

Sources d'énergie nucléaire et utilisations

L'épuisement des combustibles fossiles rend indispensable le développement de nouvelles énergies. L'utilisation de réactions nucléaires représente un véritable enjeu dans ce domaine et reste un sujet très controversé dans notre société actuelle. Vous avez déjà étudié les transformations nucléaires dans un chapitre précédent, ce chapitre 4 constitue la suite et s'intéresse à l'aspect énergétique des transformations nucléaires.

I Equivalence masse-énergie

Einstein, en 1905, énonce le principe universel suivant :

Tout système du fait de sa masse m , possède au repos une énergie dite **énergie de masse** E_{masse} telle que

$$E_{\text{masse}} = m \cdot c^2$$

où c est la célérité de la lumière dans le vide égale à $3,00 \cdot 10^8 \text{m.s}^{-1}$

Unités dans le SI :

Point méthode : plusieurs unités seront utilisées dans ce chapitre et il faudra savoir basculer aisément d'une unité à l'autre (unités de masse et unités d'énergie)

Une autre unité de masse couramment utilisée lorsqu'on évoque le domaine du nucléaire est l'**unité de masse atomique** que l'on note u (elle correspond environ à la masse d'un nucléon donc c'est une unité plus adaptée à la physique nucléaire).

$1u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{kg}$ et donc, dans l'autre sens, pour les conversions, $1 \text{ kg} = \dots\dots\dots u$

Convertir la masse d'un électron en unité u : $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}$

Une autre unité d'énergie souvent utilisée à l'échelle atomique et nucléaire est l'**électronvolt**, qu'on note eV .

$1eV = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{J}$ et donc, dans l'autre sens, pour les conversions, $\dots\dots\dots$

Déterminer l'énergie de masse E_1 d'une particule de masse $4,00u$ en J puis en MeV (en passant par les eV) ?

Déterminer l'énergie de masse E_2 correspondant à la masse d'un électron $m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{kg}$ en J puis en MeV ?

II Conséquence 1 : transformations nucléaires et énergie qui peut être libérée

1) Principe général

On considère une réaction nucléaire faisant intervenir un système à l'état initial décrit par les entités à $\dots\dots\dots$ de l'équation nucléaire et le même système à l'état final décrit par $\dots\dots\dots$



a) Grandeurs qui sont conservées ou non lors d'une réaction nucléaire

b) Conséquence fondamentale : la masse n'est pas conservée en général

Notons $\Delta m_{\text{réaction}}$ la variation de masse lors de la réaction nucléaire correspondant aux entités de l'équation correspondante.

$\Delta m_{\text{réaction}} =$

- Si $\Delta m_{\text{réaction}} > 0$, cela signifie que $\dots\dots\dots$
 $\dots\dots\dots$
 $\dots\dots\dots$

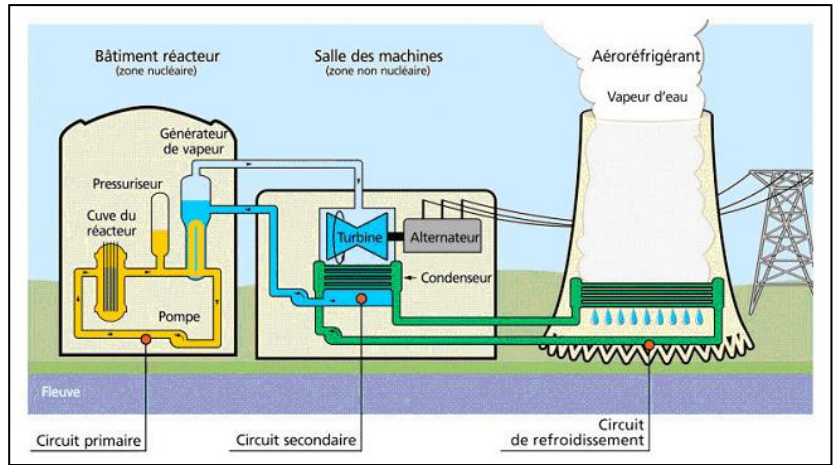
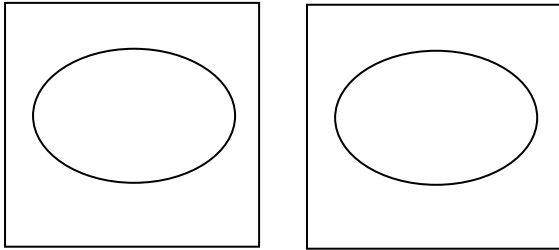
- Si $\Delta m_{\text{réaction}} < 0$, cela signifie que

.....

.....

.....

C'est le cas très important des réactions nucléaires utilisées dans les centrales nucléaires où l'énergie de masse perdue est récupérée intégralement en énergie libérée E_{lib} et récupérée par l'extérieur permettant d'obtenir, à la sortie de la centrale, de l'énergie électrique. Schéma simplifié (en omettant les intermédiaires de la chaîne) :



Alors, $E_{\text{lib}} =$

2) Exemple

L'uranium 235, sous l'impact d'un neutron, subit une fission :



Donner l'expression et le calcul de la variation de masse (en kg) lors de cette réaction nucléaire provoquée en fonction de la masse d'un noyau d'Uranium, la masse d'un noyau de Strontium, la masse d'un noyau de Xénon et de la masse d'un neutron m_n :

$\Delta m_{\text{réaction}} =$

Donner l'expression et calcul de la variation d'énergie de masse lors de cette réaction (en J puis en MeV)

En déduire l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235 en J puis en MeV

Terminer par le calcul de l'énergie libérée par la fission de 3,00 g d'uranium 235 en J

Données:

Masse d'un noyau d'Uranium: 235,013 u

Masse d'un noyau de Strontium : 93,8946 u

Masse d'un noyau de Xénon: 138,888 u

Masse d'un neutron : 1,00866 u

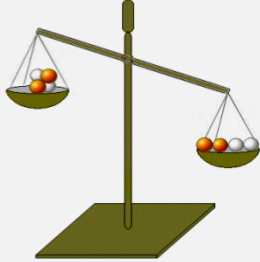
Célérité de la lumière dans le vide : $3,00 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

3) Ordres de grandeur

	Fission d'un noyau d'Uranium	Fusion donnant un noyau d'hélium	Désintégration radioactive
E_{lib} (MeV)	200	20	2

III Conséquence 2 : défaut de masse d'un noyau et stabilité des noyaux

Document 1 : une constatation étrange

Masse du noyau : $m_n = 6,6647 \times 10^{-27} \text{ kg}$		Masse des constituants : $= 2 m_p + 2 m_n$ $= 2 \times 1,6726 \times 10^{-27} + 2 \times 1,6750 \times 10^{-27}$ $= 6,6952 \times 10^{-27} \text{ kg}$
---	---	---

1) Qu'est représenté exactement dans le plateau de gauche de la balance ? Et dans le plateau de droite ?

2) Pourquoi le résultat de la pesée est-il étrange ?

3) Le défaut de masse Δm du noyau est égale à la différence de la masse du système *S* constitué de ses nucléons pris isolément (séparés) moins la masse du noyau

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n - m_{\text{noyau}}$$

unité dans le SI : kg

a) Calculer le défaut de masse du noyau du document 1.

b) Le défaut de masse d'un noyau a toujours la même signe. Quel est-il ?

c) Qu'en déduire sur la stabilité d'un noyau vis-à-vis de ses nucléons pris séparément ? Justifier.

d) Pourquoi est-ce important ?

e) Autre exemple : calculer le défaut de masse du lithium 7 en utilisant les données suivantes et vérifier que il est bien

négatif : $m({}^7_3\text{Li}) = 1,16476 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$; $m({}^1_1\text{P}) = 1,67261 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $m({}^1_0\text{n}) = 1,67494 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;

IV Conséquence 3 : découverte du neutrino et de l'antineutrino

Document 2 : introduction d'une nouvelle particule lors de la radioactivité bêta

Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie ont été les premiers à mettre en évidence le phénomène de radioactivité, c'est-à-dire la transformation au cours de laquelle des noyaux atomiques instables subissent une désintégration pour donner des atomes plus stables en libérant des rayonnements. Trois types de rayonnement ont été observés, les rayonnements α (libération d'un noyau d'hélium), les rayonnements γ (libération de photons) et β (libération d'un électron ou d'un positron).

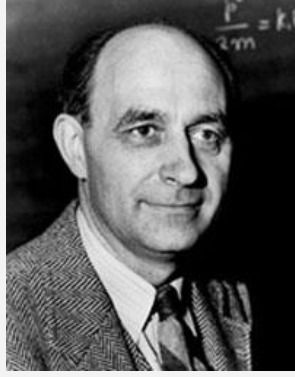
La radioactivité β a posé problème aux physiciens de l'époque, car le principe de la conservation de l'énergie ne semblait pas vérifié. Certains ont pensé à renoncer à ce principe mais d'autres, comme Wolfgang Pauli, ont proposé une solution, sans pouvoir en apporter la preuve expérimentale. L'idée était que lors de la désintégration β , l'émission d'un électron ou d'un positron était accompagnée d'une particule de faible masse, de charge électrique neutre (appelée plus tard neutrino).

James Chadwick a découvert le neutron en 1932, particule neutre dont la masse est proche de celle du proton. Ainsi Enrico Fermi pour ne pas qu'il y ait de confusion propose d'appeler neutrino les particules imaginées par Pauli (qu'il appelait neutron en 1930) pour décrire la désintégration β . Il faudra cependant attendre de nombreuses années pour que l'on puisse mettre en évidence ces particules dont la masse est très faible et qui interagissent peu avec la matière.



Wolfgang Pauli (1900–1958)

Physicien autrichien, il a été l'assistant de Niels Bohr, puis a publié de nombreux articles sur la mécanique quantique, en particulier la propriété de spin des particules. Il exprima le fameux principe d'exclusion selon lequel deux particules (fermions) ne peuvent se trouver dans le même état quantique. Il participa à la découverte du neutrino. Il obtint le prix Nobel de Physique en 1945 pour ses travaux en mécanique quantique.



Enrico Fermi (1901-1954)

Physicien italien, il apporta une contribution majeure à la physique quantique grâce à sa théorie statistique qu'il proposa en 1926 en collaboration avec Paul Dirac. Il s'intéressa ensuite à la physique nucléaire en particulier la radioactivité bêta pour laquelle il renomma les particules introduites par Pauli en neutrino. Il travaillera ensuite sur la première pile atomique et apportera sa contribution dans le développement de la bombe atomique. Il obtint le prix Nobel en 1938 pour ses travaux sur les éléments radioactifs.



James Chadwick (1891-1974)

Physicien britannique, il a été pendant de nombreuses années un des assistants d'Ernest Rutherford avec lequel il travailla sur la physique des particules. En 1932, il découvrit une particule de masse sensiblement égale à celle du proton mais sans charge électrique, qu'il baptisa neutron. Il fut ensuite un des principaux scientifiques collaborant à la création de la bombe atomique, projet connu sous le nom de « projet Manhattan ». Il reçut le prix Nobel de Physique en 1935 pour sa découverte du neutron.

Document 3 : lettre adressée par Pauli à des physiciens lors d'un colloque

Chers dames et messieurs radioactifs

Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le message de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la « mauvaise » statistique des noyaux N et ⁶Li et le spectre bêta continu, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver les lois de conservation de l'énergie et les statistiques. Il s'agit de la possibilité d'existence [...] de particules neutres de spin 1/2, obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons parce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière et que j'appelle neutrons. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que celle des électrons et ne doit en aucun cas excéder 0,01 fois la masse du proton. Le spectre β serait alors compréhensible si l'on suppose que pendant la désintégration β, avec chaque électron (L'électron est une particule élémentaire de la famille des leptons, et possédant une charge électrique élémentaire de signe négatif.) est émis un neutron de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constante... J'admets que mon remède puisse paraître invraisemblable, car on aurait dû voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagne, et la gravité de la situation, due à la nature continue du spectre β, est éclairée par une remarque de mon honoré prédécesseur, monsieur Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : « Oh ! Il vaut mieux ne pas y penser du tout, comme pour les nouveaux impôts. » Dorénavant, on doit discuter sérieusement toute voie d'issue. Ainsi, cher peuple radioactif, examinez et jugez. Malheureusement, je ne pourrai pas être moi-même à Tübingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu pendant la nuit du 6 au 7 décembre.

Votre serviteur le plus dévoué, W. Pauli

Wolfgang Pauli (lettres aux physiciens à Tübingen, 4 décembre 1930)

- 1) Pourquoi Wolfgang Pauli juge-t-il si important d'introduire une nouvelle particule pour expliquer la désintégration bêta ?
- 2) Quelles sont les caractéristiques de cette particule notée : ${}^0_0\nu_e$?
- 3) Qui a réellement découvert le neutron ? Pourquoi Fermi a-t-il baptisé cette nouvelle particule neutrino ?
- 4) Le Phosphore 30, possédant 15 neutrons et 15 protons, est radioactif β^+ et se désintègre en un noyau de Silicium. Ecrire l'équation de cette désintégration sans oublier la nouvelle particule introduite : : → + +
- 5) De la même façon, pour les désintégrations β^- , on définit l'antineutrino comme étant l'antiparticule du neutrino. Celui-ci est noté ${}^0_0\bar{\nu}_e$. Ecrire l'équation de désintégration β^- d'un noyau de césium 137(55 protons et 82 neutrons), en un noyau de Baryum : → + +