





# Noyau



Hello everybody, cours HYPER intéressant sur des notions de rayonnements qui sont très très importantes mais ça se retient facilement + c'est intéressant jsp si je l'ai déjà dit

++ Le prof a précisé l'année dernière en présentiel que tout est à connaître dans le cours (les noms, les expériences, les modèles, l'évolution du concept du noyau etc...) + QCMs QUE LE PROF A FAIT EN PRESENTIEL A LA FIN

## I. INTRODUCTION

### a) Historique de l'atome et du noyau (=nuclide=nucléide)

→ Antiquité Grecque, vers 400 av JC

Les notions de noyau et d'atomes **apparaissent** avec **Démocrite** qui pense que la matière est composée de particules élémentaires invisibles et indivisibles qu'il nomme **atomes**. Pour Démocrite, les atomes sont éternels et immuables (quel poète) mais cela est encore loin de la notion de radioactivité. Concrètement pour lui, la variété de matière qui nous entoure est due à l'infinité de forme que peuvent prendre les atomes.



→ Mini drama : Cette théorie **s'oppose à celle d'Aristote**, pour qui la matière est constituée de 4 éléments : le feu, l'air, la terre et l'eau, la théorie de la croix d'Aristote. Puisqu'il a plus de buzz que Démocrite, on prend sa théorie plutôt que l'autre (aïe)



→ 1805

→ On a enfin la vision : l'hypothèse de Démocrite est reprise par **John Dalton**, qui lui pense que l'atome se limite à une **sphère dure** pleine de **matière** (très peu ouvert d'esprit). Les réactions chimiques sont alors expliquées comme les assemblages et les réarrangements d'atomes et de molécules.

→ 1897

→ Nouveau personnage : **Thomson**, qui 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 raisin".



*"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."*

→ C'est au 20e siècle que les modèles de l'atome vont évoluer très nettement et faire apparaître 2 zones distinctes :

- Le **noyau** = contient l'ensemble des charges **positives**
- Le **nuage électronique** = contient les charges **négatives**

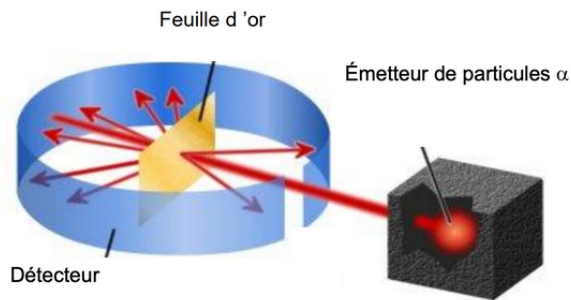
Différents modèles vont cohabiter :

- 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

Ces 2 modèles seront ensuite mis à défaut par les observations expérimentales et d'autres modèles verront le jour, jusqu'aujourd'hui.



## b) 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 **alpha** (composées de 2 protons et 2 neutrons) qu'il a placé dans une boîte en **plomb**. Les particules alpha sont absorbées par le plomb sauf au niveau d'un petit trou.

→ Les particules alpha pouvaient s'échapper par un petit trou, 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 **alpha**.

### Que donne l'expérience ?

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

### Pourquoi ce résultat ?

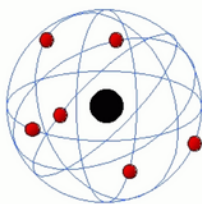
→ La plupart des particules **alpha** chargées **positivement** va **traverser** le vide de la matière et donc ne pas être déviée. Certaines vont passer à proximité du noyau et vont être légèrement **déviées** et certaines vont rentrer en contact avec le noyau et vont **rebondir** contre la feuille d'or (1/20 000).

Rutherford a conclu à une **structure lacunaire** de l'atome, c'est-à-dire que les atomes sont constitués par un petit noyau central avec beaucoup de vide autour.

→ Rutherford propose alors un **modèle planétaire** de l'atome, avec les **électrons** chargés **négativement**, qui gravitent autour d'un **noyau** central, chargé **positivement**. Ces électrons ont une masse très faible par rapport à la totalité de la masse de l'atome. Le **noyau** en position centrale concentre donc la **quasi-totalité de la masse de l'atome**.

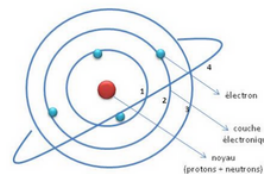
→ Différents modèles de l'atome vont coexister :

Le modèle de Rutherford : les électrons sont répartis dans un nuage autour du noyau



Le « nuage d'électron » du modèle de Rutherford

Le modèle de Bohr (1913) : fait intervenir la notion de couches électroniques, dont les électrons qui occupent des couches avec des niveaux d'énergie bien définis.

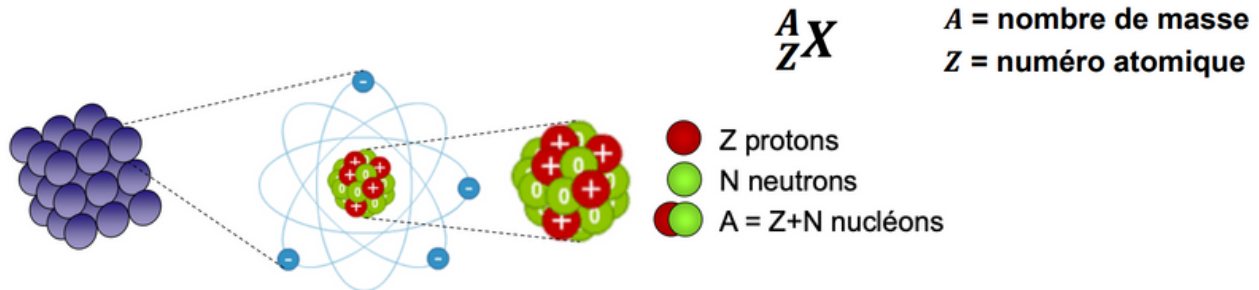


Le modèle « en couches » de Bohr



## II. COMPOSITION ET CLASSIFICATION

**Nomenclature** : le **noyau X** (symbole chimique de l'élément) est constitué de **nucléons** (A, le nombre de masse) répartis en **protons** (Z) et en **neutrons** (A-Z). Les protons étant chargés positivement, Z est proportionnel à la charge électrique du noyau.



### a) Nombre de protons Z = nombre de charges = nombre d'électrons = numéro atomique

Il existe différentes manières de classer les atomes en fonction de leur noyau. La lère est la *classification périodique* des éléments, appelée *classification de Mendeleïev*. Les éléments sont classés en fonction de leur **Z croissant**, en fonction du nombre de **protons**. Ce nombre est indissociable de l'élément chimique.

**Classification périodique des éléments (de Mendeleïev).**

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 <sup>ème</sup> élément chimique (8 électrons)		

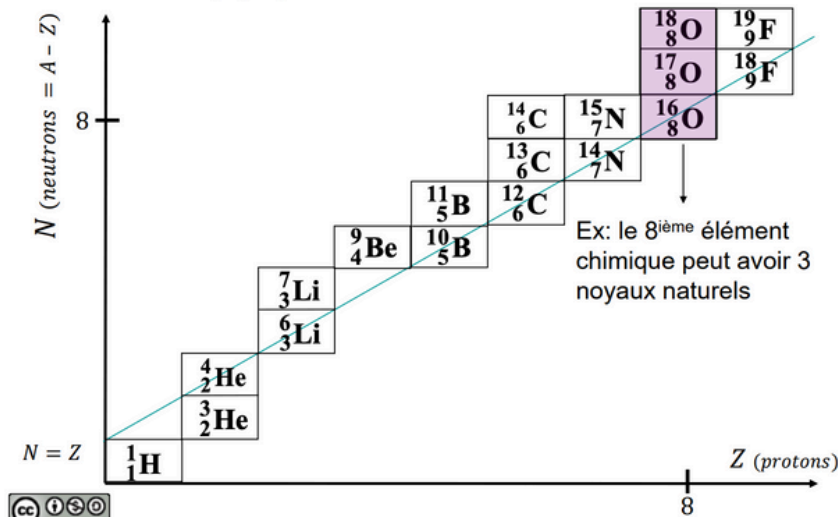
Par exemple, un atome qui possède 6 protons sera toujours un carbone. Cette classification regroupe les éléments ayant des **propriétés physicochimiques proches** de la même colonne : on parle de **famille** et c'est celle-là qui intéresse les chimistes. En physique nucléaire, on va utiliser une autre classification qui est plus adaptée aux problématiques qu'on se pose.

### b) Nombre de neutrons A-Z

En physique nucléaire, on utilise plutôt une classification qui va tenir compte du **nombre de neutrons** : c'est la *table des nucléides*. Elle permet de caractériser les différentes formes du noyau en fonction de Z et N. Cette représentation place les noyaux dans un repère cartésien, qui a comme **abscisse** le nombre de **protons Z** et en **ordonnée** 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.



$N = A - Z = f(Z)$ : « table des nuclides »  
classification de physique nucléaire

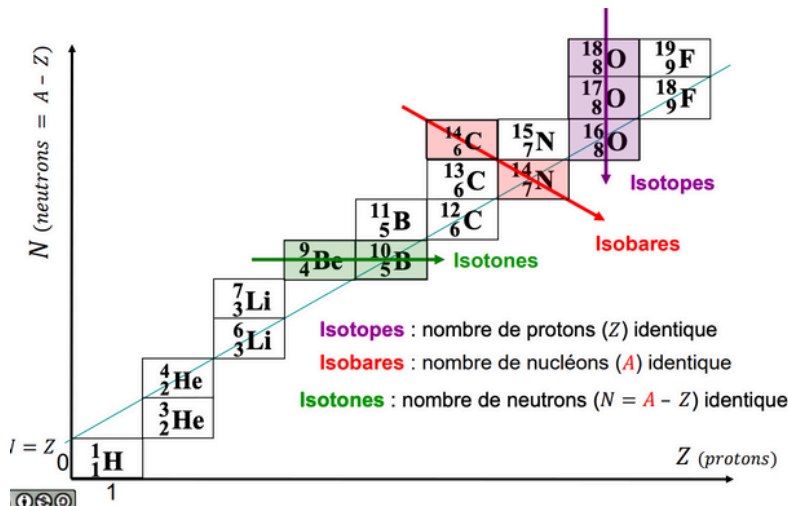


On va prendre l'exemple de l'oxygène, qui a 8 protons, et on voit qu'il existe sous 3 formes solides :

- ${}^{16}_8\text{O}$  : possède 8 protons et 8 neutrons, il est stable et est le plus répandu
- ${}^{17}_8\text{O}$  : possède 8 protons mais 9 neutrons, il est instable
- ${}^{18}_8\text{O}$  : possède 8 protons mais 10 neutrons, il est instable aussi

On voit donc ici l'importance du nombre de neutrons qui fait apparaître les variétés isotopiques d'un même élément.

### c) Classification des nucléides (hyper important)



- Les **isotoPes** : noyaux ayant le même nombre de **Protons Z**. Ils ont le même symbole chimique (c'est le même élément) mais un nombre de neutrons différent (comme l'exemple de l'oxygène précédemment) :  ${}^{131}_{53}\text{I}$ ,  ${}^{123}_{53}\text{I}$
- Les **isobAres** : noyaux ayant le même nombre de nucléons A. Leur symbole chimique est différent, ce n'est plus le même élément, exemple :  ${}^{14}_6\text{C}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}$
- Les **isotoNes** : noyaux ayant le même nombre de **Neutrons N**. Ce sont donc 2 éléments différents, exemple :  ${}^9_4\text{Be}$ ,  ${}^9_5\text{B}$



## d) Abondance isotopique

Ces effets cellulaires peuvent être très variés selon le type de cellule irradiée et selon la dose d'irradiation reçue :

	${}^{14}_6\text{C}$	${}^{15}_7\text{N}$
	${}^{13}_6\text{C}$	${}^{14}_7\text{N}$
${}^{11}_5\text{B}$	${}^{12}_6\text{C}$	
${}^{10}_5\text{B}$		

N ↑  
Z →

Ce tableau illustre la notion d'**abondance isotopique**. La majorité des éléments chimiques **existent à l'état naturel** sous la forme d'un **mélange** de plusieurs isotopes.

Par exemple, le carbone existe sous plusieurs formes, avec toujours 6 protons mais avec un nombre de masse différent (12, 13 ou 14), *rappelez vous du carbone 14 qu'on voyait en cours pour la datation au lycée.*

Exemple du carbone naturel:

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

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

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

L'abondance isotopique, c'est la **fraction molaire** de chaque isotope exprimée en %. La **somme** des différents **isotopes** d'un même élément chimique est égale à **100%**.

## e) Nombre de masses

Le nombre de nucléons A correspond à la **valeur entière la plus proche de la masse de l'atome** exprimée en unité de masse atomique, ou alors de la masse atomique d'une mole d'atome exprimée en g. (*encore une fois par rapport à ça, que ce soit g ou g/mol c'est la même parce qu'on parle d'une seule mole, ne vous prenez pas la tête*)

La **valeur approchée de la masse de l'atome** correspond à A puisque chaque nucléon a une valeur approximative de 1u (avec la masse d'un électron qui est négligeable).

✧ **Convention d'écriture** :  $M$  = masse de l'atome /  $M$  = masse du noyau

Attention à ne pas confondre les 2

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

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

La masse du noyau est donc égale à la masse de l'**atome moins** la masse des électrons.

**$\Delta M$**  = défaut de masse du noyau qui correspond à l'**énergie de liaison** entre les nucléons du noyau.

✧ **Équivalence masse/énergie** : D'après la loi d'Einstein, on dit que  $E = mc^2$  avec m en kg, c en m/s et E en Joules. Cependant, l'énergie est généralement en eV et non en joules et la masse en u et non en kg. Pour passer d'une unité à l'autre, on utilise l'**équivalence** :



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

*la fameuse*



## f) Nucléons

Par analogie avec la nomenclature des noyaux, on va pouvoir écrire :

- PROTON:  ${}^1_1p$  ou  ${}^1_1H$  ou  $H^+$  existe à l'état libre (dissociation acide)
- NEUTRON:  ${}^1_0n$  instable:  ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}$  ( $T_{1/2} \approx 10 \text{ min}$ )



Rappelez-vous du cours de Physique de la matière, en **dehors** du noyau, le **neutron est instable** (tandis que le proton est stable). En fait, la demi-vie d'un neutron en dehors du noyau est de 10 min, avant de se désintégrer en **1 proton, 1 électron et 1 anti-neutrino**. Il s'agit de la **transformation  $\beta^-$**  (omg des rappels des cours d'Ethel woouo)

Particule	Charge (e=1,6.10 <sup>-19</sup> C)	A	Masse (u)	Masse (Mev/c <sup>2</sup> )
${}^1_1p$	+1	1	1,00728	938,28
${}^1_0n$	0	1	1,00866	939,56
${}^0_{-1}e$	-1	0	0,00055	0,511

Ce qu'on va surtout noter ici, c'est la **différence de masse** entre le neutron et le proton, le *neutron* étant légèrement plus *lourd*. Cette différence de masse est à peu près de **0,14%** mais c'est **fondamental**, la **stabilité de l'univers** (oui la stabilité de l'UNIVERS) repose en grande partie sur cette différence de masse.

Les particules élémentaires sont classées en **2 types et 3 familles** (modèle standard). On ne s'intéresse qu'à la **famille I** dite « ordinaire », car elle regroupe les particules *qui nous entourent*. Les **familles II et III** concernent les particules des rayonnements *cosmiques* et des *réacteurs nucléaires*.

Dans la **famille I**, on retrouve **2 sous-groupes** :

☼ Les **Quarks** : ce sont les particules qui constituent les *nucléons*, donc les protons et les neutrons.

Ils sont prisonniers de ces particules, ils ne *peuvent pas se déplacer librement*. Il existe 2 types de quarks :

→ Up (u) chargé +2/3e

→ Down (d) chargé -1/3e

☼ Les **Leptons** : contrairement aux quarks, ils *peuvent se déplacer librement* dans l'espace, ils ne sont pas confinés dans le noyau.

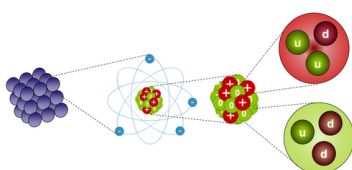
Il y a 2 types de leptons :

→ L'**électron**

→ L'**antineutrino** qui est très difficile à observer

On retrouve ensuite ce qu'on appelle les particules d'interactions : les **bosons**

	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	u up	c charm	t top	Y photon
Quarks				
mass	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
charge	-1/3	-1/3	-1/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons				
mass	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
charge	0	0	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	Z <sup>0</sup> Z boson
Leptons				
mass	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
charge	-1	-1	-1	+2
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	W <sup>±</sup> W boson
Leptons				Gauge Bosons



Comme on l'a dit, les nucléons sont eux-mêmes composés de **Quarks** (vu que ce ne sont pas des particules élémentaires de la matière) :

☼ Le **proton** : 2 quarks **up** et 1 **down** :  $uud = 2/3 + 2/3 - 1/3 = 1e$

☼ Le **neutron** : 2 quarks **down** et 1 **up** :  $udd = 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0e$

→ Vous comprendrez donc que les quarks expliquent la **charge** du proton et du neutron.



### III. ENERGIE DE LIAISON ET DEFAUT DE MASSE

*Rappels + on répète 40 fois la même chose*

**Rappels :**

La masse d'un noyau constitué est inférieure à la somme de la masse de ses nucléons A pris individuellement.

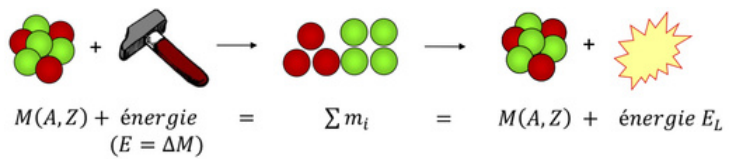
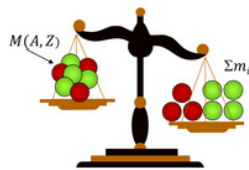
Il existe donc un défaut de masse  $\Delta M$  qui est égal à la somme des masses des nucléons pris individuellement moins la masse du noyau. Cette différence de masse est liée à l'énergie de liaison entre les nucléons dans le noyau, donnée par l'équivalence masse-énergie d'Einstein :  $E = mc^2$  avec  $\Delta M$  le défaut de masse.

**Définition**

Ce défaut de masse est équivalent à une énergie :  
 $E_L = \Delta M c^2$  qui correspond à l'énergie de liaison des nucléons.

Avec  $E_L$  en J ;  $\Delta M$  en kg ;  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s

$E_L = 931,5 \times \Delta M$  (MeV)  
 avec  $E_L$  en MeV et  $\Delta M$  en u



Il faut apporter une énergie E pour séparer les nucléons entre eux et casser le noyau. Et à l'inverse, si on veut créer un noyau à partir de nucléons, le noyau résultant aura une masse plus faible puisque de l'énergie va être libérée.

+ Ce phénomène est à l'origine de l'énergie nucléaire +

On peut généraliser cette notion de défaut de masse et de cette énergie de liaison : à 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.

• Atome:  $M(A, Z) < M(A, Z) + Zm_e$

$\Delta M_e(A, Z) = M(A, Z) + Zm_e - M(A, Z) = E_{le}$  Énergie de liaison des électrons

• Noyau:  $M(A, Z) < \Sigma m_i$

$\Delta M(A, Z) = \Sigma m_i - M(A, Z) = E_{ln}$  Énergie de liaison des nucléons

On va calculer le  $\Delta M$  entre l'atome pris dans sa globalité (noyau + électrons) et la masse de son noyau + ses électrons pris séparément. On se rend compte que la masse des particules séparées est légèrement supérieure à la masse de l'atome lié. Ce défaut de masse correspond donc à l'énergie de liaison entre les électrons périphériques et le noyau de l'atome.

Les énergies de liaison sont différentes entre les particules :

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

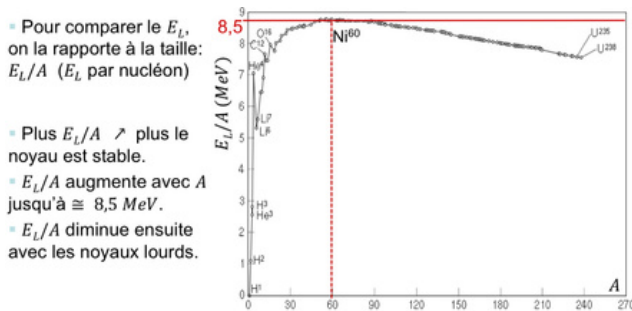


## IV. Facteurs de stabilité nucléaire

### a) Énergie de liaison par nucléon

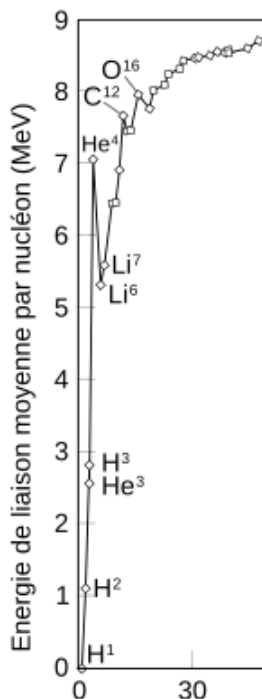


Le premier facteur de **stabilité** est l'**énergie de liaison des nucléons**. Pour pouvoir mieux comparer les différents noyaux, on va rapporter l'énergie de liaison du noyau par le nombre de masses, donc l'**énergie de liaison par nucléon** est égale à l'**énergie de liaison totale du noyau**/nombre de nucléons.



Sur ce schéma, vous avez en *abscisse* le **nombre de masses** des différents atomes et en *ordonnée* l'**énergie de liaison par nucléon**. Cette énergie de liaison varie entre **++ 1 et 8,8 MeV ++**. Plus l'énergie de liaison augmente, plus le noyau va être stable jusqu'à peu près un **maximum de 8,8 MeV** pour le  $\text{Ni}^{60}$ .

Ensuite, le nombre de masse va augmenter jusqu'à l'uranium 238 et l'**énergie de liaison par nucléon** va légèrement **diminuer** pour ces **noyaux lourds**.



On remarque ci-contre l'absence de régularité. On voit des pics que pour certains noyaux et ces pics correspondent à une **augmentation** très ponctuelle de l'**énergie de liaison** par nucléon, preuve d'une grande stabilité : on appelle ça les **nombres magiques**.

Par exemple :

$\text{He}^4$  un atome que vous connaissez déjà !!  $\rightarrow$  on observe un pic d'énergie pour  $\text{He}^4$ . Il est particulier car il est composé de 2 protons et 2 neutrons. L'Hélium est doublement magique, ça veut dire que d'une part son énergie de liaison est élevée et d'une autre part son nombre de neutrons et protons est égal.

$\text{O}^{16}$   $\rightarrow$  doublement magique  $\rightarrow$  nombre de protons et de neutrons égal donc 8

$\text{Pb}^{208}$   $\rightarrow$  doublement magique  $\rightarrow$  82 protons et 126 neutrons, tous les deux nombres magiques et particulièrement stable alors que pourtant très lourd

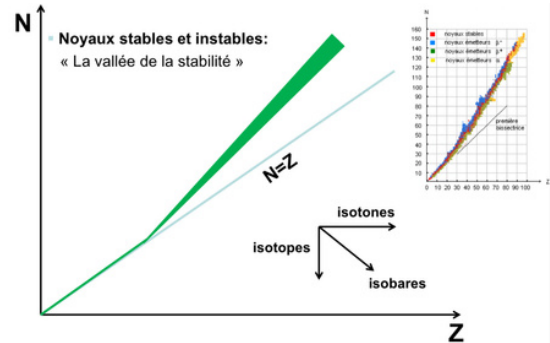


## b) Nombre de neutrons

Un second facteur de stabilité est le nombre de neutrons.

- ☼ Pour les noyaux **légers**, dont  $A < 20$ , ils sont stables si et seulement si : le **nombre de neutrons = nombre de protons**, ils sont donc situés sur la première bissectrice tel que  $N = Z$
- ☼ Pour les noyaux plus **lourds**, dont  $A > 20$ , ils seront stables en ayant un **nombre de neutrons > nombre de protons**. Ils se situeront sur une autre bissectrice  $N > Z$

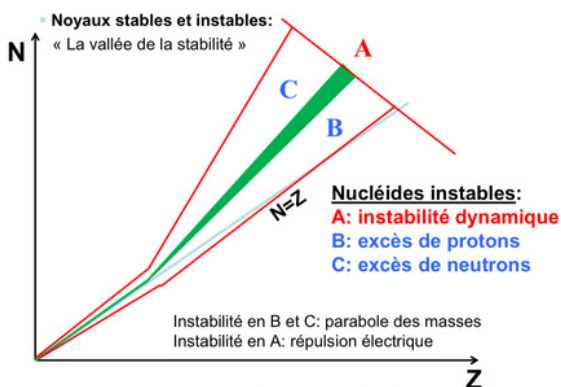
Sur ce graphe, les noyaux stables ne sont pas situés n'importe où :



Explication pour les noyaux lourds : Dites vous que si dans le noyau il n'y avait que des interactions **fortes** (forces **attractives**) entre les nucléons, cela suffirait à assurer la stabilité. Mais n'oubliez pas !! Il y a aussi des interactions **colombiennes** (forces **répulsives**) entre ces nucléons, vu que les protons sont chargés.

Maintenant, on veut compenser ces forces répulsives donc on veut **augmenter les forces attractives** et pour cela, on **augmente le nombre de neutrons**.

On voit ici que les **noyaux stables** se situent dans ce qu'on appelle la **vallée de la stabilité**, ils ont une **énergie de liaison de leurs nucléons** qui est **supérieure** à celles des **noyaux avoisinants**.



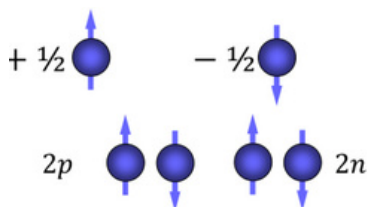
Les noyaux qui se trouvent **en dehors** de cette vallée de stabilité sont **instables** c'est-à-dire **radioactifs**. Ceci peut être dû à 2 choses :

- soit à un **excès de protons ou des neutrons**, cela amènera à des transformations radioactives que l'on reverra
- soit à un **excès de nucléons**, les forces répulsives l'emportent sur les forces attractives, on est dans la zone d'instabilité dynamique

## b) Parité du nombre de nucléons

Dernier facteur de stabilité des noyaux, c'est la **parité protons/neutrons**. 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 noyaux stables dont le nombre de protons et le nombre de neutrons est impair.

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



Interprétation : les nucléons possèdent un **spin +1/2** soit **-1/2**. On remarquera qu'ils tournent sur leur axe avec un type de spin, en fonction de leur **orientation**. Du fait de l'existence de ces 2 spins, les nucléons ont tendance à se regrouper par **paires**, avec un spin **opposé**. On a donc, à ce moment-là, des nucléons qui vont avoir des spins qui se **compensent**, s'annulent. Cette parité favorise la stabilité du noyau.

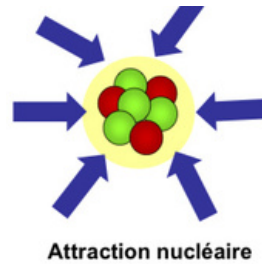


## V. Forces nucléaires

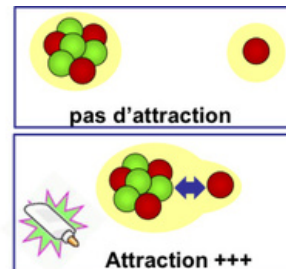
Les forces nucléaires sont liées aux **interactions des nucléons entre eux** et au sein du **noyau**. Ce qui est fondamental, c'est que ces forces sont responsables de la stabilité ou de l'instabilité du noyau. L'intensité de ces forces va correspondre à l'énergie moyenne de liaison au sein du noyau.

### a) Interaction forte (force nucléaire spécifique)

C'est une **force attractive à très courte distance** (entre 1 et  $2 \times 10^{-15}$  m) qui assure la cohésion du noyau. Elle est 100 à 1000 fois **supérieure à la force électrostatique**. Cette force est responsable du **défaut de masse**, elle correspond à la **masse perdue** par les noyaux. Cette interaction correspond à la mise en commun des particules d'interaction qui sont des **gluons** (de la famille des bosons).



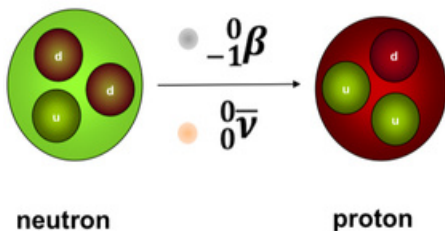
Attraction nucléaire



pas d'attraction

Attraction +++

### b) Interaction faible



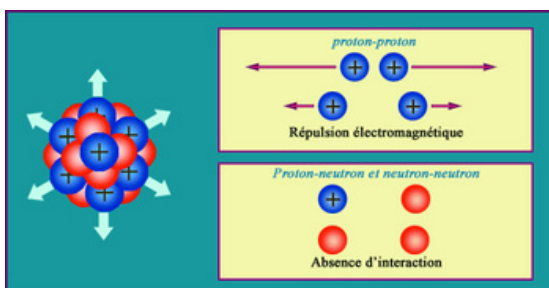
neutron

proton

C'est une **force discrète** qui s'exerce à très **courte distance** (env  $10^{-15}$  aussi) et à **l'intérieur** même des **nucléons**. Elle est fondamentale car elle est capable de changer la composition d'un noyau (neutron en proton ou vice versa ; c'est la **transformation radioactive isobarique** dont on reparlera).

On a ici l'exemple de la transformation d'un **quark down en un quark up** par le changement de sa charge électrique, ce qui aboutira à la transformation d'un **neutron en proton**. Cela s'accompagne par **l'émission d'un électron** issu du noyau et d'un antineutrino : il s'agit de la transformation radioactive isobarique.

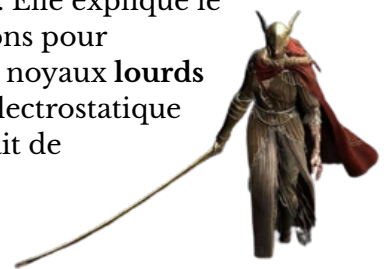
### c) Force électrostatique



C'est une force **coulombienne**, qui est **non spécifique** au noyau. Elle est **répulsive**, et agit entre les **protons** qui ont des charges positives. Elle explique le besoin d'avoir des neutrons pour maintenir la **stabilité** des noyaux **lourds** pour lesquelles la force électrostatique est plus importante du fait de **l'abondance** de protons.

Elle reste nettement **plus faible** que l'interaction forte.

L'intensité de ces forces va correspondre à l'énergie moyenne de liaison au sein du noyau. La **stabilité** ou **l'instabilité** d'un noyau est le résultat de la **compétition de ces 3 forces**.



## VI. Modèles nucléaires

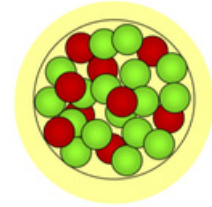
### a) Modèle de la goutte sphérique

C'est un modèle relativement simple :

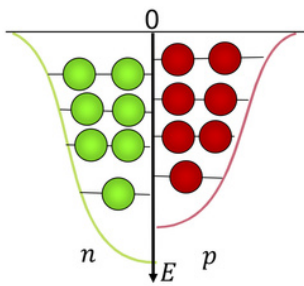
- Le noyau est assimilé à un liquide constitué de nucléons.
- Ces derniers sont confinés dans cette goutte par l'interaction forte (attractive)

Caractéristiques :

- Incompressible
- Sphérique, on peut calculer son rayon
- Répartition de densité homogène des charges au sein du noyau



### b) Modèle en couches



C'est un modèle analogue à celui des atomes.

Les nucléons sont caractérisés par un **nombre quantique**. Ils se répartissent dans le noyau dans différentes couches et sous-couches étant caractérisées par un **couplage spin-orbite**.

Il y aura un nombre **maximum** de nucléons par **couche** avec un remplissage successif des couches et une **différence entre les protons et les neutrons**.

Ce modèle permet d'expliquer la **stabilité des noyaux à nombre magique**. Ces nombres magiques correspondent à la **saturation** d'une couche. Exemple :  ${}^4_2\text{He}$  qui a 2 protons et 2 neutrons. C'est un atome doublement magique dans lequel la première couche est saturée.

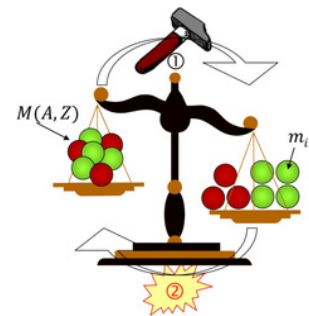
## VII. Réactions de fission et de fusion nucléaires

*Pour cette partie, remettez vous en tête la loi d'équivalence masse-énergie.*

Au niveau des nucléons d'un noyau :

+ Si on veut **séparer** un noyau en ses différents éléments constitutifs que sont les nucléons, on doit faire un **apport d'énergie de l'extérieur** pour casser les liaisons. Selon la loi d'Einstein, une **consommation** d'énergie va se traduire par un **gain de masse**.

- À l'inverse, si on part des nucléons et que l'on veut **recréer le noyau**, les nucléons doivent **acquérir** une énergie de liaison qui se traduira par un **défaut de masse**.

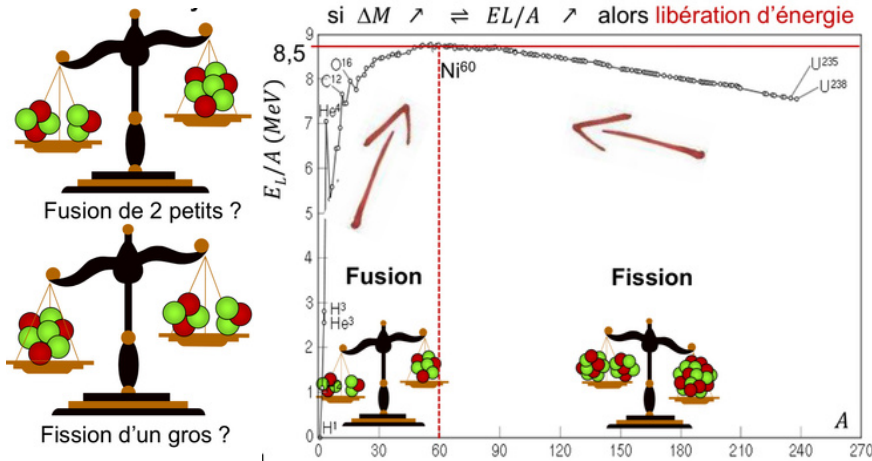


**GAIN DE MASSE = CONSOMMATION D'ÉNERGIE**  
**PERTE DE MASSE = LIBÉRATION D'ÉNERGIE**

Nous avons vu que la fusion et la fission sont 2 phénomènes qui libèrent de l'énergie :

- Le phénomène de **fusion** consiste à fusionner **deux petits noyaux en un noyau de masse plus importante**. On obtient une augmentation d'énergie de liaison avec une perte de masse du système = **on libère de l'énergie**
- A l'inverse, la **fission** part d'un **très gros noyau que l'on fissionne en 2 plus petits**. Le système final aura une masse plus faible que le système initial. On obtient donc également une perte de masse = **on libère de l'énergie**





Dans les 2 cas, on a une perte de masse avec libération d'énergie ce qui est contradictoire vu que dans la fission on casse un gros noyau pour en obtenir un plus petit et dans la fusion c'est l'inverse. Le graphique à gauche va permettre de comprendre que fission et fusion sont 2 phénomènes qui libèrent de l'énergie

**On répète**

La **fusion** entraîne une augmentation de l'énergie de liaison par nucléon (on se rapproche de  $E_L/A_{max}$ ). On a une **baïsse de masse** (augmentation de  $\Delta M$ ) de votre noyau final par rapport aux deux noyaux initiaux. On aboutit à une **libération d'énergie**.

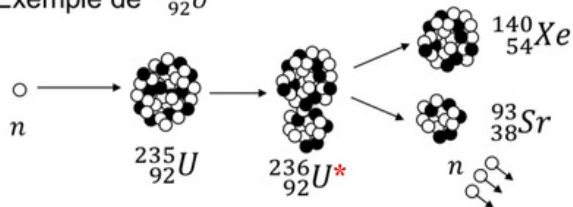
La **fission** entraîne également une augmentation de  $E_L/A$ . Un gros noyau instable se divise en deux noyaux plus petits et plus stables. On a une **perte de masse** (augmentation de  $\Delta M$ ) entre le noyau initial et les noyaux finaux. On obtient également une **libération d'énergie**

**Conclusion** : lorsqu'on a une augmentation du défaut de masse  $\Delta M$ , l'énergie de liaison par nucléon  $E_L/A$  augmente aussi et on a alors une libération d'énergie.

**a) Fission nucléaire**

Prenons l'exemple de l'*Uranium 235*, utilisé dans les centrales nucléaires pour faire de l'énergie.

Exemple de  $^{235}_{92}U$

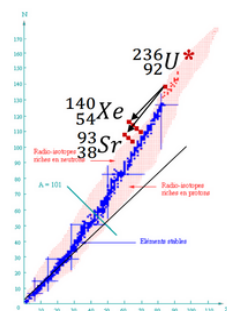


Comment ça marche ??

Première étape : bombarder  $^{235}U$  par un neutron pour donner  $^{236}U$ , qui est très instable du fait de son excédent de nucléons → Pour essayer de retourner à la stabilité, le noyau père se désintègre en 2 noyaux fils :  $^{93}Sr$  et  $^{140}Xe$ .

Quand il y a un excès de neutrons, le noyau va, via la **radioactivité  $\beta^-$** , transformer un neutron en un proton pour retourner vers une zone de stabilité.

Calcul de l'énergie libérée : On va raisonner avec l'énergie de liaison par nucléon de nos différents noyaux :



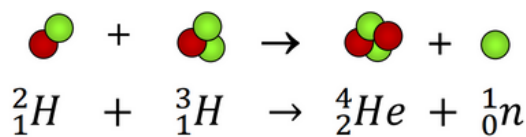
Calcul de l'énergie libérée (via l'évolution des  $E_L$ )

	$\frac{1}{0}n$	$+$	$\frac{235}{92}U$	$\rightarrow$	$\frac{140}{54}Xe$	$+$	$\frac{93}{38}Sr$	$+$	$3\frac{1}{0}n$
$E_{L/A}$	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
Total avant =			1762,5 MeV		après =		1938,5 MeV		
$\Delta E_L =$			1938,5 - 1762,5 =			176 MeV			

On prend l'énergie de liaison par nucléon de chaque noyau que l'on **multiplie par le nombre de nucléons**, on obtient l'énergie de liaison totale du noyau. Ensuite, on fait le total des énergies dans l'état initial et dans l'état final. On soustrait les deux et on obtient l'**énergie libérée** par la réaction de fission de  $^{235}U$  qui est de 176 MeV



## b) Fusion nucléaire



On voit ici l'exemple de la fusion de deux atomes d'hydrogène en un atome d'hélium. Cette réaction est essentielle, elle permet au **soleil de produire de l'énergie**.

Il y a plusieurs isotopes de l'atome d'hydrogène :  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$  (deutérium) et  ${}^3_1\text{H}$  (tritium)

La réaction de **fusion** s'effectue entre un noyau de **deutérium** et de **tritium** qui donne un **noyau d'hélium** et un **neutron**.

Calcul de l'énergie libérée : On calcule de la même manière que précédemment. On utilise les **énergies de liaison par nucléon** que l'on **multiplie** pour obtenir l'**énergie de liaison totale** pour un noyau. On fait la **différence** entre **état initial** et **état final** et obtient l'**énergie libérée** par la réaction de fusion de **17,6 MeV**.



■ Calcul de l'énergie libérée

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

$$\begin{array}{l}
 \text{Total avant} = 10,4 \text{ MeV} \quad \text{après} = 28 \text{ MeV} \\
 \Delta E = 28 - 10,4 = 17,6 \text{ MeV libérés}
 \end{array}$$

## c) Applications

**FISSION** = 2 types : **induite** et **spontanée**

La fission **spontanée** c'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'années**.

On va donc **induire** sa fission en le **bombardant de neutrons** comme on l'a vu précédemment.

→ Un exemple malheureux d'application, c'est la **bombe atomique**. La bombe larguée par les Américains sur Hiroshima contenait de l'**Uranium 235**.



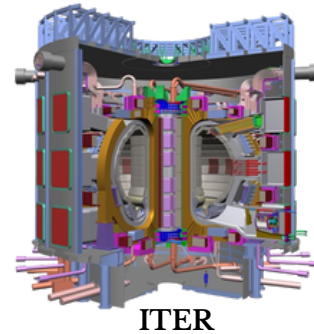
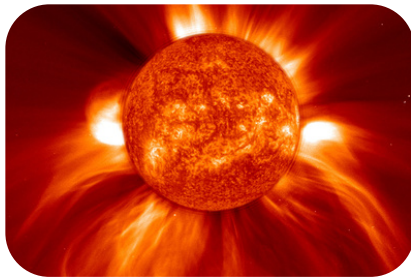
→ Un autre exemple d'application civile, c'est dans les **centrales nucléaires** qui produisent de l'**électricité** par **fission de l'uranium**. La fission est ici contrôlée.



**FUSION** : Elle 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**.

→ **Application militaire** : bombe H (*pour hydrogène*), qui utilise la réaction de fusion. Elle est nettement plus destructrice qu'une bombe nucléaire à uranium (*à noter que pour réaliser une fusion de la sorte, il faut un apport conséquent d'énergie qu'une fission nucléaire réalise, ainsi on a une première fission qui va apporter de l'énergie pour réaliser ensuite la fusion, qui va libérer une énergie encore plus grande*)

→ **Application scientifique** : les réacteurs thermonucléaires ITER qui sont destinés à produire 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 (*en France wsh incroyable*)



ITER

DEDIIIIII

(VOUS AVEZ LES QCMs PRESENTIELS DU PROF JUSTE APRES)

Dédi à ma famille que j'aime plus que tout au monde

Dédi à Auscaaaaaaaaa et à son jeu préféré Elden Ring (vu que c'est le délire de la fiche en gros)

Dédi à ma ptite Naw

Dédi à la team Jeuxnou

Dédi à l'ours (anciennement le sanglier)

Dédi à mes fillots Lisa, Chloe, Mathis, Naïs, Duncan, Eva et Maya, vous êtes les boss des boss et je crois 100% en votre réussite

Dédi à Bobby Bob

Dédi à la bossa nova je t'aime

Dédi à Bloodborne parce que c'est quand même le prime du prime

Dédi à Vaïana ma sœur antillaise qui ramène les meilleurs avocats

Dédi à la Switch que ma sœur vient de s'acheter, c'est la mienne maintenant hehe

Dédi spéciale à mes parents qui sont sûrement les plus adorables êtres humains ayant existés

Mini dédi photo



## QCMs DU PROFESSEUR HUMBERT EN PRÉSENTIEL

**QCM 1** : Concernant la nomenclature du noyau, quelle(s) est (sont) la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) X est le composé chimique étudié
- B) A est le nombre de neutrons du noyau
- C) Z est proportionnel à la charge électrique du noyau
- D) La nomenclature du noyau s'écrit  ${}^A_ZX$
- E) Les réponses A, B, C et D sont fausses

**QCM 2** : Concernant la classification des noyaux, quelle(s) est (sont) la (les) proposition(s) vraie(s) ?

- A) La classification périodique des éléments représente tous les éléments chimiques, ordonnés par numéro atomique croissant
- B) Le 6ème élément chimique de la classification périodique a normalement 6 électrons
- C) La classification périodique est peu utile lorsque l'on travaille sur les transformations radioactives
- D) La table des nucléides fait apparaître en abscisse le numéro atomique Z et en ordonnée le nombre de neutrons N
- E) Les réponses A, B, C et D sont fausses

**QCM 3** : Concernant la classification des noyaux, quelle(s) est (sont) la (les) proposition(s) vraie(s) ?

- A) Les masses d'un proton et d'un neutron pris séparément sont différentes
- B) La masse d'un atome d'oxygène  ${}^{16}\text{O}$  vaut exactement  $16u$
- C)  $u$  est une unité du système international
- D) La masse d'un noyau atomique est plus lourde que la masse de ses constituants pris séparément (n et p)
- E) Un proton libre (c'est-à-dire en dehors du noyau) est instable avec une demi-vie d'environ 10min



## QCMs DU PROFESSEUR HUMBERT EN PRÉSENTIEL

**QRU 4 : Calculez l'énergie de liaison par nucléon (en MeV) de  $(210, 82)\text{Pb}$**

On donne

$$M(210, 82)\text{Pb} = 209,984 \text{ u}$$

$$\text{Masse du neutron isolé } (m_n) = 1,009 \text{ u}$$

$$\text{Masse du proton isolé } (m_p) = 1,007 \text{ u}$$

$$1 \text{ u} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Célérité} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ J}$$



## QCMs DU PROFESSEUR HUMBERT EN PRÉSENTIEL

**QCM 1 :** Concernant la nomenclature du noyau, quelle(s) est (sont) la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) X est le composé chimique étudié
- B) A est le nombre de neutrons du noyau
- C) Z est proportionnel à la charge électrique du noyau
- D) La nomenclature du noyau s'écrit  ${}^A_ZX$
- E) Les réponses A, B, C et D sont fausses

A) **Faux** : c'est élément et pas composé (piège wow)

B) **Faux** : c'est le nombre de nucléons

C) **Vrai**

D) **Vrai**

E) **Faux**

**QCM 2 :** Concernant la classification des noyaux, quelle(s) est (sont) la (les) proposition(s) vraie(s) ?

- A) La classification périodique des éléments représente tous les éléments chimiques, ordonnés par numéro atomique croissant
- B) Le 6ème élément chimique de la classification périodique a normalement 6 électrons
- C) La classification périodique est peu utile lorsque l'on travaille sur les transformations radioactives
- D) La table des nucléides fait apparaître en abscisse le numéro atomique Z et en ordonnée le nombre de neutrons N
- E) Les réponses A, B, C et D sont fausses

A) **Vrai**

B) **Vrai** : nombre de protons = nombre d'électrons

C) **Vrai** : en radioactivité on va souvent se retrouver avec des isotopes donc la classification périodique ne nous donnera pas assez d'infos, contrairement à la table des nucléides

D) **Vrai**

E) **Faux**

**QCM 3 :** Concernant la classification des noyaux, quelle(s) est (sont) la (les) proposition(s) vraie(s) ?

- A) Les masses d'un proton et d'un neutron pris séparément sont différentes
- B) La masse d'un atome d'oxygène  ${}^{16}\text{O}$  vaut exactement  $16u$
- C)  $u$  est une unité du système international
- D) La masse d'un noyau atomique est plus lourde que la masse de ses constituants pris séparément (n et p)
- E) Un proton libre (c'est-à-dire en dehors du noyau) est instable avec une demi-vie d'environ  $10\text{min}$

A) **Vrai** : le neutron est plus lourd

B) **Faux** : le seul pour lequel ça tombe pile c'est le carbone  ${}^{12}\text{C}$  à  $12u$

C) **Faux**

D) **Faux**

E) **Faux** : c'est le cas du neutron



## QCMs DU PROFESSEUR HUMBERT EN PRÉSENTIEL

QRU 4 : Calculez l'énergie de liaison par nucléon (en MeV) de  $(210, 82)\text{Pb}$

On donne

$$M(210, 82)\text{Pb} = 209,984 \text{ u}$$

$$\text{Masse du neutron isolé } (m_n) = 1,009 \text{ u}$$

$$\text{Masse du proton isolé } (m_p) = 1,007 \text{ u}$$

$$1 \text{ u} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Célérité} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\Delta M \left( {}_{82}^{210}\text{Pb} \right) = (82 \times m_p) + (128 \times m_n) - M \left( {}_{82}^{210}\text{Pb} \right)$$

$$\Delta M \left( {}_{82}^{210}\text{Pb} \right) = (82 \times 1,007) + (128 \times 1,009) - 209,984$$

$$\Delta M \left( {}_{82}^{210}\text{Pb} \right) = (82,574) + (129,152) - 209,984$$

$$\Delta M \left( {}_{82}^{210}\text{Pb} \right) = 1,742 \text{ unités de masse atomique}$$

Loi d'équivalence masse-énergie  $\rightarrow$  pas besoin d' $E = mc^2 \rightarrow$  on prend  $931,5 \text{ MeV}/c^2$

$$E_l = 931,5 \times \Delta M \text{ avec } E_l \text{ en MeV et } \Delta M \text{ en u}$$

$$E_l = 931,5 \times 1,742$$

$$E_l = 1622,673 \text{ MeV}$$

Énergie de liaison par nucléon  $\frac{E_l}{A}$

$$\text{Énergie de liaison par nucléon} = \frac{1622,673}{210} \approx 7,727 \text{ MeV par nucléon}$$

Détail du calcul :

1622	210
- 1470	7,72
-----	
1520	
- 1470	
-----	
500	
- 420	
-----	
80	