BURHAN

Noyaux, masse et énergie : exercices, niveau examen

2ème Année Baccalauréat · Sciences Physiques · Physique-Chimie

Version en ligne : burhan.ma/2bac/pc/physique-chimie/noyaux-masse-et-energie/exercices/examen

Chapitre	Palier	Exercices
Noyaux, masse et énergie	Niveau examen	5

Exercice 1 6 pts

Centrale nucléaire et uranium consommé

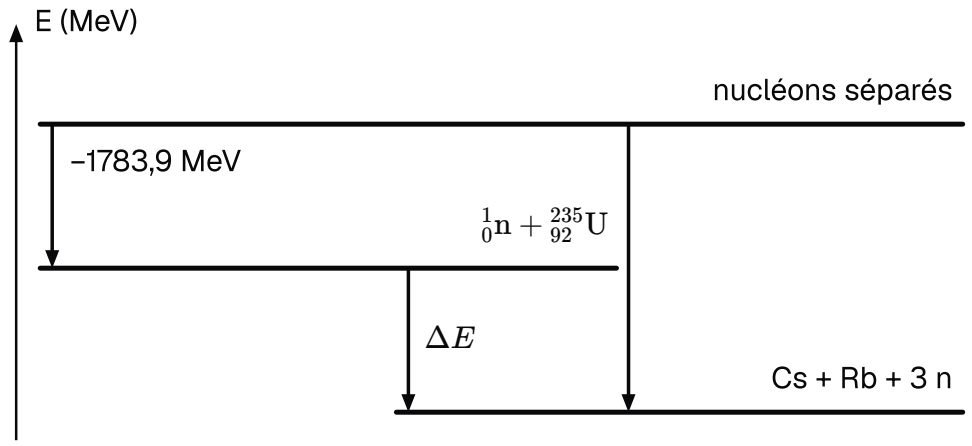
Une centrale nucléaire fournit au réseau une puissance électrique $P_e = 9{,}00 \times 10^{2}\,\mathrm{MW}$ avec un rendement $\eta = 33{,}0\,\%$. Dans son réacteur, l'une des fissions de l'uranium 235 s'écrit :

$$\begin{aligned} &{}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \\ &\longrightarrow {}^{140}_{55}\mathrm{Cs} + {}^{93}_{37}\mathrm{Rb} \\ &\quad + x\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} \end{aligned}$$

Document 1. Énergies de liaison des noyaux, déduites de masses mesurées.

Noyau	E_ℓ (MeV)
uranium 235	$1\,783{,}9$
césium 140	$1\,164{,}0$
rubidium 93	$794{,}3$

Document 2. Diagramme d'énergie de la fission ; le niveau des nucléons séparés est pris à 0. Seule la flèche vers les réactifs est chiffrée.



Bilan énergétique de la fission en césium et rubidium

A.1. 0,75 pts

Partie A : stabilité et énergie d'une fission.

Déterminer le nombre x de neutrons émis, puis vérifier la conservation du nombre de charge.

INDICE

Outil : le nombre de nucléons se conserve ; un neutron compte un nucléon et aucune charge.

CORRIGÉ

Nucléons. $1 + 235 = 140 + 93 + x$, donc $x = 3$.

Charges. $0 + 92 = 55 + 37$: le nombre de charge est conservé.

Conclusion. La fission émet 3 neutrons, et l'équation conserve les deux nombres.

A.2. 0,75 pts

À l'aide du document 1, calculer l'énergie de liaison par nucléon des trois noyaux. Classer ces noyaux du moins stable au plus stable.

INDICE

Outil : l'énergie de liaison par nucléon est un quotient par A.

CORRIGÉ

Quotients. Uranium 235 : $\dfrac{1\,783{,}9}{235} = 7{,}591\,\mathrm{MeV}$. Césium 140 : $\dfrac{1\,164{,}0}{140} = 8{,}314\,\mathrm{MeV}$. Rubidium 93 : $\dfrac{794{,}3}{93} = 8{,}541\,\mathrm{MeV}$.

Classement. $7{,}591 < 8{,}314 < 8{,}541$ en MeV par nucléon.

Conclusion. Du moins stable au plus stable : uranium 235, césium 140, rubidium 93 ; les deux fragments sont plus stables que le noyau qui se scinde.

A.3. 1,25 pts

Montrer que la variation d'énergie de la réaction vaut $\Delta E = -174{,}4\,\mathrm{MeV}$. Indiquer les valeurs que portent les deux flèches non chiffrées du document 2.

INDICE

Outil : l'énergie d'une réaction à partir des énergies de liaison ; un neutron libre a une énergie de liaison nulle.

CORRIGÉ

Énergies de liaison. $E_\ell(\mathrm{i}) = 0 + 1\,783{,}9 = 1\,783{,}9\,\mathrm{MeV}$; $E_\ell(\mathrm{f}) = 1\,164{,}0 + 794{,}3 + 0 = 1\,958{,}3\,\mathrm{MeV}$.

Variation d'énergie.

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_\ell(\mathrm{i}) - E_\ell(\mathrm{f})\\ \Delta E &= 1\,783{,}9 - 1\,958{,}3\\ \Delta E &= -174{,}4\,\mathrm{MeV}\end{aligned}$$

Sur le diagramme. La flèche des nucléons séparés aux produits porte $-E_\ell(\mathrm{f}) = -1\,958{,}3\,\mathrm{MeV}$. La flèche des réactifs aux produits porte $\Delta E = -174{,}4\,\mathrm{MeV}$.

Conclusion. $\Delta E = -174{,}4\,\mathrm{MeV}$: chaque fission libère $174{,}4\,\mathrm{MeV}$.

A.4. 0,75 pts

Expliquer pourquoi la fission peut s'entretenir dans le réacteur, et le rôle des barres de contrôle.

INDICE

Outil : compte les neutrons produits par une fission et ce qu'ils peuvent provoquer.

CORRIGÉ

Réaction en chaîne. Chaque fission libère 3 neutrons, qui peuvent provoquer d'autres fissions.

Barres de contrôle. Elles absorbent une partie des neutrons, pour qu'en moyenne une seule nouvelle fission suive chaque fission.

Conclusion. Les neutrons émis entretiennent une réaction en chaîne, que les barres de contrôle maintiennent stable.

B.1. 0,75 pts

Partie B : uranium consommé en une journée. On admet que chaque fission libère $E_1 = 174{,}4\,\text{MeV}$. Données : $1\,\text{MeV} = 1{,}60 \times 10^{-13}\,\text{J}$; une journée dure $8{,}64 \times 10^{4}\,\text{s}$; $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$; masse molaire de l'uranium 235 : $235\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$; la combustion de $1\,\text{kg}$ de charbon libère $2{,}9 \times 10^{7}\,\text{J}$.

Montrer que l'énergie libérée par les fissions en une journée vaut environ $2{,}36 \times 10^{14}\,\text{J}$.

INDICE

Début : calcule l'énergie électrique fournie en une journée. **Ensuite :** pense au rendement de la centrale.

CORRIGÉ

Énergie électrique. $E_e = P_e\,\Delta t = 9{,}00 \times 10^{8} \times 8{,}64 \times 10^{4} = 7{,}776 \times 10^{13}\,\text{J}$.

Énergie libérée.

$$E = \frac{E_e}{\eta}$$
$$E = \frac{7{,}776 \times 10^{13}}{0{,}330}$$
$$E = 2{,}36 \times 10^{14}\,\text{J}$$

Conclusion. En une journée, les fissions libèrent environ $2{,}36 \times 10^{14}\,\text{J}$; les deux tiers sont évacués par le refroidissement.

B.2. 1,25 pts

En exprimant en joules l'énergie libérée par une fission, déterminer le nombre de fissions en une journée, puis la masse d'uranium 235 consommée.

INDICE

Début : convertis E_1 en joules, puis compare-la à l'énergie de la journée. **Ensuite :** passe du nombre de noyaux à la quantité de matière.

CORRIGÉ

Énergie d'une fission. $E_1 = 174{,}4 \times 1{,}60 \times 10^{-13} = 2{,}79 \times 10^{-11}\,\text{J}$.

Nombre de fissions. $N = \dfrac{2{,}356 \times 10^{14}}{2{,}790 \times 10^{-11}} = 8{,}44 \times 10^{24}$.

Quantité de matière. $n = \dfrac{N}{N_A} = \dfrac{8{,}444 \times 10^{24}}{6{,}02 \times 10^{23}} = 14{,}0\,\text{mol}$.

Masse.

$$m = n\,M$$
$$m = 14{,}03 \times 235$$
$$m = 3{,}30 \times 10^{3}\,\text{g}$$

Conclusion. La centrale consomme environ $3{,}30\,\text{kg}$ d'uranium 235 par jour.

B.3. `0,5 pts`

Quelle masse de charbon une centrale thermique devrait-elle brûler pour libérer la même énergie ? Donner un avantage et un inconvénient du combustible nucléaire.

INDICE

Outil : l'énergie libérée par la combustion d'un kilogramme de charbon.

CORRIGÉ

Masse de charbon.

$$m = \frac{2{,}36 \times 10^{14}}{2{,}9 \times 10^{7}}$$
$$m = 8{,}1 \times 10^{6}\,\mathrm{kg}$$

Avis. Quelques kilogrammes d'uranium remplacent environ huit mille tonnes de charbon, sans gaz carbonique rejeté. En revanche, les produits de fission sont radioactifs : ces déchets doivent être confinés longtemps.

Conclusion. Il faudrait brûler environ $8{,}1 \times 10^{6}\,\mathrm{kg}$ de charbon par jour ; le nucléaire économise du combustible mais produit des déchets radioactifs.

Exercice 2 — 6 pts

Combustible d'un réacteur de fusion deutérium-tritium

Un réacteur expérimental doit produire de l'énergie par la fusion du deutérium et du tritium, deux isotopes de l'hydrogène :

$$ {}_{1}^{2}\mathrm{H} + {}_{1}^{3}\mathrm{H} \longrightarrow {}_{2}^{4}\mathrm{He} + {}_{Z}^{A}\mathrm{X} $$

Document. Diagramme d'énergie de la réaction. Les nucléons séparés sont au niveau 0 ; chaque nombre porté par une flèche donne sa variation d'énergie.

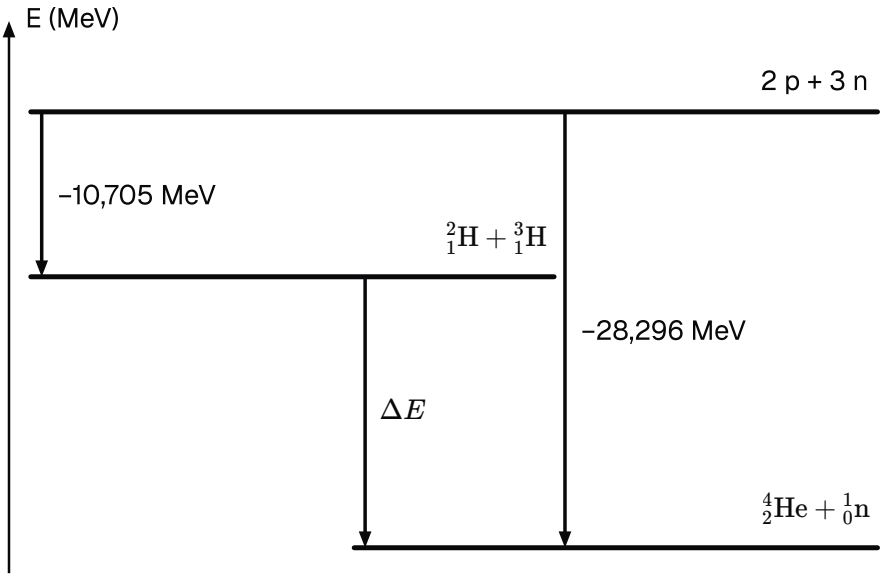


Diagramme d'énergie de la fusion du deutérium et du tritium

A.1. — 0,75 pts

Partie A : bilan sur le diagramme d'énergie.

Identifier la particule ${}_{Z}^{A}\mathrm{X}$.

INDICE

Outil : les deux lois de conservation.

CORRIGÉ

Nucléons. $2 + 3 = 4 + A$, donc $A = 1$.

Charges. $1 + 1 = 2 + Z$, donc $Z = 0$.

Conclusion. La particule émise est un neutron, ${}_{0}^{1}\mathrm{n}$.

A.2. 0,75 pts

Déduire des flèches chiffrées du document l'énergie de liaison $E_\ell(\mathrm{i})$ des deux noyaux réactifs, puis celle des produits, $E_\ell(\mathrm{f})$. Pourquoi le neutron n'y contribue-t-il pas ?

INDICE

Outil : une flèche issue des nucléons séparés vaut l'opposé d'une énergie de liaison.

CORRIGÉ

Réactifs. La flèche vers le deutérium et le tritium vaut $-10{,}705\,\mathrm{MeV}$, donc $E_\ell(\mathrm{i}) = 10{,}705\,\mathrm{MeV}$.

Produits. La flèche vers l'hélium 4 et le neutron vaut $-28{,}296\,\mathrm{MeV}$, donc $E_\ell(\mathrm{f}) = 28{,}296\,\mathrm{MeV}$.

Neutron. Un nucléon libre n'est lié à aucun autre : son énergie de liaison est nulle.

Conclusion. $E_\ell(\mathrm{i}) = 10{,}705\,\mathrm{MeV}$ et $E_\ell(\mathrm{f}) = 28{,}296\,\mathrm{MeV}$, toute due au noyau d'hélium 4.

A.3. 1 pts

Montrer que la variation d'énergie de la réaction vaut $\Delta E = -17{,}591\,\mathrm{MeV}$. En déduire l'énergie libérée.

INDICE

Outil : l'énergie d'une réaction à partir des énergies de liaison.

CORRIGÉ

Variation d'énergie.

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_\ell(\mathrm{i}) - E_\ell(\mathrm{f})\\ \Delta E &= 10{,}705 - 28{,}296\\ \Delta E &= -17{,}591\,\mathrm{MeV}\end{aligned}$$

Énergie libérée. $\Delta E < 0$: $E_{\mathrm{lib}} = 17{,}591\,\mathrm{MeV}$.

Conclusion. Chaque fusion libère $17{,}591\,\mathrm{MeV}$; c'est la flèche non chiffrée du document.

A.4. 0,75 pts

Une fission de l'uranium 235 libère en moyenne environ $0{,}8\,\mathrm{MeV}$ par nucléon des réactifs. Comparer à la fusion étudiée et donner un avis argumenté sur l'intérêt de cette fusion.

INDICE

Début : ramène l'énergie libérée par la fusion à un nucléon des réactifs. **Ensuite :** fais le rapport des deux valeurs.

CORRIGÉ

Par nucléon. Les réactifs comptent 5 nucléons : $\dfrac{17{,}591}{5} = 3{,}518\,\mathrm{MeV}$ par nucléon.

Rapport. $\dfrac{3{,}518}{0{,}8} \approx 4$.

Avis. À masse égale de combustible, cette fusion libère environ quatre fois plus d'énergie qu'une fission. L'hélium 4 formé est stable ; les déchets, surtout des matériaux rendus radioactifs par les neutrons, sont moins durables que ceux de la fission.

Limite. Elle exige cependant une température de l'ordre de cent millions de kelvins, encore difficile à maintenir.

Conclusion. La fusion deutérium-tritium est très intéressante énergétiquement ; sa maîtrise reste un défi technique.

B.1. 0,75 pts

Partie B : masse de combustible. On admet que chaque fusion libère $E_1 = 17{,}6\,\mathrm{MeV}$. Données : $1\,\mathrm{MeV} = 1{,}60 \times 10^{-13}\,\mathrm{J}$; $1\,\mathrm{u} = 931{,}5\,\mathrm{MeV}/c^2$; $c = 3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\,\mathrm{mol^{-1}}$; masses molaires : deutérium $2{,}01\,\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$, tritium $3{,}02\,\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$.

Calculer, en unité de masse atomique, la masse qui disparaît au cours d'une fusion.

INDICE

Outil : la correspondance entre l'unité de masse atomique et le mégaélectronvolt.

CORRIGÉ

Relation. Une énergie de $931{,}5\,\mathrm{MeV}$ correspond à une masse de $1\,\mathrm{u}$.

Calcul.

$$|\Delta m| = \frac{17{,}6}{931{,}5}$$
$$|\Delta m| = 0{,}0189\,\mathrm{u}$$

Conclusion. Une fusion fait disparaître $0{,}0189\,\mathrm{u}$ de masse.

B.2. 0,75 pts

Le réacteur doit fournir l'énergie $E = 1{,}00 \times 10^{15}\ \text{J}$. En exprimant E_1 en joules, montrer qu'il faut environ $3{,}55 \times 10^{26}$ fusions.

INDICE

Début : la valeur du mégaélectronvolt en joules. **Ensuite :** compare l'énergie totale à celle d'une fusion.

CORRIGÉ

Énergie d'une fusion. $E_1 = 17{,}6 \times 1{,}60 \times 10^{-13} = 2{,}82 \times 10^{-12}\ \text{J}$.

Nombre de fusions.

$$N = \frac{1{,}00 \times 10^{15}}{2{,}816 \times 10^{-12}}$$
$$N = 3{,}55 \times 10^{26}$$

Conclusion. Il faut environ $3{,}55 \times 10^{26}$ fusions pour fournir cette énergie.

B.3. 0,5 pts

Calculer la masse totale de deutérium et de tritium consommée.

INDICE

Début : cherche combien de noyaux de chaque isotope une fusion consomme. **Ensuite :** passe du nombre de noyaux à la quantité de matière.

CORRIGÉ

Quantité de matière. Une fusion consomme un noyau de deutérium et un noyau de tritium : $n = \dfrac{N}{N_A} = \dfrac{3{,}551 \times 10^{26}}{6{,}02 \times 10^{23}} = 590\,\text{mol}$ de chaque isotope.

Masse.

$$m = n \times (2{,}01 + 3{,}02)$$
$$m = 589{,}9 \times 5{,}03$$
$$m = 2{,}97 \times 10^{3}\ \text{g}$$

Conclusion. Le réacteur consomme environ $2{,}97\,\text{kg}$ de deutérium et de tritium.

B.4. `0,75 pts`

Calculer la masse convertie en énergie pour libérer $E = 1{,}00 \times 10^{15}\,\text{J}$. Quelle fraction de la masse de combustible représente-t-elle ?

INDICE

Outil : la relation d'équivalence masse-énergie, avec l'énergie en joules. **Ensuite :** compare à la masse de combustible.

CORRIGÉ

Masse convertie.

$$\Delta m = \frac{E}{c^2}$$
$$\Delta m = \frac{1{,}00 \times 10^{15}}{(3{,}00 \times 10^{8})^2}$$
$$\Delta m = 1{,}11 \times 10^{-2}\,\text{kg}$$

Fraction. $\dfrac{1{,}11 \times 10^{-2}}{2{,}97} \approx 3{,}7 \times 10^{-3}$, soit environ $0{,}37\,\%$.

Conclusion. Seuls $11{,}1\,\text{g}$ de matière, environ $0{,}37\,\%$ du combustible, sont convertis en énergie.

Exercice 3 6 pts

Énergie et radioprotection d'une source de polonium 210

Des ioniseurs industriels contiennent une petite source scellée de polonium 210, radioactif α. Les particules α rendent l'air conducteur et éliminent l'électricité statique.

Document 1. Masses des atomes, électrons compris.

Atome	Masse de l'atome (u)
polonium 210, $^{210}_{84}\mathrm{Po}$	$209{,}98287$
plomb 206	$205{,}97447$
hélium 4	$4{,}00260$

Données : Pb ($Z=82$), Bi ($Z=83$), Po ($Z=84$) ; $m_e = 5{,}49\times10^{-4}\,\mathrm{u}$; $1\,\mathrm{u} = 931{,}5\,\mathrm{MeV}/c^2$; $1\,\mathrm{MeV} = 1{,}60\times10^{-13}\,\mathrm{J}$; $N_A = 6{,}02\times10^{23}\,\mathrm{mol^{-1}}$; masse molaire du polonium 210 : $210\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$; la combustion de $1\,\mathrm{kg}$ de méthane libère $5{,}0\times10^{7}\,\mathrm{J}$.

A.1. 0,75 pts

Partie A : désintégration du polonium 210.

Écrire l'équation de la désintégration et identifier le noyau formé.

INDICE

Outil : la particule α est un noyau d'hélium 4 ; applique les deux lois de conservation.

CORRIGÉ

Noyau formé. Nucléons : $210 = A + 4$, donc $A = 206$. Charges : $84 = Z + 2$, donc $Z = 82$: c'est le plomb.

Équation.

$$^{210}_{84}\mathrm{Po} \longrightarrow {}^{206}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

Conclusion. Le polonium 210 donne un noyau de plomb 206 et une particule α.

A.2. 1,25 pts

Calculer la masse du noyau de chacun des trois atomes du document 1. Montrer que la variation d'énergie de cette désintégration vaut environ $-5{,}4\,\mathrm{MeV}$.

INDICE

Début : un atome compte Z électrons en plus de son noyau. **Point délicat :** chaque différence garde cinq décimales.

CORRIGÉ

Polonium 210. $m = 209{,}98287 - 84 \times 0{,}000549 = 209{,}93675\,\mathrm{u}$.

Plomb 206. $m = 205{,}97447 - 82 \times 0{,}000549 = 205{,}92945\,\mathrm{u}$.

Hélium 4. $m = 4{,}00260 - 2 \times 0{,}000549 = 4{,}00150\,\mathrm{u}$.

Masses. $m_\mathrm{i} = 209{,}93675\,\mathrm{u}$; $m_\mathrm{f} = 205{,}92945 + 4{,}00150 = 209{,}93095\,\mathrm{u}$.

Variation d'énergie.

$$\begin{aligned}\Delta E &= (m_\mathrm{f} - m_\mathrm{i})\,c^2 \\ \Delta E &= -0{,}00580 \\ &\quad \times 931{,}5 \\ \Delta E &= -5{,}40\,\mathrm{MeV}\end{aligned}$$

Conclusion. $\Delta E \approx -5{,}40\,\mathrm{MeV}$: chaque désintégration libère environ $5{,}40\,\mathrm{MeV}$.

A.3. 0,75 pts

Calculer l'énergie libérée par la désintégration de tous les noyaux d'une masse $m = 1{,}0\,\mu\mathrm{g}$ de polonium 210.

INDICE

Début : calcule le nombre de noyaux contenus dans $1{,}0\,\mu\mathrm{g}$. **Point délicat :** garde la valeur non arrondie de l'énergie d'une désintégration.

CORRIGÉ

Nombre de noyaux. $N = \dfrac{m}{M}\,N_A = \dfrac{1{,}0 \times 10^{-6}}{210} \times 6{,}02 \times 10^{23} = 2{,}87 \times 10^{15}$.

Énergie d'une désintégration. $0{,}00580 \times 931{,}5 = 5{,}403\,\mathrm{MeV}$, soit $8{,}64 \times 10^{-13}\,\mathrm{J}$.

Énergie totale.

$$\begin{aligned}E &= 2{,}87 \times 10^{15} \\ &\quad \times 8{,}64 \times 10^{-13} \\ E &= 2{,}5 \times 10^{3}\,\mathrm{J}\end{aligned}$$

Conclusion. Un microgramme de polonium 210 libère environ $2{,}5 \times 10^{3}\,\mathrm{J}$ en se désintégrant entièrement.

A.4. 0,5 pts

Comparer à l'énergie libérée par la combustion de $1{,}0\ \mu\text{g}$ de méthane, et conclure.

INDICE

Outil : l'énergie libérée par la combustion d'un kilogramme de méthane. **Point délicat :** $1\ \mu\text{g} = 10^{-9}\ \text{kg}$.

CORRIGÉ

Combustion. $E' = 1{,}0 \times 10^{-9} \times 5{,}0 \times 10^{7} = 5{,}0 \times 10^{-2}\ \text{J}$.

Rapport.

$$\frac{E}{E'} = \frac{2{,}5 \times 10^{3}}{5{,}0 \times 10^{-2}}$$
$$\frac{E}{E'} = 5{,}0 \times 10^{4}$$

Conclusion. À masse égale, la désintégration du polonium 210 libère environ cinquante mille fois plus d'énergie que la combustion du méthane.

B.1. 0,5 pts

Partie B : protection et mesure. Les particules α sont peu pénétrantes.

Proposer deux règles de protection pour l'opérateur qui installe un ioniseur.

INDICE

Outil : les moyens de réduire la dose reçue près d'une source.

CORRIGÉ

Règle de distance. Manipuler l'ioniseur par son boîtier, sans approcher les mains ni le visage de la face active.

Règle d'écran et d'intégrité. Garder la grille de protection en place et ne jamais ouvrir la source scellée.

Conclusion. L'opérateur se protège en gardant ses distances avec la face active et en conservant intacts la grille et le scellement de la source.

B.2. 0,75 pts

Expliquer pourquoi le polonium 210 est très dangereux s'il est inhalé ou avalé, alors que la source scellée l'est peu à quelques décimètres.

INDICE

Outil : regarde, dans chaque cas, où se trouve la source par rapport au corps.

CORRIGÉ

À distance. La source reste hors du corps : c'est une irradiation. Les particules α sont arrêtées par l'air et par la couche superficielle de la peau, donc l'irradiation externe est faible.

Contamination. Une fois inhalé ou avalé, le polonium se trouve dans le corps et se dépose dans les organes. Toute l'énergie des particules α est alors cédée aux cellules voisines.

Conclusion. Le polonium 210 est surtout dangereux par contamination interne, d'où l'obligation de garder la source scellée.

B.3. 1 pts

On dispose d'un compteur de particules, d'un chronomètre, d'une feuille de papier et d'une source scellée de polonium 210. Proposer un protocole pour vérifier que la feuille arrête les particules α.

INDICE

Début : pense à mesurer ce que compte l'appareil sans la source. **Ensuite :** ne fais varier qu'un paramètre à la fois.

CORRIGÉ

Bruit de fond. Compter pendant $60\,\mathrm{s}$ sans source, pour connaître les comptages dus à l'environnement.

Sans écran. Placer la source à $1\,\mathrm{cm}$ de la fenêtre du compteur et compter pendant $60\,\mathrm{s}$.

Avec écran. Glisser la feuille entre la source et le compteur, sans rien déplacer, et compter encore pendant $60\,\mathrm{s}$.

Conclusion. Si le comptage avec la feuille retombe au niveau du bruit de fond, la feuille arrête les particules α.

B.4. `0,5 pts`

Document 2. Un protocole de ce type a donné les comptages suivants, relevés pendant $60\,\text{s}$: sans source, avec la source sans écran, puis avec la source et une feuille de papier.

Mesure	Nombre de coups
sans source	18
source, sans écran	$2\,430$
source, feuille de papier	20

Calculer, pour chaque mesure avec la source, le nombre de coups dus à la source. Conclure sur le rôle de la feuille.

INDICE

Outil : le comptage sans source mesure le bruit de fond.

CORRIGÉ

Sans écran. $2\,430 - 18 = 2\,412$ coups dus à la source.

Avec la feuille. $20 - 18 = 2$ coups, soit moins de $0{,}1\,\%$ des précédents, du même ordre que les fluctuations du bruit de fond.

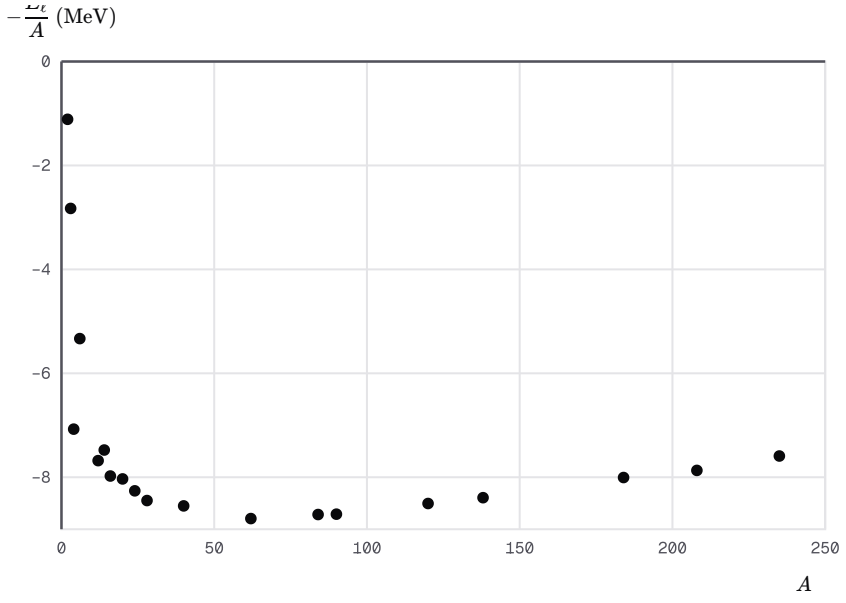
Conclusion. La feuille de papier arrête la quasi-totalité des particules α : le rayonnement de cette source n'irradie pas au-delà d'un écran mince.

Exercice 4 — 6 pts

Stabilité et fission du plutonium 239

Les physiciens comparent la stabilité des noyaux grâce à la courbe d'Aston, établie à partir de masses mesurées.

Document 1. Valeurs de $-\dfrac{E_\ell}{A}$ en fonction du nombre de nucléons A, pour dix-neuf noyaux.



Courbe d'Aston : dix-neuf noyaux mesurés

A.1. — 0,5 pts

Partie A : lecture de la courbe d'Aston.

Repérer sur le document la zone des noyaux les plus stables. Donner l'ordre de grandeur de leur énergie de liaison par nucléon.

INDICE

Outil : l'ordonnée est l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon.

CORRIGÉ

Lecture. Les points les plus bas se trouvent pour A voisin de 60, avec une ordonnée proche de $-8{,}8\,\text{MeV}$.

Interprétation. Plus un point est bas, plus l'énergie de liaison par nucléon est grande.

Conclusion. Les noyaux les plus stables ont environ 60 nucléons et une énergie de liaison voisine de $8{,}8\,\text{MeV}$ par nucléon.

A.2. 0,5 pts

Quelle énergie de liaison par nucléon le document donne-t-il pour le magnésium 24 ($A = 24$) et pour le plomb 208 ($A = 208$) ? Lequel de ces noyaux est le plus stable ?

INDICE

Outil : lis l'ordonnée de chaque point, puis compare les valeurs opposées.

CORRIGÉ

Lectures. Magnésium 24 : $\dfrac{E_\ell}{A} \approx 8{,}3\,\mathrm{MeV}$. Plomb 208 : $\dfrac{E_\ell}{A} \approx 7{,}9\,\mathrm{MeV}$.

Comparaison. $8{,}3 > 7{,}9$ en MeV par nucléon.

Conclusion. Le magnésium 24 est plus stable que le plomb 208, d'après ces lectures graphiques.

A.3. 0,75 pts

Montrer que l'énergie de liaison du plomb 208 est environ huit fois celle du magnésium 24. Pourquoi ce résultat ne contredit-il pas la question précédente ?

INDICE

Outil : la définition de l'énergie de liaison par nucléon.

CORRIGÉ

Énergies de liaison. Plomb : $E_\ell \approx 208 \times 7{,}9 \approx 1{,}6 \times 10^3\,\mathrm{MeV}$. Magnésium : $E_\ell \approx 24 \times 8{,}3 \approx 2{,}0 \times 10^2\,\mathrm{MeV}$.

Rapport. $\dfrac{1{,}6 \times 10^3}{2{,}0 \times 10^2} \approx 8$.

Explication. L'énergie de liaison totale croît avec le nombre de nucléons. La stabilité se juge par nucléon, donc par la question précédente.

Conclusion. Le plomb 208 a une énergie de liaison environ huit fois plus grande, mais il reste moins stable que le magnésium 24.

A.4. 0,5 pts

À l'aide de la position des points par rapport au creux du document, indiquer quels noyaux peuvent libérer de l'énergie par fusion et lesquels par fission.

INDICE

Outil : une réaction libère de l'énergie si elle rapproche les noyaux du creux.

CORRIGÉ

Fusion. Les noyaux légers, à gauche du creux, sont sur la partie qui descend : en s'unissant, ils forment un noyau plus proche du creux.

Fission. Les noyaux lourds, à droite du creux, sont sur la partie qui remonte : en se scindant, ils donnent des noyaux plus proches du creux.

Conclusion. Les noyaux légers, à gauche du creux, peuvent libérer de l'énergie par fusion ; les noyaux lourds, à droite, par fission.

A.5. 0,5 pts

Comparer l'énergie de liaison par nucléon de l'hélium 4 ($A = 4$) à celle des noyaux de $A = 3$ et $A = 6$, puis en déduire une propriété de ce noyau.

INDICE

Outil : lis les ordonnées des trois points.

CORRIGÉ

Lecture. L'hélium 4 a une énergie de liaison par nucléon d'environ $7{,}1\,\mathrm{MeV}$, contre environ $2{,}8\,\mathrm{MeV}$ pour $A = 3$ et $5{,}3\,\mathrm{MeV}$ pour $A = 6$.

Interprétation. Son point est bien plus bas que celui de ses voisins : ce noyau est exceptionnellement lié pour sa taille.

Conclusion. L'hélium 4 est un noyau léger particulièrement stable.

B.1. 0,5 pts

Partie B : fission du plutonium 239. Un neutron lent provoque la fission d'un noyau de plutonium 239 :

$$\begin{aligned} &{}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{239}_{94}\mathrm{Pu} \\ &\longrightarrow {}^{134}_{52}\mathrm{Te} + {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \\ &\quad + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} \end{aligned}$$

Document 2. Masses des noyaux.

Noyau	Masse (u)
plutonium 239	$239{,}00060$
tellure 134	$133{,}88287$
noyau ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$	$103{,}89072$

Données : Nb ($Z = 41$), Mo ($Z = 42$), Tc ($Z = 43$) ; $m_n = 1{,}00866\,\mathrm{u}$; $1\,\mathrm{u} = 931{,}5\,\mathrm{MeV}/c^2$; $1\,\mathrm{MeV} = 1{,}60 \times 10^{-13}\,\mathrm{J}$; $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\,\mathrm{mol}^{-1}$; masse molaire du plutonium 239 : $239\,\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$.

Déterminer A et Z, puis identifier le noyau ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$.

INDICE

Outil : les deux lois de conservation ; un neutron compte un nucléon et aucune charge.

CORRIGÉ

Nucléons. $1 + 239 = 134 + A + 2$, donc $A = 104$.

Charges. $0 + 94 = 52 + Z + 0$, donc $Z = 42$: c'est le molybdène.

Conclusion. Le second fragment est le molybdène 104, ${}^{104}_{42}\mathrm{Mo}$.

B.2. 1,5 pts

Calculer, à partir des masses du document 2, la variation d'énergie ΔE de cette fission, puis l'énergie libérée.

INDICE

Outil : l'énergie d'une réaction nucléaire à partir des masses. **Point délicat :** compte tous les neutrons, du côté des réactifs et du côté des produits.

CORRIGÉ

Réactifs. $m_{\mathrm{i}} = 1{,}00866 + 239{,}00060 = 240{,}00926\,\mathrm{u}$.

Produits. $m_{\mathrm{f}} = 133{,}88287 + 103{,}89072 + 2 \times 1{,}00866 = 239{,}79091\,\mathrm{u}$.

Variation d'énergie.

$$\begin{aligned} \Delta E &= (m_{\mathrm{f}} - m_{\mathrm{i}})\,c^2 \\ \Delta E &= -0{,}21835 \\ &\quad \times 931{,}5 \\ \Delta E &= -203{,}4\,\mathrm{MeV} \end{aligned}$$

Conclusion. $\Delta E < 0$: chaque fission libère $E_{\mathrm{lib}} = 203{,}4\,\mathrm{MeV}$.

B.3. 0,75 pts

Un réacteur consomme $1{,}20\,\mathrm{kg}$ de plutonium 239 en une journée, soit $8{,}64 \times 10^{4}\,\mathrm{s}$. Calculer le nombre de noyaux qui subissent la fission, puis l'énergie libérée en joules.

INDICE

Début : passe de la masse à la quantité de matière. **Point délicat :** garde la valeur non arrondie de l'énergie d'une fission.

CORRIGÉ

Nombre de noyaux. $N = \dfrac{1\,200}{239} \times 6{,}02 \times 10^{23} = 3{,}023 \times 10^{24}$.

Énergie d'une fission. $203{,}39 \times 1{,}60 \times 10^{-13} = 3{,}254 \times 10^{-11}\,\mathrm{J}$.

Énergie totale.

$$\begin{aligned} E &= 3{,}023 \times 10^{24} \\ &\quad \times 3{,}254 \times 10^{-11} \\ E &= 9{,}84 \times 10^{13}\,\mathrm{J} \end{aligned}$$

Conclusion. En une journée, le réacteur libère environ $9{,}84 \times 10^{13}\,\mathrm{J}$.

B.4. `0,5 pts`

En déduire la puissance thermique moyenne du réacteur.

INDICE

Outil : une puissance est une énergie divisée par une durée.

CORRIGÉ

Relation. $P = \dfrac{E}{\Delta t}$, avec $\Delta t = 8{,}64 \times 10^{4}\ \text{s}$.

Application numérique.

$$P = \frac{9{,}836 \times 10^{13}}{8{,}64 \times 10^{4}}$$
$$P = 1{,}14 \times 10^{9}\ \text{W}$$

Conclusion. La puissance thermique moyenne du réacteur vaut environ $1{,}14 \times 10^{9}\ \text{W}$.

Exercice 5 6 pts

Fusion de l'hélium en carbone dans une étoile

Une étoile géante rouge a épuisé l'hydrogène de son cœur. Elle y transforme maintenant l'hélium en carbone :

$$3\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X}$$

Document. Masses des atomes et énergies de liaison par nucléon des noyaux.

Atome	Masse de l'atome (u)	$\frac{E_\ell}{A}$ du noyau (MeV)
hélium 4	$4{,}002603$	$7{,}074$
carbone 12	$12{,}000000$	$7{,}680$

Données : B ($Z=5$), C ($Z=6$), N ($Z=7$) ; $m_e = 5{,}49\times10^{-4}\,\mathrm{u}$; $1\,\mathrm{u} = 931{,}5\,\mathrm{MeV}/c^2$.

A.1. 0,75 pts

Partie A : fusion de l'hélium en carbone.

Déterminer A et Z, et identifier le noyau formé.

INDICE

Outil : les deux lois de conservation.

CORRIGÉ

Nucléons. $3\times4 = A$, donc $A = 12$.

Charges. $3\times2 = Z$, donc $Z = 6$: c'est le carbone.

Conclusion. Trois noyaux d'hélium 4 forment un noyau de carbone 12, ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$.

A.2. 1 pts

On note $m_{\mathrm{at}}(\mathrm{He})$ et $m_{\mathrm{at}}(\mathrm{C})$ les masses des atomes. Montrer que la variation de masse de la réaction s'écrit

$$\begin{aligned} &m_{\mathrm{f}} - m_{\mathrm{i}} \\ &= m_{\mathrm{at}}(\mathrm{C}) - 3\,m_{\mathrm{at}}(\mathrm{He}) \end{aligned}$$

INDICE

Début : exprime la masse de chaque noyau à partir de celle de son atome. **Point délicat :** compte les électrons de chaque côté.

CORRIGÉ

Masses des noyaux. Un atome de Z électrons a pour noyau $m = m_{\mathrm{at}} - Z\,m_e$: $m(\mathrm{C}) = m_{\mathrm{at}}(\mathrm{C}) - 6\,m_e$ et $m(\mathrm{He}) = m_{\mathrm{at}}(\mathrm{He}) - 2\,m_e$.

Différence.

$$\begin{aligned} &m_{\mathrm{f}} - m_{\mathrm{i}} \\ &= m_{\mathrm{at}}(\mathrm{C}) - 6\,m_e \\ &\quad - 3\,m_{\mathrm{at}}(\mathrm{He}) + 6\,m_e \end{aligned}$$

Simplification. Les termes en m_e s'éliminent, car la réaction conserve le nombre de charge : six électrons de chaque côté.

Conclusion. $m_{\mathrm{f}} - m_{\mathrm{i}} = m_{\mathrm{at}}(\mathrm{C}) - 3\,m_{\mathrm{at}}(\mathrm{He})$: on peut faire ce bilan avec les masses des atomes.

A.3. 1,25 pts

Calculer la variation d'énergie ΔE de la réaction et l'énergie libérée.

INDICE

Outil : l'énergie d'une réaction nucléaire à partir des masses, avec la relation de la question précédente.

CORRIGÉ

Variation de masse. $m_{\mathrm{f}} - m_{\mathrm{i}} = 12{,}000000 - 3 \times 4{,}002603 = -0{,}007809\,\mathrm{u}$.

Variation d'énergie.

$$\begin{aligned} \Delta E &= -0{,}007809 \\ &\quad \times 931{,}5 \\ \Delta E &= -7{,}274\,\mathrm{MeV} \end{aligned}$$

Conclusion. $\Delta E < 0$: chaque réaction libère $E_{\mathrm{lib}} = 7{,}274\,\mathrm{MeV}$.

A.4. 0,5 pts

Recalculer ΔE à partir des énergies de liaison par nucléon du document. Les deux résultats sont-ils compatibles ?

INDICE

Début : multiplie chaque énergie par nucléon par A. **Ensuite :** compare l'écart des deux résultats à leur précision.

CORRIGÉ

Énergies de liaison. $E_\ell(\mathrm{i}) = 3 \times 4 \times 7{,}074 = 84{,}888\,\mathrm{MeV}$; $E_\ell(\mathrm{f}) = 12 \times 7{,}680 = 92{,}160\,\mathrm{MeV}$.

Variation d'énergie.

$$\Delta E = 84{,}888 - 92{,}160$$
$$\Delta E = -7{,}272\,\mathrm{MeV}$$

Comparaison. L'écart avec $-7{,}274\,\mathrm{MeV}$ vaut $0{,}002\,\mathrm{MeV}$, soit $0{,}03\,\%$, de l'ordre de l'arrondi des énergies par nucléon.

Conclusion. Les deux bilans sont compatibles : la réaction libère environ $7{,}27\,\mathrm{MeV}$.

B.1. 1 pts

Partie B : consommation d'hélium de l'étoile. On admet que chaque réaction libère $E_1 = 7{,}27\,\mathrm{MeV}$ et que l'étoile rayonne la puissance $L = 3{,}8 \times 10^{28}\,\mathrm{W}$, fournie par cette seule réaction.

Données : $1\,\mathrm{MeV} = 1{,}60 \times 10^{-13}\,\mathrm{J}$; $c = 3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\,\mathrm{mol^{-1}}$; masse molaire de l'hélium 4 : $M = 4{,}00 \times 10^{-3}\,\mathrm{kg \cdot mol^{-1}}$.

En exprimant E_1 en joules, calculer le nombre N de réactions qui se produisent chaque seconde dans l'étoile.

INDICE

Début : en une seconde, l'étoile rayonne une énergie égale à $L \times 1\,\mathrm{s}$. **Point délicat :** garde la valeur non arrondie de E_1.

CORRIGÉ

Conversion. $E_1 = 7{,}27 \times 1{,}60 \times 10^{-13} = 1{,}16 \times 10^{-12}\,\mathrm{J}$; on garde $1{,}163 \times 10^{-12}\,\mathrm{J}$ pour la suite.

Nombre de réactions.

$$N = \frac{L \times 1\,\mathrm{s}}{E_1}$$
$$N = \frac{3{,}8 \times 10^{28}}{1{,}163 \times 10^{-12}}$$
$$N = 3{,}3 \times 10^{40}$$

Conclusion. Environ $3{,}3 \times 10^{40}$ réactions se produisent chaque seconde dans le cœur de l'étoile.

B.2. 0,75 pts

En déduire la masse d'hélium consommée par seconde.

INDICE

Début : compte les noyaux d'hélium 4 qu'une réaction consomme. **Point délicat :** garde la valeur non arrondie de E_1, et celle de N.

CORRIGÉ

Noyaux consommés. Une réaction consomme trois noyaux d'hélium 4 : $3N = 9{,}80 \times 10^{40}$ noyaux par seconde, soit $\dfrac{3N}{N_A} = 1{,}628 \times 10^{17}\,\text{mol}$.

Masse.

$$\begin{aligned} m &= 1{,}628 \times 10^{17} \\ &\quad \times 4{,}00 \times 10^{-3} \\ m &= 6{,}5 \times 10^{14}\,\text{kg} \end{aligned}$$

Conclusion. L'étoile consomme environ $6{,}5 \times 10^{14}\,\text{kg}$ d'hélium par seconde.

B.3. 0,75 pts

La masse perdue chaque seconde par l'étoile vaut $\dfrac{L \times 1\,\text{s}}{c^2}$. Établir l'expression littérale du rapport r entre cette masse et la masse d'hélium consommée par seconde. Montrer que r ne dépend pas de L, puis le calculer.

INDICE

Début : exprime la masse d'hélium consommée par seconde en fonction de L. **Ensuite :** simplifie le quotient.

CORRIGÉ

Masse consommée. $m = \dfrac{3N}{N_A}\,M$ avec $N = \dfrac{L \times 1\,\text{s}}{E_1}$, d'où $m = \dfrac{3\,M\,L \times 1\,\text{s}}{N_A\,E_1}$.

Rapport.

$$\begin{aligned} r &= \frac{L}{c^2} \times \frac{N_A\,E_1}{3\,M\,L} \\ r &= \frac{N_A\,E_1}{3\,M\,c^2} \end{aligned}$$

Application numérique. $r = \dfrac{6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}163 \times 10^{-12}}{3 \times 4{,}00 \times 10^{-3} \times 9{,}00 \times 10^{16}} = 6{,}48 \times 10^{-4}$.

Conclusion. $r = \dfrac{N_A\,E_1}{3\,M\,c^2}$ ne dépend que de la réaction : environ $0{,}065\,\%$ de l'hélium consommé disparaît en énergie, quelle que soit la puissance de l'étoile.