BURHAN

Noyaux, masse et énergie

2ème Année Baccalauréat · Sciences Physiques · Physique-Chimie

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

Chapitre	Semestre
Noyaux, masse et énergie	Semestre 1

Énergie de masse et unités du noyau

La masse d'un noyau d'hélium 4

Un spectromètre de masse trie les ions selon leur masse. Il permet de mesurer la masse d'un noyau avec six chiffres significatifs.

Rappel : le noyau d'hélium 4, $^{4}_{2}\mathrm{He}$, contient deux protons et deux neutrons. Les masses se donnent ici en **unité de masse atomique**, notée u, définie plus bas :

- proton : $m_p = 1{,}00728\,\mathrm{u}$; neutron : $m_n = 1{,}00866\,\mathrm{u}$;
- noyau d'hélium 4 mesuré : $m(^{4}_{2}\mathrm{He}) = 4{,}00151\,\mathrm{u}$.

Devine : Le noyau et ses nucléons

Compare la masse mesurée du noyau d'hélium 4 à la somme des masses de ses quatre nucléons pris séparément, $2\,m_p + 2\,m_n$.

A. Les deux masses sont égales : la masse se conserve.

Faux.

La masse se conserve en chimie à la précision des balances, pas à l'échelle du noyau.

B. Le noyau est plus lourd que ses nucléons séparés.

Faux.

Il faudrait $m(\mathrm{noyau}) > 2\,m_p + 2\,m_n$; le calcul donne l'inverse.

C. Le noyau est plus léger que ses nucléons séparés.

Juste.

Juste : il manque environ trois centièmes d'unité de masse atomique.

Correction

On calcule la somme des masses des nucléons :

$$\begin{aligned} &2\,m_p + 2\,m_n \\ &= 2 \times 1{,}00728 + 2 \times 1{,}00866 \\ &= 4{,}03188\,\mathrm{u} \end{aligned}$$

Elle dépasse la masse du noyau, $4{,}00151\,\mathrm{u}$. Réunis en noyau, les nucléons ont perdu de la masse. Ce chapitre explique où elle est passée.

Unités de masse et d'énergie du noyau

Des unités à la taille du noyau. Un noyau pèse environ $10^{-27}\,\mathrm{kg}$: le kilogramme est trop grand pour lui. De même, le joule est trop grand pour les énergies d'un seul noyau.

On emploie donc deux unités adaptées : l'unité de masse atomique pour les masses, l'électronvolt et ses multiples pour les énergies.

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

Exemple : La masse du noyau d'hélium 4 en kilogrammes

On convertit la masse mesurée avec $1\,\mathrm{u} = 1{,}66054 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$:

$$\begin{aligned} m &= 4{,}00151 \times 1{,}66054 \times 10^{-27} \\ &= 6{,}64467 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg} \end{aligned}$$

Les deux facteurs ont six chiffres significatifs : le résultat en garde six.

Vérifie : Une énergie de particule en mégaélectronvolts

Une particule émise par un noyau emporte l'énergie $E = 8{,}0 \times 10^{-13}\,\mathrm{J}$. Quelle est cette énergie en MeV ?

A. $5{,}0\,\mathrm{MeV}$

Juste.

Juste : $\dfrac{8{,}0 \times 10^{-13}}{1{,}60 \times 10^{-13}} = 5{,}0$.

B. $5{,}0 \times 10^{6}\,\mathrm{MeV}$

Faux.

C'est l'énergie en électronvolts : $1\,\mathrm{MeV}$ vaut déjà $10^{6}\,\mathrm{eV}$.

C. $0{,}20\,\mathrm{MeV}$

Faux.

Le quotient est inversé : on divise l'énergie en joules par la valeur d'un mégaélectronvolt.

D. $1{,}3 \times 10^{-25}\,\mathrm{MeV}$

Faux.

On ne multiplie pas par la valeur d'un mégaélectronvolt : on divise par elle.

Correction

Un mégaélectronvolt vaut $1{,}60 \times 10^{-13}\,\mathrm{J}$. On divise donc l'énergie en joules par cette valeur :

$$E = \frac{8{,}0 \times 10^{-13}}{1{,}60 \times 10^{-13}} = 5{,}0\,\mathrm{MeV}$$

L'énergie de masse d'un objet

Une masse qui disparaît. Le noyau d'hélium 4 est plus léger que ses nucléons. En 1905, Einstein a établi une relation entre la masse et l'énergie. Elle explique ce manque.

Elle est admise : c'est une loi de la physique, confirmée par toutes les mesures depuis. Tout objet possède une énergie du seul fait de sa masse.

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 : L'énergie de masse d'un trombone de 1 g

Un trombone de masse $m = 1{,}00\,\mathrm{g} = 1{,}00 \times 10^{-3}\,\mathrm{kg}$ est au repos. Son énergie de masse vaut :

$$\begin{aligned} E &= m\,c^2 \\ &= 1{,}00 \times 10^{-3} \times (3{,}00 \times 10^{8})^2 \\ &= 9{,}00 \times 10^{13}\,\mathrm{J} \end{aligned}$$

C'est l'énergie qu'une centrale de $1\,000\,\mathrm{MW}$ fournit en 25 heures environ. Aucune réaction ne libère toute cette énergie : une réaction nucléaire n'en libère qu'une petite part.

Choisir une chaîne de conversion

Méthode : Passer d'une masse à son énergie de masse

1. **Repère l'unité** de la masse donnée : kilogramme ou unité de masse atomique.
2. **En kilogrammes**, calcule $E = m\,c^2$: le résultat est en joules. Convertis en MeV si besoin, en divisant par $1{,}60 \times 10^{-13}$.
3. **En unités de masse atomique**, multiplie la masse par $931{,}5$: le résultat est en MeV.
4. **Garde une seule chaîne** de conversion dans un même calcul : celle qu'indiquent les données.

Attention : Deux chaînes de conversion dans un même calcul

✗ « La masse est en u ; je la convertis en kilogrammes, puis j'utilise $1\,\mathrm{u} = 931{,}5\,\mathrm{MeV}/c^2$ pour un autre terme du même calcul. »

✓ Une masse en u se convertit en MeV par $931{,}5$, du début à la fin du calcul.

Par le kilogramme et le joule, $1\,\mathrm{u}$ donne $1{,}66054 \times 10^{-27} \times (3{,}00 \times 10^{8})^2$ joules, soit environ $934\,\mathrm{MeV}$. L'écart avec $931{,}5\,\mathrm{MeV}$ vient des arrondis de c et de l'électronvolt : mélanger les deux chaînes fausse le troisième chiffre.

Chiffres significatifs. Ils disent la précision d'un résultat ; la règle vaut pour tout le chapitre.

- Produit ou quotient : le résultat compte au plus autant de chiffres significatifs que la donnée qui en a le moins.
- Somme ou différence : le résultat n'a pas plus de **décimales** que la donnée qui en compte le moins.
- On écrit toutes les décimales jusqu'à la soustraction, et on n'arrondit qu'au résultat final.

Ainsi, un défaut de masse de $0{,}03037\,\mathrm{u}$ (quatre chiffres) multiplié par $931{,}5$ donne une énergie à quatre chiffres.

À toi : L'énergie de masse du noyau d'hélium 4 par deux chaînes

Calcule l'énergie de masse du noyau d'hélium 4, de masse $4{,}00151\,\mathrm{u}$, en MeV : d'abord avec $1\,\mathrm{u} = 931{,}5\,\mathrm{MeV}/c^2$, puis par sa masse en kilogrammes, $6{,}64467 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$. Compare les deux résultats. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Première chaîne : une seule multiplication par $931{,}5$.
Indice 2
Seconde chaîne : $E = m\,c^2$ en joules, puis une division par $1{,}60 \times 10^{-13}$.
Indice 3
Point délicat : chaque résultat garde les chiffres significatifs de sa donnée la moins précise ; c n'en a que trois.

Réponse

Par l'unité de masse atomique.

$$E = 4{,}00151 \times 931{,}5 \\ = 3\,727\,\mathrm{MeV}$$

Par le joule.

$$E = m\,c^2 \\ = 5{,}98 \times 10^{-10}\,\mathrm{J} \\ = 3{,}74 \times 10^{3}\,\mathrm{MeV}$$

Conclusion. Les deux chaînes diffèrent de $0{,}3\,\%$ environ, à cause des arrondis de c et de l'électronvolt. Dans un calcul, on garde une seule chaîne.

Calculer un défaut de masse

Composition d'un noyau

Rappel : le noyau $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ contient Z protons et $A - Z$ neutrons ; A est le nombre de nucléons, Z le nombre de charge.

Pour calculer la masse de ses nucléons séparés, il suffit donc de lire A et Z dans le symbole, puis d'utiliser m_p et m_n.

Vérifie : Les nucléons du fer 56

Le noyau de fer 56 s'écrit $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$. Combien contient-il de protons et de neutrons ?

A. 30 protons et 26 neutrons.

Faux.

Le nombre de protons est le nombre du bas, $Z = 26$.

B. 26 protons et 56 neutrons.

Faux.

56 compte tous les nucléons, protons compris.

C. 26 protons et 30 neutrons.

Juste.

Juste : $Z = 26$ protons et $A - Z = 30$ neutrons.

D. 28 protons et 28 neutrons.

Faux.

Un noyau n'a pas toujours autant de protons que de neutrons.

Correction

On lit $Z = 26$ et $A = 56$ dans le symbole. Le noyau contient 26 protons et $56 - 26 = 30$ neutrons.

Le défaut de masse

Une mesure. Pour l'hélium 4, le noyau pèse moins que ses nucléons séparés. L'écart est petit, mais très supérieur à la précision des mesures.

On retrouve un tel écart pour tous les noyaux mesurés. On lui donne un nom.

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.

Exemple : Le défaut de masse du noyau d'hélium 4

Le noyau $^{4}_{2}\mathrm{He}$ contient 2 protons et 2 neutrons :

$$\begin{aligned}\Delta m &= 2\,m_p + 2\,m_n - m(^{4}_{2}\mathrm{He})\\ &= 4{,}03188 - 4{,}00151\\ &= 0{,}03037\,\mathrm{u}\end{aligned}$$

C'est une différence : le résultat garde les cinq décimales des données. Le défaut de masse représente environ $0{,}75\,\%$ de la masse des nucléons.

Attention : Arrondir avant de soustraire

✗ « J'arrondis les masses à $1{,}01\,\mathrm{u}$ et $4{,}00\,\mathrm{u}$: $\Delta m = 4\times 1{,}01 - 4{,}00 = 0{,}04\,\mathrm{u}$. »

✓ Le défaut de masse est la différence de deux nombres très voisins : on garde toutes les décimales des masses avant la soustraction.

Avec les masses complètes, $\Delta m = 0{,}03037\,\mathrm{u}$. Le calcul arrondi donne $0{,}04\,\mathrm{u}$, soit une erreur de plus de $30\,\%$.

Retirer la masse des électrons

Les tables donnent en général la masse de l'**atome**, électrons compris. La masse d'un électron vaut $m_e = 5{,}49\times 10^{-4}\,\mathrm{u}$.

L'atome d'hélium 4 a une masse de $4{,}002603\,\mathrm{u}$ et deux électrons. La masse de son noyau vaut :

$$\begin{aligned}&4{,}002603 - 2\times 5{,}49\times 10^{-4}\\ &= 4{,}001505\,\mathrm{u}\end{aligned}$$

Arrondie à cinq décimales, c'est la valeur $4{,}00151\ \mathrm{u}$ employée plus haut.

Attention : Masse de l'atome à la place de la masse du noyau

✗ « Je mets la masse de l'atome dans la formule du défaut de masse. »

✓ La formule demande la masse du **noyau** : $m(\text{noyau}) = m(\text{atome}) - Z\,m_e$.

L'erreur compte. Pour le fer 56, les 26 électrons pèsent $26 \times 5{,}49 \times 10^{-4} = 0{,}014274\ \mathrm{u}$. C'est près de $3\,\%$ du défaut de masse de ce noyau.

Trouve l'erreur : Un défaut de masse calculé avec l'atome

Un élève calcule le défaut de masse d'un noyau en utilisant, par erreur, la masse de l'atome. Comment son résultat se compare-t-il au bon défaut de masse ?

A. Il est trop grand de $Z\,m_e$.
Faux.
La masse soustraite est trop grande : le résultat ne peut pas augmenter.

B. Il est trop petit de $Z\,m_e$.
Juste.
Juste : on retranche la masse des Z électrons en trop.

C. Il est le même : les électrons ont une masse négligeable.
Faux.
La masse des électrons est du même ordre que les décimales gardées : elle ne se néglige pas ici.

D. Il est trop petit de $2\,Z\,m_e$.
Faux.
Chaque électron n'est compté qu'une fois en trop : l'écart est $Z\,m_e$.

Correction
La masse de l'atome dépasse celle du noyau de $Z\,m_e$. Dans $\Delta m = Z\,m_p + (A - Z)\,m_n - m$, on retranche alors $Z\,m_e$ de trop : le défaut de masse calculé est trop petit de $Z\,m_e$.

Signe du défaut de masse

Le défaut de masse est positif pour tout noyau de plus d'un nucléon : un noyau pèse toujours moins que ses nucléons séparés.

Pour un nucléon seul, il n'y a rien à séparer : son défaut de masse est nul. La section suivante relie ce défaut de masse à l'énergie qui tient le noyau.

À toi : Le défaut de masse du noyau de fer 56

La masse de l'atome de fer 56 vaut $55{,}934936\,\mathrm{u}$. Calcule la masse de son noyau, puis son défaut de masse. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Le fer 56 a 26 électrons ; retire leur masse de celle de l'atome.
Indice 2
Le noyau contient 26 protons et 30 neutrons.
Indice 3
Point délicat : garde toutes les décimales jusqu'à la soustraction finale.

Réponse
Masse du noyau.

$$\begin{aligned} m &= 55{,}934936 \\ &\quad - 26 \times 5{,}49 \times 10^{-4} \\ &= 55{,}920662\,\mathrm{u} \end{aligned}$$

Défaut de masse. Avec $26\,m_p = 26{,}18928\,\mathrm{u}$ et $30\,m_n = 30{,}2598\,\mathrm{u}$:

$$\begin{aligned} \Delta m &= 56{,}44908 \\ &\quad - 55{,}920662 \\ &= 0{,}52842\,\mathrm{u} \end{aligned}$$

Conclusion. Le noyau de fer 56 a une masse de $55{,}92066\,\mathrm{u}$ et un défaut de masse de $0{,}52842\,\mathrm{u}$, à cinq décimales comme m_p et m_n.

Énergie de liaison et énergie de liaison par nucléon

Séparer les nucléons d'un noyau

Devine : Défaire un noyau d'hélium 4

On veut séparer un noyau d'hélium 4 en ses quatre nucléons, isolés et au repos. Que faut-il faire du point de vue de l'énergie ?

A. Rien : les nucléons se séparent seuls.
Faux.
Un noyau d'hélium 4 est stable : il ne se défait pas de lui-même.

B. Fournir de l'énergie au noyau.
Juste.
Juste : les nucléons séparés ont plus de masse, donc plus d'énergie de masse.

C. Récupérer de l'énergie libérée par le noyau.
Faux.
Les nucléons séparés pèsent plus que le noyau : leur énergie de masse est plus grande.

Correction

> Les nucléons séparés ont une masse plus grande que le noyau, de $\Delta m = 0{,}03037\ \mathrm{u}$. D'après la relation d'équivalence masse-énergie, leur énergie de masse est plus grande de $\Delta m\, c^2$. Pour séparer le noyau, il faut donc lui fournir cette énergie.

Ce que mesure l'énergie de liaison. Les protons se repoussent, et pourtant le noyau tient. Une interaction attractive, de très courte portée, assure la cohésion du noyau.

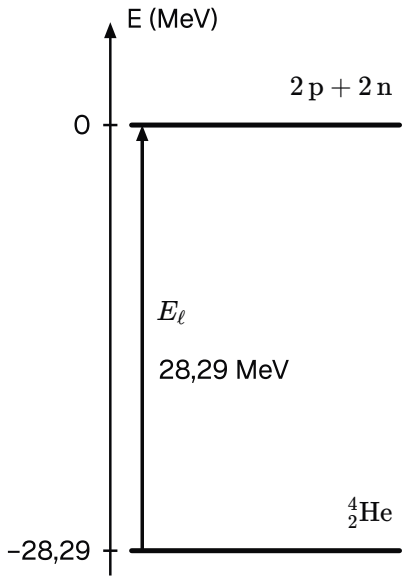
Pour défaire le noyau, il faut fournir une énergie qui mesure la force de ce lien.

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.



Énergie de liaison du noyau d'hélium 4 : des nucléons séparés au noyau.

Énergie de liaison de l'hélium 4

Exemple : L'énergie de liaison du noyau d'hélium 4

Le défaut de masse vaut $\Delta m = 0{,}03037\ \mathrm{u}$. Il est en unités de masse atomique : on multiplie par $931{,}5$.

$$E_\ell = \Delta m\, c^2 = 0{,}03037 \times 931{,}5$$
$$= 28{,}29\,\mathrm{MeV}$$

En joules, $E_\ell = 28{,}29 \times 1{,}60 \times 10^{-13} = 4{,}53 \times 10^{-12}\,\mathrm{J}$. C'est la valeur de la flèche du diagramme.

Méthode : Calculer l'énergie de liaison à partir de la masse du noyau

1. **Lis** Z et A dans le symbole ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, puis calcule le nombre de neutrons $A - Z$.
2. **Calcule** le défaut de masse $\Delta m = Z\, m_p + (A - Z)\, m_n - m({}^{A}_{Z}\mathrm{X})$, avec toutes les décimales des masses.
3. **Convertis** : $E_\ell = \Delta m\, c^2$, en MeV en multipliant par $931{,}5$ si Δm est en u.
4. **Divise** par A si la question porte sur la stabilité du noyau.

Vérifie : La flèche dans l'autre sens

Sur le diagramme de l'hélium 4, on trace la flèche dans l'autre sens : des nucléons séparés vers le noyau. Que représente-t-elle ?

A. Une énergie de $28{,}29\,\mathrm{MeV}$ à fournir pour former le noyau.
Faux.
Former le noyau fait descendre l'énergie : rien n'est à fournir.

B. Une variation d'énergie de $-28{,}29\,\mathrm{MeV}$: la formation du noyau libère cette énergie.
Juste.
Juste : l'énergie du système diminue de l'énergie de liaison.

C. Une variation d'énergie nulle : le noyau garde ses nucléons.
Faux.
Les deux niveaux n'ont pas la même énergie : la variation n'est pas nulle.

Correction
Des nucléons séparés au noyau, l'énergie passe de 0 à $-28{,}29\,\mathrm{MeV}$: sa variation vaut $-E_\ell = -28{,}29\,\mathrm{MeV}$. Quand quatre nucléons s'unissent en noyau d'hélium 4, ils libèrent cette énergie.

Rapporter l'énergie de liaison à un nucléon

Une comparaison. Le noyau de fer 56 a un défaut de masse de $0{,}52842\,\mathrm{u}$, soit $E_\ell = 0{,}52842 \times 931{,}5 = 492{,}2\,\mathrm{MeV}$.

C'est dix-sept fois plus que pour l'hélium 4, mais le fer a aussi quatorze fois plus de nucléons. Pour comparer deux noyaux, on rapporte l'énergie de liaison à un nucléon.

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 : Le fer 56 et l'hélium 4 nucléon par nucléon

On divise chaque énergie de liaison par le nombre de nucléons A. On part de la valeur non arrondie, $\Delta m \times 931{,}5$, pour ne pas réutiliser un arrondi :

- hélium 4 : $\dfrac{E_\ell}{A} = 7{,}072\,\mathrm{MeV}$ par nucléon ;
- fer 56 : $\dfrac{E_\ell}{A} = 8{,}790\,\mathrm{MeV}$ par nucléon.

Chaque nucléon du fer 56 est plus lié que ceux de l'hélium 4 : le fer 56 est le plus stable des deux.

Vérifie : Justifier la stabilité du fer 56

Le fer 56 est plus stable que l'hélium 4. Quel raisonnement le justifie ?

A. Son énergie de liaison est plus grande.

Faux.
La conclusion est juste, mais la raison ne suffit pas : un gros noyau a beaucoup de nucléons à lier.

B. Il a plus de nucléons.

Faux.
Le nombre de nucléons ne dit rien de la force du lien entre eux.

C. Son défaut de masse est plus grand.

Faux.
C'est la même idée que l'énergie de liaison seule : elle grandit avec la taille du noyau.

D. Son énergie de liaison par nucléon est plus grande.

Juste.
Juste : la stabilité se compare nucléon par nucléon.

Correction

Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon est grande. Le fer 56 a $8{,}790\,\mathrm{MeV}$ par nucléon, contre $7{,}072\,\mathrm{MeV}$ pour l'hélium 4 : il est plus stable.

Comparer la stabilité d'un noyau lourd

Attention : La plus grande énergie de liaison et la stabilité

✗ « L'uranium 238 a une énergie de liaison beaucoup plus grande que celle du fer 56 : il est plus stable. »

✓ Un noyau lourd a une grande énergie de liaison parce qu'il a beaucoup de nucléons. La stabilité se compare par l'énergie de liaison **par nucléon**, jamais par l'énergie de liaison seule.

À toi : L'uranium 238 nucléon par nucléon

Le noyau d'uranium 238, $^{238}_{92}\mathrm{U}$, a une masse de $238{,}00028\,\mathrm{u}$. Calcule son défaut de masse, son énergie de liaison et son énergie de liaison par nucléon. Compare sa stabilité à celle du fer 56. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Le noyau contient 92 protons et 146 neutrons.
Indice 2
Multiplie le défaut de masse par $931{,}5$, puis divise par 238.
Indice 3
Point délicat : compare les énergies par nucléon, pas les énergies de liaison.

Réponse
Défaut de masse. $92\,m_p + 146\,m_n = 239{,}93412\,\mathrm{u}$, donc

$$\begin{aligned}\Delta m &= 239{,}93412 \\ &\quad - 238{,}00028 \\ &= 1{,}93384\,\mathrm{u}\end{aligned}$$

Énergies.

$$\begin{aligned}E_\ell &= 1{,}93384 \times 931{,}5 \\ &= 1\,801\,\mathrm{MeV}\end{aligned}$$

$$\frac{E_\ell}{A} = 7{,}569\,\mathrm{MeV}$$

Conclusion. L'uranium 238 a $7{,}569\,\mathrm{MeV}$ par nucléon, contre $8{,}790\,\mathrm{MeV}$ pour le fer 56 : il est moins stable, malgré son énergie de liaison plus grande.

Lire la courbe d'Aston

Énergies de liaison par nucléon mesurées

Devine : Le noyau le plus lié

Avant de lire les mesures : parmi tous les noyaux, lesquels ont la plus grande énergie de liaison par nucléon ?

A. Les noyaux les plus légers.

Faux.

Les noyaux légers ont peu de voisins pour chaque nucléon : ils sont peu liés.

B. Les noyaux les plus lourds.

Faux.

Un noyau lourd a une grande énergie de liaison, mais pas par nucléon.

C. Des noyaux de masse moyenne, vers le fer.

Juste.

Juste : les mesures du tableau le montrent.

D. Tous les noyaux ont la même valeur.

Faux.

Le tableau montre des valeurs de 1 à près de $9\,\mathrm{MeV}$ par nucléon.

Correction

L'énergie de liaison par nucléon croît très vite pour les noyaux légers, passe par un maximum vers le fer et le nickel, puis décroît lentement. Les noyaux de masse moyenne sont les plus liés.

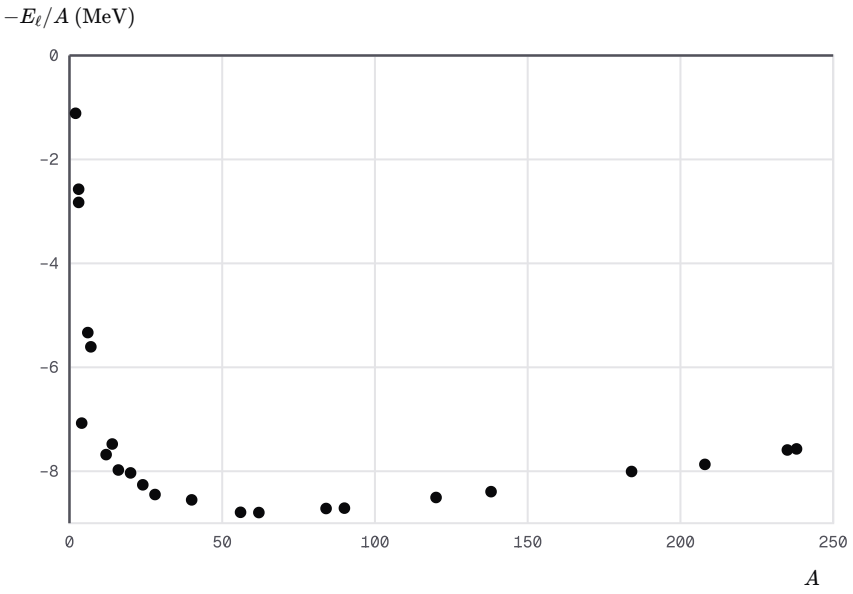
Des mesures. Les énergies de liaison par nucléon ci-dessous sont établies à partir des masses mesurées des noyaux.

Noyau	A	$\frac{E_\ell}{A}$ (MeV)
hydrogène 2	2	$1{,}112$
hélium 4	4	$7{,}074$
carbone 12	12	$7{,}680$
oxygène 16	16	$7{,}976$
fer 56	56	$8{,}790$
nickel 62	62	$8{,}795$
étain 120	120	$8{,}505$
plomb 208	208	$7{,}868$
uranium 235	235	$7{,}591$
uranium 238	238	$7{,}570$

Un calcul fait avec des masses arrondies peut s'écarter de ces valeurs de quelques millièmes. Pour l'hélium 4, le tableau donne $4 \times 7{,}074 = 28{,}296\,\mathrm{MeV}$; les masses du cours donnent $28{,}29\,\mathrm{MeV}$, d'autres tables $28{,}30\,\mathrm{MeV}$. Ces valeurs ne diffèrent que par l'arrondi des masses.

La courbe d'Aston

Une courbe en creux. On place ces mesures dans un graphique, avec $-\dfrac{E_\ell}{A}$ en ordonnée. Le signe moins met les noyaux les plus stables en bas, comme une bille au fond d'un creux.



Courbe d'Aston : opposé de l'énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de nucléons, de l'hydrogène 2 à l'uranium 238.

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.

Exemple : Trois lectures sur la courbe d'Aston

Le creux est atteint vers $A = 60$. Pour le fer 56, on lit $-\dfrac{E_\ell}{A} \approx -8{,}8\,\mathrm{MeV}$: chaque nucléon y est lié par environ $8{,}8\,\mathrm{MeV}$.

Pour l'uranium 238, on lit environ $-7{,}6\,\mathrm{MeV}$: ce noyau est moins stable que le fer. L'hélium 4, avec environ $-7{,}1\,\mathrm{MeV}$, est bien plus bas que ses voisins légers : c'est un noyau léger très stable.

Domaines de la fusion et de la fission

Vérifie : Un noyau de nombre de nucléons 230

Un noyau a $A = 230$. Par quelle transformation peut-il donner des noyaux plus stables ?

A. Par fission, en se scindant en deux noyaux moyens.

Juste.

Juste : les noyaux moyens sont plus bas sur la courbe.

B. Par fusion avec un autre noyau lourd.

Faux.

Un noyau encore plus lourd serait plus haut sur la courbe, donc moins stable.

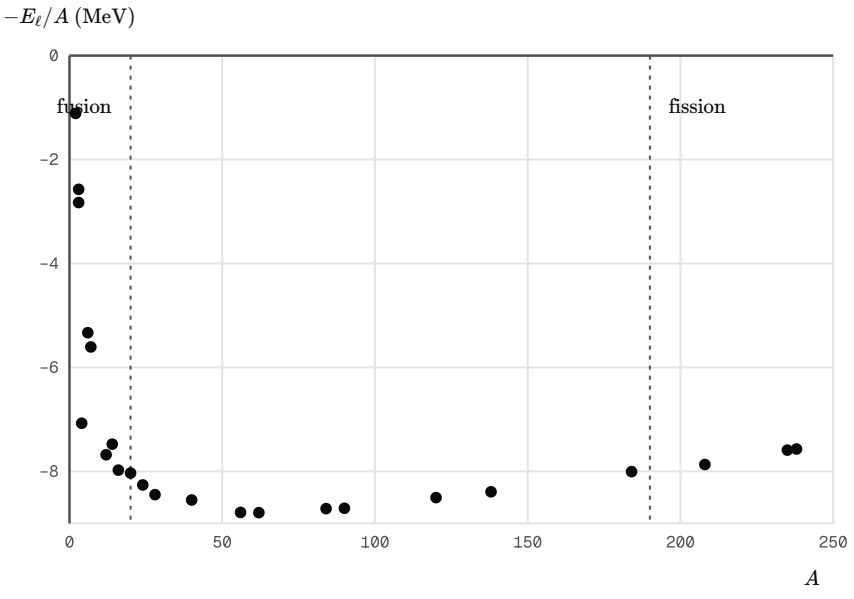
C. Par aucune : c'est un noyau lourd, donc très lié.

Faux.

Il a une grande énergie de liaison, mais une énergie par nucléon plus faible que les noyaux moyens.

Correction

Un noyau de $A = 230$ est à droite de la courbe, au-dessus du creux. En se scindant en deux noyaux voisins de $A = 115$, il donne des noyaux plus bas sur la courbe, donc plus stables : c'est une fission.



Domaines de la fusion et de la fission sur la courbe d'Aston : bornes approchées A = 20 et A = 190.

Dans les deux domaines, les produits sont plus bas sur la courbe que les réactifs : la réaction libère de l'énergie.

Ordre de grandeur pour une fission : chaque nucléon passe d'environ $7{,}6$ à environ $8{,}4\,\mathrm{MeV}$ par nucléon. Il gagne environ $0{,}8\,\mathrm{MeV}$; pour 236 nucléons, cela fait près de $190\,\mathrm{MeV}$.

Comparer et situer des noyaux

Méthode : Comparer la stabilité de noyaux sur la courbe d'Aston

1. **Calcule ou lis** l'énergie de liaison par nucléon $\frac{E_\ell}{A}$ de chaque noyau, par le calcul ou sur la courbe d'Aston.
2. **Compare** ces quotients, jamais les énergies de liaison seules.
3. **Conclus** : le noyau qui a la plus grande énergie de liaison par nucléon est le plus stable.
4. **Situe** chaque noyau sur la courbe pour dire s'il peut gagner en stabilité par fusion ou par fission.

À toi : Trois noyaux sur la courbe d'Aston

D'après le tableau, classe le carbone 12, l'étain 120 et l'uranium 235 du plus stable au moins stable. Dis ensuite lequel peut gagner en stabilité par fusion, et lequel par fission. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Relève $\frac{E_\ell}{A}$ de chaque noyau dans le tableau.
Indice 2
Situe chaque noyau par rapport aux bornes $A = 20$ et $A = 190$.
Indice 3
Point délicat : un noyau moyen n'a intérêt ni à fusionner ni à se scinder.

Réponse
Classement. Étain 120 : $8{,}505\,\mathrm{MeV}$; uranium 235 : $7{,}591\,\mathrm{MeV}$; carbone 12 : $7{,}680\,\mathrm{MeV}$ par nucléon. Du plus stable au moins stable : étain 120, carbone 12, uranium 235.

Domaines. Le carbone 12 ($A = 12$) est dans le domaine de la fusion. L'uranium 235 ($A = 235$) est dans celui de la fission.

Conclusion. L'étain 120 est le plus stable ; le carbone 12 peut gagner en stabilité par fusion, l'uranium 235 par fission.

Écrire et reconnaître une fission

Les deux lois de conservation

Rappel : une réaction nucléaire conserve le nombre de charge et le nombre de nucléons. On les vérifie sur chaque équation, la particule $^{1}_{0}\mathrm{n}$ comprise.

Un noyau d'uranium 235, frappé par un neutron lent, peut se scinder en un noyau de strontium 94 et un noyau de xénon 140.

Devine : Les neutrons de la fission

Dans cette réaction, un neutron frappe le noyau $^{235}_{92}\mathrm{U}$, qui donne $^{94}_{38}\mathrm{Sr}$, $^{140}_{54}\mathrm{Xe}$ et des neutrons. Combien de neutrons sont émis ?

A. Aucun.
Faux.
Il manquerait des nucléons : $94 + 140 = 234$, contre 236 au départ.

B. Un seul.
Faux.
$94 + 140 + 1 = 235$: il manque encore un nucléon.

C. Deux.
Juste.
Juste : $94 + 140 + 2 = 236 = 1 + 235$.

D. Trois.
Faux.
$94 + 140 + 3 = 237$: un nucléon de trop.

Correction
Au départ, il y a $1 + 235 = 236$ nucléons. Les deux noyaux formés en ont $94 + 140 = 234$: il reste 2 nucléons, sans charge. Ce sont deux neutrons.

La fission de l'uranium 235

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.

Exemple : L'équation de la fission en strontium et xénon

L'équation de la réaction s'écrit :

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

On vérifie les deux lois de conservation :

- nombre de nucléons : $1 + 235 = 94 + 140 + 2 \times 1 = 236$;
- nombre de charge : $0 + 92 = 38 + 54 + 2 \times 0 = 92$.

La réaction en chaîne. Chaque fission émet deux ou trois neutrons. Ralentis, ils peuvent provoquer d'autres fissions, qui en émettent à leur tour.

Sans contrôle, le nombre de fissions croît très vite. Dans un réacteur, des **barres de contrôle** absorbent une partie des neutrons. En moyenne, chaque fission en provoque alors exactement une autre.

Vérifie : Une réaction en chaîne contrôlée

Dans un réacteur qui fonctionne à puissance constante, combien de neutrons de chaque fission provoquent, en moyenne, une nouvelle fission ?

A. Aucun.

Faux.
La réaction s'arrêterait après la première fission.

B. Deux ou trois, tous ceux qui sont émis.

Faux.
Le nombre de fissions doublerait à chaque génération : la puissance croîtrait sans fin.

C. Exactement un.

Juste.
Juste : le nombre de fissions par seconde reste constant.

Correction
Pour que la puissance reste constante, le nombre de fissions par seconde ne doit ni croître ni décroître. Chaque fission doit en provoquer, en moyenne, une seule autre ; les barres de contrôle absorbent les autres neutrons.

Noyaux fissiles et neutrons lents

Un noyau **fissile** subit la fission quand il absorbe un neutron lent. L'uranium 235 et le plutonium 239 sont fissiles. L'uranium 238, bien plus abondant dans le minerai, ne l'est pas.

Le combustible d'une centrale est donc de l'uranium **enrichi** en uranium 235, à quelques pour cent.

Les neutrons sortent de la fission très rapides. Un **modérateur**, l'eau en général, les ralentit par chocs successifs.

Ralentis, ils ont plus de chances de provoquer une nouvelle fission. Le bilan énergétique de cette fission est calculé dans la section sur les énergies de masse.

Reconnaître le type d'une réaction

Méthode : Écrire une équation nucléaire et en reconnaître le type

1. **Écris** les réactifs et les produits connus avec leurs symboles ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, et les neutrons ${}^{1}_{0}\mathrm{n}$.
2. **Applique** la conservation du nombre de nucléons, puis celle du nombre de charge, pour trouver A et Z d'une particule inconnue.
3. **Identifie** l'élément par son nombre de charge Z.
4. **Reconnais** le type : un noyau lourd frappé par un neutron qui donne deux noyaux plus légers, une fission ; deux noyaux légers qui donnent un noyau plus lourd, une fusion ; un seul noyau qui se transforme spontanément, une radioactivité.

Vérifie : Un noyau lourd frappé par un neutron

Un noyau lourd absorbe un neutron lent, puis se scinde en deux noyaux de masses voisines en émettant trois neutrons. Quel est le type de cette réaction ?

A. Une radioactivité alpha.

Faux.
Une radioactivité est spontanée et n'émet pas deux noyaux moyens.

B. Une fusion.

Faux.
Une fusion unit deux noyaux légers ; ici, un noyau lourd se scinde.

C. Une radioactivité bêta moins.

Faux.
Elle émet un électron, sans scinder le noyau.

D. Une fission.

Juste.
Juste : un noyau lourd, un neutron lent, deux noyaux plus légers et des neutrons.

Correction
La réaction est provoquée par un neutron, et un noyau lourd donne deux noyaux plus légers et des neutrons. C'est une fission.

À toi : La désintégration d'un produit de fission

Le strontium 94 formé est radioactif β^{-} : il émet un électron ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$. Écris l'équation de sa désintégration et identifie le noyau formé. Données : yttrium Y, $Z = 39$; zirconium Zr, $Z = 40$. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Écris l'équation avec un noyau inconnu ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ parmi les produits.
Indice 2
Conserve le nombre de nucléons, puis le nombre de charge.
Indice 3
Point délicat : l'électron compte -1 dans le nombre de charge.

Réponse
Les lois de conservation donnent $94 = A + 0$ et $38 = Z - 1$, soit $A = 94$ et $Z = 39$: c'est l'yttrium.

$$ {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} \longrightarrow {}^{94}_{39}\mathrm{Y} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} $$

Conclusion. Le strontium 94 se désintègre en yttrium 94. Les produits de fission sont radioactifs : c'est l'origine d'une partie des déchets.

Écrire et reconnaître une fusion

Deux deutons qui fusionnent

Le deutérium est un isotope de l'hydrogène : son noyau ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$, le **deuton**, contient un proton et un neutron. On en trouve dans l'eau de mer.

À très haute température, deux deutons peuvent s'unir. L'un des produits est un noyau d'hélium 3, ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$.

Devine : L'autre produit de deux deutons

Deux deutons s'unissent en un noyau d'hélium 3 et une autre particule. Quelle est cette particule ?

A. Un proton.
Faux.
Le nombre de charge ne serait pas conservé : $1 + 1 \neq 2 + 1$.

B. Un neutron.
Juste.
Juste : il reste un nucléon sans charge.

C. Un électron.
Faux.
Il manquerait un nucléon : $2 + 2 \neq 3 + 0$.

D. Aucune.
Faux.
Il manquerait un nucléon : 4 au départ, 3 à l'arrivée.

Correction
Au départ : 4 nucléons et une charge 2. L'hélium 3 en emporte 3 et une charge 2 : il reste un nucléon de charge nulle, un neutron.

La fusion et ses conditions

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.

Exemple : L'équation de la fusion de deux deutons

L'équation de la réaction s'écrit :

$$ {}_{1}^{2}\mathrm{H} + {}_{1}^{2}\mathrm{H} \longrightarrow {}_{2}^{3}\mathrm{He} + {}_{0}^{1}\mathrm{n} $$

On vérifie les deux lois de conservation :

- nombre de nucléons : $2 + 2 = 3 + 1 = 4$;
- nombre de charge : $1 + 1 = 2 + 0 = 2$.

Deux noyaux légers forment un noyau plus lourd : c'est une fusion.

Deux noyaux chargés positivement se repoussent. Pour fusionner, ils doivent s'approcher très près l'un de l'autre, à la portée de l'interaction qui tient le noyau.

Il leur faut pour cela une très grande vitesse, donc une température très élevée. À cette température, la matière forme un **plasma**, mélange de noyaux et d'électrons séparés.

Vérifie : Pourquoi une si haute température

Pourquoi la fusion de deux noyaux légers exige-t-elle une température très élevée ?

A. Pour faire fondre les noyaux avant de les réunir.
Faux.
Un noyau ne fond pas : la température agit sur la vitesse des noyaux.

B. Pour donner aux noyaux une vitesse qui vainc leur répulsion électrique.
Juste.
Juste : plus la température est haute, plus les noyaux sont rapides.

C. Pour produire les neutrons lents qui déclenchent la fusion.
Faux.
Ce sont les fissions qui sont provoquées par des neutrons lents.

Correction

> Les deux noyaux sont chargés positivement : ils se repoussent. Seuls des noyaux très rapides s'approchent assez pour fusionner, et la vitesse des noyaux croît avec la température.

La fusion dans le Soleil et sur Terre

Au cœur du Soleil, la température et la densité sont immenses. Des noyaux d'hydrogène y fusionnent, en plusieurs réactions successives.

Au bilan, quatre protons forment un noyau d'hélium 4. L'énergie libérée est celle que le Soleil rayonne.

Sur Terre, des réacteurs de recherche tentent de produire de l'énergie par fusion contrôlée. Des aimants très puissants y confinent un plasma de deutérium et de tritium.

Aucune centrale à fusion ne produit encore d'électricité : la recherche se poursuit. Le combustible serait abondant, et les déchets moins durables que ceux de la fission.

Comparer fission et fusion

> **À retenir : Fission et fusion côte à côte**
>
> | | Fission | Fusion |
> |---|---|---|
> | Réactifs | un noyau lourd et un neutron lent | deux noyaux légers |
> | Condition | neutrons lents | très haute température |
> | Domaine | A supérieur à 190 environ | A inférieur à 20 environ |
> | Utilisation | centrales nucléaires | Soleil, réacteurs de recherche |
>
> Les deux réactions conservent le nombre de charge et le nombre de nucléons, et libèrent de l'énergie.

> **À toi : Deux deutons qui donnent du tritium**
>
> Deux deutons peuvent aussi donner un noyau de tritium ${}_{1}^{3}\mathrm{H}$ et une autre particule. Écris l'équation de la réaction et identifie cette particule. Justifie qu'il s'agit d'une fusion. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.
>
> **Indice 1**
> Écris l'équation avec une particule inconnue ${}_{Z}^{A}\mathrm{X}$ parmi les produits.
> **Indice 2**
> Conserve le nombre de nucléons, puis le nombre de charge.
> **Indice 3**
> Point délicat : une particule de nombre de charge 1 et de nombre de nucléons 1 est un proton.
>
> **Réponse**

Les lois de conservation donnent $2 + 2 = 3 + A$ et $1 + 1 = 1 + Z$, soit $A = 1$ et $Z = 1$: c'est un proton.

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{p}$$

Conclusion. La particule est un proton. Deux noyaux légers forment un noyau plus lourd, le tritium : c'est une fusion.

Bilan énergétique par les énergies de masse

Masses avant et après une fission

Devine : La masse au cours d'une fission

Au cours de la fission de l'uranium 235 en strontium et xénon, comment varie la somme des masses des particules ?

A. Elle augmente.

Faux.
Les produits sont plus liés que les réactifs : ils pèsent moins, pas plus.

B. Elle diminue.

Juste.
Juste : une partie de l'énergie de masse devient une autre forme d'énergie.

C. Elle reste constante, comme en chimie.

Faux.
À l'échelle du noyau, la variation de masse se mesure : elle n'est pas nulle.

Correction
Les produits de la fission sont plus bas sur la courbe d'Aston : ils sont plus liés que l'uranium 235. Leur masse totale est donc plus petite que celle des réactifs. Les masses mesurées qui suivent le confirment.

Des masses mesurées. Voici les masses des particules de la fission de l'uranium 235 en strontium et xénon :

- neutron : $1{,}00866\,\mathrm{u}$;
- noyau d'uranium 235 : $234{,}99342\,\mathrm{u}$;
- noyau de strontium 94 : $93{,}89449\,\mathrm{u}$;
- noyau de xénon 140 : $139{,}89200\,\mathrm{u}$.

Les produits, deux neutrons compris, pèsent environ $0{,}2\,\mathrm{u}$ de moins que les réactifs.

Pourquoi une masse perdue libère de l'énergie. Chaque particule a une énergie de masse. Si la masse du système diminue au cours d'une réaction, son énergie de masse diminue aussi.

Or l'énergie totale se conserve : c'est une loi admise. L'énergie de masse perdue apparaît donc sous une autre forme.

Variation de l'énergie de masse

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.

Démonstration

Étape 1. D'après la relation d'équivalence masse-énergie, chaque particule de masse m, au repos, possède l'énergie de masse $m\,c^2$.

Étape 2. Avant la réaction, l'énergie de masse du système est la somme de celles des réactifs : $E_{\mathrm{i}} = m_{\mathrm{i}}\, c^2$. Après la réaction, c'est la somme de celles des produits : $E_{\mathrm{f}} = m_{\mathrm{f}}\, c^2$.

Étape 3. La variation de l'énergie de masse est donc $\Delta E = E_{\mathrm{f}} - E_{\mathrm{i}} = (m_{\mathrm{f}} - m_{\mathrm{i}})\, c^2$.

Étape 4. L'énergie totale du système se conserve. Si $\Delta E < 0$, l'énergie de masse a diminué de $|\Delta E|$: cette énergie apparaît sous une autre forme, énergie cinétique des produits et rayonnement γ. C'est l'énergie libérée $E_{\mathrm{lib}} = |\Delta E|$.

À retenir : Le geste de la preuve du bilan par les masses

La preuve écrit l'énergie de masse avant et après la réaction, puis en fait la différence. La conservation de l'énergie totale, à l'étape 4, dit où passe l'énergie de masse perdue : énergie cinétique des produits et rayonnement γ.

Vérifie : La loi qui conclut la preuve

Dans la preuve, quelle loi permet d'affirmer que l'énergie de masse perdue n'est pas perdue pour le système ?

A. La conservation du nombre de charge.

Faux.
Elle sert à écrire l'équation, pas à suivre l'énergie.

B. La conservation de l'énergie totale.
Juste.
Juste : c'est l'étape 4 de la preuve.

C. La conservation du nombre de nucléons.
Faux.
Elle ne dit rien de l'énergie du système.

D. La conservation de la masse.
Faux.
La masse ne se conserve pas ici : c'est tout l'objet du bilan.

Correction
À l'étape 4, la conservation de l'énergie totale montre que l'énergie de masse perdue réapparaît en énergie cinétique des produits et en rayonnement gamma : c'est l'énergie libérée.

Radioactivité alpha du radium 226

Exemple : Le bilan de la désintégration alpha du radium 226

Le radium 226 émet une particule α :

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

Nucléons : $226 = 222 + 4$; charge : $88 = 86 + 2$. Masses des noyaux : radium $225{,}97710\,\mathrm{u}$, radon $221{,}97036\,\mathrm{u}$, hélium $4{,}00151\,\mathrm{u}$.

$$\begin{aligned} m_\mathrm{f} - m_\mathrm{i} &= 225{,}97187 \\ &\quad - 225{,}97710 = -0{,}00523\,\mathrm{u} \\ \Delta E &= -0{,}00523 \times 931{,}5 \\ &= -4{,}87\,\mathrm{MeV} \end{aligned}$$

La désintégration libère $E_\mathrm{lib} = 4{,}87\,\mathrm{MeV}$.

Méthode : Faire le bilan d'une réaction par les masses

1. **Écris** l'équation de la réaction et vérifie les deux lois de conservation.
2. **Calcule** la somme m_i des masses des réactifs et la somme m_f des masses des produits, avec toutes les décimales.
3. **Calcule** $\Delta E = (m_\mathrm{f} - m_\mathrm{i})\,c^2$, en MeV avec $1\,\mathrm{u} = 931{,}5\,\mathrm{MeV}/c^2$.

4. **Conclus** : si $\Delta E < 0$, la réaction libère $E_{\text{lib}} = |\Delta E|$; ramène-la si besoin à une masse de combustible, avec la constante d'Avogadro.

Attention : Le signe de la variation d'énergie

✗ « Le radium libère de l'énergie, donc $\Delta E = 4{,}87\,\text{MeV}$. »

✓ La variation d'énergie d'une réaction qui libère de l'énergie est **négative** : $\Delta E = -4{,}87\,\text{MeV}$. L'énergie libérée, elle, est positive : $E_{\text{lib}} = |\Delta E| = 4{,}87\,\text{MeV}$.

Radioactivité bêta moins du carbone 14

Exemple : Le bilan de la désintégration bêta moins du carbone 14

Le carbone 14 émet un électron :

$$^{14}_{6}\text{C} \longrightarrow {}^{14}_{7}\text{N} + {}^{0}_{-1}\text{e}$$

L'électron entre dans la masse des produits. Avec les noyaux de carbone, $13{,}999948\,\text{u}$, et d'azote, $13{,}999231\,\text{u}$:

$$\begin{aligned} m_{\text{f}} - m_{\text{i}} &= 13{,}999231 + 0{,}000549 \\ &\quad - 13{,}999948 = -0{,}000168\,\text{u} \end{aligned}$$

Donc $\Delta E = -0{,}000168 \times 931{,}5 = -0{,}156\,\text{MeV}$. La différence est très petite : six décimales sont nécessaires.

L'énergie libérée par la fission

Exemple : L'énergie libérée par la fission de l'uranium 235

On reprend les masses mesurées de la fission en strontium et xénon, données plus haut :

- $m_{\text{i}} = 1{,}00866 + 234{,}99342 = 236{,}00208\,\text{u}$;
- $m_{\text{f}} = 93{,}89449 + 139{,}89200 + 2 \times 1{,}00866 = 235{,}80381\,\text{u}$.

$$\begin{aligned} \Delta E &= -0{,}19827 \times 931{,}5 \\ &= -184{,}7\,\text{MeV} \end{aligned}$$

Chaque fission libère environ $184{,}7\,\text{MeV}$, près de quarante fois plus que la désintégration du radium.

Pour un gramme. Rappel : un échantillon de masse m contient $N = \dfrac{m}{M}\,N_A$ noyaux. Avec $M = 235\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, un gramme d'uranium 235 en contient $N = 2{,}56 \times 10^{21}$.

$$
\begin{aligned}
E &= N\,E_{\text{lib}} \\
&= 2{,}56 \times 10^{21} \times 184{,}7 \times 1{,}60 \times 10^{-13} \\
&= 7{,}57 \times 10^{10}\ \text{J}
\end{aligned}
$$

Comparaison à la combustion. La combustion d'un gramme de pétrole libère environ $4{,}5 \times 10^{4}$ J. La fission d'un gramme d'uranium 235 en libère environ $1{,}7 \times 10^{6}$ fois plus.

C'est pourquoi une centrale nucléaire consomme si peu de combustible.

À toi : Le bilan par les masses de la fusion de deux deutons

Masses des noyaux : deuton $2{,}01355\,\text{u}$, hélium 3 $3{,}01493\,\text{u}$; neutron $1{,}00866\,\text{u}$. Calcule ΔE et l'énergie libérée par la fusion de deux deutons en hélium 3 et neutron. Compare l'énergie libérée par nucléon à celle de la fission, $184{,}7\,\text{MeV}$ pour 236 nucléons. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Calcule m_{i}, puis m_{f}, avec toutes les décimales.
Indice 2
Multiplie $m_{\text{f}} - m_{\text{i}}$ par $931{,}5$.
Indice 3
Point délicat : le neutron fait partie des produits ; son énergie de liaison n'intervient pas ici, seule sa masse compte.

Réponse
Masses. $m_{\text{i}} = 2 \times 2{,}01355 = 4{,}02710\,\text{u}$ et $m_{\text{f}} = 3{,}01493 + 1{,}00866 = 4{,}02359\,\text{u}$.

$$
\begin{aligned}
\Delta E &= -0{,}00351 \times 931{,}5 \\
&= -3{,}27\,\text{MeV}
\end{aligned}
$$

Par nucléon. Fusion : $\dfrac{3{,}27}{4} \approx 0{,}82\,\text{MeV}$; fission : $\dfrac{184{,}7}{236} \approx 0{,}78\,\text{MeV}$.

Conclusion. La fusion libère $3{,}27\,\text{MeV}$; par nucléon, elle en libère un peu plus que la fission.

Bilan par les énergies de liaison et diagramme d'énergie

Énergies de liaison des noyaux de la fission

Devine : Des produits plus liés

D'après la courbe d'Aston, les produits d'une fission sont-ils, au total, plus liés ou moins liés que le noyau d'uranium 235 ?

A. Moins liés : ils ont moins de nucléons chacun.
Faux.
Moins de nucléons par noyau, mais chacun plus lié : c'est l'énergie par nucléon qui compte.

B. Autant liés : le nombre de nucléons se conserve.

Faux.

Les nucléons se conservent, mais pas leur énergie de liaison.

C. Plus liés : leurs nucléons sont plus bas sur la courbe.

Juste.

Juste : environ $8{,}4\,\mathrm{MeV}$ par nucléon contre $7{,}6\,\mathrm{MeV}$.

Correction

Les noyaux de strontium et de xénon sont des noyaux moyens, plus bas que l'uranium sur la courbe d'Aston. Leurs nucléons sont plus liés : l'énergie de liaison totale des produits dépasse celle des réactifs.

Des énergies de liaison. Par la méthode de l'énergie de liaison, avec les masses des noyaux de la fission :

- uranium 235 : $\Delta m = 1{,}91472\,\mathrm{u}$, $E_\ell = 1\,783{,}56\,\mathrm{MeV}$;
- strontium 94 : $\Delta m = 0{,}86711\,\mathrm{u}$, $E_\ell = 807{,}71\,\mathrm{MeV}$;
- xénon 140 : $\Delta m = 1{,}24588\,\mathrm{u}$, $E_\ell = 1\,160{,}54\,\mathrm{MeV}$.

Ensemble, les deux produits ont une énergie de liaison plus grande que l'uranium 235.

Pourquoi les masses disparaissent des bilans. D'après la définition du défaut de masse, la masse d'un noyau est celle de ses nucléons séparés, moins $\dfrac{E_\ell}{c^2}$.

En écrivant ainsi toutes les masses du bilan, les masses des protons et des neutrons s'éliminent : il ne reste que les énergies de liaison.

Le bilan à partir des énergies de liaison

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.

Démonstration

Étape 1. D'après la définition du défaut de masse et celle de l'énergie de liaison, la masse d'un noyau $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ s'écrit

$$m(^{A}_{Z}\mathrm{X}) = Z\,m_p + (A-Z)\,m_n - \frac{E_\ell}{c^2}.$$

Cette écriture vaut aussi pour un nucléon libre, d'énergie de liaison nulle.

Étape 2. En additionnant ces écritures pour les réactifs, $m_\mathrm{i} = Z_\mathrm{i}\,m_p + N_\mathrm{i}\,m_n - \dfrac{E_\ell(\mathrm{i})}{c^2}$, où Z_i est le nombre total de protons et N_i le nombre total de neutrons ; de même pour les produits.

Étape 3. La réaction conserve le nombre de charge et le nombre de nucléons : $Z_\mathrm{f} = Z_\mathrm{i}$ et $N_\mathrm{f} = N_\mathrm{i}$. Les termes en m_p et en m_n s'éliminent dans la différence :

$$m_\mathrm{f} - m_\mathrm{i} = \frac{E_\ell(\mathrm{i}) - E_\ell(\mathrm{f})}{c^2}.$$

Étape 4. D'après l'énergie d'une réaction nucléaire à partir des masses, $\Delta E = (m_\mathrm{f} - m_\mathrm{i})\,c^2 = E_\ell(\mathrm{i}) - E_\ell(\mathrm{f})$.

À retenir : Le calcul clé de la preuve par les énergies de liaison

À l'étape 3, la conservation du nombre de charge et du nombre de nucléons laisse autant de protons et de neutrons de chaque côté. Les termes en m_p et m_n s'éliminent : seule reste la différence $E_\ell(\mathrm{i}) - E_\ell(\mathrm{f})$.

Vérifie : Une relation qui ne vaut pas pour la radioactivité bêta

Pourquoi la relation par les énergies de liaison ne s'applique-t-elle pas à une radioactivité bêta moins ?

A. Un neutron devient un proton : protons et neutrons ne sont plus en même nombre des deux côtés.

Juste.

Juste : l'étape 3 de la preuve ne s'applique plus, et un électron apparaît.

B. L'énergie totale ne se conserve pas au cours d'une radioactivité.

Faux.

L'énergie totale se conserve toujours ; c'est l'élimination de m_p et de m_n qui échoue.

C. Le noyau formé n'a pas d'énergie de liaison.

Faux.

Tout noyau de plus d'un nucléon a une énergie de liaison positive.

Correction

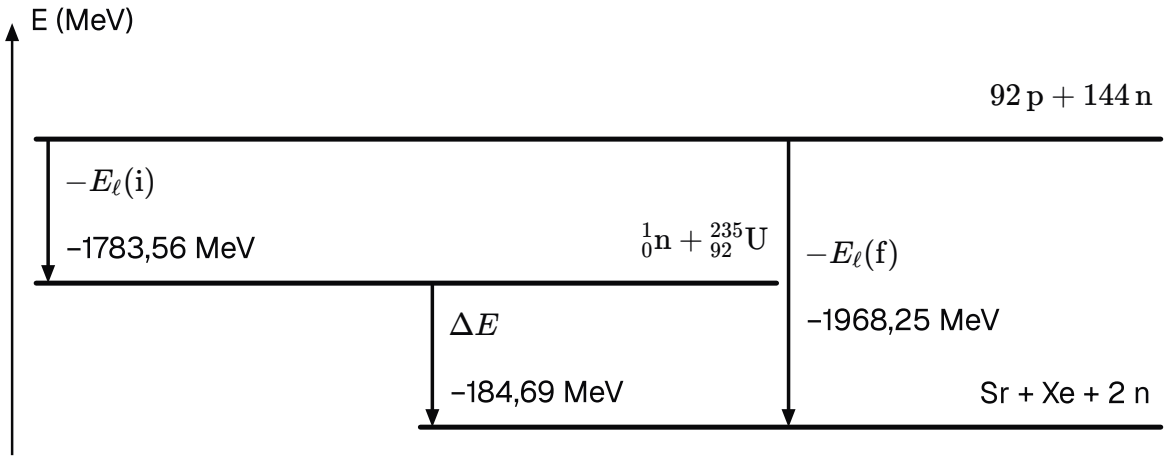
Dans une radioactivité β^-, un neutron du noyau devient un proton, et un électron est émis. Le nombre de protons et celui de neutrons changent : à l'étape 3, les termes en m_p et m_n ne s'éliminent plus. Le bilan se fait par les masses, électron compris.

Le diagramme d'énergie de la fission

Exemple : Le bilan de la fission par les énergies de liaison

On reprend les trois énergies de liaison données plus haut. Ce sont des valeurs intermédiaires : on leur garde deux décimales et on n'arrondit que ΔE. Les neutrons libres ont une énergie de liaison nulle.

$$\begin{aligned}\Delta E &= 1\,783{,}56 - 1\,968{,}25 \\ &= -184{,}69\,\mathrm{MeV}\end{aligned}$$



Bilan de la fission de l'uranium 235 en strontium 94 et xénon 140 ; énergies comptées depuis les nucléons séparés.

Sur le diagramme, les trois flèches valent $-1\,783{,}56\,\mathrm{MeV}$, $-184{,}69\,\mathrm{MeV}$ et $-1\,968{,}25\,\mathrm{MeV}$. Les longueurs ne sont pas à l'échelle.

Arrondi à quatre chiffres significatifs, $\Delta E = -184{,}7\,\mathrm{MeV}$: c'est le résultat du bilan par les masses. Les deux bilans se recoupent.

Méthode : Construire le diagramme d'énergie d'une réaction

1. **Calcule** l'énergie de liaison de chaque noyau, ou lis-la dans les données ; celle d'un nucléon libre est nulle.
2. **Place** trois niveaux : les nucléons séparés en haut, à 0 ; les réactifs à $-E_\ell(\mathrm{i})$; les produits à $-E_\ell(\mathrm{f})$.
3. **Trace** deux flèches descendantes, des nucléons séparés vers les réactifs et vers les produits.
4. **Déduis** la flèche des réactifs aux produits : $\Delta E = E_\ell(\mathrm{i}) - E_\ell(\mathrm{f})$, puis l'énergie libérée $|\Delta E|$.

Le diagramme d'énergie de la fusion

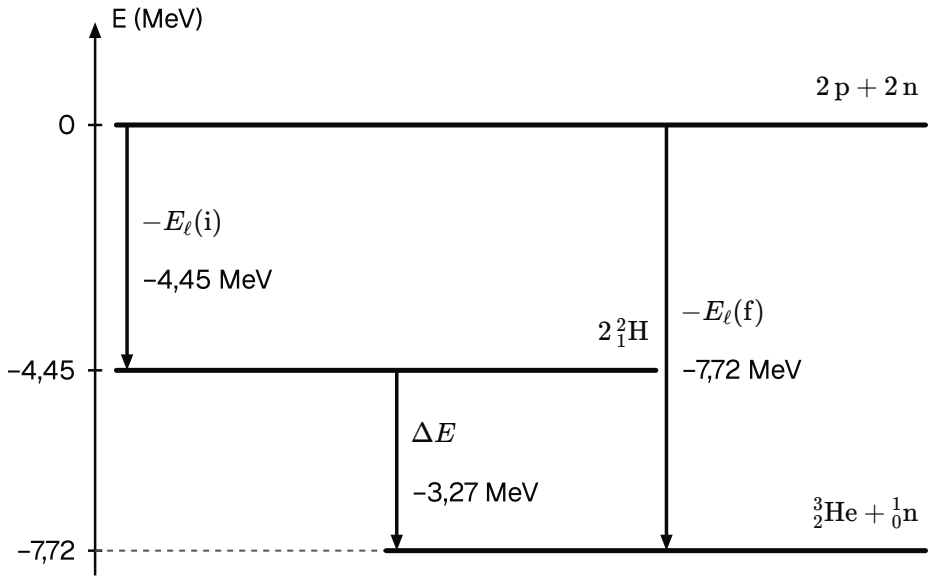
Exemple : La fusion de deux deutons par les énergies de liaison

Défauts de masse : deuton $0{,}00239\,\mathrm{u}$, hélium 3 $0{,}00829\,\mathrm{u}$. Le neutron libre ne compte pas.

- $E_\ell(\mathrm{i}) = 2 \times 0{,}00239 \times 931{,}5 = 4{,}45\,\mathrm{MeV}$;
- $E_\ell(\mathrm{f}) = 0{,}00829 \times 931{,}5 = 7{,}72\,\mathrm{MeV}$.

$$\begin{aligned}\Delta E &= 4{,}45 - 7{,}72 \\ &= -3{,}27\,\mathrm{MeV}\end{aligned}$$

C'est la valeur trouvée par les masses : la fusion libère $3{,}27\,\mathrm{MeV}$.



Bilan de la fusion de deux deutons en hélium 3 et neutron ; énergies comptées depuis les nucléons séparés.

Le lien avec la courbe d'Aston

Une réaction libère de l'énergie quand ses produits sont, au total, plus liés que ses réactifs. Sur la courbe d'Aston, c'est le cas quand la réaction rapproche les noyaux du creux, vers $A = 60$.

La fission y rapproche les noyaux lourds, la fusion les noyaux légers : c'est tout l'intérêt énergétique des deux réactions.

> **À toi : La désintégration alpha du radium par les énergies de liaison**
>
> Énergies de liaison, calculées depuis les masses : radium 226, $1\,731{,}305\,\mathrm{MeV}$; radon 222, $1\,707{,}887\,\mathrm{MeV}$; hélium 4, $28{,}290\,\mathrm{MeV}$. Calcule ΔE pour la désintégration alpha du radium 226, et compare au bilan par les masses. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.
>
> **Indice 1**
> Le seul réactif est le radium ; les produits sont le radon et l'hélium.

Indice 2
Applique $\Delta E = E_\ell(\mathrm{i}) - E_\ell(\mathrm{f})$.
Indice 3
Point délicat : $E_\ell(\mathrm{f})$ est la somme des énergies de liaison des deux produits.

Réponse
Énergies de liaison. $E_\ell(\mathrm{i}) = 1\,731{,}305\,\mathrm{MeV}$, et

$$\begin{aligned} E_\ell(\mathrm{f}) &= 1\,707{,}887 \\ &+ 28{,}290 \\ &= 1\,736{,}177\,\mathrm{MeV} \end{aligned}$$

Bilan.

$$\begin{aligned} \Delta E &= 1\,731{,}305 \\ &- 1\,736{,}177 \\ &= -4{,}872\,\mathrm{MeV} \end{aligned}$$

Conclusion. $\Delta E \approx -4{,}87\,\mathrm{MeV}$, comme par les masses : la radioactivité alpha ne fait intervenir que des noyaux, et les deux bilans se recoupent.

Utilisations de l'énergie nucléaire et radioprotection

La centrale nucléaire

Devine : L'énergie électrique d'une centrale

Dans une centrale nucléaire, quelle part de l'énergie libérée par les fissions devient de l'énergie électrique ?

A. Toute l'énergie libérée.
Faux.
Aucune machine thermique ne convertit toute la chaleur en travail.

B. Environ un tiers.
Juste.
Juste : le rendement est voisin de 33 %.

C. Moins d'un millième.
Faux.
La conversion est bien meilleure : environ un tiers.

Correction
L'énergie des fissions chauffe de l'eau ; la vapeur fait tourner une turbine. Comme toute machine thermique, la centrale rejette une grande partie de la chaleur : environ un tiers seulement devient électrique.

Le **réacteur** contient le combustible : des pastilles d'uranium enrichi. L'eau y joue deux rôles : modérateur, elle ralentit les neutrons ; fluide, elle emporte la chaleur.

Les **barres de contrôle** règlent le nombre de fissions. La chaleur produit de la vapeur, qui entraîne une turbine ; la turbine fait tourner un **alternateur**.

Le **rendement** de la centrale est le quotient de l'énergie électrique produite par l'énergie libérée par les fissions. Il vaut environ $33\,\%$.

Un gramme d'uranium 235 libère $7{,}57 \times 10^{10}\,\mathrm{J}$. Avec ce rendement, il fournit environ $0{,}33 \times 7{,}57 \times 10^{10} \approx 2{,}5 \times 10^{10}\,\mathrm{J}$ d'énergie électrique.

Applications de la radioactivité

La radioactivité sert bien au-delà des centrales :

- **médecine** : un traceur radioactif injecté montre le fonctionnement d'un organe ; des rayonnements détruisent des cellules cancéreuses ;
- **industrie** : un rayonnement γ traverse une pièce métallique et révèle les défauts d'une soudure ;
- **agroalimentaire** : une irradiation détruit les micro-organismes et prolonge la conservation des aliments.

Vérifie : Contrôler une soudure

On veut repérer une fissure à l'intérieur d'une soudure épaisse, sans la découper. Quel rayonnement convient ?

A. Un rayonnement α.
Faux.
Il est arrêté par une feuille de papier : il ne traverse pas le métal.

B. Un rayonnement β^-.
Faux.
Il est arrêté par quelques millimètres d'aluminium.

C. Un rayonnement γ.
Juste.
Juste : très pénétrant, il traverse le métal et révèle les défauts.

Correction
Seul un rayonnement très pénétrant traverse une soudure épaisse. Le rayonnement γ convient : un film placé derrière la pièce révèle les fissures.

Dangers des rayonnements

Les rayonnements ionisants endommagent les cellules vivantes. On distingue deux situations :

- l'**irradiation** : la source reste à l'extérieur du corps ;
- la **contamination** : des noyaux radioactifs entrent dans le corps, par la respiration, l'alimentation ou une plaie.

Une feuille de papier arrête le rayonnement α, quelques millimètres d'aluminium le rayonnement β. Le rayonnement γ demande du plomb ou du béton.

Vérifie : Irradiation ou contamination

Le rayonnement d'un émetteur α est arrêté par la peau. Dans quel cas cet émetteur est-il le plus dangereux ?

A. Quand on en respire des poussières.
Juste.
Juste : la contamination interne place la source contre les cellules.

B. Quand on reste à un mètre de la source.
Faux.
À cette distance, le rayonnement alpha est arrêté par l'air.

C. Quand on le manipule derrière une vitre.
Faux.
La vitre arrête le rayonnement alpha : l'opérateur est protégé.

Correction
Le rayonnement alpha ne franchit ni l'air sur quelques centimètres, ni la peau. Il devient dangereux en cas de contamination : inhalé ou avalé, l'émetteur irradie directement les cellules voisines.

Se protéger : distance, écran, durée

À retenir : Trois règles de radioprotection

Pour limiter l'exposition à une source de rayonnements :

- **distance** : s'éloigner de la source, car l'exposition diminue vite avec la distance ;
- **écran** : interposer un matériau adapté au rayonnement, papier, aluminium, plomb ou béton ;
- **durée** : rester le moins longtemps possible près de la source.

Contre la contamination, on travaille avec des gants, une blouse et parfois un masque.

Les **déchets** radioactifs viennent surtout du combustible usé et des produits de fission. Ils sont triés selon l'intensité de leur rayonnement et la durée de leur danger.

On les confine dans du verre, du béton ou de l'acier, et on les entrepose sous surveillance. Certains restent dangereux pendant des milliers d'années.

À toi : Protéger un technicien de contrôle

Un technicien contrôle des soudures avec une source γ. Propose trois mesures qui le protègent, une par règle de radioprotection. Ajoute un moyen de suivre l'exposition qu'il reçoit. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Pense aux trois règles : distance, écran, durée.
Indice 2
Le rayonnement γ est très pénétrant : quel écran l'arrête ?
Indice 3
Point délicat : suivre l'exposition demande un appareil porté par le technicien.

Réponse
Distance. Il déclenche l'exposition à distance, avec une commande à câble, et balise une zone interdite.

Écran. La source reste dans un conteneur en plomb entre deux contrôles ; il se place derrière un mur de béton.

Durée. Il prépare le contrôle à l'avance pour que l'exposition dure le moins possible.

Suivi. Il porte un dosimètre, qui mesure l'exposition reçue.

Conclusion. Distance, écran et durée limitent l'irradiation ; le dosimètre vérifie qu'elle reste faible.

Ce qu'il faut savoir faire.

- passer d'une masse à une énergie, en u et MeV ou en kg et J, avec une seule chaîne ;
- calculer un défaut de masse, une énergie de liaison et une énergie de liaison par nucléon ;
- lire la courbe d'Aston : noyaux stables, domaines de la fusion et de la fission ;
- écrire une équation de fission ou de fusion par les deux lois de conservation ;
- faire le bilan d'une réaction par les masses ou par les énergies de liaison, et tracer son diagramme d'énergie.

Le mot du prof. Une petite masse cache une énorme énergie : c'est la clé de l'énergie nucléaire, de ses usages comme de ses risques.

SOURCES

Référentiel BURHAN du chapitre « Noyaux, masse et énergie » (2bac · pc · physique-chimie)