

Activité documentaire : les réactions nucléaires.

Objectif : extraire et exploiter des informations permettant d'utiliser la relation d'équivalence entre masse et énergie pour résoudre un problème scientifique.

Document 1 : masses de quelques atomes et particules.

Le tableau suivant regroupe les masses des particules élémentaires du noyau, ainsi que la masse de quelques noyaux.

A l'échelle du noyau, le kg est peu adapté : la masse est exprimée en « unité de masse atomique » notée u.
 $1\text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$.

Particule ou Noyau	Neutron	Proton	Hydrogène 2 ou Deutérium	Hydrogène 3 ou Tritium	Hélium 4	Strontium 94	Xenon 139	Uranium 235
Symbole	${}_0^1\text{n}$	${}_1^1\text{p}$	${}_1^2\text{H}$	${}_1^3\text{H}$	${}_2^4\text{He}$	${}_{38}^{94}\text{Sr}$	${}_{54}^{139}\text{Xe}$	${}_{92}^{235}\text{U}$
Masse en u	1,00866	1,00728	2,01355	3,01550	4,00150	93,8945	138,8892	234,9942

Document 2 : la relation d'équivalence d'Einstein.

Albert Einstein postule en 1905 que la masse est équivalente à de l'énergie. C'est la fameuse relation :

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

$c = 2,99792 \cdot 10^8\text{ m.s}^{-1}$ est la vitesse de la lumière dans le vide.

Cette relation nommée « relation d'équivalence masse-énergie » associe à toute particule immobile de masse m exprimée en kg, une « énergie de masse au repos » exprimée en Joules (J).

A l'échelle atomique et nucléaire, l'unité d'énergie est plutôt l'électron-volt (eV) : $1\text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$.

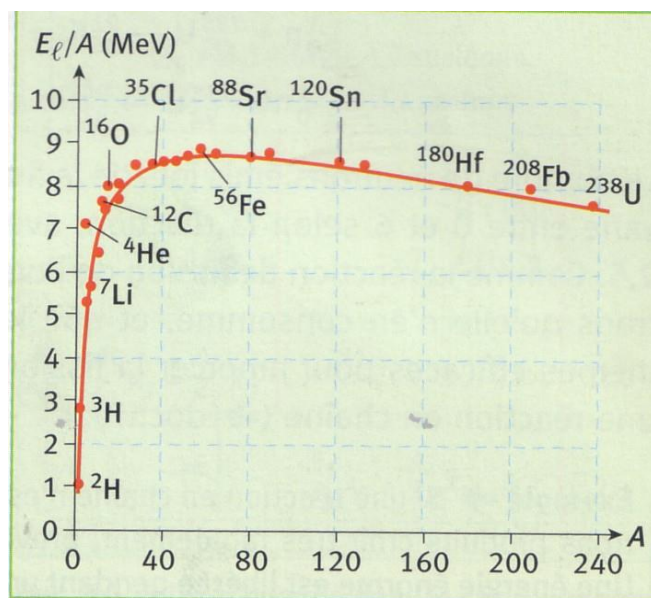
Document 3 : stabilité des noyaux et courbe d'Aston

Les nucléons d'un noyau atomique sont liés entre eux par l'interaction forte. La force de ces liaisons peut être évaluée par l'énergie de cohésion du noyau, qui est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le séparer en ses nucléons constitutifs, immobiles et isolés les uns des autres.

Cette énergie correspond à un défaut de masse entre le noyau et ses nucléons séparés : d'après la relation d'équivalence masse-énergie d'Einstein, la masse manquante entre un noyau et ses nucléons séparés explique l'origine de l'énergie de cohésion du noyau.

Afin de comparer les noyaux entre eux de façon pertinente, le physicien F.W. Aston proposa en 1919 une courbe, nommée en son honneur courbe d'Aston, représentant l'énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de nucléons. Aston reçut le prix Nobel en 1922 pour l'ensemble de ses travaux.

L'énergie de liaison par nucléon représente l'énergie qu'il faut fournir pour arracher un nucléon à un noyau donné. Ainsi, les noyaux les plus stables sont ceux dont l'énergie de liaison par nucléon est la plus élevée.



Courbe d'Aston représentant l'énergie de liaison par nucléon des noyaux en fonction du nombre de nucléons.

Document 4 : la fission nucléaire.

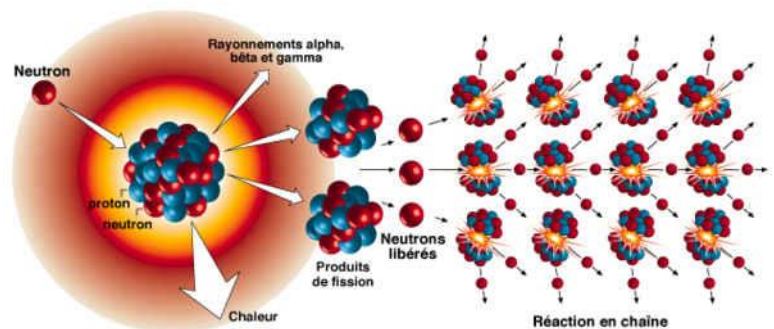
Après la découverte du neutron en 1932, le physicien Enrico Fermi comprend que cette particule peut s'avérer extrêmement utile pour étudier les noyaux atomiques.

En effet, sans charge électrique, le neutron a la faculté d'approcher suffisamment près le noyau, chargé positivement, sans être repoussé par des forces électriques.

E. Fermi montre que, contrairement à l'évidence immédiate, les neutrons lents sont beaucoup plus efficaces que les neutrons rapides pour parvenir à cette fin. Le neutron lent peut pénétrer à l'intérieur de ce noyau et le briser en deux morceaux. Il ne s'agit pas d'une explosion du noyau sous l'effet du choc mécanique avec le neutron, mais d'une cassure interne déclenchée par l'arrivée de ce neutron supplémentaire. C'est le résultat du bouleversement induit lors de l'intégration du neutron arrivant dans le noyau, sous l'action de l'interaction forte. La fragmentation du noyau est appelée réaction de fission. Un atome ayant la faculté de se briser en deux lors d'une collision est dit fissile. Les plus connus d'entre eux sont l'uranium 235 et le plutonium 239. Les deux morceaux obtenus après la fission d'un gros noyau sont les produits de fission. Ils sont la plupart du temps radioactifs : on parle de radioactivité *artificielle*, ces noyaux radioactifs ayant été créés par une réaction nucléaire.

Les chemins possibles lors de la fission de $^{235}_{92}\text{U}$ après l'incorporation d'un neutron sont au nombre de trois :

- soit les produits $^{92}_{36}\text{Kr}$ et $^{141}_{56}\text{Ba}$
- soit les produits $^{94}_{38}\text{Sr}$ et $^{139}_{54}\text{Xe}$
- soit les produits $^{94}_{37}\text{Rb}$ et $^{141}_{55}\text{Cs}$



En moyenne, ces réactions produisent 2,5 neutrons qui vont pouvoir provoquer à leur tour de nouvelles fissions et la libération de nouveaux neutrons et ainsi de suite... c'est la réaction en chaîne.

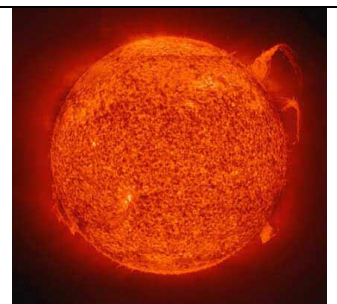
Pour que cette réaction s'amorce et s'entretienne, il est nécessaire d'atteindre une masse critique de matière fissile, de l'ordre de 50 kg pour $^{235}_{92}\text{U}$.

Cette réaction en chaîne peut être contrôlée (dans les réacteurs des centrales nucléaires) par des matériaux qui absorbent les neutrons (modérateurs), ou non : on obtient alors une bombe nucléaire à fission, appelée bombe « A ».

Document 5 : la fusion nucléaire.

Les étoiles sont essentiellement faites de noyaux d'hydrogène. Sous l'effet de la gravitation, ces noyaux d'hydrogène sont compressés au cœur de l'étoile où la température atteint de l'ordre de 10 millions de degrés. Les noyaux d'hydrogène (quatre d'un coup) fusionnent dans ces conditions extrêmes pour former des noyaux d'hélium et d'autres particules, en libérant une quantité d'énergie colossale : de l'ordre de 10^{26} J par seconde ! D'après la relation d'Einstein, cela signifie que, chaque seconde, l'étoile transforme environ 1 million de tonnes de matière... en énergie !

Grâce à cette énergie dégagée, le cœur de l'étoile s'oppose à la force de gravitation, qui tend à l'écraser. L'étoile est donc en équilibre entre la gravitation, compressive, et la fusion nucléaire, expansive.



Le rayonnement « X » du Soleil

Lorsque cet équilibre est rompu, l'étoile se contracte, elle s'effondre sous sa propre masse ; pression et température augmentent, la fusion s'emballe alors et engendre des noyaux de plus en plus lourds, qui s'éparpillent enfin dans l'espace dans une immense explosion : l'étoile meurt. Ainsi l'univers s'enrichit-il, par l'éclatement final d'un nuage incandescent, tel le désert par la pluie.

Loin de cette vaste création céleste, nos amis les humains utilisent l'énergie de la fusion pour détruire leurs atolls, avant de se détruire peut-être, comme en témoigne Castle Bravo.

Castle Bravo ? C'est le nom de la bombe H la plus puissante jamais testée par les États-Unis. D'une puissance de 15 mégatonnes de TNT (1 000 fois plus que les bombes nucléaires larguées sur les villes japonaises d'Hiroshima et Nagasaki le 6 août 1945), l'explosion eut lieu sur l'atoll de Bikini, le 1^{er} mars 1954 lors de l'opération Castle.

L'explosion, à 7 mètres de la surface de l'atoll, laissa un cratère d'environ 2 kilomètres de diamètre et 70 mètres de profondeur.

Le champignon atomique atteignit une altitude de plus de 50 kilomètres en quelques minutes. La boule de feu en elle-même avait un diamètre de 11 kilomètres.



Le champignon atomique de Castle Bravo

Destinée à tester un nouveau prototype de bombe H, la bombe était nommée "crevette" et ressemblait à une citerne de 4,56 m de long pour un diamètre de 1,37 m. Sa masse était de 10 660 kg. Composée à 40 % de lithium et d'uranium, elle a dramatiquement dépassé les prévisions en termes de puissance. Cet effet inattendu fut causé par la présence de lithium-7, un isotope normalement stable mais qui se divise en hélium et tritium lorsqu'il est bombardé avec des neutrons. Le tritium contribua sensiblement à la fusion. L'amorçage de la réaction de fusion fut assuré par une bombe A de 2 kilotonnes.

Avec son diamètre de plus de 100 kilomètres, le nuage radioactif des produits de fission et de fusion contamina une grande partie des atolls aux alentours, de même que les îles Marshall. Un bateau de pêcheurs japonais, le *Daigo Fukuryu Maru* fut contaminé par les retombées et un des membres d'équipage décéda des suites de l'irradiation. Après ce test, une zone d'exclusion fut délimitée autour de l'explosion dans un rayon de 1 200 kilomètres, cela représente environ 1 % de la surface de la Terre. Aujourd'hui, les bombes H ont une puissance de 100 mégatonnes.

Document 6 : le projet ITER

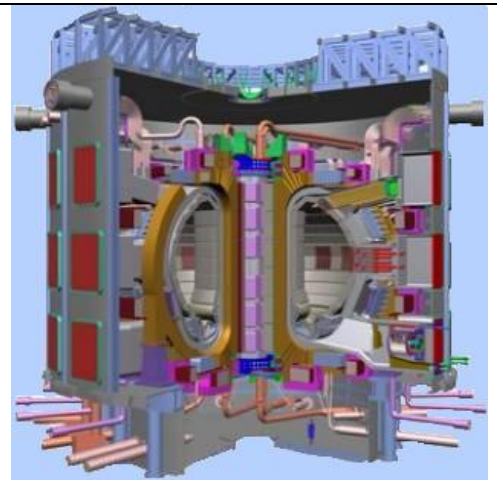
Le projet ITER s'installera prochainement sur le site de Cadarache en France. L'objectif de ce projet est de démontrer la possibilité scientifique et technologique de la production d'énergie par la fusion nucléaire.

La fusion est la source d'énergie du soleil et des autres étoiles. Pour obtenir une réaction de fusion, il faut rapprocher suffisamment deux noyaux qui se repoussent, puisqu'ils sont tous deux chargés positivement. Une certaine énergie est donc indispensable pour franchir cette barrière et arriver dans la zone, très proche du noyau, où se manifestent les forces nucléaires capables de l'emporter sur la répulsion électrostatique.

De plus, une réaction de fusion n'est possible que si elle conduit à des noyaux plus stables. La courbe d'Aston, qui représente l'énergie de liaison par nucléon dans un noyau donné, permet de classer les noyaux en deux catégories : ceux pour lesquels les réactions de fusion sont possibles, et ceux pour lesquels seules les réactions de fissions le sont.

En effet, plus l'énergie de liaison par nucléon est élevée, plus la cohésion du noyau est forte, et donc plus le noyau est stable. La courbe d'Aston révèle que le noyau le plus stable est le fer 56. Cet élément, d'après l'allure de la courbe, représente la frontière entre les éléments qui obtiendraient un gain de stabilité par fusion nucléaire, et ceux qui arriveraient à ce résultat par fission nucléaire.

La réaction de fusion la plus accessible est la réaction impliquant le deutérium et le tritium. C'est sur cette réaction que se concentrent les recherches concernant la fusion contrôlée.



Réacteur du type Tokamak du projet ITER (le personnage en bas donne l'échelle)

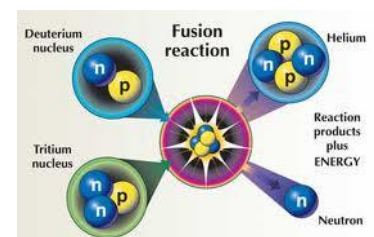


Illustration de la fusion nucléaire