L'hydrogène: un combustible d'avenir

Bac S 2005 Centres étrangers (ancien programme) · Exercice 1 **7 points** **Durée conseillée 1 h 31**

1.1 Première partie (fusion nucléaire). Que représentent les symboles A et Z dans l'écriture ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ d'un noyau ?

A est le nombre de masse : c'est le nombre de nucléons (protons et neutrons) du noyau.

Z est le numéro atomique (nombre de charge) : c'est le nombre de protons du noyau.

A : nombre de nucléons ; Z : nombre de protons.

COMPRENDRE
Le nombre de neutrons n'apparaît pas dans le symbole : il se calcule par $N = A - Z$.

1.2 Par quoi diffèrent les isotopes d'un même élément chimique ?

Des isotopes ont le même nombre de protons Z (c'est le même élément) mais des nombres de neutrons différents, donc des nombres de nucléons A différents.

Les isotopes diffèrent par leur nombre de neutrons.

1.3 Donner la composition du noyau de deutérium.

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

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

Le noyau de deutérium contient 1 proton et 1 neutron.

1.4 Nommer un isotope du deutérium et donner la composition de son noyau.

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

Le tritium ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ a le même numéro atomique $Z = 1$ que le deutérium : c'est un de ses isotopes. Son noyau contient 1 proton et $3 - 1 = 2$ neutrons.

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

COMPRENDRE
L'hydrogène 1, ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$, convient aussi : son noyau est un proton seul, sans neutron.

2 Pour les réactions (1) et (2) entre deux noyaux de deutérium, donner le nom et le symbole des noyaux formés ${}^{A_1}_{Z_1}\mathrm{X}$ et ${}^{A_2}_{Z_2}\mathrm{X}$.

Données utiles (1) : ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}\mathrm{X} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$; (2) : ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{A_2}_{Z_2}\mathrm{X} + {}^{1}_{1}\mathrm{p}$

Une réaction nucléaire conserve le nombre de nucléons et le nombre de charge (lois de Soddy).

Réaction (1) : $2 + 2 = A_1 + 1$ donc $A_1 = 3$; $1 + 1 = Z_1 + 0$ donc $Z_1 = 2$. L'élément de numéro atomique 2 est l'hélium.

Réaction (2) : $2 + 2 = A_2 + 1$ donc $A_2 = 3$; $1 + 1 = Z_2 + 1$ donc $Z_2 = 1$. L'élément de numéro atomique 1 est l'hydrogène.

(1) : hélium 3, ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$; (2) : tritium, ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$.

MÉTHODE
Écrire deux équations séparées, une sur les A (en haut), une sur les Z (en bas), puis identifier l'élément grâce à Z dans le tableau des données.

3.1 Expliquer l'expression « la répulsion coulombienne ».

Deux corps portant des charges électriques de même signe exercent l'un sur l'autre des forces répulsives : c'est l'interaction électrostatique, décrite par la loi de Coulomb. Cette force est d'autant plus intense que les charges sont proches.

Répulsion coulombienne : force électrostatique qui repousse deux charges de même signe.

3.2 Quel est le signe de la charge électrique des noyaux de deutérium et de tritium ?

Un noyau est formé de protons, chargés positivement, et de neutrons, de charge nulle. Les noyaux de deutérium et de tritium contiennent chacun un proton.

Les deux noyaux sont chargés positivement (charge $+e$) : ils se repoussent.

COMPRENDRE
C'est pour vaincre cette répulsion qu'il faut une température très élevée : les noyaux, très rapides, peuvent alors s'approcher assez pour fusionner.

4.1 Rappeler la définition de l'énergie de liaison E_L.

L'énergie de liaison E_L d'un noyau est l'énergie qu'il faut apporter à ce noyau, pris au repos, pour le séparer en ses nucléons isolés et immobiles.

E_L : énergie à fournir pour dissocier le noyau au repos en nucléons séparés au repos.

4.2 Calculer en mégaélectronvolt (MeV) l'énergie de liaison du noyau de tritium.

Données utiles $m_p = 1{,}007\,28$ u ; $m_n = 1{,}008\,66$ u ; $m(^3_1\mathrm{H}) = 3{,}015\,50$ u ; 1 u correspond à 931,5 MeV

Le noyau $^3_1\mathrm{H}$ contient 1 proton et 2 neutrons. Son défaut de masse est :

$$\Delta m = m_p + 2\,m_n - m(^3_1\mathrm{H})$$

$$\Delta m = 1{,}007\,28 + 2 \times 1{,}008\,66 - 3{,}015\,50 = 0{,}009\,10 \text{ u}$$

L'énergie de liaison est $E_L = \Delta m \cdot c^2$. Comme une masse de 1 u correspond à une énergie de 931,5 MeV :

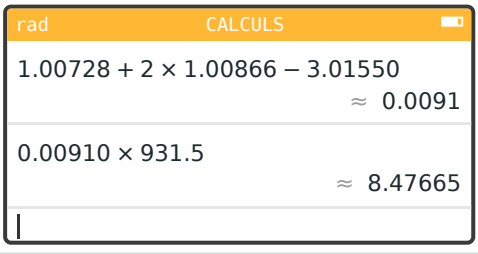
$$E_L = 0{,}009\,10 \times 931{,}5$$

$E_L(^3_1\mathrm{H}) = 8{,}48$ MeV

PIÈGE
Passer par les kilogrammes et $c = 3{,}00 \times 10^8$ m · s^{-1} est correct mais plus long et moins précis (on trouve 8,50 MeV). L'équivalence 1 u ↔ 931,5 MeV donne directement des MeV.

COMPRENDRE
Chiffres significatifs : la soustraction ne laisse que trois chiffres au défaut de masse ($0{,}009\,10$ u), donc trois chiffres au résultat. On retrouve $8{,}48 \div 3 \approx 2{,}8$ MeV par nucléon, valeur citée en 4.4.

À LA CALCULATRICE



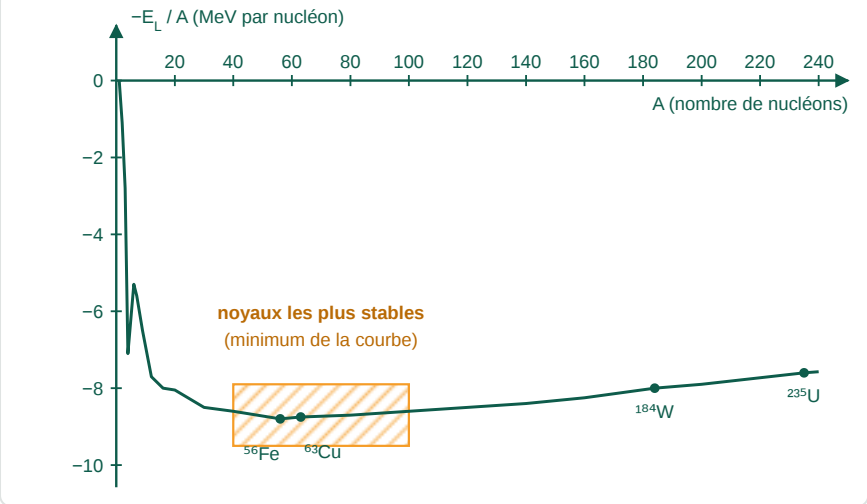
4.3 Sur la courbe d'Aston de l'annexe 1 ($-E_L/A$ en fonction de A), indiquer par des hachures la zone où l'on trouve les noyaux les plus stables.

Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon E_L/A est grande, donc que $-E_L/A$ est petit : les noyaux les plus stables sont au plus bas de la courbe.

Le minimum se situe autour du fer et du cuivre, pour A compris environ entre 40 et 100, où E_L/A approche 9 MeV par nucléon.

Zone hachurée : le creux de la courbe, autour de $A \approx 60$.

PIÈGE
Comparer les énergies de liaison E_L et non E_L/A : l'uranium a une énergie de liaison bien plus grande que le fer, il est pourtant moins stable.



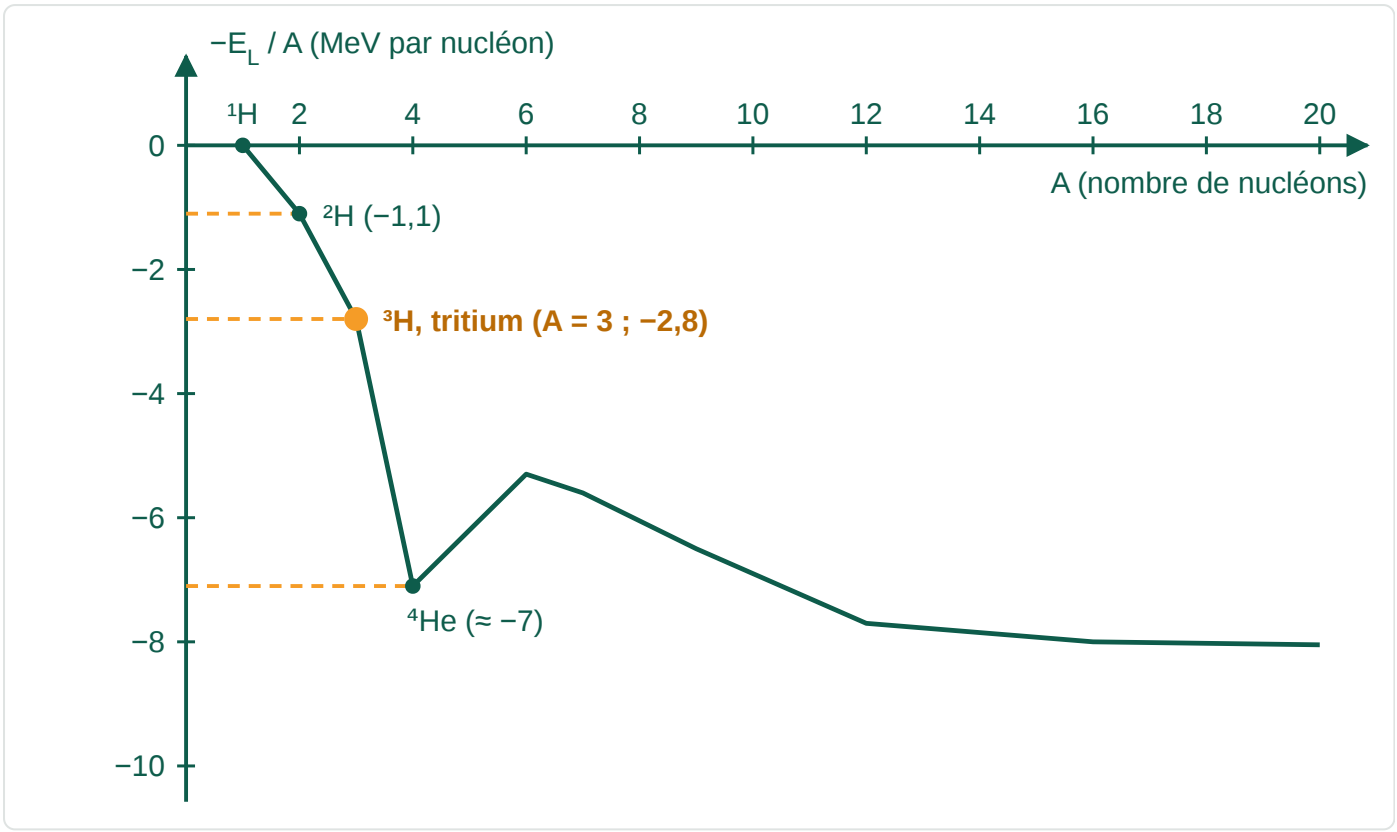
4.3 · Annexe 1 complétée : zone des noyaux les plus stables (hachures)

4.4.1 L'énergie de liaison par nucléon du tritium est d'environ 2,8 MeV. Repérer sur la courbe la place du noyau de tritium.

Données utiles $E_L/A \approx 2{,}8$ MeV par nucléon ; $A = 3$

Le tritium ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ a pour abscisse $A = 3$ et pour ordonnée $-\dfrac{E_L}{A} \approx -2{,}8$ MeV par nucléon. Il se place sur la partie très pentue du début de la courbe, entre ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ et ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

Tritium : point de coordonnées $(3\ ;\ -2{,}8)$.



4.4.1 · Début de la courbe d'Aston agrandi : place du tritium et lectures

4.4.2 Comparer, à partir de la courbe d'Aston, l'énergie de liaison par nucléon de ${}_2^4\mathrm{He}$ à celles de ${}_1^2\mathrm{H}$ et ${}_1^3\mathrm{H}$. Dégager l'intérêt énergétique de la réaction (3).

Données utiles réaction (3) : ${}_1^2\mathrm{H} + {}_1^3\mathrm{H} \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + {}_0^1\mathrm{n}$; lectures sur la courbe

Lectures : $\dfrac{E_L}{A} \approx 1{,}1$ MeV pour ${}_1^2\mathrm{H}$, $2{,}8$ MeV pour ${}_1^3\mathrm{H}$ et environ 7 MeV pour ${}_2^4\mathrm{He}$.

L'énergie de liaison par nucléon de l'hélium 4 est nettement plus grande que celles du deutérium et du tritium : le noyau formé est beaucoup plus stable que les noyaux de départ.

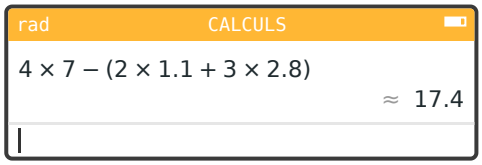
Dissocier les deux noyaux de départ coûte $2 \times 1{,}1 + 3 \times 2{,}8 \approx 10{,}6$ MeV ; la formation de l'hélium 4 restitue $4 \times 7 \approx 28$ MeV. La différence, de l'ordre de 17 MeV, est cédée au milieu extérieur.

${}_2^4\mathrm{He}$ est bien plus lié : la réaction (3) libère de l'énergie, environ 17 MeV par fusion.

COMPRENDRE

Sur la courbe, la fusion fait « descendre » les nucléons vers les noyaux plus stables. Le neutron libre n'a pas d'énergie de liaison : il ne compte pas dans le bilan.

À LA CALCULATRICE



5 Montrer que l'énergie libérée par la réaction (3) vaut 17,6 MeV.

Données utiles $m(^2_1\mathrm{H}) = 2{,}013\,55$ u ; $m(^3_1\mathrm{H}) = 3{,}015\,50$ u ; $m(^4_2\mathrm{He}) = 4{,}001\,50$ u ; $m_n = 1{,}008\,66$ u ; 1 u correspond à 931,5 MeV

Perte de masse au cours de la réaction (3) :

$$|\Delta m| = m(^2_1\mathrm{H}) + m(^3_1\mathrm{H}) - m(^4_2\mathrm{He}) - m_n$$

$$|\Delta m| = 2{,}013\,55 + 3{,}015\,50 - 4{,}001\,50 - 1{,}008\,66 = 0{,}018\,89 \text{ u}$$

La masse des produits est inférieure à celle des réactifs : la masse perdue est convertie en énergie libérée, $E_{\text{lib}} = |\Delta m| \cdot c^2$.

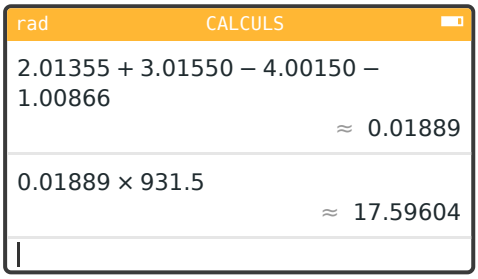
$$E_{\text{lib}} = 0{,}018\,89 \times 931{,}5 = 17{,}60 \text{ MeV}$$

$E_{\text{lib}} = 17{,}60$ MeV $\approx 17{,}6$ MeV : valeur attendue.

PIÈGE
Oublier le neutron dans la masse des produits. Avec la convention $\Delta E = (m_{\text{produits}} - m_{\text{réactifs}})\,c^2$, on trouve $-17{,}6$ MeV : le signe négatif traduit une énergie cédée, l'énergie libérée est sa valeur absolue.

COMPRENDRE
Ce calcul exact confirme l'estimation de 17 MeV faite en 4.4.2 à partir de la courbe d'Aston.

À LA CALCULATRICE



1.1 Deuxième partie (électrolyse de l'eau). La réaction qui a lieu dans l'électrolyseur est-elle spontanée ? Justifier.

Données utiles $2\,\mathrm{H_2O\,(l)} = 2\,\mathrm{H_2\,(g)} + \mathrm{O_2\,(g)}$; générateur de tension continue d'environ 2 V

L'eau ne se décompose pas d'elle-même en dihydrogène et dioxygène. La réaction n'a lieu que parce qu'un générateur impose le passage d'un courant et apporte de l'énergie électrique au système : c'est une transformation forcée.

La réaction n'est pas spontanée : elle est forcée par le générateur.

COMPRENDRE
La transformation spontanée est la réaction inverse, entre H_2 et O_2 : c'est celle qui se produit dans une pile à combustible.

1.2 Écrire la demi-équation électronique correspondant à la formation du dihydrogène.

Données utiles couples $\mathrm{O_2\,(g)}$ / $\mathrm{H_2O\,(l)}$ et $\mathrm{H^+\,(aq)}$ / $\mathrm{H_2\,(g)}$

Le dihydrogène est le réducteur du couple $\mathrm{H^+\,(aq)}$ / $\mathrm{H_2\,(g)}$: il se forme par réduction des ions H^+.

$2\,\mathrm{H^+\,(aq)} + 2\,\mathrm{e^-} = \mathrm{H_2\,(g)}$

MÉTHODE
Vérifier la demi-équation en deux temps : conservation des éléments (2 H de chaque côté), puis des charges ($2 - 2 = 0$).

1.3 À quelle électrode se dégage le dihydrogène : cathode ou anode ? Justifier.

La formation de H_2 est une réduction : les ions H^+ gagnent des électrons. Par définition, l'électrode où se produit la réduction est la cathode.

Le dihydrogène se dégage à la cathode.

MÉTHODE
Moyen mnémotechnique valable pour une pile comme pour une électrolyse : **c**athode et réd**uc**tion commencent par une consonne, **a**node et **o**xydation par une voyelle.

1.4 À quel pôle du générateur cette électrode est-elle branchée ?

La réduction consomme des électrons : ils doivent arriver à la cathode par le circuit extérieur. Or, hors du générateur, les électrons partent de sa borne négative.

La cathode est reliée au pôle négatif du générateur.

PIÈGE
Dans une pile, la cathode est le pôle positif. Dans un électrolyseur, c'est l'inverse : elle est reliée au pôle négatif. Seule la définition (cathode = réduction) ne change pas.

2.1 Donner la relation entre la quantité de matière de dihydrogène formée $n(\mathrm{H_2})$ et l'avancement x de la demi-équation.

Données utiles $2\,\mathrm{H^+\,(aq)} + 2\,\mathrm{e^-} = \mathrm{H_2\,(g)}$ (1.2)

Le nombre stœchiométrique de $\mathrm{H_2}$ vaut 1 et il n'y a pas de dihydrogène à $t_0 = 0$.

$n(\mathrm{H_2}) = x$

2.2 Donner la relation entre la quantité d'électrons mise en jeu n_e et l'avancement x à l'instant t.

La demi-équation fait intervenir 2 électrons pour 1 molécule de $\mathrm{H_2}$ formée.

$n_e = 2\,x$

2.3 Donner l'expression de la valeur absolue de la charge électrique Q à l'instant t en fonction de l'avancement x.

Données utiles F : charge transportée par une mole d'électrons ; $n_e = 2\,x$ (2.2)

Une mole d'électrons transporte la charge F, donc n_e moles transportent $Q = n_e \cdot F$.

$Q = 2\,x\,F$

2.4 Montrer que l'intensité du courant qui a circulé pour produire la quantité $n(\mathrm{H_2})$ est $I = \dfrac{2\,F \cdot n(\mathrm{H_2})}{\Delta t}$.

Données utiles $Q = I\,\Delta t$; $Q = 2\,x\,F$ (2.3) ; $n(\mathrm{H_2}) = x$ (2.1)

D'après l'énoncé, $Q = I\,\Delta t$, donc $I = \dfrac{Q}{\Delta t}$.

Avec $Q = 2\,x\,F$: $\quad I = \dfrac{2\,x\,F}{\Delta t}$.

Enfin $x = n(\mathrm{H_2})$:

$I = \dfrac{2\,F \cdot n(\mathrm{H_2})}{\Delta t}$: expression attendue.

2.5 Calculer la valeur de l'intensité I du courant qui circule dans l'électrolyseur quand le débit horaire de dihydrogène est de 5 m³.

Données utiles $V(\mathrm{H_2}) = 5\ \mathrm{m^3}$ en $\Delta t = 1\ \mathrm{h}$; $V_{\text{molaire}} = 25\ \mathrm{L \cdot mol^{-1}}$; $F = 9{,}65 \times 10^4\ \mathrm{C \cdot mol^{-1}}$

Avec $n(\mathrm{H_2}) = \dfrac{V(\mathrm{H_2})}{V_{\text{molaire}}}$, la relation de la question 2.4 devient :

$$I = \frac{2\,F \cdot V(\mathrm{H_2})}{V_{\text{molaire}} \cdot \Delta t}$$

Conversions : $V(\mathrm{H_2}) = 5\ \mathrm{m^3} = 5 \times 10^3$ L et $\Delta t = 1\ \mathrm{h} = 3\,600$ s.

$$I = \frac{2 \times 9{,}65 \times 10^4 \times 5 \times 10^3}{25 \times 3\,600} = 1{,}1 \times 10^4\ \mathrm{A}$$

$I \approx 1{,}1 \times 10^4$ A, soit environ 11 kA.

PIÈGE

Laisser le volume en m³ alors que V_{molaire} est en litres par mole, ou la durée en heures : l'intensité s'exprime en ampères, soit des coulombs par seconde.

COMPRENDRE

Deux chiffres significatifs, comme V_{molaire}. Le résultat, 11 kA, est cohérent avec les « plusieurs kiloampères » annoncés par l'énoncé ; il correspond à 200 mol de $\mathrm{H_2}$ par heure.

À LA CALCULATRICE

