

L'énergie nucléaire est un type d'énergie, à différencier des énergies fossiles et des énergies renouvelables. Elle est produite à partir d'un combustible, l'uranium. Ce métal radioactif est contenu dans le sous-sol de la terre. L'énergie nucléaire est principalement utilisée pour produire de l'électricité, mais elle peut également être utilisée dans les secteurs sanitaires, militaires, environnementaux...

○ Comment produit-on de l'énergie nucléaire? Quels sont les avantages et les inconvénients de l'énergie nucléaire?

## 1. Équivalence masse - énergie :

### 1.1. Relation d'Einstein :

En 1905, Albert Einstein postula l'équivalence entre la masse et l'énergie.

Un système de masse  $m$  possède, au repos, une énergie de masse  $E$  donnée par la relation :

$$E = m \cdot c^2$$

$E$  : énergie de masse en joule (J) ;

$m$  : masse en kilogramme (kg) ;

$c$  : célérité de la lumière dans le vide :  $c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

### 1.2. Unités de masse et énergie :

#### Activité 1 :

Dans le système international, la masse s'exprime en kilogramme (kg) et l'énergie en joule (J).

En physique nucléaire, on utilise plutôt l'unité de masse atomique (u) pour la masse et l'électronvolt (eV) ou souvent le mégaélectronvolt (MeV) pour l'énergie.

Une unité de masse atomique est égale à un douzième (1/12) de la masse d'un atome de carbone 12.

Un électronvolt est égal à l'énergie acquise par un électron accéléré par une tension de un volt.

1) Calculer la valeur, en kg, de l'unité de masse atomique.

2) En appliquant la relation d'Einstein, calculer, en MeV, l'énergie correspondante à l'unité de masse atomique.

3) En déduire la valeur de l'unité de masse atomique en MeV/c<sup>2</sup>.

Données :

Masse molaire de <sup>12</sup>C :  $M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  ; Constante d'Avogadro :  $N_A = 6,02214 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$   
 $1 \text{ eV} = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  et  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$

#### a. Unité de masse :

En physique nucléaire, les masses considérées étant petites, on les exprime en **unité de masse atomique**, de symbole **u**.

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

#### b. Unité d'énergie :

En physique nucléaire, le joule (J) est une unité d'énergie inadaptée, on utilise plutôt l'**électronvolt**, notée **eV**.

$$1 \text{ eV} = 1,602177 \times 10^{-19} \text{ J}$$

On utilise aussi comme unité le **mégaélectronvolt MeV** :  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$

#### c. Correspondance :

L'énergie correspondante à une unité de masse atomique est :

$$E = 1 \text{ u} \cdot c^2 = 931,5 \text{ MeV}$$

C'est-à-dire :  $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$

Particule	Masse (en u)	Énergie (en MeV)
proton	1,00728	938,272
neutron	1,00866	939,565
électron	0,00055	0,511

Masse et énergie du proton, du neutron et de l'électron.

## 2. Énergie de liaison d'un noyau :

### Activité 2 :

Le noyau d'hélium  ${}^4_2\text{He}$  est constitué de 2 protons et 2 neutrons. Sa masse est  $m({}^4_2\text{He}) = 4,00150 \text{ u}$ .

- 1) Calculer, en unité de masse atomique, la masse des nucléons séparés constituant ce noyau.
- 2) En déduire la différence entre la somme des masses des nucléons séparés et la masse du noyau, appelé le défaut de masse et noté  $\Delta m$ .
- 3) Calculer, en MeV, l'énergie de masse correspondant au défaut de masse de ce noyau, appelée l'énergie de liaison du noyau et notée  $E_l$ .
- 4) En déduire le rapport  $\xi = \frac{E_l}{A}$ , appelé l'énergie de liaison par nucléon et qui s'exprime en MeV/nucléon.
- 5) Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon  $\xi$  est plus grande. Lequel des deux noyaux  ${}^4_2\text{He}$  et  ${}^2_1\text{H}$ , le noyau de deutérium, est plus stable.

Données :

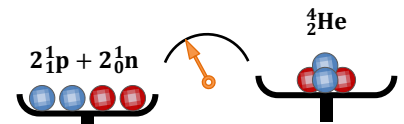
$$m({}^1_1\text{H}) = 2,01355 \text{ u} \quad ; \quad m({}^1_1\text{p}) = 1,00728 \text{ u} \quad ; \quad m({}^1_0\text{n}) = 1,00866 \text{ u} \quad ; \quad 1\text{u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

### 2.1. Le défaut de masse d'un noyau :

Le défaut de masse d'un noyau  ${}^A_Z\text{X}$  est la différence entre la somme des masses de ses nucléons et la masse de ce noyau :

$$\Delta m = (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n) - m({}^A_Z\text{X})$$

où  $m_p$  et  $m_n$  sont respectivement la masse d'un proton et la masse d'un neutron.



La masse du noyau d'hélium est inférieure à la somme des masses de deux protons et deux neutrons séparés.

### 2.2. L'énergie de liaison d'un noyau :

L'énergie de liaison d'un noyau  ${}^A_Z\text{X}$  est l'énergie qu'il faudrait fournir à ce noyau au repos pour le dissocier en nucléons, isolés et immobiles :

$$E_l = \Delta m \cdot c^2 = [(Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n) - m({}^A_Z\text{X})] \cdot c^2$$

### 2.3. L'énergie de liaison par nucléon :

L'énergie de liaison par nucléon d'un noyau  ${}^A_Z\text{X}$  est défini par la relation :

$$\xi = \frac{E_l}{A} \quad (\text{en MeV/nucléon})$$

Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon est grande.

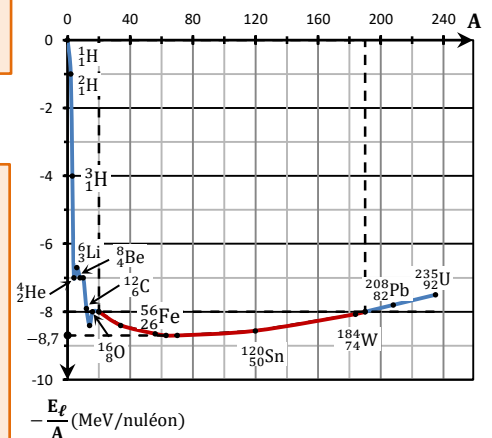
### 2.4. La courbe d'Aston :

La courbe d'Aston représente l'opposée de l'énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de nucléons pour chaque noyau. Il permet d'illustrer la stabilité relative des noyaux.

- Les noyaux stables se situent en bas, dans le creux, sur la partie rouge de la courbe ( $20 < A < 190$ ) ;
- Les noyaux très stables ( $50 < A < 75$ ) ont une énergie de liaison par nucléon de l'ordre de 8,7 MeV/nucléon ;
- Les noyaux légers ( $A < 20$ ) et les noyaux lourds ( $A > 190$ ) sont instables.

Noyau	$E_l$ (MeV)	$E_l/A$ (MeV/nucléon)
${}^2_1\text{H}$	2,2	1,1
${}^4_2\text{He}$	28	7,1
${}^{56}_{26}\text{Fe}$	$4,9 \times 10^2$	8,8
${}^{238}_{92}\text{U}$	$1,8 \times 10^3$	7,6

Énergie de liaison par nucléon de quelques noyaux

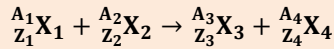


Courbe d'Aston. Les points situés sur la partie rouge de la courbe concernent les noyaux les plus stables.

### 3. Le bilan énergétique d'une réaction nucléaire :

#### 3.1. Cas général d'une réaction nucléaire :

Considérons une réaction nucléaire d'équation suivante :



avec  $X_i$  : un noyau ou une particule

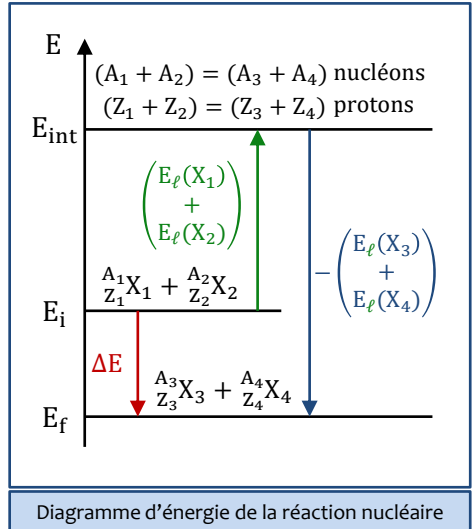
Le bilan énergétique de cette réaction nucléaire s'écrit :

$$\Delta E = [m(X_3) + m(X_4) - m(X_1) - m(X_2)] \cdot c^2$$

Ou bien :  $\Delta E = [E_\ell(X_1) + E_\ell(X_2)] - [E_\ell(X_3) + E_\ell(X_4)]$

- Si  $\Delta E > 0$ , l'ensemble reçoit de l'énergie du milieu extérieur ;
- Si  $\Delta E < 0$ , l'ensemble cède de l'énergie au milieu extérieur. Dans ce cas l'énergie libérée (produite) par la réaction nucléaire est :

$$E_{\text{libérée}} = |\Delta E|$$



#### 3.2. Cas des réactions nucléaires spontanées.

##### Activité 3 :

Les réactions nucléaires spontanées s'accompagnent d'une libération d'énergie liée à la perte de masse. Cette énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique cédée aux différents noyaux et particules et sous forme de rayonnement électromagnétique.

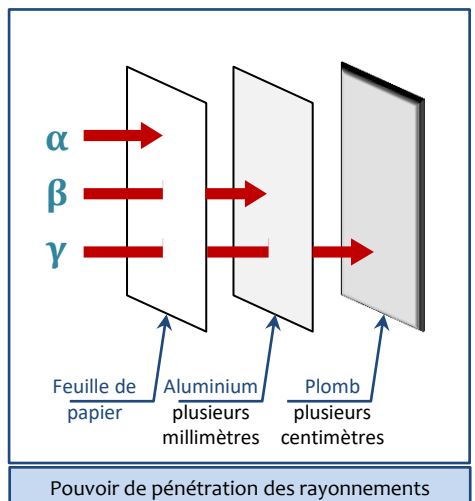
Calculer l'énergie libérée par les réactions nucléaires spontanées suivantes et représenter ses diagrammes d'énergie :

- La radioactivité  $\alpha$  :  ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$
- La radioactivité  $\beta^-$  :  ${}_{27}^{60}\text{Co} \rightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + {}_{-1}^0\text{e}$
- La radioactivité  $\beta^+$  :  ${}_{7}^{13}\text{N} \rightarrow {}_{6}^{13}\text{C} + {}_{+1}^0\text{e}$

Données		
Radioactivité $\alpha$	Radioactivité $\beta^-$	Radioactivité $\beta^+$
$m({}_{88}^{226}\text{Ra}) = 225,9770 \text{ u}$	$m({}_{27}^{60}\text{Co}) = 59,9190 \text{ u}$	$m({}_{7}^{13}\text{N}) = 13,001898 \text{ u}$
$m({}_{86}^{222}\text{Rn}) = 221,9702 \text{ u}$	$m({}_{28}^{60}\text{Ni}) = 59,915 \text{ u}$	$m({}_{6}^{13}\text{C}) = 13,000062 \text{ u}$
$m({}_2^4\text{He}) = 4,0015 \text{ u}$	$m({}_{-1}^0\text{e}) = 0,00055 \text{ u}$	$m({}_{+1}^0\text{e}) = 0,00055 \text{ u}$
$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$		

#### 3.3. Quelques applications et dangers de la radioactivité.

- Les rayonnements ionisants ont de nombreuses applications bénéfiques, notamment en médecine, en agriculture, dans l'industrie et dans la recherche.
- Lorsque les doses de rayonnements dépassent un certain niveau, des effets sanitaires aigus tels que des brûlures cutanées ou un syndrome d'irradiation aigu peuvent se produire. Les faibles doses peuvent accroître le risque d'effet à long terme comme le cancer.
- Les personnes exposées aux radiations dans leur pratique professionnelle portent des tenues adaptées au risque encouru : combinaisons, gants, surchaussures, masque, tablier plombé. Ces professionnels sont équipés d'un dosimètre qui permet de vérifier que la dose reçue ne dépasse pas les normes en vigueur.
- Le pouvoir de pénétration du rayonnement  $\alpha$  est le plus faible tandis que celui des rayons  $\gamma$  est le plus important.



## 4. La fission et la fusion nucléaires :

Les noyaux possédant des énergies de liaison par nucléon relativement faibles peuvent se transformer en d'autres noyaux plus stables avec libération d'énergie. Deux processus sont alors possibles : **la fission d'un noyau lourd** ou **la fusion de deux noyaux légers**. Contrairement aux désintégrations radioactives, ces réactions ne sont pas spontanées et doivent être amorcées.

### 4.1. La fission nucléaire :

#### Activité 4 :

Sous l'impact d'un neutron, un noyau d'uranium 235 ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) éclate en deux noyaux : du strontium  $^{94}_{38}\text{Sr}$  et du xénon  $^{139}_{54}\text{Xe}$ . Lors de cette réaction, il y a libération de neutrons.

- 1) Comment appelle-t-on ce type de réaction? Est-elle spontanée ?
- 2) D'après la courbe d'Aston, les deux noyaux formés sont-ils plus stable que celui d'uranium ?
- 3) Écrire l'équation de cette réaction.
- 4) Calculer l'énergie libérée par cette réaction.

Données :

$$m(^1_0\text{n}) = 1,00866 \text{ u} ; m(^{235}_{92}\text{U}) = 234,99332 \text{ u}$$

$$m(^{94}_{38}\text{Sr}) = 93,89446 \text{ u} ; m(^{139}_{54}\text{Xe}) = 138,88909 \text{ u}$$

$$1\text{u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

La fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd éclate, généralement en deux noyaux plus légers, sous l'impact d'un neutron.

Les neutrons produits peuvent à leur tour causer d'autres fissions (réaction en chaîne).

La fission nucléaire est réalisée dans :

- La bombe A (fission non contrôlée);
- Les réacteurs nucléaire (fission contrôlée), où l'énergie est convertie en énergie électrique.

### 4.2. La fusion nucléaire :

#### Activité 5 :

Lorsque deux noyaux, de deutérium  $^2_1\text{H}$  et de tritium  $^3_1\text{H}$ , se rapprochent à des températures atteignant plusieurs millions de degrés, ils fusionnent en un noyau instable. Un noyau d'hélium  $^4_2\text{He}$  et un neutron sont alors éjectés, créant de l'énergie.

- 1) Comment appelle-t-on ce type de réaction? Est-elle spontanée ?
- 2) D'après la courbe d'Aston, le noyau formé  $^4_2\text{He}$  est-il plus stable que les deux noyaux  $^2_1\text{H}$  et  $^3_1\text{H}$  ?
- 3) Écrire l'équation de cette réaction.
- 4) Calculer l'énergie libérée par cette réaction.

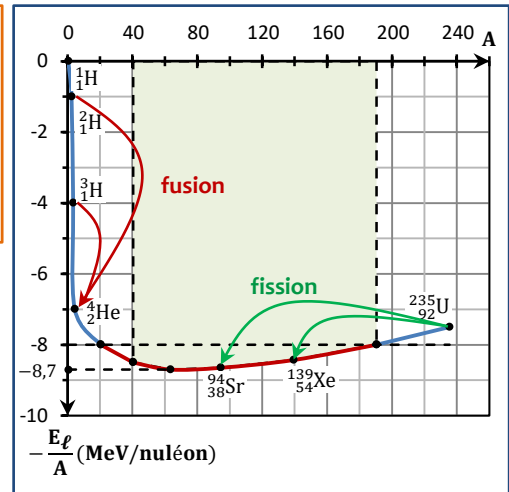
Données :

$$m(^1_0\text{n}) = 1,00866 \text{ u} ; m(^2_1\text{H}) = 2,01355 \text{ u}$$

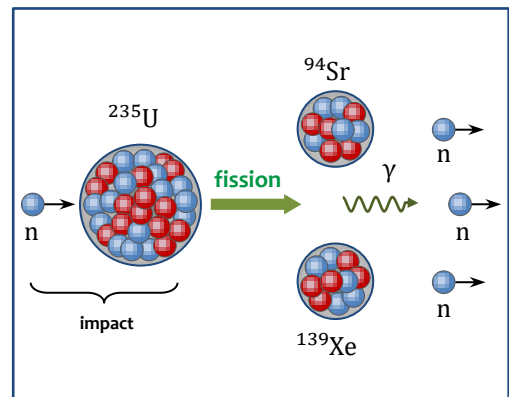
$$m(^3_1\text{H}) = 3,01550 \text{ u} ; m(^4_2\text{He}) = 4,00150 \text{ u}$$

La fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers fusionnent pour former un noyau plus lourd.

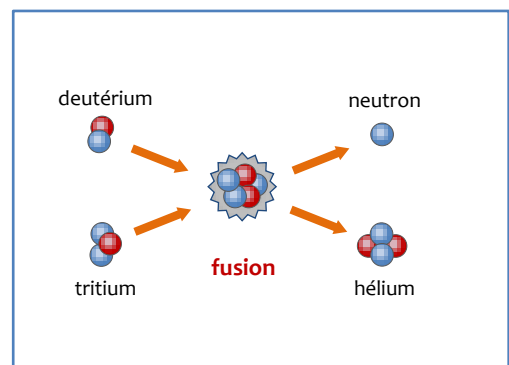
La fusion nucléaire est utilisée dans la bombe H et dans le générateur de neutrons. Elle pourrait être utilisée pour la production d'électricité.



Les processus de fission et de fusion



Sous l'impact d'un neutron, un noyau d'uranium 235 peut se casser en donnant des noyaux plus petits et d'autres neutrons. Les neutrons produits peuvent à leur tour casser des noyaux (réaction en chaîne)



Une réaction de fusion produisant un noyau d'hélium à partir du deutérium et du tritium.

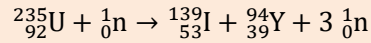
### Comparaison fission-fusion :

- Pour une même masse de matière, le processus de fusion est plus énergétique que la fission.
- L'approvisionnement en hydrogène (donc en deutérium et tritium) se fait aisément (eau).
- La fusion n'engendre pas de déchets radioactifs (le noyaux radioactif obtenus ont une durée de vie très faible, ce qui rend facile leur gestion).

### Application :

Dans une centrale nucléaire, on utilise des noyaux d'uranium 235 comme combustible fissile.

L'un des modes de fission nucléaire de l'uranium 235 est le suivant :



- 1) Donner l'expression de  $\Delta m$  la variation de la masse correspondante. Calculer sa valeur.
- 2) En déduire, en **MeV**, puis en **joule**, l'énergie libérée au cours de cette fission.
- 3) Montrer que :  $\Delta E = E_\ell({}^{235}_{92}\text{U}) - [E_\ell({}^{139}_{53}\text{I}) + E_\ell({}^{94}_{39}\text{Y})]$
- 4) Représenter le diagramme d'énergie correspondant à cette fission.
- 5) Calculer la quantité d'énergie libérée lors de la fission de **1 kg** d'uranium 235.
- 6) Calculer la masse de pétrole qui produirait la même quantité d'énergie . Conclure en comparant les deux masses.

### Données :

$$m({}_0^1\text{n}) = 1,00866 \text{ u} \quad ; \quad m({}_{92}^{235}\text{U}) = 234,99332 \text{ u} \quad ; \quad m({}_{53}^{139}\text{I}) = 138,89695 \text{ u} \quad ; \quad m({}_{39}^{94}\text{Y}) = 93,8904 \text{ u}$$

$$M({}_{92}^{235}\text{U}) = 235 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \quad ; \quad \mathbf{1 \text{ kg}} \text{ de pétrole peut produire } \mathbf{42 \text{ MJ}} \text{ d'énergie}$$