules α (composées de 2 protons et 2 neutrons) qu'il a placé dans une boîte en plomb. Les particules α sont absorbées par le plomb sauf au niveau d'un petit trou d'où les particules pouvaient s'échapper, formant un faisceau qui se projetait sur une très fine feuille d'or. Il a placé une couronne détectrice à 360° autour de la feuille d'or, capable de détecter les particules α .

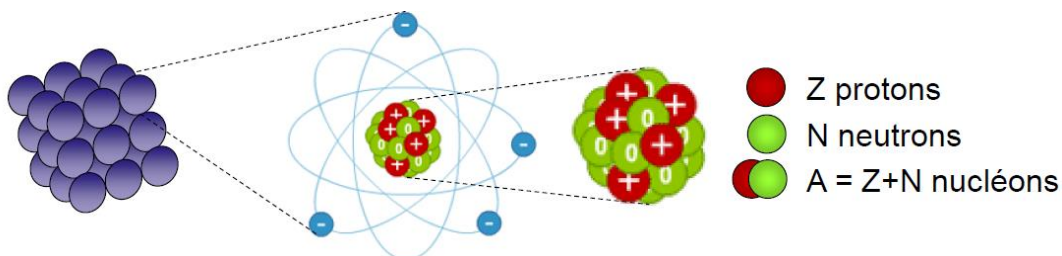
Résultats : La majorité des particules α ont traversé la feuille d'or sans être déviées, un petit pourcentage a été légèrement dévié, et environ 1 particule sur 20 000 va rebondir sur la feuille d'or pour venir frapper le détecteur à côté de la source. Ces résultats contredisent totalement les théories sur l'atome de cette époque.

Explications : La plupart des particules α traversent le vide de la matière et donc ne seront pas déviées. Certaines vont passer à proximité du noyau et seront donc déviées (interactions coulombiennes entre deux charges +, la masse du noyau de l'or est \gggg celle de la particule α , qui est donc déviée). Enfin certaines vont entrer en contact avec le noyau en rebondissant dessus (1/20000).

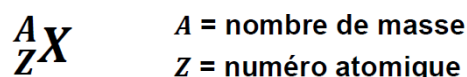
Rutherford conclut donc que l'atome a une **structure lacunaire**, c'est-à-dire avec un **petit noyau central** et **beaucoup de vide autour**. Il propose ainsi un modèle planétaire de l'atome, avec les électrons chargés négativement qui gravitent / satellisent autour du noyau central chargé positivement. Ces électrons ont une **masse très faible** par rapport à la totalité de la masse de l'atome, concentrée **quasi-exclusivement dans le noyau** (qui a donc une densité très élevée = $10^{15} \text{ g.cm}^{-3}$).



2- Composition et classification



Nomenclature : Le noyau X est constitué de A nucléons, répartis en Z protons et $N = A - Z$ neutrons.



2.1- Les différentes manières de classer les atomes

En fonction du Z (= nb de protons = nb de charges = nb d'e- = numéro atomique) :

Il s'agit de la classification périodique des éléments, aussi appelée classification de Mendeleïev. Elle est dite classification « chimique », car surtout utilisée dans le domaine de la chimie et moins dans celui de la physique nucléaire.

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

1 H						2 He
3 Li	4 Be					10 Ne
11 Na	12 Mg					
19 K	20 Ca					

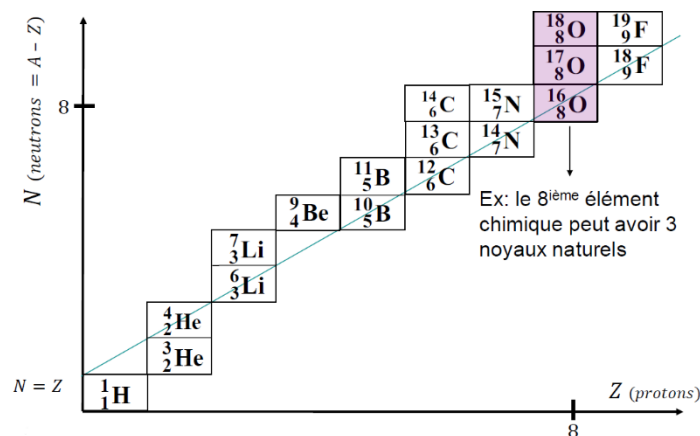
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	
13 Al					

Ex: le 8^{ème} élément chimique (8 électrons)

Dans cette classification sont regroupés par **colonne** les éléments ayant des **propriétés physico-chimiques similaires**, on parle de familles d'éléments.

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

La **table des nuclides** est une classification bien plus adaptée à la physique nucléaire. Elle tient compte du nombre de neutrons et permet de caractériser les différentes formes du noyau en fonction de Z et de N. On place en abscisses le nombre de protons Z et en ordonnées le nombre de neutrons N.



Les progrès de la physique nucléaire ont permis de répertorier un peu moins de 300 nucléides naturels (stables) et plus de 2500 nucléides radioactifs (instables). La table des nucléides permet de classer tous les noyaux, naturels comme radioactifs !

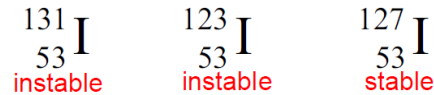
On voit ainsi l'exemple de l'oxygène, il est composé de Z = 8 protons, et on voit qu'il existe sous 3 formes :

- ¹⁶O qui a 8 protons et 8 neutrons, qui est stable, c'est le plus répandu.
- ¹⁷O qui a 8 protons mais 9 neutrons, il est instable.
- ¹⁸O qui a toujours 8 protons mais 10 neutrons, il est instable également !

On voit ici l'importance de faire apparaître le nombre de neutrons dans la classification, afin d'inclure les variétés isotopiques d'un même élément.

En parlant d'isotopes, trois définitions importantes :

• **Isotopes** : Deux nucléides avec le **même nombre de protons Z**, mais des A différents. Les isotopes sont indiscernables chimiquement.



• **Isobares** : Deux nucléides avec le **même nombre de masse A**, mais des Z différents. Deux isobares sont donc deux éléments chimiques différents.



• **Isotones** : Deux nucléides avec le **même nombre de neutrons** (A et Z sont différents). Deux isotones sont donc deux éléments chimiques différents.

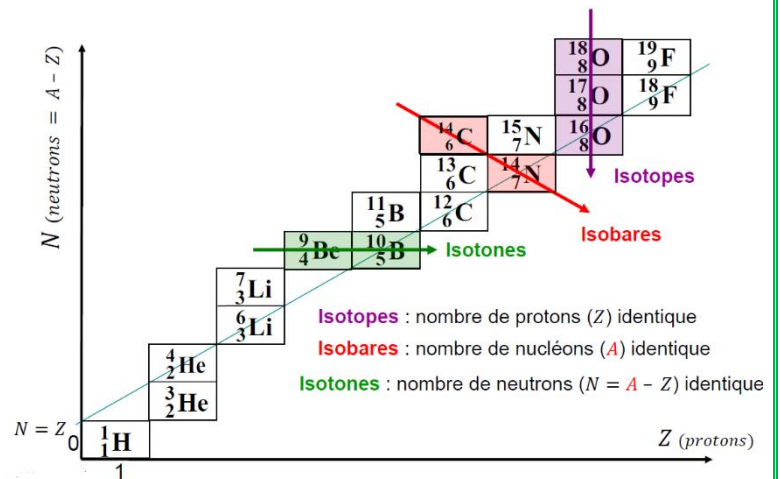
Ces éléments peuvent être retrouvés dans la table des nucléides :

Tut'souviens :

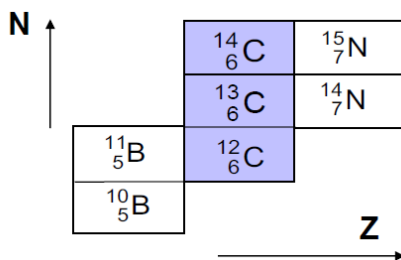
Isotopes : même nb de protons

Isobares : même A

Isotones : même N



On peut enfin aborder la notion d'**abondance isotopique**, qui correspond à la fraction molaire de chaque isotope dans le mélange, exprimé en pourcent. La majorité des éléments chimiques existe à l'état naturel sous la forme d'un **mélange de plusieurs isotopes** :



On a ici l'exemple du 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%.

2.2- Les nucléons

On rappelle que **A = nb de nucléons = nb de masse**

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

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

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

Conventions d'écriture : \mathcal{M} = masse d'un atome

$$M = \text{masse du noyau} \quad (M = \mathcal{M}(A, Z) - Zm_e)$$

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

On remarque que le défaut de masse du noyau (revu plus tard) correspond à l'énergie de liaison, c'est grâce à l'équivalence masse-énergie : $E = mc^2$

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**.

On rappelle enfin que **1u correspond à 931,5 MeV/c²**, on peut donc exprimer l'énergie de liaison en MeV grâce une autre formule qui prend en compte la différence de masse en u (revue plus tard également).

Les deux nucléons sont :

- Le **proton**, qui existe à l'état libre (lors d'une dissociation acide par exemple) : 1_1p ou 1_1H ou H^+

- Le **neutron**, instable en dehors du noyau 1_0n , il se désintègre alors selon la réaction ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}$ de demi-vie de 10 minutes environ. Il se désintègre en un proton, un électron et un **antineutrino**, cela correspond à la **transformation β^-** , revue dans le cours sur les transformations isobariques.

Particule	Charge ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C)	A	Masse (u)	Masse (MeV/c ²)
1_1p	+1	1	1,00728	938,28
1_0n	0	1	1,00866	939,56
${}^0_{-1}e$	-1	0	0,00055	0,511

Ce qui est intéressant c'est la différence de masse entre le neutron et le proton, le **neutron étant légèrement plus lourd (0,14%)**. Les stabilités de l'univers reposent en grande partie sur cette différence de masse, elle est donc fondamentale.

2.3- Les particules élémentaires

Les **particules élémentaires** sont classées en 2 types et 3 familles dans le modèle standard.

On ne s'intéresse qu'à la **première famille dite « ordinaire » (I)**, qui concerne la matière qui nous entoure (\neq rayonnements cosmiques et réacteurs nucléaires pour les familles II et III).

Parmi les deux types de particules dans la famille I :

	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z^0 Z boson
0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
-1	-1	-1	± 1	
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	W^\pm W boson

• Les **QUARKS** : **u** pour **up** et **d** pour **down**, qui sont prisonniers de particules plus grandes, ils ne peuvent pas se déplacer librement. Ces particules sont chargées : $u = +\frac{2}{3}e$

$$d = -\frac{1}{3}e$$

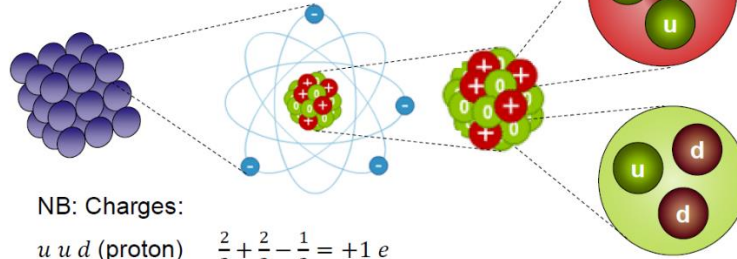
• Les **LEPTONS** : **électron** et **neutrino de l'électron**, qui peuvent se déplacer librement.

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

Il existe également des particules d'interaction, dont on parlera plus tard, qui sont les **Bosons**.

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

- Le neutron: $u d d$
- Le proton: $u u d$



NB: Charges:

$$u u d \text{ (proton)} \quad \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1 e$$

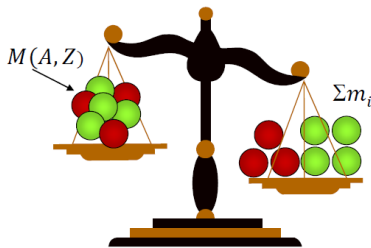
$$u d d \text{ (neutron)} \quad \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0 e$$

On voit d'ailleurs que **les Quarks expliquent la charge du proton et du neutron !**

3- Energie de liaison et défaut de masse

3.1- Définition

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



On a donc : $M(A, Z) < \sum m_i$

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

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

Point important sur le calcul du défaut de masse :

Souvent dans l'énoncé on vous donnera la masse de **l'atome** (\mathcal{M}), et ce n'est pas la même chose que la masse du noyau (M). On rappelle que $M(A, Z) = \mathcal{M}(A, Z) - Zm_e$

Ainsi il faudrait **théoriquement** adapter légèrement la formule du défaut de masse lorsqu'on a la masse de l'atome complet dans l'énoncé :

(j'écris théoriquement parce qu'en cours le prof a dit que c'était un truc de puristes et que la masse des électrons ne changeait pas grand-chose, donc considérez qu'à l'examen les valeurs seront suffisamment éloignées pour éviter les ambiguïtés selon que l'on tienne compte ou non des électrons)

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

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

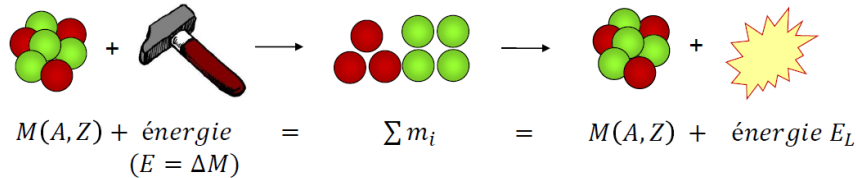
Autre astuce : souvent dans l'énoncé vous aurez aussi la masse de l'atome d'Hydrogène 1_1H . Cet atome contient **un proton et un électron**, donc en multipliant $M({}^1_1H)$ par Z on a déjà le $Zm_p + Zm_e$ (c'est-à-dire la masse de nos protons et de nos électrons), il n'y a ensuite plus qu'à ajouter la masse des neutrons Zm_n (*en gros on fait deux multiplications en une seule*).

Comme dit plus haut, ce défaut de masse est équivalent à une énergie, qui correspond à l'**énergie de liaison des nucléons**.

On peut la calculer de deux manières, grâce à la **loi d'équivalence masse-énergie** :

- $E_L = \Delta M \times c^2$ avec E en Joules, ΔM en Kilogrammes et $c = 3.10^8$ m/s

- $E_L = 931,5 \times \Delta M$ avec E en MeV et ΔM en u



On voit ici que schématiquement, il faut apporter de l'énergie à un noyau pour séparer ses nucléons, cette énergie correspond à l'énergie de liaison. A l'inverse, lorsqu'on assemble les nucléons pour former un noyau, celui-ci aura une masse plus faible que la somme des masses des différents nucléons pris séparément, et de l'énergie sera libérée, correspondant à l'énergie de liaison. Ce phénomène est à l'origine de l'énergie nucléaire, revue plus tard.

3.2- Généralisation des notions de défaut de masse et énergie de liaison

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

On a montré que le défaut de masse du **noyau** est lié à l'**énergie de liaison des nucléons**.

On peut maintenant élargir l'échelle et s'intéresser au défaut de masse de l'atome en entier.

La masse d'un atome constitué 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 :

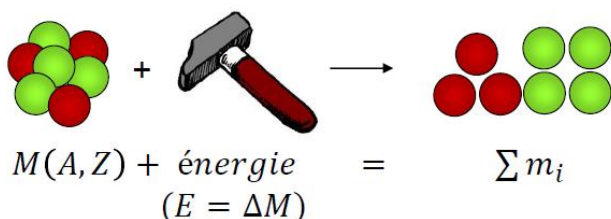
$$\Delta \mathcal{M}_e(A, Z) = M(A, Z) + Zm_e - \mathcal{M}(A, Z) = E_{le}$$

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

On voit l'ordre de grandeur des énergies de liaisons selon l'échelle où l'on se trouve :

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

3.3- Conclusion sur l'énergie de liaison et le défaut de masse



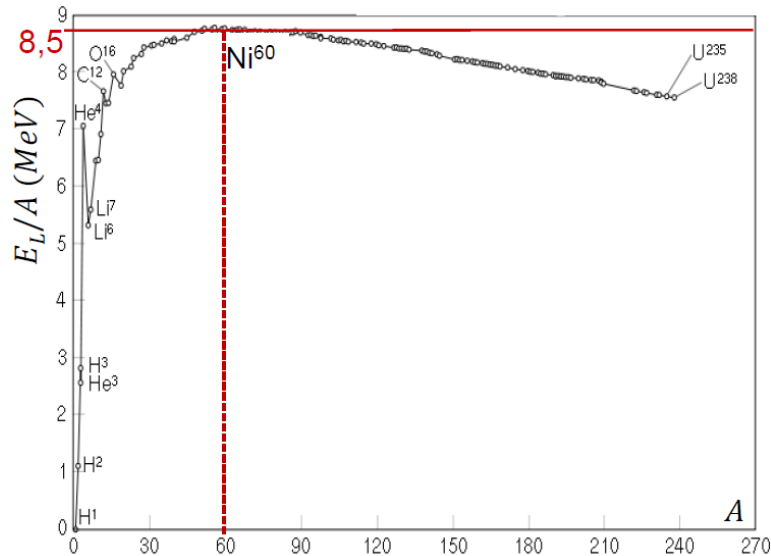
L'énergie de liaison des nucléons d'un noyau est l'**énergie qu'il faut fournir pour le dissocier**. L'énergie apportée est alors **transformée en masse**.

L'énergie de liaison des **nucléons** est de l'ordre du **MeV**, celle des électrons du keV, et celle des atomes entre eux dans une molécule de l'eV.

4- Facteurs de stabilité nucléaire

4.1- Energie de liaison par nucléon

Le premier facteur de stabilité du noyau est l'énergie de liaison des nucléons. Afin de mieux comparer les différents noyaux, on rapporte l'énergie de liaison globale du noyau au nombre de masse (donc au nombre de nucléons), on obtient ainsi l'**énergie de liaison par nucléon, E_L/A** .

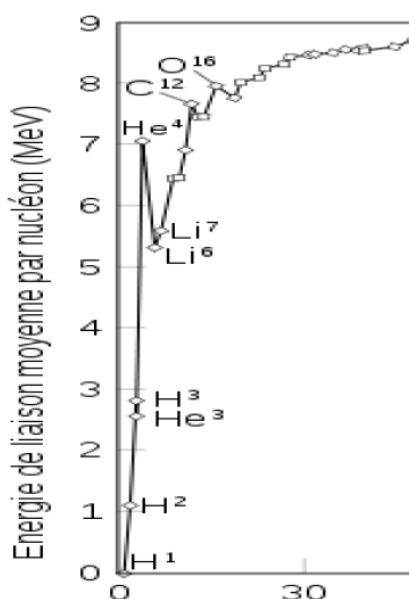


On place sur ce graphique le nombre de masse A en abscisses et l'énergie de liaison par nucléon E_L/A en MeV en ordonnées.

Cette énergie de liaison par nucléon varie entre 1 et **8,5-9 MeV**, et **plus elle est élevée, plus le noyau est stable**. (logique, on a vu que E_L est l'énergie à apporter pour dissocier le noyau, donc plus elle est grande pour chaque nucléon plus il est difficile de dissocier le noyau, qui est donc plus stable)

L'énergie de liaison va augmenter avec le A jusqu'à un **maximum d'environ 8,8 MeV pour le Ni⁶⁰**. *Le prof m'a dit qu'il avait un peu actualisé son cours et que le maximum d'énergie était plutôt aux alentours de 8,8 MeV, mais il évitera les ambiguïtés là-dessus !*

Ensuite, A va augmenter jusqu'au U²³⁸ mais l'énergie de liaison va **légèrement diminuer** pour ces noyaux plus lourds.



On va maintenant s'intéresser un peu plus à la partie de ce graphique sur les noyaux les plus légers :

On remarque une absence de régularité de l'énergie de liaison par nucléon, avec des pics correspondant à une augmentation ponctuelle de l'énergie de liaisons par nucléon pour certains noyaux, et donc une grande stabilité.

Cela est dû à des combinaisons avec des « **nombre magique** », c'est-à-dire lorsque **Z ou A vaut 2, 8, 20, 50, 82...** (*me demandez pas pourquoi, c'est comme ça*).

Par exemple l'**He⁴** est très stable car il est **doublement magique**, il est composé de 2 protons et 2 neutrons. Pareil pour le **O¹⁶** composé de 8 protons et 8 neutrons.

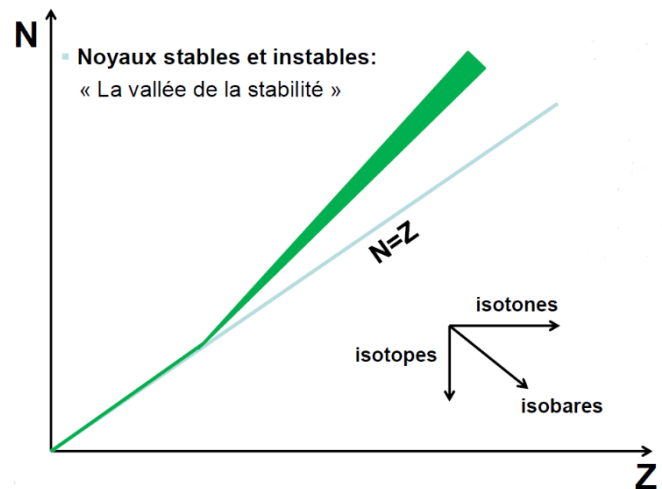
On peut citer un noyau très lourd et pourtant particulièrement stable, le **Pb²⁰⁸**, doublement magique avec ses 82 protons et 126 neutrons.

4.2- Nombre de neutrons

Un second facteur de stabilité du noyau est le **nombre de neutrons**.

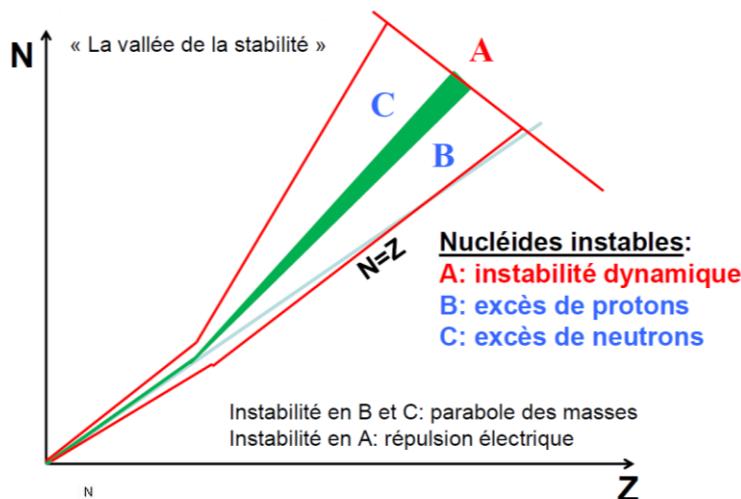
On voit sur ce graphique en abscisses le nombre de charge Z et en ordonnées le nombre de neutrons N . Les noyaux stables sont représentés en vert, dans ce qu'on appelle la « **vallée de la stabilité** ».

- **Pour les noyaux légers, avec $A < 20$** : ils sont stables si et seulement si le nombre de neutrons et de protons est égal, ils sont donc sur la première bissectrice telle que $N = Z$.
- **Pour les noyaux lourds, avec $A > 20$** : ils sont stables en ayant un nombre de neutrons plus élevé que le nombre de protons, ils se situent donc sur une autre bissectrice telle que $N > Z$.

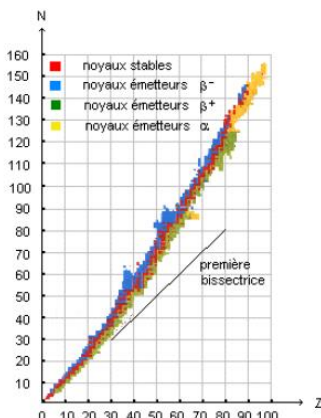


Explications pour les noyaux lourds : dans le noyau, s'il n'y avait que les interactions fortes (forces attractives) entre les nucléons, cela suffirait à assurer la stabilité des noyaux lourds. Mais il y a aussi des interactions électriques coulombienne (forces répulsives) entre ces nucléons, vu que les protons sont chargés positivement. Pour **compenser ces forces répulsives**, il faut **augmenter les forces attractives**, et cela se passe par une **augmentation du nombre de neutrons** ! (C'est pas très clair la première fois, faut comprendre la partie un peu plus loin sur les forces nucléaires et ça devrait aller, et au pire c'est pas ce qu'il y a de plus important)

On améliore un peu le schéma :



On voit les noyaux stables, dans la vallée de la stabilité, avec une énergie de liaison par nucléon 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**. Ceci 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 radioactive α** .

4.3- Parité du nombre de nucléons

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

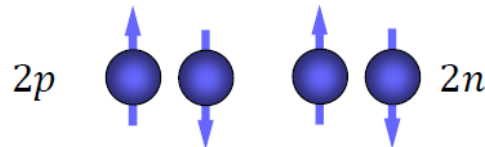
Z	N	A	Nbre de noyaux stables
<i>pair</i>	<i>pair</i>	<i>pair</i>	166
<i>pair</i>	<i>impair</i>	<i>impair</i>	55
<i>impair</i>	<i>pair</i>	<i>impair</i>	51
<i>impair</i>	<i>impair</i>	<i>pair</i>	5

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 le nombre de neutrons sont impairs. On peut donc voir que cette parité à des conséquences directes sur la stabilité des noyaux.

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



Du fait de ces 2 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.



5- Forces nucléaires

Les forces nucléaires sont liées aux **interactions des nucléons entre eux et au sein du noyau**. Ce qui est fondamental, c'est que 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.

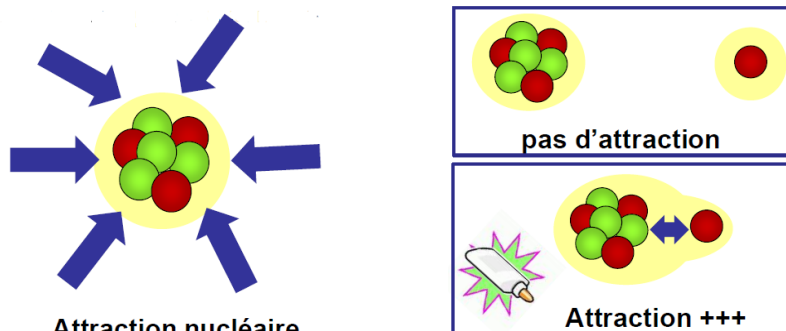
5.1- Interaction forte (force nucléaire spécifique)

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 très faibles, entre 1 et $2 \cdot 10^{-15}$ m**.

Cette énergie correspond à la masse perdue par les nucléons.

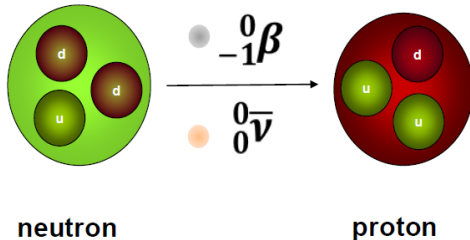
Cette interaction correspond à la mise en commun des particules d'interaction (les Bosons) que sont les **Gluons**.



5.2- 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** vues dans le cours sur la radioactivité.



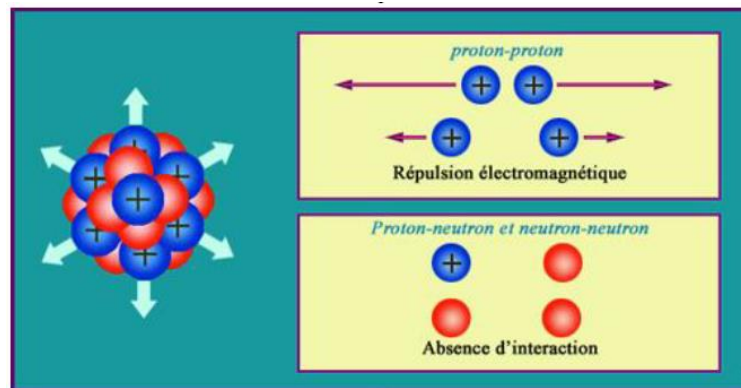
On a ici l'exemple d'un neutron transformé en proton grâce à la **transformation d'un quark down en un quark up** par le changement de sa charge électrique. On aura alors l'émission d'une particule β^- et d'un antineutrino.

5.3- 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 décrite plus haut.

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



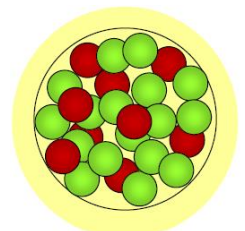
6- Modèles nucléaires

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

6.1- Modèle de la goutte sphérique

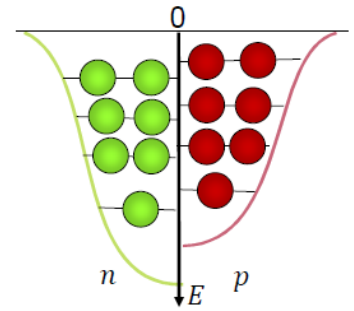
C'est un modèle très simple, où le noyau est assimilé à un liquide constitué de nucléons. Ces derniers sont **confinés dans cette goutte** par l'interaction forte (attractive).

Ce modèle est considéré comme **incompressible, sphérique**, et permettant une **densité homogène des charges**.



6.2- Modèle en couche

Ce modèle, plus complexe, 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.



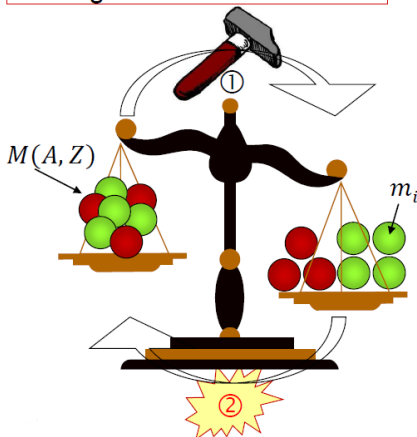
Ce modèle permet d'expliquer différents phénomènes :

- La **stabilité particulière des noyaux à « nombre magique »**, par le **remplissage complet des couches**. On donne l'exemple de ${}^4_2\text{He}$, doublement magique, dont les 2 neutrons et 2 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 (revues dans la radioactivité).

7- Réactions de fission et de fusion nucléaire

Au niveau des nucléons:

- ① Gain de masse = consommation d'énergie.
- ② Perte de masse = libération d'énergie.



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.

Ainsi pour **séparer** les éléments d'un noyau, il faut un apport d'énergie, et cette **consommation d'énergie** se traduira par un **gain de masse**.

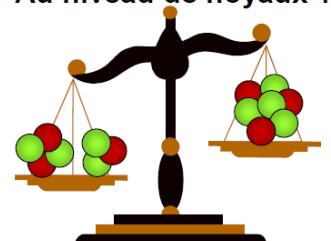
A l'inverse pour **assembler** le noyau à partir de ses éléments, de **l'énergie va être libérée**, entraînant une **perte de masse**.

On va maintenant voir ce qu'il se passe à l'échelle des noyaux, lors de la fusion ou de la fission.

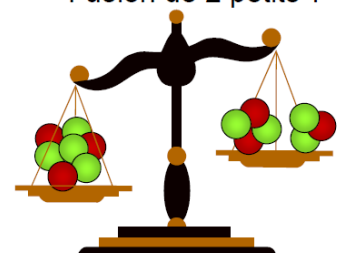
- Le phénomène de fusion consiste à fusionner **deux petits noyaux en un noyau de taille plus importante**. Le noyau obtenu est **plus léger**, ce qui traduit une **libération d'énergie**.
- A l'inverse, la fission part d'un **très gros noyau** que l'on **fissionne en deux plus petits**. Le système final 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 que dans la fission on sépare un noyau en plusieurs éléments, alors que dans la fusion on forme un noyau à partir de noyaux préexistants.

■ **Au niveau de noyaux ?**

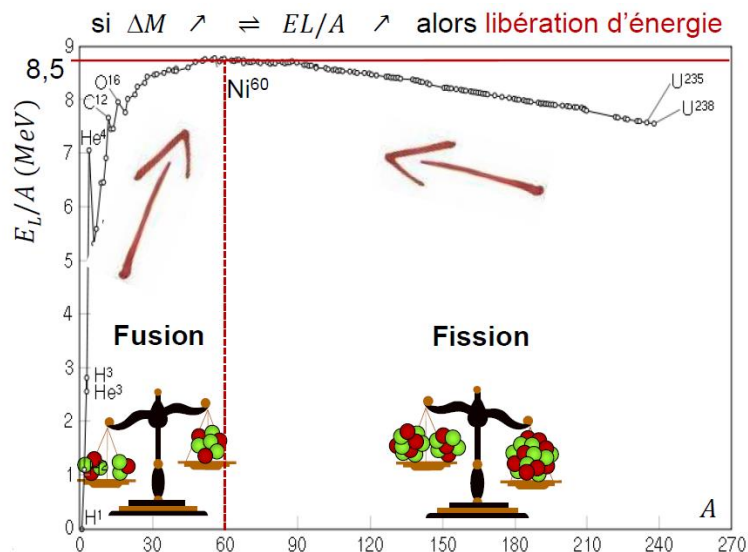


Fusion de 2 petits ?



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.



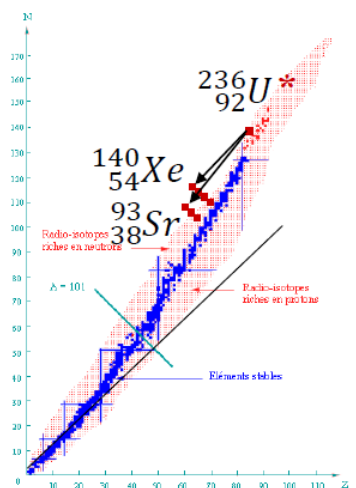
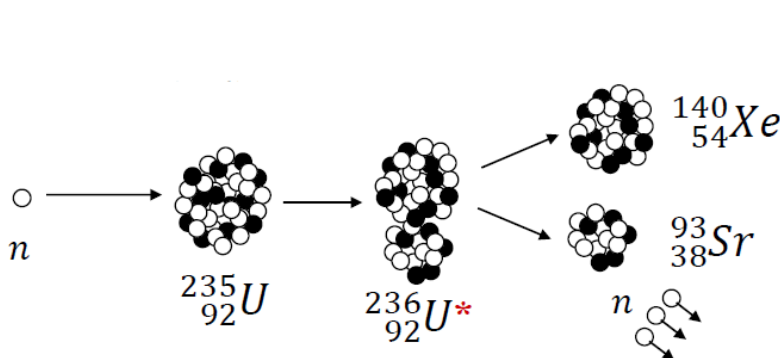
Ce qu'il faut retenir, c'est qu'une **augmentation de l'énergie de liaison par nucléon E_L/A signifie que le défaut de masse augmente aussi, on a donc une libération d'énergie.**

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

Pour 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 une libération d'énergie.**

7.1- Fission nucléaire

On va prendre l'exemple de l'**Uranium-235**, utilisé dans les centrales nucléaires pour produire de l'énergie.



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

Pour retourner à la stabilité, ce noyau père d'Uranium-236 va se désintégrer, donnant deux noyaux fils, le Xenon-140 et le Strontium-93, ainsi que trois neutrons.

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

$$\begin{array}{rcccccc}
 & {}^1_0n & + & {}^{235}_{92}U & \rightarrow & {}^{140}_{54}Xe & + & {}^{93}_{38}Sr & + & 3 {}^1_0n \\
 E_{L/A} & 0 & & 7,5 & & 8,2 & & 8,5 & & 0 \\
 & & & \times 235 & & \times 140 & & \times 93 & & \\
 E_L (\Delta M) & 0 & & 1762,5 & & 1148 & & 790,5 & & 0 \\
 \text{Total avant} & = & 1762,5 \text{ MeV} & & \text{après} & = & 1938,5 \text{ MeV} & & & \\
 \Delta E_L & = & 1938,5 - 1762,5 = 176 \text{ MeV} & & & & & & &
 \end{array}$$

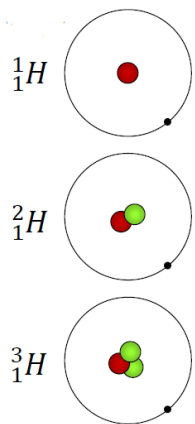
Pour calculer cette énergie libérée, on se base ici sur les **énergies de liaison par nucléon** :

1- On multiplie pour chaque élément par le nombre de nucléons pour obtenir l'**énergie de liaison globale**.
(si on vous donne déjà les énergies de liaison globales dans l'énoncé pas besoin de cette étape)

2- On additionne les énergies de liaison globale 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.

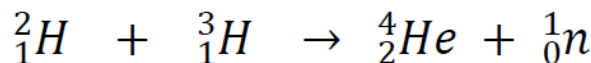
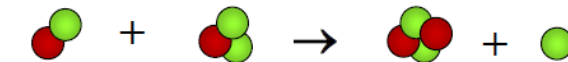
7.2- Fusion nucléaire



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 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 précédemment :

$$\begin{array}{rcccccc}
 & {}^2_1H & + & {}^3_1H & \rightarrow & {}^4_2He & + & {}^1_0n \\
 E_{L/A} (MeV) & 1 & + & 2,8 & \rightarrow & 7 & & 0 \\
 & \times 2 & & \times 3 & & \times 4 & & \\
 E_L (\Delta M) & 2 & & 8,4 & & 28 & & \\
 \text{Total avant} & = & 10,4 \text{ MeV} & & \text{après} & = & 28 \text{ MeV} & & \\
 \Delta E & = & 28 - 10,4 = 17,6 \text{ MeV libérés} & & & & & &
 \end{array}$$

La méthodologie est la même que celle expliquée pour la fission, l'énergie libérée ici est de 17,6 MeV.

Point important sur les calculs d'énergie libérée :

On a vu ici une méthode de calcul, en commençant avec les **énergies de liaison par nucléon**. C'est la méthode développée dans le diapo, qu'il faut savoir appliquer.

Il existe cependant une « autre » méthode que je vais vous détailler ici, en commençant avec les **masses de chaque élément**. C'est absolument pas donné dans le diapo, mais il faut savoir l'appliquer quand même, cf l'exam de l'année dernière :). Il ne s'agit pas en réalité d'une deuxième méthode, il s'agit plutôt d'une variante de la première.

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

Or on connaît bien notre cours, et notamment la **loi d'équivalence masse-énergie++++** qui nous dit en gros que l'énergie c'est de la masse et la masse c'est de l'énergie.

- Donc avec notre deuxième méthode, il suffit de **calculer le défaut de masse entre avant et après la réaction**. Pour cela rien de plus simple, on multiplie la masse de chaque élément par sa quantité (par exemple si on a 3 neutrons émis on multiplie la masse du neutron par 3), et on additionne les masses de chaque côté, afin d'avoir la **masse globale avant et après la réaction**. On **soustrait** les deux, et une fois qu'on a calculé ce défaut de masse, on a plus qu'à utiliser notre loi d'équivalence masse-énergie afin de retrouver l'énergie libérée. *Notez qu'en y regardant de plus près, c'est la même méthode que celle utilisée pour calculer l'énergie de liaison des nucléons dans le grand 3-)*

MAIS ATTENTION AUX UNITÉS++++

Je vous rappelle nos deux formules de la loi d'équivalence masse-énergie :

- $E_L = \Delta M \times c^2$ avec E en Joules, ΔM en Kilogrammes et $c = 3.10^8$ m/s

- $E_L = 931,5 \times \Delta M$ avec E en MeV et ΔM en u

La plupart du temps, on vous donnera dans l'énoncé les **masses en u**, il faudra donc utiliser la **deuxième formule** et vous aurez l'**énergie libérée en MeV**.

Si on vous demande une énergie en **Joules**, en vous donnant les masses en u, il faudra faire la conversion à la toute fin du calcul, une fois que vous aurez l'énergie libérée en MeV.

Pour rappel : **1eV = 1,6.10⁻¹⁹ J**, donc pour passer de l'eV au J on multiplie par 1,6.10⁻¹⁹.

Donc pour les calculs d'énergie libérée lors d'une fusion/fission ou les calculs d'énergie de liaison des nucléons d'un noyau, pensez à bien utiliser les bonnes unités et la bonne formule. Ça vaut également pour les calculs que vous verrez dans les autres cours sur la radioactivité+++.

Exemple avec la fusion du deutérium et du tritium vue plus haut :

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

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

