Chapitre 5 : Noyaux, masse et énergie

Connaissances et savoir-faire exigibles :

(1) Définir et calculer un défaut de masse et une énergie de liaison.
(2) Définir et calculer l'énergie de liaison par nucléon.
(3) Savoir convertir des J en eV et réciproquement.
(4) Connaître la relation d'équivalence masse-énergie et calculer une énergie de masse.
(5) Commenter la courbe d'Aston pour dégager l'intérêt énergétique des fissions et des fusions.
(6) Définir la fission et la fusion et écrire les équations des réactions nucléaires en appliquant les lois de conservation.
(7) A partir de l'équation d'une réaction nucléaire, reconnaître le type de réaction (**exercices**).
(8) Faire le bilan énergétique d'une réaction nucléaire en comparant les énergies de masse.

Introduction : *Activité documentaire*

Document 1 :

1) On calcul tout d'abord son défaut de masse : $\Delta m = 2\times m_P + 2\times m_N - m_{^4_2He}$
$= 2\times 1.67262*10^{-27} + 2\times 1.67493*10^{-27} - 6.64449*10^{-27}$
$= 5.061*10^{-29}$ kg
2) a. Puis l'énergie de liaison : $E_l = \Delta m \times c^2 = 5.061*10^{-29} \times (3.0*10^8)^2 = 4.6*10^{-12}\ J = 28 MeV$
b. L'énergie de liaison par nucléons est donnée par : $\frac{E_l}{A} = \frac{28}{4} = 7 MeV / Nucléon$

Document 2 :

1) C'est le cuivre 63 qui a la plus grande énergie de liaison par nucléon, c'est donc lui qui est le plus stable.
2) Pour la plupart des noyaux, l'énergie de liaison par nucléons est de l'ordre de 8 ou 9 MeV / nucléon.
3) L'énergie de liaison du cuivre 63 est donnée par El = $-\left(-\frac{El}{A}\right)\times A = 8.7\times 63 = 5.5*10^2\ MeV$

I Equivalence masse-énergie :

1) La relation d'Einstein : énergie de masse (4) :

Pour Einstein en 1905, **un système au repos possède une énergie due à sa masse**, appelée **énergie de masse :**
Elle est définie par :

$$\boxed{E = m\times c^2} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{E : énergie de masse (J)} \\ \text{m : masse (kg)} \\ \text{c : vitesse de la lumière dans le vide (m.s}^{-1}\text{)} \\ c = 3.0*10^8 \text{ m.s}^{-1} \end{array} \right.$$

Remarque :
Une conséquence importante de cette relation est que quand la masse d'un système va varier, alors son énergie va varier. Ainsi on a : $\Delta E = \Delta m \times c^2$
Donc **si la masse d'un système diminue**, son énergie diminue et ce **système fournie ainsi de l'énergie au milieu extérieur**.

2) Une unité d'énergie mieux adaptée [3] et [4] :

Dans le domaine de la **physique nucléaire**, **on s'intéresse davantage à une particule** plutôt qu'à un ensemble, une mole de particule.
Ainsi si nous calculons **l'énergie de masse d'un électron** : $E_{e^-} = m_{e^-} \times c^2 = 9.31*10^{-31}*3.0*10^8 =$ **$8.4*10^{-14}$ J**
Nous trouvons une valeur très petite.

Nous utiliserons donc une **unité d'énergie plus adaptée** à l'échelle microscopique appelé **l'électron-volt** (eV) : $\boxed{1eV = 1.6*10^{-19}\ J}$

On trouve alors pour l'énergie de masse d'un électrons : $E_{e^-} = \dfrac{8.4*10^{-14}}{1.6*10^{-19}} = 5.2*10^5\, eV$
On préfèrera utiliser les **multiples de l'électron-volt** : $E_{e^-} = 0.52$ MeV

Remarque : 1 keV = 10^3 eV
1 MeV = 10^6 eV
1 GeV = 10^9 eV

3) Défaut de masse d'un noyau et énergie de liaison [1] :

a. Défaut de masse :

En mesurant la masse des noyaux au repos et celles des nucléons, les scientifiques se sont aperçu que la masse d'un noyau est toujours inférieure à la somme des masses des nucléons qui le compose.

Cette **différence de masse est appelée défaut de masse (Δm)** et se calcule comme suit :
Soit un noyau $^A_Z X$: $\boxed{\Delta m = Z\times m_P + (A-Z)\times m_N - m_{noyau} > 0}$

b. Energie de liaison :

Elle correspond à l'énergie qu'il faut fournir à un noyau au repos pour le dissocier en nucléons isolés et immobiles.

Comme on l'a vu avec l'équivalence masse énergie, **l'énergie de liaison d'un noyau est en rapport avec son défaut de masse :** $\boxed{E_l = \Delta m \times c^2}$

Cette énergie est positive puisqu'elle est reçu par le système considéré (noyau).

Exemple (si pas d'act doc intro) : calculons l'énergie de liaison d'un noyau d'Hélium :
On calcul tout d'abord son défaut de masse : $\Delta m = 2\times m_P + 2\times m_N - m_{^4_2He}$
$= 2\times1.67262*10^{-27} + 2\times1.67493*10^{-27} - 6.64449*10^{-27}$
$= 5.061*10^{-29}$ kg
Puis l'énergie de liaison : $E_l = \Delta m \times c^2 = 5.061*10^{-29} \times (3.0*10^8)^2 = 4.6*10^{-12}\ J = 28 MeV$

4) Energie de liaison par nucléon et courbe d'Aston :

a. Energie de liaison par nucléon [2] :

Elle est égale à **l'énergie de liaison du noyau divisée par le nombre de nucléons** présents dans ce noyau :

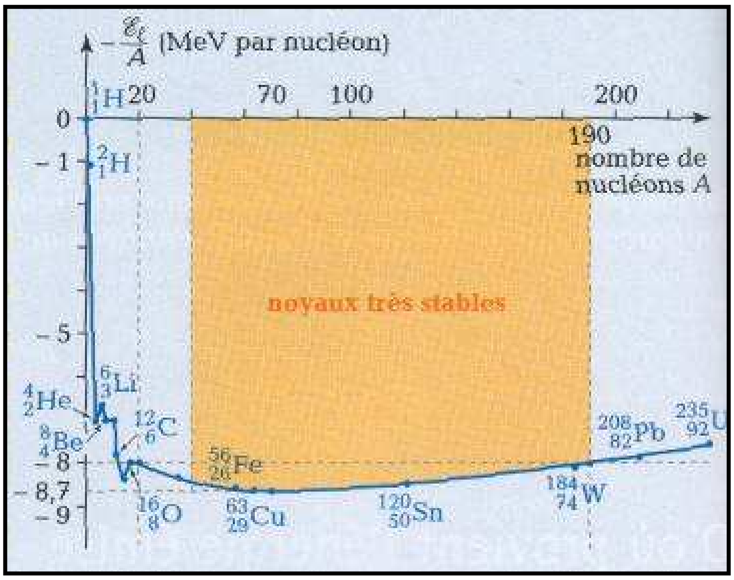
$$\boxed{E_l/A}$$

On l'exprimera généralement en **MeV/nucléon.**

b. Courbe d'Aston :

Elle permet de **comparer la stabilité de différents noyaux atomiques**. Par commodité, comme dans un diagramme énergétique, on s'est arrangé pour que les **noyaux les plus stables se situent dans la partie la plus basse de la courbe.**

La courbe d'Aston est donc la représentation : $-E_l/A = f(A)$: *Fiche élève*



Doc n°1

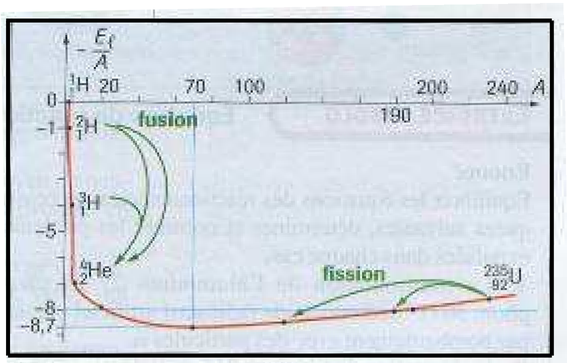
Exercices n°14 et 16 p 128/129

II Réactions nucléaires de fission et de fusion :

1) Exploitation de la courbe d'Aston [5] :

Selon la position des noyaux instables sur la courbe d'Aston, on peut savoir comment ils vont évoluer :

Fiche élève



Doc n°2 : domaine de fission et de fusion

Les **noyaux légers** vont évoluer par **fusion**, alors que les **noyaux lourds** vont évoluer par **fission**

Remarque : pourquoi ces deux processus se produisent-ils ?

La courbe trouve son minimum pour un nombre de nucléons de 70. De part et d'autre de ce point, les noyaux instables peuvent subir une modification de structure et se rapprocher du point de stabilité. Du coup l'énergie de liaison du noyau fils obtenu est supérieure à celle du noyau père, cela coïncide avec une diminution de masse du système est donc une libération d'énergie vers le milieu extérieur.

2) Propriétés de la fission et de la fusion :

a. Les réactions nucléaires de fusion et de fission sont qualifiées de **réactions provoquées** :
Une réaction nucléaire est provoquée lorsqu'un noyau projectile frappe un noyau cible et donne naissance à deux nouveaux noyaux.

b. Les réactions nucléaires de fusion et de fission **doivent vérifier les lois de conservation** comme toutes réactions nucléaires :

- Conservation du nombre de masse (ou nombre de nucléons)
- Conservation du numéro atomique (ou nombre de protons)

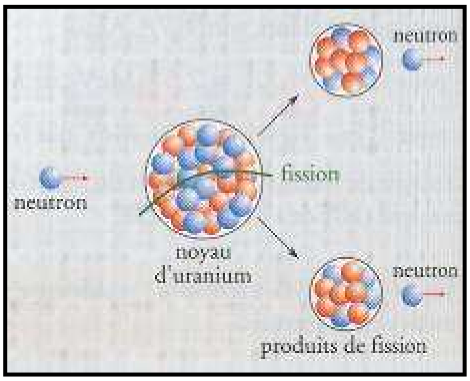
3) Réaction de fission nucléaire (6) :

a. Définition :
Elle se produit lors de la **rencontre d'un neutron lent** (Ec = 0.1 MeV), dit neutron thermique, **avec un noyau fissile** tel l'uranium 235 ; ce qui provoque la naissance de deux noyaux plus légers.

La première fission de l'uranium 235 a été obtenue par Frédéric et Irène Joliot-Curie.

b. Conditions d'obtention et applications :

- Le fait que ce soit un **neutron qui initie** la réaction est intéressant car il n'y a **pas de répulsion** lors de la rencontre entre le neutron (non chargé) et le noyau d'uranium.
- Une réaction de fission va **donner naissance à des noyaux fils mais aussi à des neutrons**, ceux-ci pouvant aller rencontrer d'autres noyaux d'uranium : on obtient alors une **réaction en chaîne.**
- On peut alors vouloir que cette réaction en chaîne s'emballe : on obtient alors une bombe atomique A. Ou bien on veut la contrôler pour produire une quantité d'énergie souhaitée : centrale nucléaire (*voir livre p 120*).



Fiche élève

Doc n°3 : la fission nucléaire

c. Exemple de réaction :
Soit la réaction de fission de l'uranium 235 qui donne naissance à un noyau de strontium 94 et à un noyau de Xénon 140. Ecrire l'équation correspondante.

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{94}_{38}Sr + {}^{140}_{54}Xe + 2\ {}^{1}_{0}n $$

Rq : plusieurs réactions sont possibles pour le seul noyau d'uranium 235

4) Réaction de fusion nucléaire (6) :

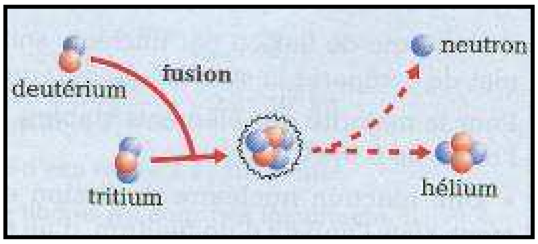
a. Définition :
Pour avoir une fusion nucléaire, il faut que **deux noyaux légers s'unissent** pour donner naissance à un **noyau plus lourd.**

b. Conditions d'obtention et applications :

- Ces noyaux légers sont cette fois-ci composés de neutrons et de protons, ainsi, il leur faut une **très grande énergie pour vaincre les forces de répulsion** : On porte alors le milieu à **très haute température** (10^8 K).
En conséquence, la réaction de fusion est appelée **réaction thermonucléaire**.

Rq : A ces températures extrêmes, on dit que la matière est à l'état de plasma : les électrons se sont dissociés du noyau auquel ils appartenaient, on obtient un gaz d'électrons et de noyaux atomiques.

- Ces réactions de fusion se font **naturellement dans les étoiles** : des noyaux d'hydrogène vont fusionner en plusieurs étapes pour donner des noyaux d'hélium.
- On crée avec cette réaction des **bombes thermonucléaires** (bombes H). C'est alors la fission qui permet d'engendrer la haute température et donc la fusion.
- On cherche depuis des années à **contrôler la fusion pour s'en servir dans les réacteurs nucléaires**. La difficulté réside dans le confinement du plasma.



Fiche élève

Doc n°4 : la fusion nucléaire

c. Exemple de réaction :
La fusion la plus courante est celle représentée ci-dessus, entre un noyau de deutérium et un noyau de tritium : $\boxed{{}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n}$
(Le deutérium et le tritium sont deux isotopes de l'hydrogène, ils ont respectivement un neutron et deux neutrons, alors que le noyau d'hydrogène n'a qu'un proton)

Exercices n°23 p 130 et hors livre

III Bilan de masse et d'énergie d'une réaction nucléaire [8] :

1) Cas général :

Soit une réaction nucléaire quelconque d'équation :

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

Il y a deux façon de calculer l'énergie libérée par la transformation nucléaire :

- Soit en utilisant la **variation de masse** :

$$\boxed{\Delta E = [(m(X_3) + m(X_4)) - (m(X_1) + m(X_2))]\times c^2}$$

Exemple : *voir ci-dessous*.

- Soit en utilisant les **énergies de liaison** des noyaux et d'après la définition de El :

$$\boxed{\Delta E = [E_l(X_1) + E_l(X_2)) - (E_l(X_3) + E_l(X_4)]}$$

Exemple : *voir exercices*.

2) Réactions nucléaires spontanées : radioactivité α et β : *Fiche élève*

a. Radioactivité α : désintégration du radium 226 :

1. Écrire l'équation de désintégration du radium $^{226}_{88}Ra$
2. Calculer l'énergie libérée lors de la désintégration :
   - d'un noyau de radium 226 (en MeV)
   - d'une mole de noyau de radium 226 (en J.mol^{-1})

Données :

Noyau	Masse (u)
Radium	225,9770
Radon	221,9702
Hélium	4,0015

c = 2.9979*10^{8} m.s^{-1}

Indication 1 :
En physique nucléaire, on utilise généralement une **autre unité de masse**, appelée **unité de masse atomique**. Elle est définie par : **1 u = 1.66054*10^{-27} kg. Elle correspond à 1/12 ème de la masse de l'atome de carbone 12.**

Indication 2 :
Lorsque l'on calcul un bilan énergétique d'une réaction nucléaire, on le fait pour un noyau. Si on veut **comparer le bilan énergétique entre une réaction chimique et une réaction nucléaire**, il faut parler en moles de noyau.
On pourra alors calculer l'énergie d'une réaction nucléaire par mole de noyau en multipliant l'énergie obtenu grâce à un noyau par le nombre d'Avogadro : $N_A = 6.02*10^{23}$ mol^{-1} (on rappelle que cette constante représente le nombre d'atomes, donc de noyaux par mole).

1. *Désintégration du radium 226 :* $^{226}_{88}Ra \rightarrow ^{222}_{86}Rn + ^{4}_{2}He$
2. *Energie libérée :*

$$\Delta E = \Delta m \times c^2 = (4.0015 + 221.9702 - 225.9770) \times 1.66054*10^{-27} \times (2.9979*10^{8})^2$$

Comme *= 931.5*

On peut écrire : $\Delta E(en\ MeV) = \Delta m(en\ u) \times 931.5$

*Ici on trouve : ΔE = -7.9097 *10-13 J = -4.94 MeV*
On rappelle que cette énergie est négative car le système la cède au milieu extérieur.

Energie libérée par mole de noyau : $\Delta E_m = 7.9*10^{-13} \times 6.02*10^{23} = -4.8*10^{11}$ *J.mol^{-1}*

b. Radioactivité β : désintégration du cobalt 60 :

1. Écrire l'équation de désintégration du colbalt $^{60}_{27}Co$
2. Calculer l'énergie libérée lors de la désintégration :
   - d'un noyau de Cobalt 60 (en MeV)
   - d'une mole de noyau de Cobalt 60 (en J.mol^{-1})

Données :

Noyau	Masse (u)
Cobalt	59,9190
Nickel	59.9154

$m_{e^-} = 5.49*10^{-4}$ u

1. $^{60}_{27}Co \rightarrow ^{60}_{28}Ni + ^{0}_{-1}e$
2. *Energie libérée :* $\Delta E = (59.9154 + 5.49*10^{-4} - 59.9190)\times 931.5 = -2.84$ *MeV*

Convertissons cette énergie en J en sachant que 1 eV = $1.6*10^{-19}$ *J :* $\Delta E = -2.84*10^{6}\times 1.6*10^{-19}$
$= -4.5*10^{-13}$ *J*

Energie libérée par mole de noyau : $\Delta E_m = 4.5*10^{-13}\times 6.02*10^{23} = -2.7*10^{11}$ *J.mol*$^{-1}$

3) Réaction nucléaire provoquées : fission et fusion :

a. Réaction de fission :

Soit une des réactions de fission possible pour le noyau d'uranium 235 :

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{94}_{38}Sr + ^{140}_{54}Xe + 2\ ^{1}_{0}n$$

Lors de cette transformation, déterminer :

- l'énergie libérée ΔE
- l'énergie libérée ΔE_m par une mole de noyau d'uranium (en J.mol^{-1})
- l'énergie libérée par nucléon

Données : masse des noyaux :

Noyau	Masse (u)
$^{235}_{92}U$	234,9935
$^{94}_{38}Sr$	93,8945
$^{145}_{54}Xe$	139,8920
n	1,0087

Energie libérée : $\Delta E = (93{,}8945 + 139{,}8920 + 2\times 1{,}0087 - 234{,}9935 - 1.0087)\times 931{,}5 = -184{,}7$ *MeV*

Convertissons cette énergie en J en sachant que 1 eV = $1.6*10^{-19}$ *J :* $\Delta E = -184.7*10^{6}\times 1.6*10^{-19}$
$= -3.00*10^{-11}$ *J*

Energie libérée par mole de noyau : $\Delta E_m = 3.00*10^{-11}\times 6.02*10^{23} = -1.8*10^{13}$ *J.mol*$^{-1}$

Energie libérée par nucléon : $\Delta E_l = \dfrac{-184.7}{236} = 0.7826$ *MeV/nucléon*

Cette énergie est énorme par rapport à la combustion de pétrole. 1 kg d'uranium fournit autant d'énergie que 2 000 Tonnes de pétrole.

b. Réaction de fusion :

On considère la réaction « classique » de fusion entre un noyau de deutérium et un noyau de tritium :

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

Lors de cette transformation, déterminer :

- l'énergie libérée ΔE
- l'énergie libérée par nucléon

Comparer énergétiquement la fission et la fusion et en déduire pourquoi les recherches s'orientent davantage sur la fusion.

Données :

Noyau	Masse (u)
${}_1^2H$	2.0160
${}_1^3H$	3.0247
${}_2^4He$	4.0015
n	1,0087

Energie libérée : $\Delta E = (4.0015+1.0087-2.0160-3.0247)\times 931,5 = -28.41$ *MeV*

Energie libérée par nucléon : $\Delta E_l = \dfrac{-28.41}{5} = -5.682$ *MeV/nucléon*

c. Comparaison fission-fusion :

On voit que **par nucléon**, **la fusion produit bien plus d'énergie que la fission**.
De plus, **l'approvisionnement en hydrogène** (donc en deutérium et tritium) se fait aisément (eau), et la fusion n'engendre **pas de déchets radioactifs** (noyaux fils eux mêmes radioactifs).
Les recherches s'orientent donc vers cette réaction nucléaire, le but étant la production d'énergie.