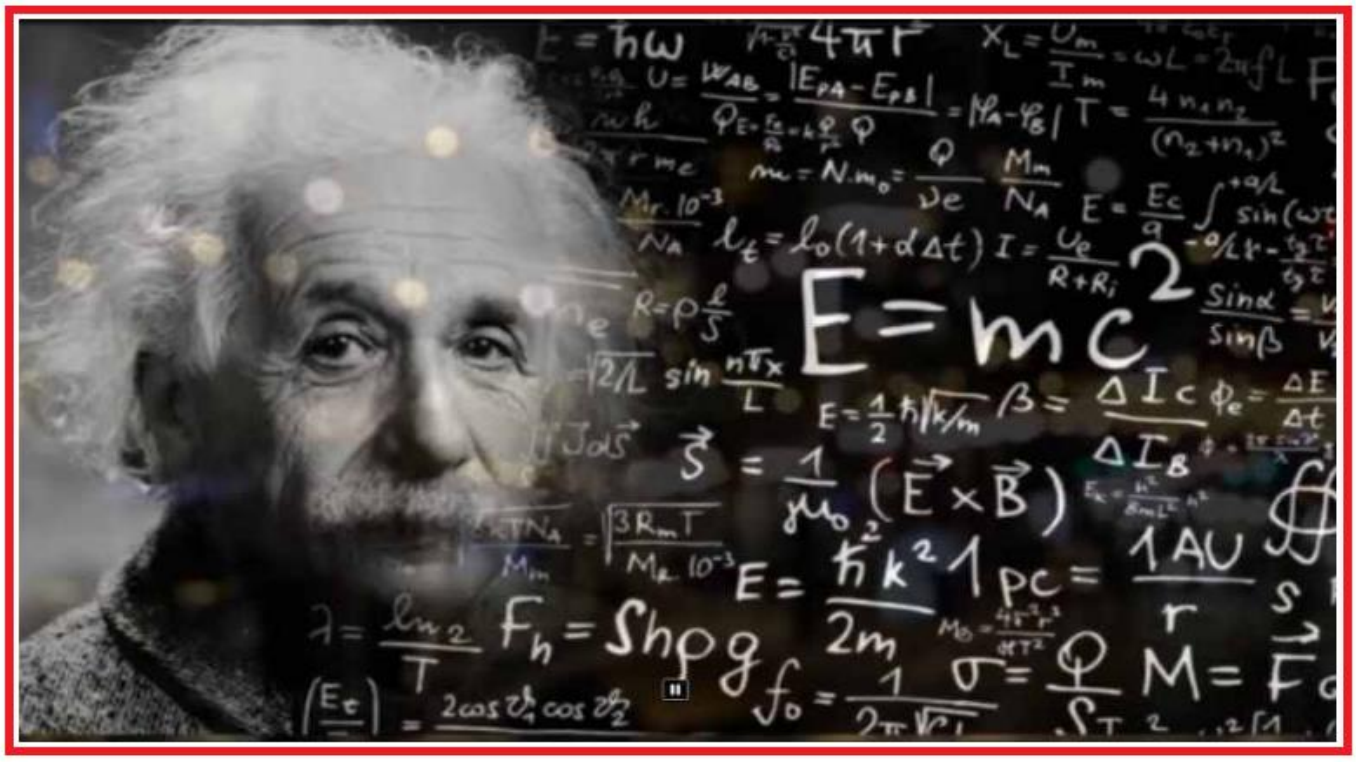
Cours de physique
Deuxième Bac
Sciences Physique

Noyaux, Masses Et Energie





Objectifs : *Connaissances et savoir-faire exigibles*

- *Définir et calculer un défaut de masse et une énergie de liaison*
- *Définir et calculer l'énergie de liaison par nucléon*
- *Savoir convertir des J en eV et réciproquement*
- *Connaitre la relation d'équivalence masse-énergie et calculer une énergie de masse*
- *Commenter la courbe d' Aston pour dégager l'intérêt énergétique des fissions et des fusions*
- *Définir la fission et la fusion et écrire les équations des réactions nucléaires en appliquant les lois de conservation.*
- *À partir de l'équation d'une réaction nucléaire, reconnaitre le type de réaction*
- *Faire le bilan énergétique d'une réaction nucléaire en comparant les énergies de masse*



1- Relation d'EINSTEIN

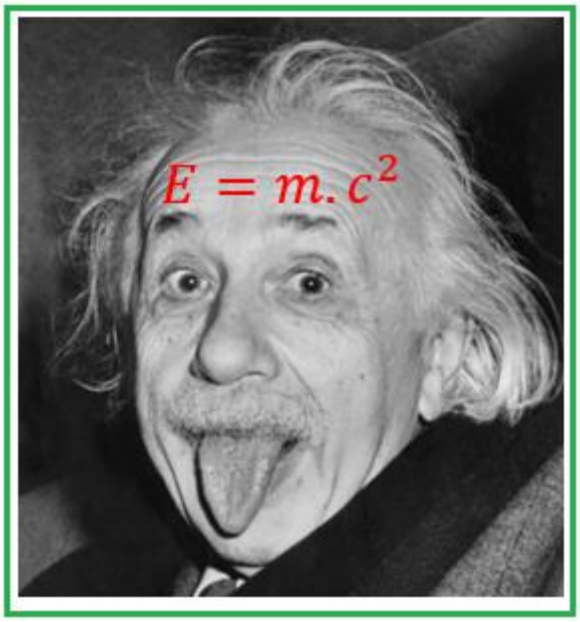
Albert Einstein né le 14 mars 1879 à Ulm (Wurtemberg, Empire allemand) et mort le 18 avril 1955 à Princeton (New Jersey, États-Unis), est un physicien théoricien. Il publie sa théorie de la relativité restreinte en 1905 et sa théorie de la gravitation, dite relativité générale, en 1915. Il contribue largement au développement de la mécanique quantique et de la cosmologie, et reçoit le prix Nobel de physique de 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique.
Il est aujourd'hui considéré comme l'un des plus grands scientifiques de l'histoire, et sa renommée dépasse largement le milieu scientifique. Il est la personnalité du 20e siècle selon l'hebdomadaire Time. Dans la culture populaire, son nom et sa personne sont directement liés aux notions d'intelligence, de savoir et de génie

En 1905 ALBERT EINSTEIN postula L'équivalence entre la masse et l'énergie :
Toute particule de masse m,possède une Energie E donnée par la relation :

$$E = m.c^2$$

C'est-à-dire chaque particule de masse m,au repos elle possède une énergie E .
Lorsque sa masse varie Δm son énergie varie aussi tel que :

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



- Si $\Delta m < 0$ alors $\Delta E < 0$, le système cède de l'énergie au milieu extérieur et sa masse diminue.
- Si $\Delta m > 0$ alors $\Delta E > 0$ le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur et sa masse augmente.

2- Unité de masse et d'énergie

2-1- Unité de masse

En physique nucléaire, les masses considérées étant petites, on les exprime en unité de masse atomique, de symbole μ : Une unité de masse atomique μ est égale à un 1/12 de la masse d'un atome de carbone 12 :

$$1\mu = \frac{M\left({}^{12}_{6}C\right)}{N_A}.\frac{1}{12} = 1{,}66054\times10^{-27}\,Kg \qquad \Rightarrow \quad 1\mu = 1{,}66054.10^{-27}Kg$$

2-2- Unité d'énergie

En chimie, on exprime parfois les énergies de liaisons chimiques en électronvolt (eV).
L'énergie libérée par une réaction nucléaire est environ un million de fois plus grande que celle libérée par une réaction chimique. Aussi, on utilise souvent, comme unité d'énergie ,le mégaélectronvolt $(MeV = 10^6 eV)$

$$1eV = 1{,}602177.10^{-19} J$$

2-3- Correspondance

D'après la relation d'Einstein, masse et énergie sont liées. une unité de masse atomique correspond à une énergie de :cas de m=1g

$$E = mc^2 = 1{,}66054\times10^{-27}\times(299792458)^2 = 1{,}49242\times10^{-10}\ j$$

$$= \frac{1{,}49242\times10^{-10}}{1{,}602177\times10^{-19}} = 931{,}49\times10^6\ eV = 931{,}49MeV$$

$$E = 1\mu\times c^2 \Rightarrow 1\mu = \frac{E}{c^2} = 931{,}49\frac{MeV}{c^2} = 931{,}49MeV\cdot c^{-2}$$

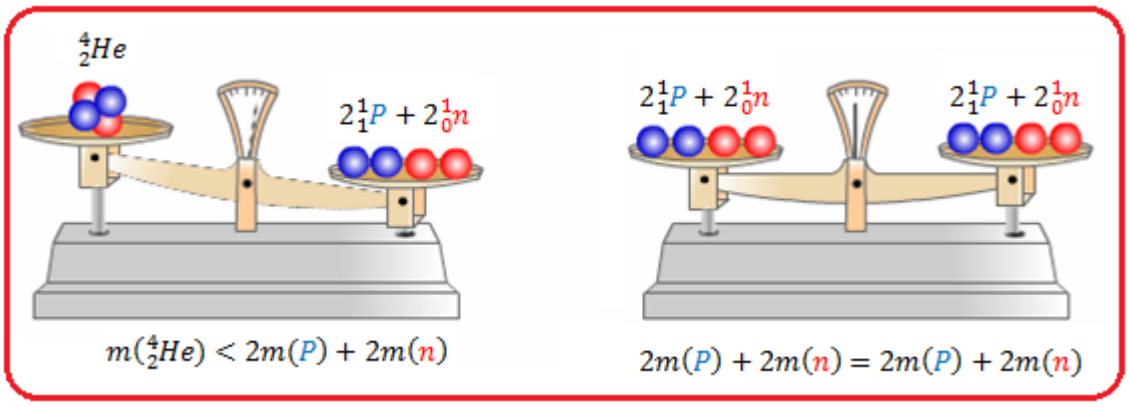
Donc $1\mu = 931{,}49\ MeV.c^{-2}$



3- L'énergie de liaison nucléaire

3-1- Le défaut de masses d'un noyau

a- Exemple



Un noyau d'hélium $\left(^4_2He\right)$est constitue de 2 protons et (4-2) neutrons, Comparons la masse du noyau d'hélium au repos et la masse de ses nucléons sépares, également au repos :

- La masse du noyau d'hélium : $M\left(^4_2He\right) = 4{,}00105\mu$

- La masse des nucléons sépares :
  $2m_p + (4-2)m_n = 4{,}032\mu$

Donc $m(^4_2He) < m(nucleons\ séparé)$

m

b- Généralité

Le défaut de masse Δm d'un noyau ${}^{A}_{Z}X$ est la différence entre la masse totale de ses nucléons séparés $\left[Zm_p + (A-Z)m_n\right]$ et la masse du noyau formé, au repos : $m\left({}^{A}_{Z}X\right)$

Dans le cas général :

Pour un noyau ${}^{A}_{Z}X$, le défaut de masse Δm est :

$$\Delta m = [Zm(P) + (A-Z)m(n)] - m({}^{A}_{Z}X)$$

3-2- Energie de liaison nucléaire

a- définition

L'énergie de liaison d'un noyau E_l est l'énergie qu'il faut fournir à un noyau pour le dissocier en ses nucléons. Elle est liée au défaut de masse Δm du noyau d'après la relation d'équivalence masse – énergie d'Einstein :

$$E_l = \Delta m.c^2$$

b- Exemple

Calculer l'énergie de liaison do polonium : $E_l({}^{210}_{84}Po)$

$$E_l({}^{210}_{84}Po) = \Delta m \times c^2 = \left[\ 84 \times m(p) + (210-84) \times m(n) - m({}^{210}_{84}Po)\ \right] \times c^2$$

$$E_l({}^{210}_{84}Po) = \Delta m \times c^2 = \left[\ 84 \times 1{,}007276 + 126 \times 1{,}008665 - 210{,}0008\ \right] \times c^2 = 1{,}702174\mu \times c^2$$

$$E_l({}^{210}_{84}Po) = 1{,}702174\mu \times c^2 = 1{,}702174 \times 931{,}5MeV.c^{-2}.c^2 = 1585{,}57508MeV$$

$$E_l({}^{210}_{84}Po) = 1585{,}57508MeV$$

3-3- Energie de liaison par nucléon

a- Définition

L'énergie de liaison par nucléon ξ_l d'un noyau est égale à son énergie de liaison totale E_l divisée par son nombre A de nucléons : $\xi_l = \frac{E_l}{A}$

b- Remarque

ξ_l Permet de comparer la stabilité des noyaux entre eux.les noyaux dont l'énergie de liaison par nucléon est la plus grande sont les plus stables.

c- Exemple

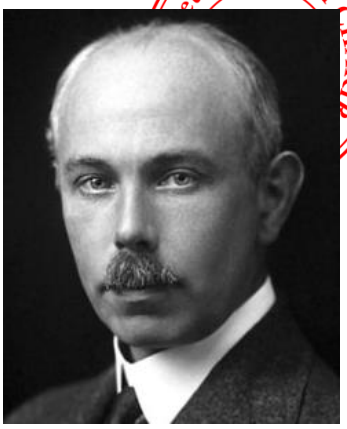
- Pour l'uranium 235 : $\xi_l({}^{235}_{92}U) = 7{,}7\ {}^{MeV}/_{nucleon}$
- Pour le Fer 56 : $\xi_l({}^{56}_{26}Fe) = 8{,}79\ {}^{MeV}/_{nucleon}$

  L'énergie de liaison par nucléons du Fer est effectivement plus importante que celle de l'uranium 235 : donc le Fer est plus stable que l'Uranium



3-4- Courbe d'ASTON

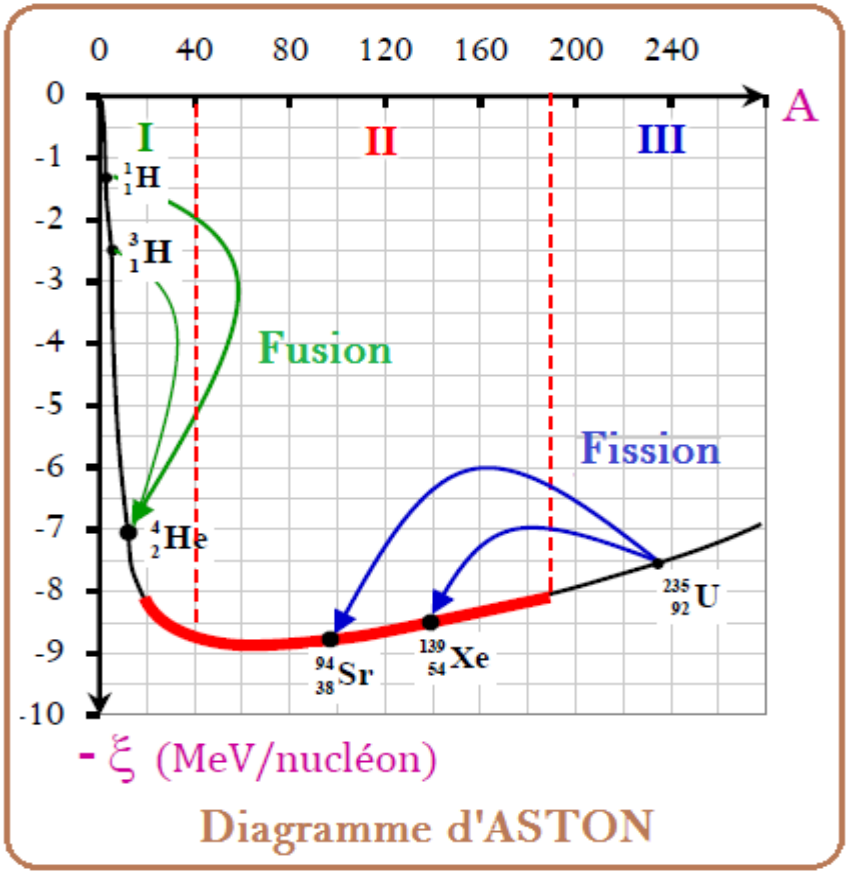
a- définition



Francis William Aston

- Né le 1er septembre 1877 à Harborne, Birmingham, Angleterre
- Décédé le 20 novembre 1945 à Cambridge, Angleterre) est un chimiste et physicien anglais. Il reçoit, en 1922, le prix Nobel de chimie « pour sa découverte, au moyen de son spectromètre de masse, des isotopes d'un grand nombre d'éléments non radioactifs et pour sa formulation de la règle des nombres entiers ».

La courbe d'Aston représente l'énergie de liaison par nucléon d'un noyau en fonction du nombre de nucléons., elle permet d'expliquer le passage d'un noyau instable à un noyau stable, par fusion ou fission.



b- Interprétation

- Pour :$A < 30$,on observe que $(-\xi)$ augmente tandis que A diminue.

Les noyaux sont moins stables, ils peuvent s'unirent pour donner un noyau plus lourd c'est :

La fusion nucléaire

- Pour : $20 < A < 190$,on observe que $(-\xi)$ est minimale, donc les noyaux sont : plus stables
- Pour : $A > 190$,on observe $-\xi$ augmente progressivement lorsque A augmente . les noyaux sont moins stable, ils peuvent diviser pour donner un noyau plus léger c'est : La fission nucléaire

  Plus un noyau est lourd (A élevé) ,plus son énergie de liaison est importante .Toutefois ,cela n'implique pas qu'il soit stable.

4- Les réactions nucléaires provoquées



4-1- Définition

une réaction provoquée est une réaction qui se produit par l'intervention de l'homme ; il existe deux types :

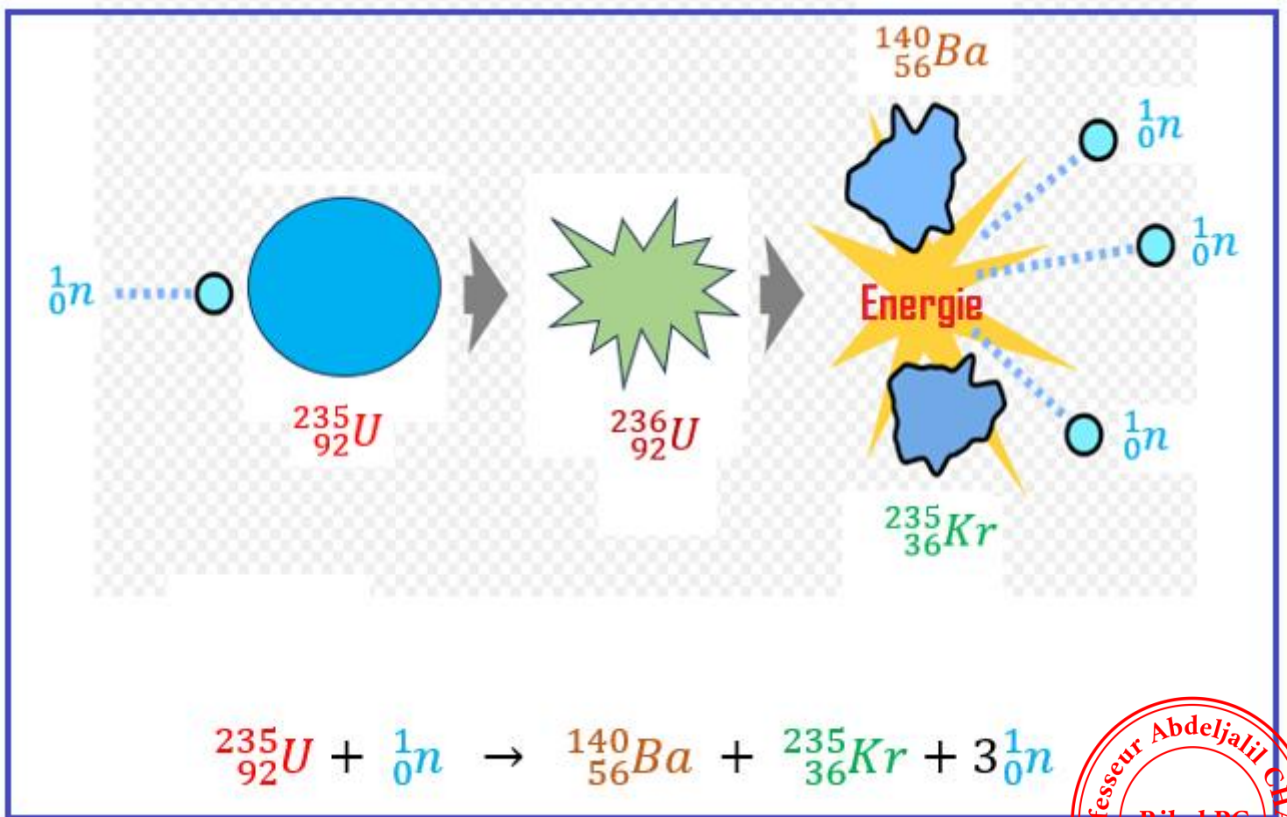
4-2- La fission nucléaire

a- Définition

La fission est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle un noyau lourd "fissible"(bombarder par un projectile nucléaire, neutron), donne naissance à deux noyaux plus légers.

b- Exemples

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

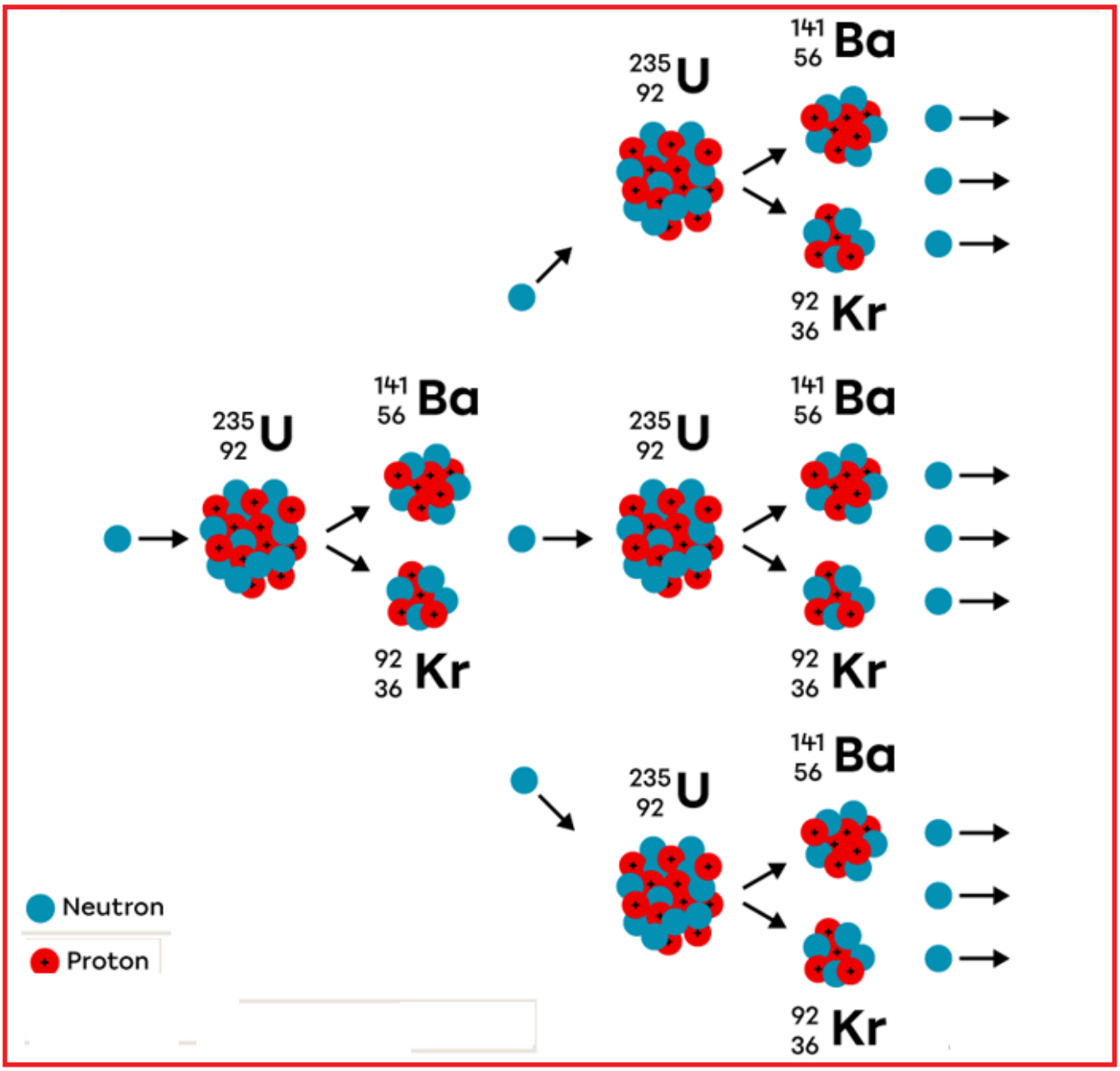


$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{140}_{56}Ba + ^{235}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n$$



c- Remarque

Les neutrons émis lors de la fission peuvent à leur tour provoquer la fission d'autres noyaux. Si le nombre de neutrons émis lors de chaque fission est supérieur à 1, il peut se produire une réaction en chaine qui devient rapidement incontrôlable (principe de la bombe à fission). Dans les centrales nucléaires, la réaction en chaine est contrôlée par des barres qui absorbent une partie du flux de neutrons.



d- Utilisation

La fission nucléaire est la base de :

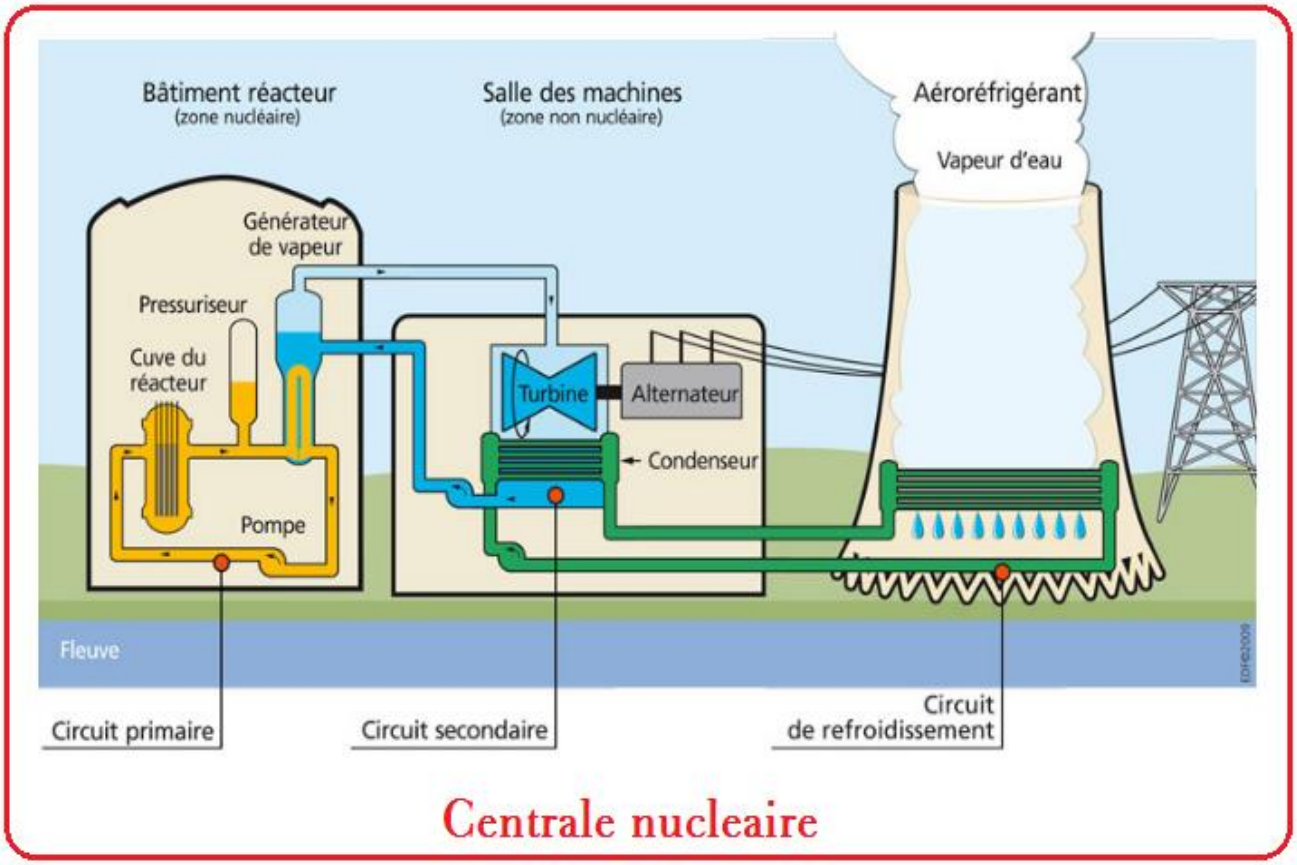
- La production de la bombe atomique


La bombe atomique de Hirochima (Japon)

La bombe A, communément appelée bombe atomique, bombe à fission ou bombe nucléaire, est un engin explosif où l'énergie est obtenue par la fission nucléaire d'une masse critique d'éléments fissiles comme l'uranium 235 ou le plutonium 239.
Les bombes à fission furent les premières armes nucléaires développées
Dans l'histoire de l'arme nucléaire, c'est à ce jour le seul type de bombe ayant servi lors d'un conflit.
Durant la Seconde Guerre mondiale,

deux bombes A, baptisées respectivement *Little Boy* (à l'uranium) et *Fat Man* (au plutonium), furent utilisées par l'armée américaine pour bombarder les villes d'Hiroshima et Nagasaki en août 1945.

- Production de l'électricité dans les centrales nucléaire



Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité, comprenant un ou plusieurs réacteurs nucléaires. La puissance électrique d'une centrale varie de quelques mégawatts à plusieurs milliers de mégawatts en fonction du nombre et du type de réacteur en service sur le site.

L'énergie d'une centrale nucléaire provient de la fission de noyaux d'atomes lourds. Celle-ci dégage de la chaleur, qui sert dans un premier temps à vaporiser de l'eau, comme dans toute centrale électrique thermique conventionnelle, puis la vapeur d'eau produite entraîne en rotation une turbine accouplée à un alternateur qui produit à son tour de l'électricité. C'est la principale application de l'énergie nucléaire dans le domaine civil.

On compte, dans le monde, environ 250 centrales nucléaires qui ont produit 10 % de l'électricité mondiale en 2020. Ces centrales comptent en décembre 2022 un total de 439 réacteurs opérationnels, dont 16 réacteurs japonais en attente d'autorisation de redémarrage. Leur puissance atteint 394 GW (897 MW en moyenne par réacteur) et 57 réacteurs en cours de construction (59 GW).Les centrales en fonctionnement dans le monde font appel à plusieurs technologie caractérisées par le choix du combustible, du modérateur et du fluide caloporteur. le combustible d'une centrale nucléaire est constitué d'atomes fissibles à partir duquel on va pouvoir produire de l'électricité.

Les principaux atomes fissiles sont

- l'uranium 235, l'uranium 233,
- le plutonium 239 et le plutonium 241.

L'uranium étant présent dans la nature, il est donc le plus utilisé dans la centrale nucléaire. Le combustible nucléaire est placé dans le cœur du réacteur. L'uranium est enrichi puis converti en poudre d'oxyde d'uranium enfin il est comprimé sous forme de pastilles (de 7 à 8 mm de diamètre pour les REP). Qui sont empilé dans la gaine (sorte de tube métallique)

Professeur Abdeljalil CHAKIR RihabPC

4-3- La fusion nucléaire

a- Définition

La fusion nucléaire est une réaction au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd.

Pour que la fusion soit possible, les deux noyaux doivent posséder une grande énergie cinétique de façon à vaincre les forces de répulsion électriques. Pour cela le milieu doit être porte à très haute température et se trouve alors sous forme de plasma. L'énergie libérée au cours d'une fusion est considérable. Ce sont des réactions de fusion qui produisent l'énergie des étoiles. Dans la bombe thermonucléaire (appelée bombe H), la fusion nucléaire est incontrôlée et explosive La très haute température nécessaire au déclenchement de la réaction est obtenue grâce à une bombe à fission (bombe A) portant le nom d'"allumette". Ce type de réaction présenterait un grand intérêt pour la production d'énergie sur Terre, mais malheureusement, on ne sait pour l'instant pas la contrôler pour produire de l'électricité.

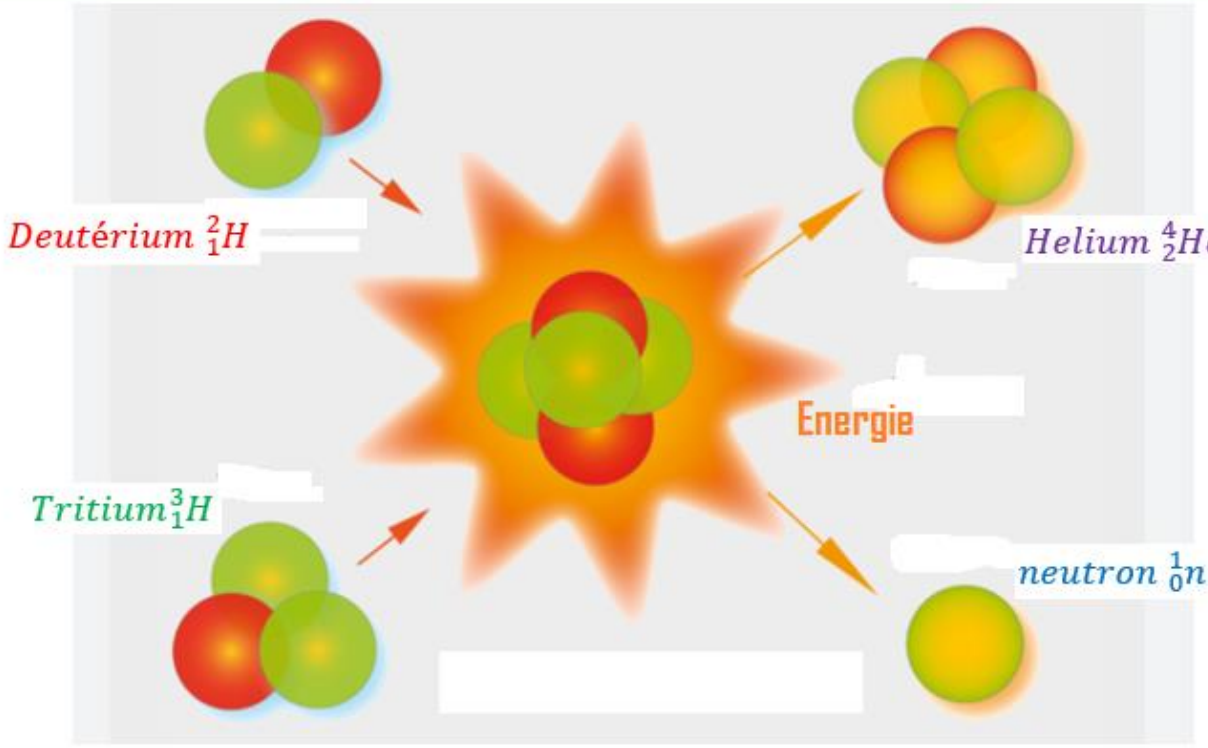
b- Remarque

Ce type de réaction présenterait un grand intérêt pour la production d'énergie sur Terre, mais malheureusement, on ne sait pour l'instant pas la contrôler pour produire de l'électricité

La bombe thermonucléaire – couramment appelée bombe H – constitue aujourd'hui la seule application pratique de la fusion nucléaire. Celle-ci a été testée pour la première fois en 1952 aux Etats-Unis dans la foulée de la maitrise de la bombe A (à fission nucléaire). Les armes thermonucléaires ont joué un rôle clé dans l'équilibre dissuasif entre les deux blocs pendant la guerre froide

Professeur Abdeljalil CHAKIR - RihabPC

c- Exemple



La fusion du deutérium ^2_1H avec le tritium ^3_1H produit l'hélium ^4_2He selon la réaction

$$^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$$

d- Avantage de la fusion

Les prochaines décennies sont d'une importance capitale pour la mise en place d'une stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

D'ici la fin du siècle, compte tenu de la croissance démographique, de l'augmentation de l'urbanisation et de l'extension du réseau électrique dans les pays en développement, la demande en énergie aura triplé. Le recours aux combustibles fossiles qui ont modelé la civilisation industrielle est synonyme d'émission de gaz à effet de serre et de pollution.

Il est urgent de trouver une nouvelle source d'énergie à grande échelle, non émettrice de CO_2, pérenne et disponible. La fusion offre les avantages suivants :

- Une énergie abondante :
  A masse égale, la fusion d'atomes légers libère une énergie près de quatre millions de fois supérieure à celle d'une réaction chimique telle que la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz, et quatre fois supérieure à celle des réactions de fission nucléaire. La fusion peut fournir l'énergie de base nécessaire pour satisfaire les besoins en électricité de nos villes et de nos industries.
- Des millions d'années :
  Les éléments deutérium et tritium sont les combustibles de fusion. Le deutérium peut être obtenu à partir de l'eau ; le tritium sera produit pendant la réaction de fusion lorsque les neutrons issus de la fusion des noyaux interagiront avec le lithium des modules placés dans la chambre à vide. (Les réserves de lithium dans la croûte terrestre permettraient l'exploitation de centrales de fusion pendant plus de 1 000 ans ; celles des océans pourraient répondre aux besoins pendant des millions d'années.) La capacité de générer du tritium par le biais de la réaction de fusion, et le récupérer, est essentielle pour les futures centrales de fusion industrielles.
- Aucune émission de CO_2 :
  La fusion ne génère pas de dioxyde de carbone ou d'autres gaz à effet de serre. Le sous-produit principal est l'hélium, un gaz inerte non toxique.
- Aucun déchet radioactif de haute activité à vie longue :
  Les réacteurs de fusion nucléaire ne produisent pas de déchets radioactifs de haute activité à vie longue. L'activation des composants d'un réacteur de fusion devrait être suffisamment faible pour que les matériaux puissent être recyclés ou réutilisés dans les 100 ans (selon les matériaux choisis pour la première paroi) qui suivent la mise à l'arrêt de l'installation.
- Aucune prolifération :
  La fusion n'utilise pas de matières fissiles comme l'uranium et le plutonium (le tritium radioactif n'est pas un matériau fissile ni fissionnable). Un réacteur de fusion ne contient pas d'éléments susceptibles d'être utilisés pour fabriquer des armes nucléaires.
- Aucun risque de fusion du cœur :
  Un accident nucléaire de type Fukushima ne peut pas se produire dans un réacteur de fusion. Les conditions propices aux réactions de fusion sont difficiles à atteindre ; en cas de perturbation, le plasma se refroidit en l'espace de quelques secondes et les réactions cessent. En outre, la quantité de combustible présente dans l'enceinte est insuffisante pour alimenter les réactions au-delà de quelques secondes et une « réaction en chaîne » est inconcevable du point de vue de la physique.
- Coût :
  La quantité d'énergie produite par un réacteur de fusion industriel, tels qu'ils pourront voir le jour dans la seconde moitié de ce siècle, sera équivalente à celle produite par un réacteur de fission — entre 1 et 1.7 gigawatts. Le coût moyen par kilowatt d'électricité ne peut pas encore être extrapolé ; pour cela, il faudrait plusieurs années d'opération du tokamak ITER. Comme de nombreuses nouvelles

technologies, les coûts seront plus élevés au début, la technologie étant nouvelle, puis décroissants par la suite dans la mesure où les économies d'échelle feront baisser les prix.

Le mix énergétique des prochaines décennies devra reposer sur une large variété de sources d'énergie différentes. En tant que nouvelle option énergétique non émettrice de carbone et non productrice de déchets nucléaires de haute activité à vie longue, la fusion répond aux défis que représentent le maintien des grands équilibres climatiques, la disponibilité des ressources et la sûreté

Professeur Abdeljalil CHAKIR - RihabPC - RihabPC

5- Bilan d'énergies

5-1- Dans le cas général

On considère la transformation nucléaire suivante :

$$^{A_1}_{Z_1}X_1 + {}^{A_2}_{Z_2}X_2 \rightarrow {}^{A_3}_{Z_3}X_3 + {}^{A_4}_{Z_4}X_4$$

- Le défaut de masse qui l'accompagne :

$$\Delta m = m\left({}^{A_3}_{Z_3}X_3\right) + m\left({}^{A_4}_{Z_4}X_4\right) - \left[m\left({}^{A_1}_{Z_1}X_1\right) + \left({}^{A_2}_{Z_2}X_2\ \right)\right]$$

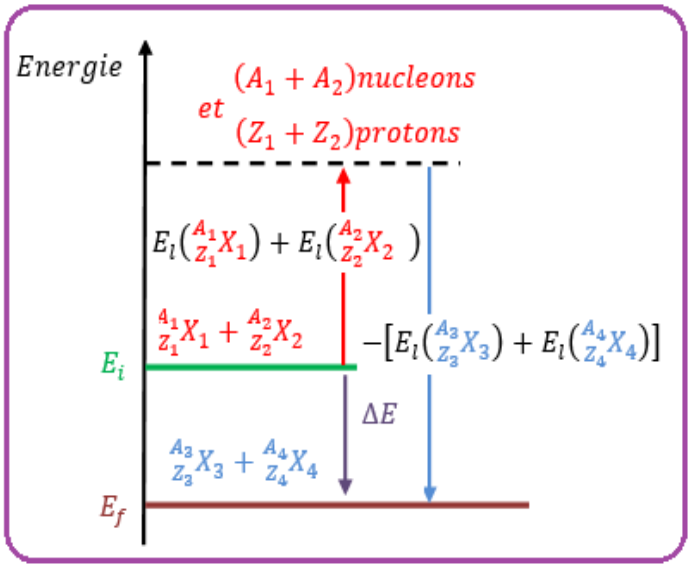
- L'énergie nucléaire émise est :

- $\Delta E = \Delta m.c^2$
- La relation qui lie l'énergie nucléaire et l'énergie de liaison de chaque noyau est :

$$\Delta E = E_l\left({}^{A_1}_{Z_1}X_1\right) + E_l\left({}^{A_2}_{Z_2}X_2\ \right) - \left[E_l\left({}^{A_3}_{Z_3}X_3\right) + E_l\left({}^{A_4}_{Z_4}X_4\right)\right]$$

5-2- Le diagramme d'énergie

Le diagramme ci-dessous represente :



- E_i : *L'énergie initiale du systéme (les réactifs)*
- E_f : *L'énergie finale du systéme (les produits)*

- $E_l\left({}^{A_1}_{Z_1}X_1\right) + E_l\left({}^{A_2}_{Z_2}X_2\right)$:
  l'énergie recu par le systéme pour separer les nucleons des noyaux X_1 *et* X_2

- $-\left[E_l\left({}^{A_3}_{Z_3}X_3\right) + E_l\left({}^{A_4}_{Z_4}X_4\right)\right]$
  L'énergie émise par le systéme pour former les noyaux X_3 *et* X_4

- Puisque la réaction fournie de l'énergie donc :$\Delta E < 0$

5-3- Applications

a- Désintégration :α

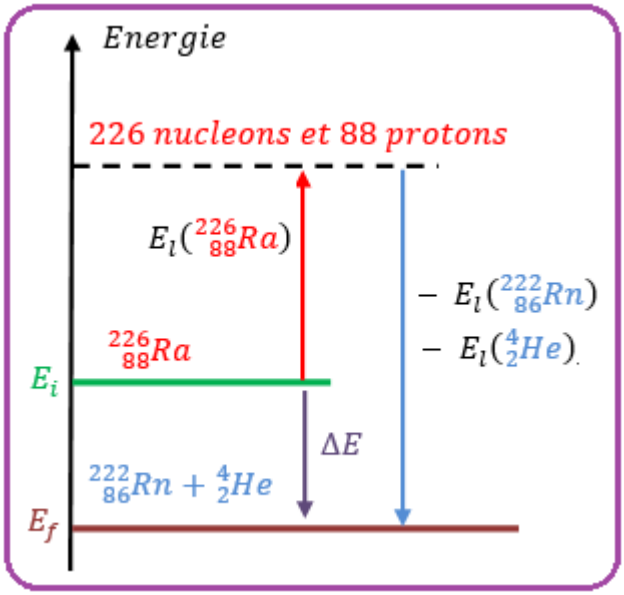
Le radium ${}^{226}_{88}Ra$ se désintègre en radon ${}^{222}_{86}Rn$ selon

L'équation suivante :

$${}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

Le diagramme à coté représente
Le diagramme de le désintégration α

ΔE : *est l'énergie liberée au cours de la désintégrationα*



b- Désintégration :β^-

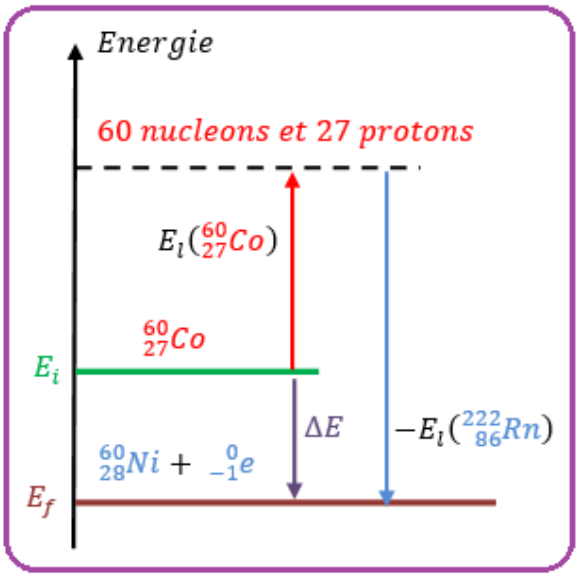
Le Cobalt ${}^{60}_{27}Co$ se désintègre en Nickel ${}^{60}_{28}Ni$ selon

L'équation suivante :

$${}^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^{0}_{-1}e$$

Le diagramme à coté représente
Le diagramme de le désintégration β^-
Avec : $E_l({}^{0}_{-1}e) = 0$

ΔE : *est l'énergie liberée au cours de la désintégrationα*



c- Désintégration : β^+

Le Bismuth $^{208}_{83}Bi$ se désintègre en Plomb $^{208}_{82}Pb$ selon

L'équation suivante :

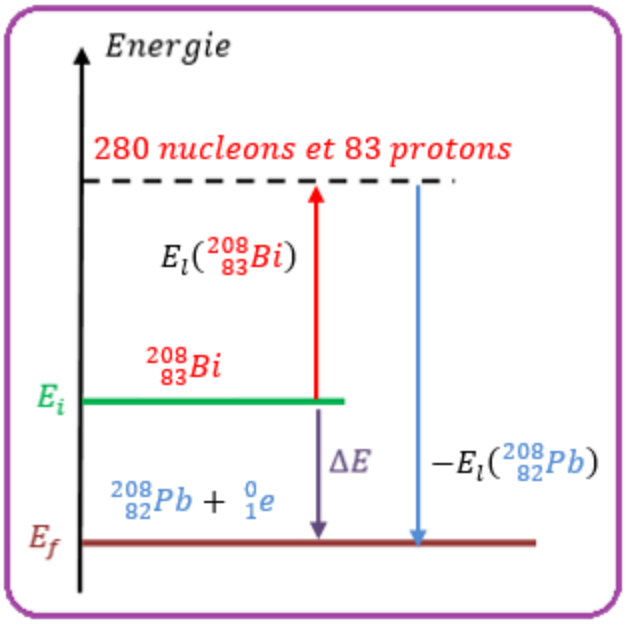
$$^{208}_{83}Bi \rightarrow {}^{208}_{82}Pb + {}^{0}_{1}e$$

Le diagramme à coté représente

Le diagramme de le désintégration β^+

Avec : $E_l(^{0}_{+1}e) = 0$

ΔE : *est l'énergie liberée au cours de la désintégrationα*



d- Fission nucléaire

La fission de l'uranium $^{235}_{92}U$

En Césium $^{140}_{55}Cs$ et Rubidium $^{93}_{37}Rb$

Selon la transformation :

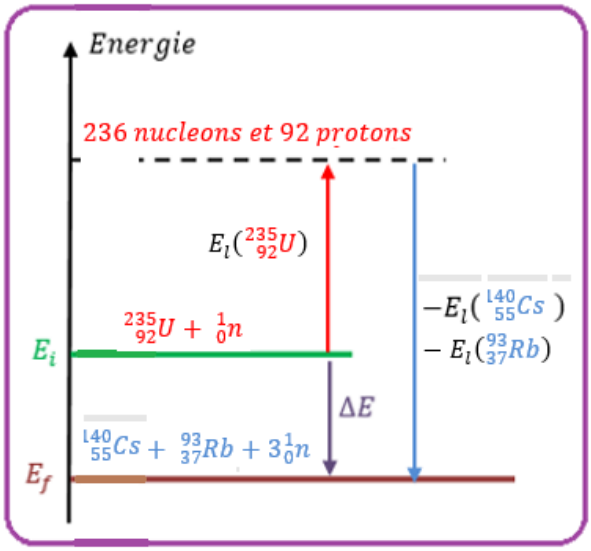
$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{140}_{55}Cs + {}^{93}_{37}Rb + 3{}^{1}_{0}n$$

Le diagramme à coté représente

Le diagramme de fission

Avec : $E_l(^{1}_{0}n) = 0$

ΔE : *est l'énergie liberée au cours de la fission de* $^{235}_{92}U$



e- Fusion nucléaire

La fusion du deutérium $^{2}_{1}H$ et du tritium $^{3}_{1}H$

En Hélium $^{4}_{2}He$

Selon la transformation :

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

Le diagramme à coté représente

Le diagramme de fusion

Avec : $E_l(^{1}_{0}n) = 0$

ΔE : *est l'énergie liberée au cours de la fusion de* $^{2}_{1}H$ *et* $^{3}_{1}H$

