L'énergie du futur

Bac S 2009 Inde (Pondichéry) (ancien programme) · Exercice 2 **5,5 points** **Durée conseillée 1 h 05**

2.1.1 Donner la composition des noyaux de deutérium et de tritium. Comment qualifie-t-on de tels noyaux ?

Données utiles deutérium ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$; tritium ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$

Un noyau ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ contient Z protons et $A-Z$ neutrons.

Deutérium ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$: 1 proton et $2-1=1$ neutron.

Tritium ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$: 1 proton et $3-1=2$ neutrons.

Même nombre de protons ($Z=1$), nombres de neutrons différents : ce sont des noyaux **isotopes** (de l'hydrogène).

PIÈGE
Lire A comme le nombre de neutrons. A compte tous les nucléons : il faut retrancher Z.

2.1.2 D'une façon générale, qu'appelle-t-on fusion nucléaire ?

La fusion est une réaction nucléaire **provoquée** au cours de laquelle deux noyaux **légers** s'assemblent pour donner un noyau **plus lourd**, avec libération d'énergie.

COMPRENDRE
Les noyaux, chargés positivement, se repoussent : il faut une température de l'ordre de cent millions de degrés pour qu'ils s'approchent assez. C'est toute la difficulté du projet ITER.

2.1.3 Calculer, en unités de masse atomique, la masse du système avant et après la fusion. Que déduire de la comparaison de ces deux valeurs ?

Données utiles $m(\mathrm{d})=2{,}01355$ u ; $m(\mathrm{t})=3{,}01550$ u ; $m({}^{4}_{2}\mathrm{He})=4{,}00150$ u ; $m(\mathrm{n})=1{,}00866$ u

Avant : $m_{\text{avant}}=m(\mathrm{d})+m(\mathrm{t})=2{,}01355+3{,}01550=5{,}02905$ u

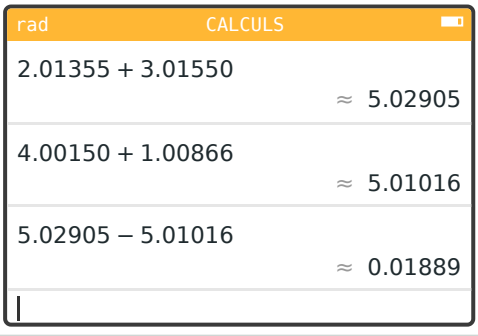
Après : $m_{\text{après}}=m({}^{4}_{2}\mathrm{He})+m(\mathrm{n})=4{,}00150+1{,}00866=5{,}01016$ u

$m_{\text{après}}<m_{\text{avant}}$: la masse du système diminue de $0{,}01889$ u. Cette perte de masse correspond à une libération d'énergie.

PIÈGE
Arrondir les masses avant de les soustraire. La différence n'apparaît qu'à la troisième décimale : il faut garder tous les chiffres donnés.

COMPRENDRE
Le nombre de nucléons se conserve (5 avant, 5 après), pas la masse. La masse perdue est convertie en énergie, selon la relation d'Einstein.

À LA CALCULATRICE



2.1.4 Calculer, en joules puis en MeV, l'énergie libérée par la fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium.

Données utiles perte de masse $0{,}01889$ u (2.1.3) ; $1\text{ u} = 1{,}66054 \times 10^{-27}$ kg ; $c = 3{,}00 \times 10^{8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $1\text{ eV} = 1{,}60 \times 10^{-19}$ J

Énergie libérée : $E_{\text{lib}} = (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}})\,c^2$, avec la perte de masse en kilogrammes.

$$E_{\text{lib}} = 0{,}01889 \times 1{,}66054 \times 10^{-27} \times (3{,}00 \times 10^{8})^2 = 2{,}82 \times 10^{-12}\text{ J}$$

Comme $1\text{ MeV} = 10^{6}\text{ eV} = 1{,}60 \times 10^{-13}$ J :

$$E_{\text{lib}} = \frac{2{,}82 \times 10^{-12}}{1{,}60 \times 10^{-13}} = 17{,}6\text{ MeV}$$

$$\boxed{E_{\text{lib}} = 2{,}82 \times 10^{-12}\text{ J} = 17{,}6\text{ MeV}}$$

PIÈGE
Laisser la masse en u dans $E = m\,c^2$, ou oublier le carré de c. La relation exige des kilogrammes pour obtenir des joules.

COMPRENDRE
Trois chiffres significatifs, comme c et la valeur de l'électronvolt. La variation d'énergie du système, $(m_{\text{après}} - m_{\text{avant}})\,c^2$, est négative : le système cède cette énergie à l'extérieur.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$0.01889 \times 1.66054 \times 10^{-27} \times (3.00 \times 10^{8})^{2} \approx 2.823084 \times 10^{-12}$

$\frac{2.82 \times 10^{-12}}{1.60 \times 10^{-13}} \approx 17.625$

2.1.5 Calculer, en joules, l'énergie obtenue à partir du deutérium extrait d'un mètre cube d'eau de mer.

Données utiles 33 mg de deutérium par litre ; $M = 2\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$; $E_{\text{lib}} = 2{,}82 \times 10^{-12}$ J (2.1.4)

$1\text{ m}^3 = 10^3$ L, donc la masse de deutérium extraite est $m = 33 \times 10^{-3} \times 10^{3} = 33$ g.

Nombre de noyaux de deutérium : $N = \frac{m}{M}\,N_A = \frac{33}{2} \times 6{,}02 \times 10^{23} = 9{,}9 \times 10^{24}$

Chaque fusion consomme un noyau de deutérium et libère E_{lib} :

$$E = N\,E_{\text{lib}} = \frac{33}{2} \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 2{,}82 \times 10^{-12}$$

$$\boxed{E = 2{,}8 \times 10^{13}\text{ J}}$$

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs seulement : la donnée « 33 mg » n'en a que deux. On suppose que le tritium nécessaire est disponible en quantité suffisante.

MÉTHODE
Passer de l'échelle d'un noyau à l'échelle macroscopique : masse → quantité de matière ($n = m/M$) → nombre de noyaux ($N = n\,N_A$) → énergie ($E = N\,E_{\text{lib}}$).

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\frac{33}{2} \times 6.02 \times 10^{23} \approx 9.933 \times 10^{24}$

$\frac{33}{2} \times 6.02 \times 10^{23} \times 2.82 \times 10^{-12} \approx 2.801106 \times 10^{13}$

2.1.6 Calculer la masse de pétrole qui produirait la même énergie par combustion. Conclure.

Données utiles pouvoir énergétique du pétrole : $42{,}0\ \text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; $E = 2{,}8\times10^{13}$ J (2.1.5)

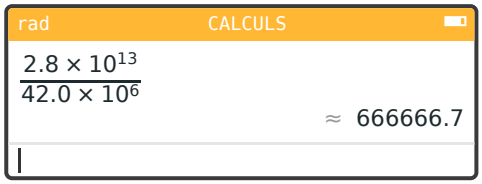
Un kilogramme de pétrole fournit $42{,}0\ \text{MJ} = 42{,}0\times10^{6}$ J, donc :

$$m_{\text{pétrole}} = \frac{E}{42{,}0\times10^{6}} = \frac{2{,}8\times10^{13}}{42{,}0\times10^{6}} = 6{,}7\times10^{5}\ \text{kg}$$

$m_{\text{pétrole}} = 6{,}7\times10^{5}$ kg, soit environ 670 tonnes de pétrole pour l'énergie tirée de 33 g de deutérium : à masse égale, la fusion libère une énergie considérablement plus grande, et l'eau de mer constitue une réserve quasi inépuisable.

PIÈGE
Oublier de convertir les mégajoules en joules : le résultat serait un million de fois trop grand.

À LA CALCULATRICE



2.2.1 Qu'est-ce qu'un noyau radioactif ?

Un noyau radioactif est un noyau **instable** qui se désintègre **spontanément** : il se transforme en un autre noyau en émettant une particule, et souvent un rayonnement.

COMPRENDRE
Spontanément : sans intervention extérieure, à l'inverse de la fusion, qui doit être provoquée. La désintégration d'un noyau donné est aléatoire, on ne peut pas prévoir sa date.

2.2.2 Définir les trois types de radioactivité.

Radioactivité α : le noyau émet un noyau d'hélium ${}^{4}_{2}\text{He}$ (particule α).

Radioactivité β^- : le noyau émet un électron ${}^{0}_{-1}\text{e}$.

Radioactivité β^+ : le noyau émet un positon ${}^{0}_{1}\text{e}$.

α : émission de ${}^{4}_{2}\text{He}$; β^- : émission de ${}^{0}_{-1}\text{e}$; β^+ : émission de ${}^{0}_{1}\text{e}$.

PIÈGE
Croire que l'électron émis vient du cortège électronique. Il est créé dans le noyau, où un neutron se transforme en proton.

COMPRENDRE
Le noyau formé est souvent dans un état excité : il revient à son état fondamental en émettant un rayonnement électromagnétique γ. Cette émission accompagne les désintégrations, elle ne change ni A ni Z.

2.2.3 Écrire l'équation de la désintégration du noyau de tritium en rappelant les lois utilisées.

Données utiles le tritium ${}^{3}_{1}\text{H}$ est radioactif β^-

Émission β^- : ${}^{3}_{1}\text{H} \longrightarrow {}^{A}_{Z}\text{X} + {}^{0}_{-1}\text{e}$

Lois de conservation (lois de Soddy) :

- conservation du nombre de nucléons : $3 = A + 0$, donc $A = 3$;
- conservation du nombre de charge : $1 = Z - 1$, donc $Z = 2$.

$Z = 2$ est l'élément hélium.

${}^{3}_{1}\text{H} \longrightarrow {}^{3}_{2}\text{He} + {}^{0}_{-1}\text{e}$

PIÈGE
Écrire $1 = Z + 1$: la charge de l'électron est négative, son « numéro de charge » vaut -1, donc Z augmente d'une unité.

COMPRENDRE
Le noyau formé est l'hélium 3, un isotope de l'hélium 4 produit par la fusion. Un antineutrino est aussi émis ; il n'était pas exigé dans l'équation.

2.2.4 Quelle est la signification du terme demi-vie ?

La demi-vie $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la **moitié** des noyaux radioactifs initialement présents dans un échantillon se sont désintégrés : $N(t_{1/2}) = \dfrac{N_0}{2}$.

COMPRENDRE
Cette durée ne dépend pas de la quantité initiale. Pour le tritium, il reste la moitié des noyaux après 12,3 ans, le quart après 24,6 ans, le huitième après 36,9 ans.

2.2.5 Exprimer le nombre N de noyaux de tritium à l'instant t en fonction de N_0, $t_{1/2}$ et t.

Loi de décroissance radioactive : $N = N_0\,\mathrm{e}^{-\lambda t}$, où λ est la constante radioactive.

À $t = t_{1/2}$: $\dfrac{N_0}{2} = N_0\,\mathrm{e}^{-\lambda t_{1/2}}$, donc $\lambda\, t_{1/2} = \ln 2$, soit $\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}}$.

$$N = N_0\,\mathrm{e}^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}}t}$$

PIÈGE
S'arrêter à $N = N_0\,\mathrm{e}^{-\lambda t}$: l'énoncé impose $t_{1/2}$, la constante λ ne doit plus apparaître dans le résultat.

2.2.6 Au bout de combien de temps N vaut-il le dixième de sa valeur initiale N_0 ?

Données utiles $t_{1/2} = 12{,}3$ ans ; expression de N (2.2.5)

On cherche t tel que $N = \dfrac{N_0}{10}$: $\mathrm{e}^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}}t} = \dfrac{1}{10}$

En prenant le logarithme : $-\dfrac{\ln 2}{t_{1/2}}\,t = \ln\dfrac{1}{10} = -\ln 10$, d'où

$$t = t_{1/2}\,\frac{\ln 10}{\ln 2} = 12{,}3 \times \frac{\ln 10}{\ln 2}$$

$$t = 40{,}9 \text{ ans}$$

COMPRENDRE
Vérification : après trois demi-vies (36,9 ans) il reste $N_0/8$, après quatre (49,2 ans) $N_0/16$. Le dixième est bien atteint entre les deux.

MÉTHODE
Pour isoler t dans une exponentielle : isoler d'abord $\mathrm{e}^{\cdots}$, puis appliquer $\ln$ aux deux membres. Inutile de convertir en secondes : t sort dans l'unité de $t_{1/2}$.

À LA CALCULATRICE

