BURHAN

Résumé : Noyaux, masse et énergie

2ème Année Baccalauréat · Sciences Physiques · Physique-Chimie

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

Chapitre	Semestre
Noyaux, masse et énergie	Semestre 1

Unités du noyau et équivalence masse-énergie

Définition : Unité de masse atomique et électronvolt

L'**unité de masse atomique**, de symbole u, est égale au douzième de la masse d'un atome de carbone 12 :

$$1\,\mathrm{u} = 1{,}66054 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}.$$

L'**électronvolt**, de symbole eV, est l'énergie acquise par un électron accéléré sous une tension de $1\,\mathrm{V}$:

$$1\,\mathrm{eV} = 1{,}60 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}.$$

À l'échelle du noyau, on emploie le mégaélectronvolt : $1\,\mathrm{MeV} = 10^{6}\,\mathrm{eV} = 1{,}60 \times 10^{-13}\,\mathrm{J}$.

Propriété : Relation d'équivalence masse-énergie

Tout système de masse m, au repos, possède une **énergie de masse** :

$$E = m\,c^{2},$$

où $c = 3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ est la célérité de la lumière dans le vide ; E s'exprime en joules si m est en kilogrammes. Une variation de masse Δm du système correspond à une variation de son énergie de masse $\Delta E = \Delta m\,c^{2}$.

À l'échelle du noyau, on utilise la correspondance $1\,\mathrm{u} = 931{,}5\,\mathrm{MeV}/c^{2}$: une masse de $1\,\mathrm{u}$ a une énergie de masse de $931{,}5\,\mathrm{MeV}$.

Exemple

Données. Le noyau de lithium 7 a pour masse $m = 7{,}01436\,\mathrm{u}$.

En MeV. $E = 7{,}01436 \times 931{,}5 = 6\,534\,\mathrm{MeV}$.

En joules. $m = 7{,}01436 \times 1{,}66054 \times 10^{-27} = 1{,}16476 \times 10^{-26}\,\mathrm{kg}$, puis $E = m\,c^{2} = 1{,}05 \times 10^{-9}\,\mathrm{J}$.

Méthode : Convertir une masse en MeV ou en joules

1. **Lis l'unité** de la masse : u ou kg.
2. **Masse en u** : multiplie par $931{,}5$, le résultat est en MeV.

3. **Masse en kg** : $E = m\,c^2$ donne des joules ; divise par $1{,}60 \times 10^{-13}$ pour des MeV.
4. **Résultat** : arrondis-le au nombre de chiffres significatifs de la donnée qui en a le moins.

Attention : Ne pas mélanger les deux chaînes de conversion

Les deux chaînes ne donnent pas tout à fait le même nombre. Pour le lithium 7, les $1{,}05 \times 10^{-9}\,\mathrm{J}$ font $6{,}55 \times 10^{3}\,\mathrm{MeV}$, contre $6\,534\,\mathrm{MeV}$ par $931{,}5$. L'écart, $0{,}3\,\%$, vient des arrondis des constantes. Choisis la chaîne qu'indiquent les données et tiens-la jusqu'au bout.

Défaut de masse et cohésion d'un noyau

Définition : Défaut de masse d'un noyau

Le noyau ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ contient Z protons et $A - Z$ neutrons. Son **défaut de masse** est la différence entre la masse de ses nucléons pris séparément, au repos, et la masse du noyau :

$$\Delta m = Z\,m_p + (A - Z)\,m_n - m({}^{A}_{Z}\mathrm{X}).$$

Pour tout noyau de plus d'un nucléon, $\Delta m > 0$: la masse d'un noyau est inférieure à la somme des masses de ses nucléons séparés.

Définition : Énergie de liaison d'un noyau

L'**énergie de liaison** E_ℓ d'un noyau est l'énergie qu'il faut fournir à ce noyau, au repos, pour le séparer en ses nucléons, isolés et au repos. D'après la relation d'équivalence masse-énergie, elle est liée au défaut de masse par :

$$E_\ell = \Delta m\,c^2.$$

L'énergie de liaison est positive. Elle s'exprime en joules ou, à l'échelle du noyau, en mégaélectronvolts.

Définition : Énergie de liaison par nucléon

L'**énergie de liaison par nucléon** d'un noyau de A nucléons est le quotient

$$\frac{E_\ell}{A},$$

exprimé en MeV par nucléon. Elle mesure la cohésion du noyau : un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon est grande.

Exemple

Composition. ${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$: 3 protons et 4 neutrons, de masse totale $7{,}05648\,\mathrm{u}$.

Défaut de masse. $\Delta m = 7{,}05648 - 7{,}01436 = 0{,}04212\,\mathrm{u}$.

Énergies. $E_\ell = 0{,}04212 \times 931{,}5 = 39{,}23\,\mathrm{MeV}$, et $\dfrac{E_\ell}{A} = \dfrac{39{,}23}{7} = 5{,}605\,\mathrm{MeV}$ par nucléon.

Méthode : Calculer une énergie de liaison pas à pas

1. **Compte** les protons et les neutrons à partir de Z et de A.
2. **Soustrais** la masse du noyau à celle des nucléons séparés, sans rien arrondir avant.
3. **Convertis** Δm en énergie : c'est E_ℓ.
4. **Divise** par A si l'on compare des noyaux.

Attention : Noyau ou atome : retirer les électrons

Une table de masses donne en général la masse de l'atome. Le lithium 7 pèse $7{,}016003\,\mathrm{u}$ avec ses trois électrons ; son noyau seul pèse $7{,}016003 - 3 \times 0{,}000549 = 7{,}014356\,\mathrm{u}$. Le défaut de masse se calcule avec le noyau.

Attention : Arrondir trop tôt fausse le défaut de masse

Le défaut de masse est une petite différence entre deux grands nombres voisins. Avec $7{,}01\,\mathrm{u}$ au lieu de $7{,}01436\,\mathrm{u}$ pour le lithium 7, on trouverait environ $0{,}046\,\mathrm{u}$: $10\,\%$ de trop. Garde toutes les décimales jusqu'à la soustraction.

Comparer la stabilité des noyaux

Propriété : Courbe d'Aston et stabilité des noyaux

La **courbe d'Aston** représente $-\dfrac{E_\ell}{A}$ en fonction du nombre de nucléons A, pour les noyaux connus ; elle est établie à partir des masses mesurées. Elle présente un minimum large pour A voisin de 60, où $\dfrac{E_\ell}{A}$ atteint environ $8{,}8\,\mathrm{MeV}$ par nucléon. Les noyaux de cette région, comme le fer et le nickel, sont les plus stables.

Les noyaux légers (A inférieur à 20 environ) et les noyaux lourds (A supérieur à 190 environ) sont moins stables. Deux noyaux légers peuvent former un noyau plus stable par **fusion** ; un noyau lourd peut se scinder en deux noyaux plus stables par **fission**. Dans les deux cas, de l'énergie est libérée.

Méthode : Juger la stabilité nucléon par nucléon

1. **Obtiens** $\dfrac{E_\ell}{A}$ de chaque noyau, par le calcul ou par une lecture sur la courbe d'Aston.
2. **Compare** ces valeurs : la plus grande désigne le noyau le plus stable.

3. **Situe** chaque noyau par rapport au creux de la courbe, vers $A = 60$.

4. **Conclus** : à gauche du creux, la fusion rapproche du creux ; à droite, la fission.

Exemple

Oxygène 16. Noyau de $15{,}99052\,\mathrm{u}$, 8 protons et 8 neutrons : $\Delta m = 16{,}12752 - 15{,}99052 = 0{,}13700\,\mathrm{u}$.

Énergies. $E_\ell = 0{,}13700 \times 931{,}5 = 127{,}6\,\mathrm{MeV}$, soit $\dfrac{E_\ell}{A} = 7{,}976\,\mathrm{MeV}$ par nucléon.

Comparaison. $7{,}976 > 5{,}605$: l'oxygène 16 est plus stable que le lithium 7.

Attention : Une grande énergie de liaison ne suffit pas

L'uranium 235 a une énergie de liaison environ quatorze fois plus grande que celle de l'oxygène 16. Il est pourtant moins stable : $7{,}59\,\mathrm{MeV}$ par nucléon contre $7{,}98\,\mathrm{MeV}$. Un gros noyau a beaucoup de nucléons, donc une grande énergie totale : seule la valeur par nucléon renseigne sur la stabilité.

Réactions de fission et de fusion

Remarque : Lois de conservation des réactions nucléaires

Rappel : toute réaction nucléaire conserve le nombre de charge Z et le nombre de nucléons A. Un neutron s'écrit ${}^{1}_{0}\mathrm{n}$.

Définition : Fission nucléaire

La **fission** est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle un noyau lourd, frappé par un neutron lent, se scinde en deux noyaux plus légers en émettant deux ou trois neutrons. Comme toute réaction nucléaire, elle conserve le nombre de charge et le nombre de nucléons.

Les neutrons émis peuvent à leur tour provoquer d'autres fissions : c'est une **réaction en chaîne**, contrôlée dans le réacteur d'une centrale nucléaire.

Définition : Fusion nucléaire

La **fusion** est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd. Elle conserve le nombre de charge et le nombre de nucléons.

Chargés positivement, les deux noyaux se repoussent : la fusion n'a lieu qu'à très haute température, de l'ordre de dix millions de kelvins ou davantage, d'où son nom de réaction **thermonucléaire**. Elle est la source de l'énergie rayonnée par le Soleil et les étoiles.

Méthode : Équilibrer et nommer une réaction nucléaire

1. **Écris** tous les noyaux connus et les neutrons avec leurs nombres A et Z.
2. **Équilibre** d'abord les nucléons, puis les charges, pour trouver la particule inconnue.
3. **Nomme** l'élément d'après son numéro atomique.
4. **Classe** la réaction : un neutron et un noyau lourd qui se scinde, fission ; deux noyaux légers qui s'unissent, fusion ; un noyau seul et spontané, radioactivité.

Exemple

Au cœur des étoiles très massives, deux noyaux d'oxygène 16 peuvent fusionner :

$$2\,{}^{16}_{8}\mathrm{O} \longrightarrow {}^{28}_{14}\mathrm{Si} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

Nucléons : $32 = 28 + 4$. Charges : $16 = 14 + 2$. Deux noyaux légers forment le silicium 28, plus lourd : c'est une fusion.

À retenir : Ce qui distingue fission et fusion

- **Fission** : sous l'impact d'un neutron lent, un noyau lourd se casse en deux ; elle se déclenche à température ordinaire et s'entretient par les neutrons émis.
- **Fusion** : deux noyaux légers s'unissent ; elle exige au moins dix millions de kelvins pour vaincre leur répulsion.
- **Point commun** : les produits sont plus liés que les réactifs, et de l'énergie est libérée.

Énergie libérée calculée avec les masses

Propriété : Énergie d'une réaction nucléaire à partir des masses

Au cours d'une réaction nucléaire, la variation de l'énergie de masse du système est :

$$\Delta E = (m_{\mathrm{f}} - m_{\mathrm{i}})\,c^2,$$

où m_{i} est la somme des masses des réactifs et m_{f} celle des masses des produits. Si $\Delta E < 0$, la réaction libère l'énergie

$$E_{\mathrm{lib}} = |\Delta E|,$$

emportée par les produits sous forme d'énergie cinétique et de rayonnement γ.

Méthode : Bilan de masses d'une réaction

1. **Vérifie** l'équation : nucléons et charges.
2. **Additionne** les masses des réactifs, m_{i}, puis celles des produits, m_{f}, électrons et positons compris.
3. **Calcule** $\Delta E = (m_{\mathrm{f}} - m_{\mathrm{i}})\,c^2$, en MeV par $931{,}5$.
4. **Conclus** : si $\Delta E < 0$, l'énergie libérée vaut $|\Delta E|$; pour une masse de combustible, passe par N_A.

Exemple

Réaction. $^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{p} \longrightarrow 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He}$, avec un noyau d'hélium 4 de $4{,}001505\,\mathrm{u}$.

Masses. $m_{\mathrm{i}} = 7{,}01436 + 1{,}00728 = 8{,}02164\,\mathrm{u}$; $m_{\mathrm{f}} = 8{,}00301\,\mathrm{u}$.

Bilan. $\Delta E = -0{,}01863 \times 931{,}5 = -17{,}35\,\mathrm{MeV}$: la réaction libère $17{,}35\,\mathrm{MeV}$.

Attention : Ne pas confondre variation d'énergie et énergie libérée

Une réaction qui libère de l'énergie a une variation d'énergie **négative** : $\Delta E = -17{,}35\,\mathrm{MeV}$ pour l'exemple. L'énergie libérée, elle, est **positive** : $E_{\mathrm{lib}} = |\Delta E| = 17{,}35\,\mathrm{MeV}$. Écris les deux, sans changer de signe en route.

Énergie libérée lue sur un diagramme d'énergie

Propriété : Énergie d'une réaction nucléaire à partir des énergies de liaison

Pour une réaction nucléaire dont les réactifs et les produits sont des noyaux et des nucléons libres, la variation d'énergie est :

$$\Delta E = E_{\ell}(\mathrm{i}) - E_{\ell}(\mathrm{f}),$$

où $E_{\ell}(\mathrm{i})$ est la somme des énergies de liaison des réactifs et $E_{\ell}(\mathrm{f})$ celle des produits ; un nucléon libre a une énergie de liaison nulle. La réaction libère de l'énergie lorsque les produits sont, au total, plus liés que les réactifs.

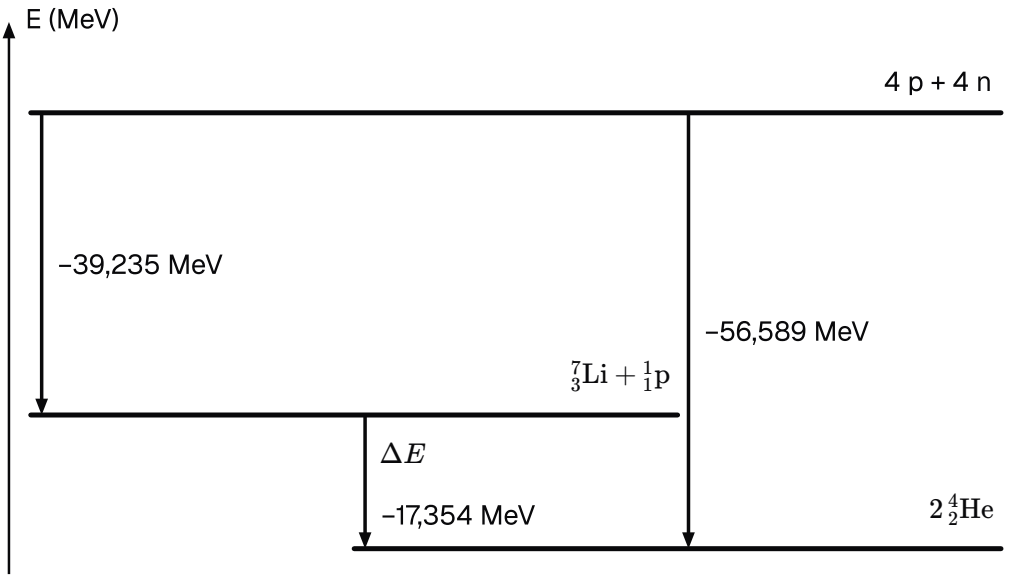

Diagramme d'énergie de la réaction du lithium 7 avec un proton

Méthode : Construire et lire un diagramme à trois niveaux

1. **Trouve** l'énergie de liaison de chaque noyau ; un nucléon libre compte pour 0.
2. **Place** trois niveaux : nucléons séparés à 0, réactifs à $-E_\ell(\mathrm{i})$, produits à $-E_\ell(\mathrm{f})$.
3. **Lis** la flèche des réactifs aux produits : $\Delta E = E_\ell(\mathrm{i}) - E_\ell(\mathrm{f})$.
4. **Réserve** cette méthode aux noyaux et nucléons libres : pour une radioactivité β, passe par les masses.

Exemple

Liaisons. $E_\ell(\mathrm{i}) = 39{,}235 + 0 = 39{,}235\,\mathrm{MeV}$. Le noyau d'hélium 4 de $4{,}001505\,\mathrm{u}$ a pour énergie de liaison $28{,}2943\,\mathrm{MeV}$, d'où $E_\ell(\mathrm{f}) = 56{,}589\,\mathrm{MeV}$.

Bilan. $\Delta E = 39{,}235 - 56{,}589 = -17{,}354\,\mathrm{MeV}$, soit $-17{,}35\,\mathrm{MeV}$: c'est la flèche centrale du diagramme.

Recoupement. Même valeur que par les masses, ce qui est attendu : les deux bilans partent des mêmes masses.

Usages, protection et formulaire du chapitre

À retenir : Centrale et applications de la radioactivité

- **Centrale** : la fission chauffe l'eau du réacteur ; la vapeur produite fait tourner une turbine et un alternateur. Le rendement avoisine un tiers.
- **Médecine** : imagerie par traceurs radioactifs, radiothérapie des tumeurs.

- **Industrie et alimentation** : contrôle des soudures, stérilisation de matériel et d'aliments.

À retenir : Règles de protection face à une source

Un rayonnement reçu depuis l'extérieur est une irradiation ; une source entrée dans le corps est une contamination. Pour réduire la dose : **s'éloigner**, **interposer un écran** adapté, **limiter la durée** d'exposition. Les déchets radioactifs sont confinés et surveillés.

Méthode : Quelle méthode pour quelle question ?

- **Énergie de masse** : $E = m\,c^2$, ou $931{,}5\,\mathrm{MeV}$ par u.
- **Cohésion d'un noyau** : défaut de masse, puis E_ℓ, puis $\dfrac{E_\ell}{A}$.
- **Plus stable ?** Comparer $\dfrac{E_\ell}{A}$, ou la position sur la courbe d'Aston.
- **Particule inconnue** : conservation de A, puis de Z.
- **Énergie d'une réaction** : masses, ou énergies de liaison et diagramme.
- **Radioactivité** β : bilan par les masses, électron ou positon compris.
- **Masse de combustible** : quantité de matière et N_A.

Électronvolt
$$1\,\mathrm{MeV} = 1{,}60 \times 10^{-13}\,\mathrm{J}$$

Équivalence
$$E = m\,c^2$$

Unité de masse
$$1\,\mathrm{u} = 931{,}5\,\mathrm{MeV}/c^2$$

Défaut de masse
$$\Delta m = Z\,m_p + (A - Z)\,m_n - m$$

Énergie de liaison
$$E_\ell = \Delta m\,c^2$$

Bilan par les masses
$$\Delta E = (m_\mathrm{f} - m_\mathrm{i})\,c^2$$

Bilan par les liaisons
$$\Delta E = E_\ell(\mathrm{i}) - E_\ell(\mathrm{f})$$

Énergie libérée
$$E_\mathrm{lib} = |\Delta E|$$

À retenir : Rédiger un bilan nucléaire

Écris l'équation et vérifie les deux lois de conservation. Nomme la relation employée : masses ou énergies de liaison. Pose la formule littérale, puis les valeurs avec leurs unités. Donne ΔE avec son signe, puis l'énergie libérée. Une lecture sur la courbe d'Aston s'écrit avec $\approx$.