

Fission nucléaire et fusion nucléaire

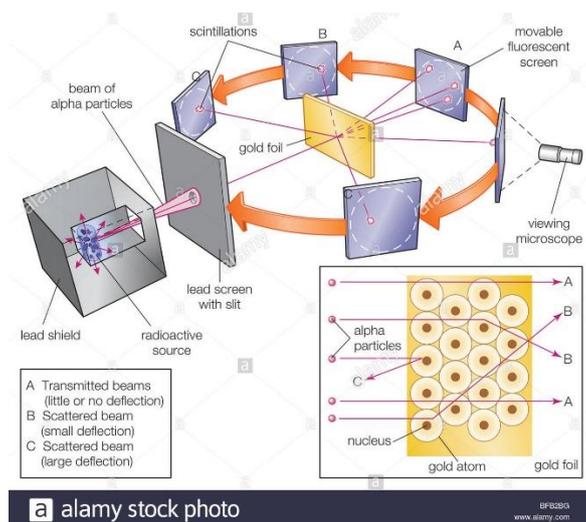
1) Bref historique

1898 : Le physicien néozélandais Ernest Rutherford découvre que la radioactivité émise par un minéral d'uranium est constituée de deux types de rayonnement, qu'il appelle **radioactivité alpha** et **beta**.

1903 : Rutherford et Soddy montrent que le rayonnement alpha est constitué de particules chargées positivement et ayant la masse d'un atome léger tandis que le rayonnement beta est constitué de particules chargées de masse bien plus faible.

1904 : Rutherford et Hans Geiger parviennent à compter une par une les particules alpha émises par un échantillon de radium et en déduisent masse et charge, montrant ainsi que les particules alpha sont des atomes d'hélium ayant perdu leurs électrons.

1911 : Rutherford bombarde une feuille d'or avec des particules alpha et en déduit que l'atome est constitué d'un noyau chargé positivement et de très petite taille, autour duquel gravite un ou plusieurs électrons.



Dispositif de Rutherford – source : Wikipédia

1920 : Arthur Eddington suggère que l'énergie des étoiles est due à la fusion de noyaux d'hydrogène en hélium.

1932 : L'américain James Chadwick découvre le rayonnement de **neutrons** en bombardant du béryllium par un rayonnement alpha selon la réaction : ${}^4\text{He}(\alpha) + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^1_0\text{n}$. S'ensuit une course entre physiciens comme Rutherford, L.Meitner, O.Hahn, E.Fermi, Irène Joliot Curie pour produire des éléments plus lourds que l'uranium.

1934 : Enrico Fermi propose une théorie de la radioactivité beta dans laquelle des neutrinos sont émis

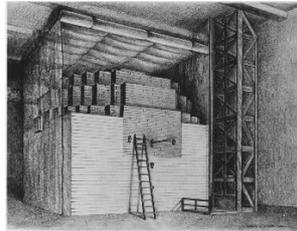
Rutherford réalise la première fusion de noyaux de deutérium en hélium

1935 : L'américain James Chadwick fait la première mesure précise de la masse du neutron

1938 : Hahn et Fritz Strassmann mettent en évidence la présence de baryum en bombardant de l'uranium avec des neutrons

1939 : Lise Meitner et Otto Frisch font l'hypothèse que l'absorption d'un neutron par un noyau d'uranium produit la scission de celui-ci en deux noyaux de tailles approximativement égales et un dégagement important d'énergie.

1942 ; La première pile atomique est créée par E. Fermi avec de l'uranium comme matière fissile et du graphite comme modérateur.



1948 ; La première pile atomique française, Zoé, fonctionne au Fort de Chatillon.



1951 : La première centrale nucléaire à produire de l'électricité entre en service aux Etats unis dans l'Idaho

2001 : Projet ITER international de construction d'une centrale thermonucléaire basée sur la fusion nucléaire et dont l'union européenne est le principal investisseur (45 %).

En laboratoire, un mélange de deutérium et de tritium est utilisé car il est celui qui nécessite le moins d'énergie pour produire les conditions de température (millions de degré) et de pression nécessaires à la fusion.

Dans ITER, ces conditions seront obtenues par confinement magnétique dans un Tokamak



Le Tokamak, réacteur dans lequel se produira la fusion nucléaire dans le projet ITER

2) La fission nucléaire

Définition :

La fission nucléaire est une réaction par laquelle le noyau d'un atome qualifié de noyau père se scinde en noyaux de masses plus faibles qualifiés de **noyaux fils** avec production de chaleur et de rayonnements de type alpha, beta, X, ou gamma ou autre (ex : neutrinos)

La fission nucléaire peut être **spontanée** ou **induite**. Dans le premier cas, un noyau se désintègre de lui-même en deux noyaux fils sans pour autant avoir absorbé de particule (un neutron par exemple) au préalable. Dans le second cas, la fission provient de l'absorption d'une particule (neutron dans le cas des réactions mises en œuvre dans les réacteurs à fission).

Exemples :

Un atome d'uranium 235 peut donner, par absorption d'un neutron lent, du krypton et du baryum ainsi que trois neutrons rapides. Les neutrons rapides peuvent à leur tour être captés par d'autres atomes d'uranium 235 et produire une fission, mais à condition d'être beaucoup plus lents. C'est pourquoi on intègre dans les réacteurs à fission un modérateur qui était du graphite dans la première pile atomique américaine et qui est de l'eau pressurisée dans les réacteurs modernes, notamment français (filiale REP : réacteurs à eau pressurisée)

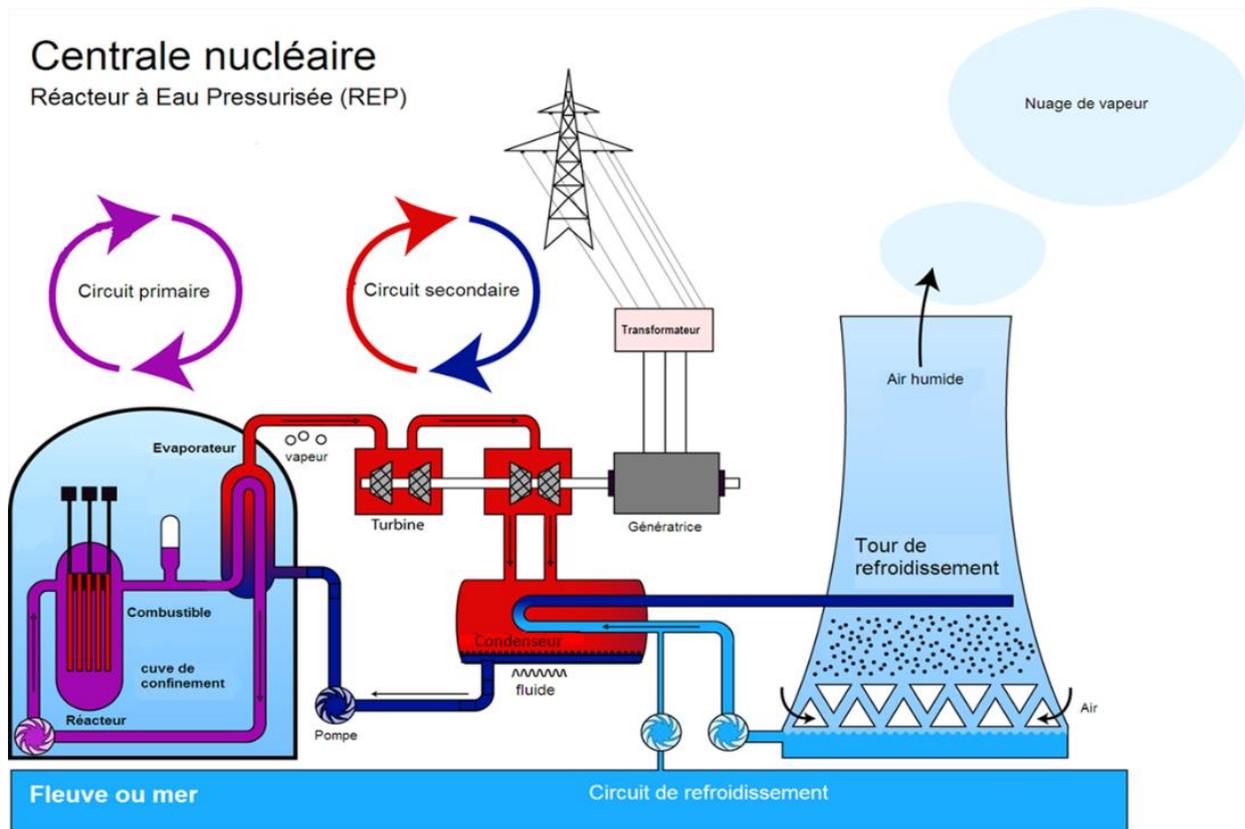
Applications :

a) La centrale nucléaire

Une centrale nucléaire utilise un réacteur nucléaire pour chauffer l'eau d'un circuit primaire, laquelle échange de la chaleur dans un générateur de vapeur avec l'eau d'un circuit secondaire afin d'éviter toute contamination. La vapeur du circuit secondaire entraîne une turbine solidaire du rotor d'un alternateur, lequel produit de l'électricité. Une tour de refroidissement assure la condensation des vapeurs en sortie de turbine par échange de chaleur avec un circuit tertiaire alimenté par l'eau d'un fleuve.

Centrale nucléaire

Réacteur à Eau Pressurisée (REP)



Le chauffage de l'eau du circuit primaire est produit pour la plus grande part par la fission nucléaire de l'uranium 235 et pour une autre part par la fission du Plutonium 239 engendré par l'uranium 238 par capture neutronique.

Ce qu'on appelle improprement le « combustible » car il n'y a pas de combustion, est constitué de pastilles constituées d'un mélange d'oxydes d'uranium 235 et 238 ou bien en plus d'oxyde de plutonium. On parle de MOX dans ce dernier cas.



Pastilles de combustible

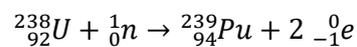
L'uranium 235 est peu abondant dans le minerai contenant de l'uranium, l'isotope 238 étant le plus représenté, à raison d'environ 7 atomes d'uranium 235 pour 1000 atomes d'uranium 238.

Il faut donc procéder à un enrichissement de la teneur en uranium 235 dans une batterie de centrifugeuses afin de constituer les pastilles de combustible.



Batterie de centrifugeuses en séries

Si l'uranium 235 est fissile, l'uranium 238 ne l'est pas. En revanche, il génère par capture d'un neutron lent, un produit fissile, le plutonium 239, par la réaction :

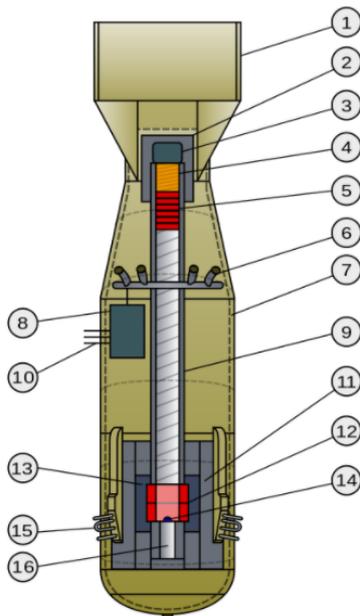


L'uranium 238 est ainsi dit fertile. Il participe pour un tiers à l'énergie produite dans une centrale nucléaire de façon indirecte par l'intermédiaire du plutonium 239 ainsi généré.

Il servait également à produire du plutonium 239 employé dans la conception des ogives nucléaires. Le démantèlement des armes nucléaires ayant conduit à disposer de stocks de plutonium 239, celui-ci a été depuis intégré sous forme d'oxyde dans le combustible de nombreuses centrales nucléaires appelé Mox. C'était le cas pour la centrale de Fukushima qui a explosé en 2011.

b) La bombe atomique

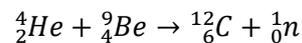
La première bombe atomique appelée Little Boy fut larguée en 1945 sur la ville d'Hiroshima au Japon. Un explosif traditionnel (cordite) propulsait un élément sous critique en uranium 235 (5) sur une cible également sous critique en uranium 235 (12) afin de réaliser par insertion une masse critique laquelle permet les conditions de l'explosion après initiation de la réaction par des neutrons.



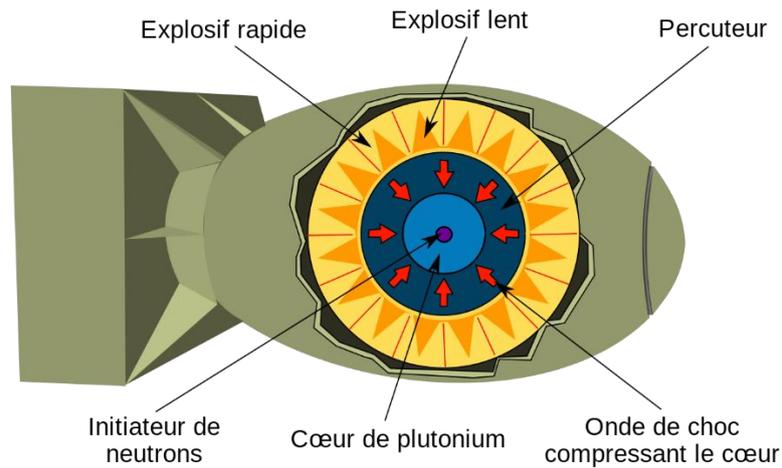
1. Aileron stabilisateur
2. Fût en acier
3. Détonateur
4. Charge explosive (cordite)
5. Projectile en uranium 235, six anneaux dans une fine boîte en acier (poids total : 26 kg)
6. Entrées pour les instruments de mesure et le baromètre
7. Enveloppe de la bombe
8. Fusible et dispositif d'armement
9. Canon en acier d'environ 10 cm de diamètre et 2 m de long
10. Câbles d'armement
11. Fût de réception en acier
12. Cible en uranium 235, deux anneaux d'un total de 38 kg
13. Réflecteur en [carbure de tungstène](#)
14. Initiateur de neutrons
15. Antennes du radar *Archie*
16. Cavité destinée à recevoir le cylindre de sécurité en [bore](#)

Source : Wikipédia

L'initiateur de neutrons utilisé pour déclencher la réaction en chaîne dans une bombe atomique peut être un mélange de Polonium et de Béryllium. Le Polonium émet des particules alpha (noyaux d'hélium) par radioactivité lesquelles réagissent avec les atomes de Béryllium selon la réaction déjà décrite plus haut dans l'historique :



Une seconde bombe atomique appelée « Fat man » et larguée sur la ville de Nagasaki était au plutonium 239 car la première bombe présentait entre autres des problèmes de sécurité (en cas de crash de l'avion porteur, la réaction pouvait s'amorcer). Son principe, qui est le même employé dans les ogives des missiles nucléaires modernes, consiste en une sphère de plutonium sous critique entourée d'explosifs conventionnels. La parfaite synchronisation du déclenchement de ces explosifs, point technique très délicat, produit une onde de choc qui comprime la sphère et la rend critique.



3) La fusion nucléaire

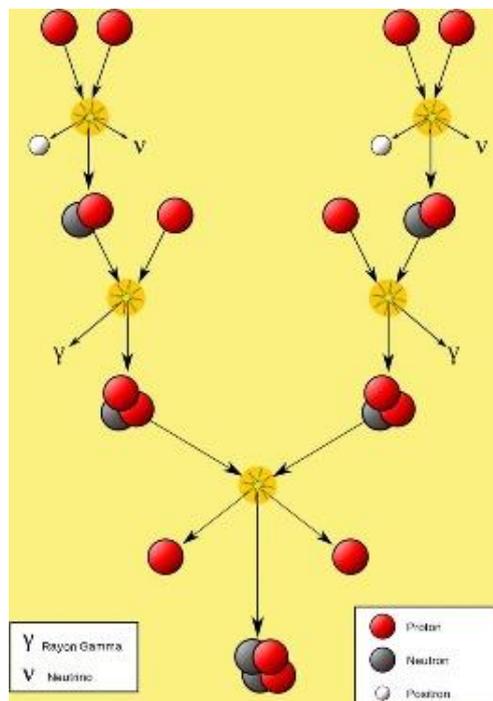
Définition :

La fusion nucléaire est une réaction par laquelle deux noyaux plus légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd avec libération d'une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur et de rayonnements.

Exemples

La fusion nucléaire est le mécanisme mis en œuvre dans le soleil pour produire de l'énergie, en son cœur, laquelle se trouve rayonnée à sa surface.

Elle peut se résumer par la chaîne de réactions suivantes :

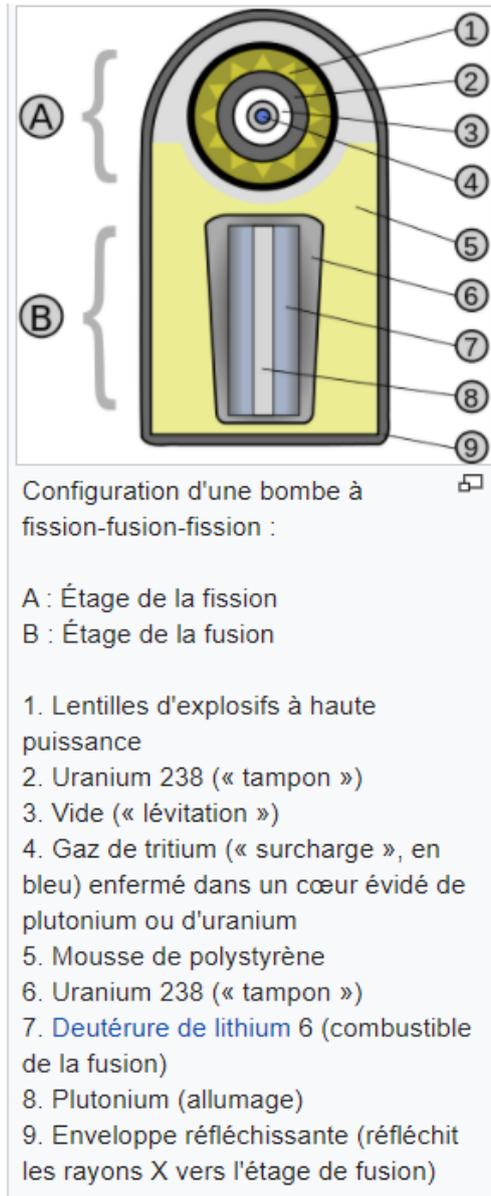


où quatre atomes d'hydrogène se voient assemblés en un atome d'hélium

Applications de la fusion nucléaire

a) La bombe H

La bombe H ou thermonucléaire ou à hydrogène est une bombe qui utilise l'énergie produit par une bombe atomique au plutonium pour déclencher par la température atteinte (des millions de degrés) la fusion nucléaire d'un mélange contenant deutérium, tritium et lithium.



b) Le projet ITER

Ce projet regroupant plusieurs pays dont la France, d'un coût d'environ 20 milliards d'euros, a pour but de faire fonctionner une centrale à fusion nucléaire en créant un mélange de deutérium et tritium à l'état ionisé (plasma) à des températures de l'ordre de 150 millions de degrés soit environ dix fois la température au cœur du Soleil. La technique suppose d'assurer un confinement total de ce plasma en disposant des électroaimants surpuissants parcourus par des courants de l'ordre du dizaine de milliers d'ampère (à des températures d'environ -270°C) afin de générer des champs magnétiques

très intenses (5 à 10 Teslas environ) et ramener les particules chargées qui tenteraient de s'en échapper dans le plasma.

La construction a démarré en 2007 en France à Cadarache dans les Bouches du Rhône et en 2019, le réacteur était à 60 % achevé. Les premiers résultats sont attendus entre 2030 et 2035. ITER n'est qu'un projet de réacteur expérimental qui devrait être suivi par le développement d'un réacteur de production puis un prototype industriel.

4) Loi de Soddy

Frederick Soddy est un physicien anglais qui établit une loi permettant de décrire les trois types de transformations nucléaires :

- La désintégration radioactive
- La fission nucléaire
- La fusion nucléaire

Cette loi s'énonce ainsi :

Dans une réaction nucléaire, il y a conservation du nombre de masse et conservation de la charge

Elle permet d'écrire les équations décrivant une transformation nucléaire, qui peuvent être des équations décrivant une transformation intermédiaire ou bien un bilan de la transformation.

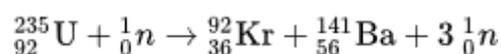
L'application de cette loi suppose adopter les conventions suivantes de notation pour les divers types de rayonnement :

- Rayonnement alpha de noyaux d'hélium : ${}^4_2\text{He}$
- Rayonnement beta moins d'électrons : ${}^0_{-1}\text{e}$ (convention qui se justifie par le fait qu'un électron a une masse négligeable devant celle d'un nucléon) et une charge élémentaire $-e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Rayonnement beta plus de positrons : ${}^0_1\text{e}$ (convention qui se justifie par le fait qu'un positron a une masse négligeable devant celle d'un nucléon) et une charge $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Rayonnement de neutrons : ${}^1_0\text{n}$ (convention qui se justifie par le fait qu'un neutron contribue pour 1 nucléon dans la masse et n'a pas de charge)
- Rayonnement de protons : ${}^1_1\text{p}$ ou ${}^1_1\text{H}$ (convention qui se justifie par le fait qu'un proton contribue pour 1 nucléon dans la masse et a une charge e)

D'autres types de rayonnement peuvent figurer dans les équations, mais ils n'interviennent pas dans la loi de Soddy car ils ne sont pas associés à des particules ayant une masse (ex : X, gamma, neutrinos)

Exemples :

Fission nucléaire de l'uranium 235 :

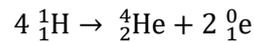


La loi de Soddy traduit que la somme des nombres de masse des réactifs (ici : 235+1) est égale à la somme des nombres de masse des produits (ici : 92+141+3×1) et que la somme des charges des réactifs (ici : 92+0) est égale à la somme des charges des produits (ici : 36+56+3×0)

On n'a pas fait apparaître les rayonnements X ou gamma accompagnant ce type de réactions.

Fusion de l'hydrogène en hélium dans le soleil :

L'équation bilan est :

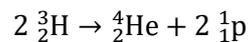
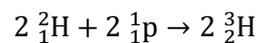
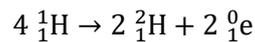


La loi de Soddy exprime les égalités :

Conservation du nombre de masse : $4 \times 1 = 4 + 2 \times 0$

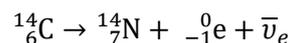
Conservation de la charge : $4 \times 1 = 2 + 2 \times 1$

Mais la réaction est le résultat de trois transformations intermédiaires



dans lesquels deux protons ont été captés puis rendus au milieu ambiant de même que deux isotopes de l'hélium ont été produits puis ont disparu par fusion.

Désintégration radioactive du carbone 14 :



La loi de Soddy exprime les égalités :

Conservation du nombre de masse : $14 = 14 + 0$

Conservation de la charge : $6 = 7 - 1$

Dans l'équation, on a fait apparaître l'émission d'un neutrino $\bar{\nu}_e$, sans masse et sans charge