

# LP.42 Fusion, fission

Maria Ubero Gonzalez

6 mai 2020

## Table des matières

|          |                                       |           |
|----------|---------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Le noyau atomique</b>              | <b>2</b>  |
| 1.1      | Cohésion du noyau . . . . .           | 2         |
| 1.2      | Stabilité des noyaux . . . . .        | 3         |
| 1.3      | Modèle de la goutte liquide . . . . . | 4         |
| <b>2</b> | <b>Fission</b>                        | <b>6</b>  |
| 2.1      | Fission induite . . . . .             | 8         |
| 2.2      | Centrales nucléaires . . . . .        | 8         |
| <b>3</b> | <b>Fusion</b>                         | <b>12</b> |
| 3.1      | Principe . . . . .                    | 12        |
| 3.2      | Fusion contrôlée . . . . .            | 13        |

## Rapport du jury

**2017.** Un exposé purement descriptif des réactions de fusion et de fission nucléaires est insuffisant.

### Bibliographie :

- Relativité. J.Ph. Pérez.
- Le monde subatomique. L. Valentin.
- Physique nucléaire. Sech & Ngô.

### Pré-requis :

- Interactions fondamentales.
- Bases de relativité,  $E = mc^2$ .
- Electrostatique, interaction coulombienne.
- Radioactivité  $\alpha$  et  $\beta$ .
- Effet tunnel.

### Objectif.

## Introduction

L'énergie nucléaire est à la fois la plus ancienne forme d'énergie dans l'univers, à l'origine notamment de la formation des étoiles, et la plus mal maîtrisée actuellement par l'homme. L'objet de cette leçon est de comprendre quelle forme prend l'énergie disponible dans le noyau, et quels sont les mécanismes permettant de la récupérer. Nous aborderons notamment la question des technologies d'exploitation de l'énergie nucléaire actuelles et futures.

## 1 Le noyau atomique

### 1.1 Cohésion du noyau

Le noyau d'un atome est constitué de neutrons de charge électrique nulle et de protons de charge électrique positive. En effet les seules particules chargées dans le noyau sont des protons. Leur répulsion coulombienne ne peut rendre compte d'une liaison. Quant à l'interaction gravitationnelle, qui, elle, est attractive, son intensité est beaucoup trop faible pour assurer la liaison observée. Exemple : Energie de liaison du deutérium :  $2,23\text{MeV}$  si les deux nucléons qui le composent étaient à 1 fermi l'un de l'autre, la liaison gravitationnelle :

$$V = G \frac{m^2}{r} \approx 10^{-30} \text{ eV} \quad (1)$$

Puisque l'énergie de liaison observée (environ  $8 \text{ MeV}$ ) est environ  $10^{37}$  fois plus élevée, il est nécessaire d'invoquer un autre type d'interaction pour assurer la stabilité nucléaire. C'est précisément l'interaction nucléaire par une portée de l'ordre du fermi. On met en évidence son intensité

spectaculaire, environ  $10^{40}$  fois plus élevée que l'intensité de l'interaction gravitationnelle et environ 1000 fois plus importante que celle de l'interaction électromagnétique.

Cette interaction est la plus intense des interactions connues à ce jour et on l'a découvert très tardivement car le potentiel de cette interaction forte est de portée quasiment nulle à l'échelle atomique, elle s'exerce entre deux noyaux au centre des atomes et donc situés à environ  $10^{-8}$  cm l'un de l'autre.

## 1.2 Stabilité des noyaux

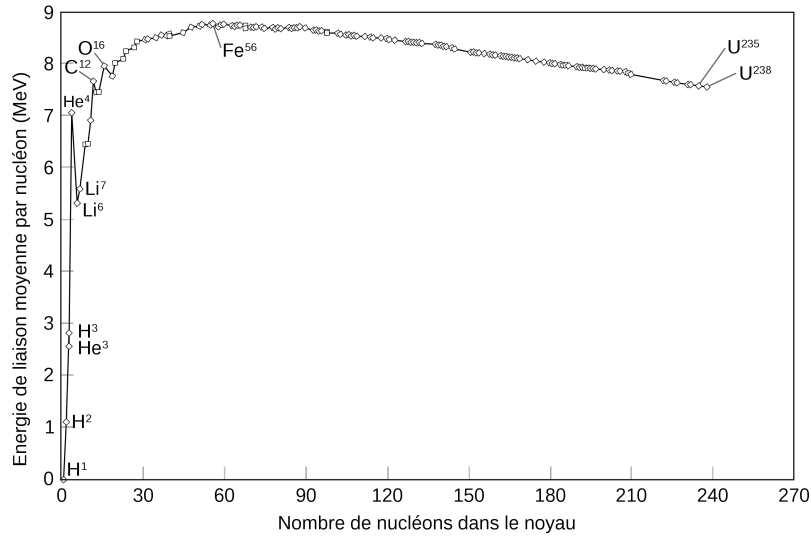
Un noyau stable est un système lié de  $A$  nucléons. Il faut donc lui fournir de l'énergie pour le réduire en ses constituants et l'on peut en conclure que dans un tel système les interactions attractives entre nucléons l'emportent sur les interactions répulsives. Cette dominance a pour effet de donner à l'état lié une masse inférieure à la somme de masses de ses constituants. S'il n'en était pas ainsi, le noyau libérerait son excès d'énergie en évoluant spontanément vers l'état d'énergie moins élevé qui représenterait la somme de ses constituants sans interaction, donc libres.

On peut écrire l'énergie totale d'un noyau ( $Z$  numéro atomique,  $A$  nombre de masse) :

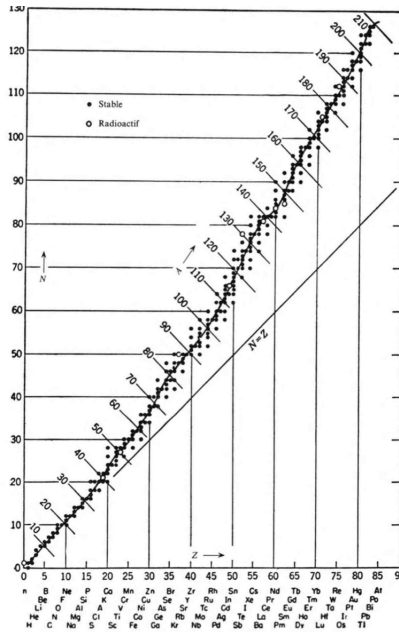
$$\boxed{M(A, Z)c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - E_l(A, Z)} \quad (2)$$

où  $M$  est la masse du noyau et  $E_l$  l'énergie de liaison de ce noyau, positive.

L'expérience montre que plus les noyaux comportent de nucléons, plus leur énergie de liaison est élevée. L'énergie de liaison par nucléon, définie par  $\frac{E_l}{A}$  en première approximation est de l'ordre de  $8 \text{ MeV}$ . Comme l'indique la figure suivante (courbe d'Asron), ce n'est qu'une approximation qui reste correct pour les noyaux moyens et lourds mais il est instructif de la comparer aux ordres de grandeur de l'énergie de liaison de la matière qui nous environne. Alors que pour séparer deux constituants de cette matière (rompre une liaison chimique), il faut au plus quelques électron-volts (liaison covalente), pour arracher un nucléon du noyau il faut environ  $8 \text{ MeV}$ , soit  $10^6$  fois plus d'énergie. On conçoit aisément que l'on se soit employé à domestiquer l'énergie nucléaire puisqu'on pouvait attendre à récupérer autant d'énergie par combustion nucléaire d'un gramme de matière que par combustion chimique de 10 tonnes. Pour effectuer cette combustion, on connaît aujourd'hui la fission de noyaux lourds en noyaux légers, ainsi que la fusion de deux noyaux légers en un noyau plus lourd.



S'il n'y avait que l'interaction forte, alors le nombre de neutrons serait égal au nombre de protons. Ligne de stabilité. Le fait d'avoir une repulsion coulombienne, plus il y a de protons plus le noyau sera riche en neutrons.



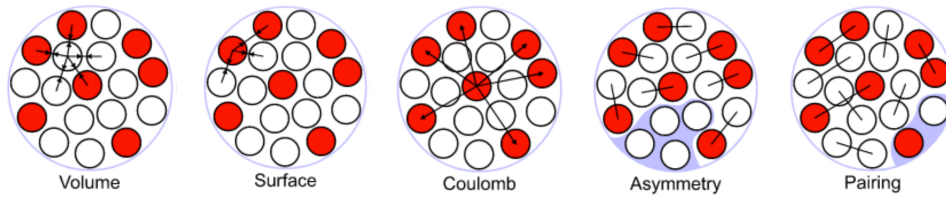
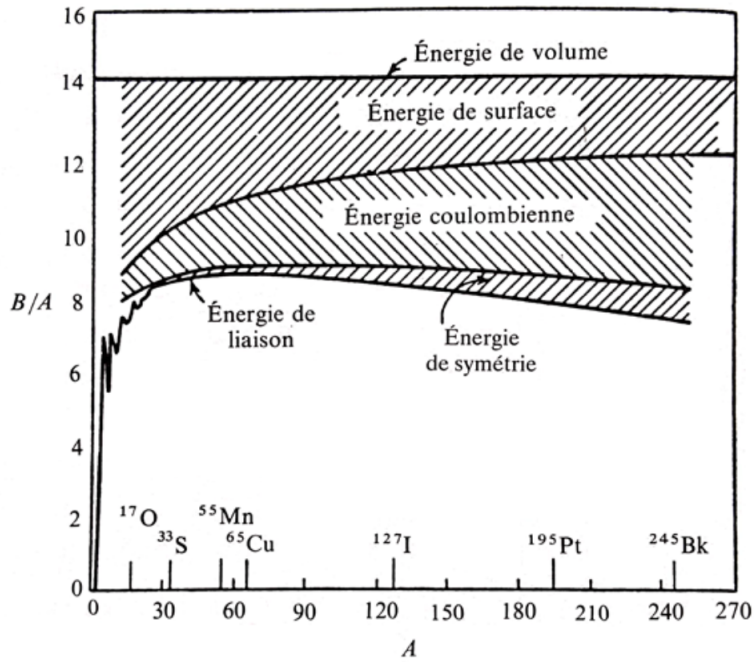
Pour les faibles valeurs de  $Z$  les noyaux cités ont approximativement autant de neutrons que de protons, droite ( $Z=N$ ). Par contre les noyaux moyens et lourds présentent un excès de neutrons ( $N>Z$ ) d'autant plus marqué que  $Z$  est grand.

### 1.3 Modèle de la goutte liquide

Ce modèle de noyau, dit de goutte liquide a été proposé par le physicien allemand C. von Weisacker en 1935, dans le but de prévoir la nature des produits de fission des noyaux lourds. Dans ce cas il répertorie cinq contributions différentes à l'énergie de liaison d'un noyau :

$$E_l = a_V A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta = \epsilon_{l,V} + \epsilon_{l,s} + \epsilon_{l,e} + \epsilon_{l,a} + \epsilon_{l,p} \quad (3)$$

- $\epsilon_{l,V} = a_V A$  est l'énergie associée à l'ensemble des nucléons regroupés dans un volume sphérique
- $\epsilon_{l,s} = -a_s A^{2/3}$  est la contribution des nucléons se trouvant à la surface du noyau ; ces nucléons ont moins de nucléons autour d'eux : l'énergie de liaison en surface est plus petite que dans le volume. La surface d'un noyau de rayon  $R$  est  $S = 4\pi R^2 = 4\pi r_0^2 A^{2/3}$ . Le nombre de nucléons situés en surface est proportionnel à  $A^{2/3}$ .
- $\epsilon_{l,s} = -a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$  est la contribution de l'interaction coulombienne (protons charges positives, ils ont tendance à se repousser). Cette interaction est de longue portée contrairement à la force nucléaire. L'énergie coulombienne d'une sphère de rayon  $R$  et de charge  $Ze$  est  $Cte \cdot \frac{(Ze)^2}{R}$ , comme  $R = r_0 A^{1/3}$ , le terme coulombien, qui diminue l'énergie de liaison, est proportionnel à  $Z^2/A^{1/3}$ .
- $\epsilon_{l,a} = -a_a \frac{(A-2Z)^2}{A}$  est le terme d'asymétrie. Il vient de ce que, pour les noyaux lourds, le nombre de neutrons est supérieur à celui des protons pour compenser la en partie la répulsion coulombienne de ces derniers. Or, l'interaction nucléaire préfère qu'il y ait un nombre égal de protons et de neutrons. l'excès de neutrons par rapport aux protons se traduit par une diminution de l'énergie de liaison proportionnelle à la différence entre le nombre de neutrons ( $N = A - Z$ ) et le nombre de protons  $Z$  ; donc  $(A - 2Z)$ . Ce terme d'asymétrie est aussi inversement proportionnel à la masse du noyau. En effet pour un même excès de neutrons, la diminution d'énergie de liaison sera d'autant plus faible que le noyau contient un grand nombre de nucléons. Le terme d'asymétrie est plus important pour les noyaux légers que pour les noyaux lourds.
- $\epsilon_{l,p} = \delta$ . Ce terme est une correction provenant du fait que les nucléons ont tendance à s'apparier. Lorsqu'ils peuvent le faire, la configuration est plus stable :
  - $\delta = 0$  pour les noyaux pair-impair ou impair-pair ( $A$  impair)
  - $\delta = a_p \frac{1}{A^{1/2}}$  pour les noyaux pair-pair ( $Z$  et  $(A - Z)$  pairs)
  - $\delta = -a_p \frac{1}{A^{1/2}}$  pour les noyaux impair-impair ( $Z$  et  $(A - Z)$  impairs)



Valeurs des coefficients (en MeV) :

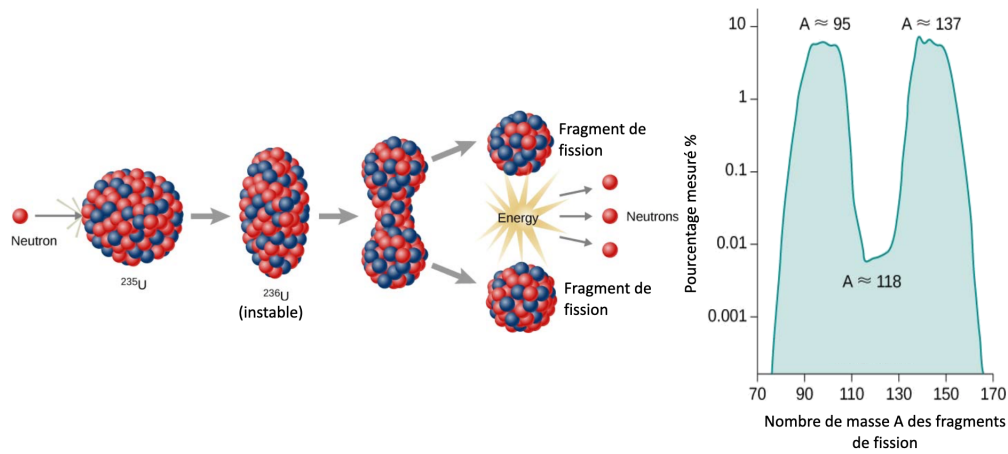
$$a_V = 15,5 - a_S = 17,23 - a_C = 0,7 - a_a = 23,3 - a_P = 12$$

## 2 Fission

La fission a été découverte accidentellement alors que les chercheurs essayaient de produire des éléments transuraniens en bombardant de l'uranium naturel avec des neutrons. O. Hahn et F. Strassmann ont montré, en 1939, qu'on obtenait des éléments plus légers, de masse moyenne, comme le baryum, par exemple.

Ce phénomène est énergétiquement possible dès que  $A > 100$  et ne devient dominant par rapport aux autres types de radioactivité que lorsque  $A > 270$ .

Il existe deux types de fission, la fission spontanée et la fission induite.



## Fission spontanée

Par exemple, la probabilité de fission spontanée de l'uranium 238 est d'un million plus faible que celle de l'émission alpha. Il y a plusieurs possibilités de cassure en deux morceaux :

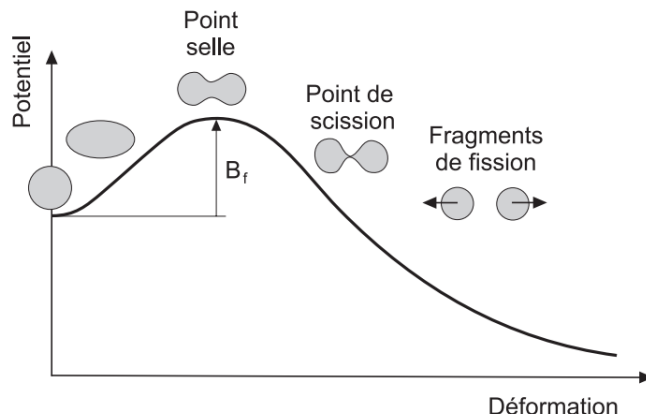


En 1939, L. Meitner et H. Frisch ont expliqué le phénomène de fission grâce au modèle à goutte liquide.

On considère une goutte qui se déforme légèrement pour donner lieu à un ellipsoïde. Avec cette déformation, l'énergie coulombienne diminue mais l'énergie de surface augmente puisque la surface augmente. Si la variation d'énergie est par rapport à la sphère initiale inférieure à 0, alors la déformation est possible et le noyau est instable vis-à-vis de la fission. On obtient la condition :

$$\frac{Z^2}{A} > \frac{2a_c}{a_s} \approx 49 \quad (5)$$

où  $\frac{Z^2}{A}$  est le **paramètre de fissilité**. Si la condition précédente est vérifiée, le noyau fissionne avec une très grande probabilité. À cause des effets quantiques, certains noyaux ayant un paramètre de fissilité plus faible (jusqu'à 35 par exemple) peuvent fissionner spontanément mais avec une probabilité beaucoup plus faible.



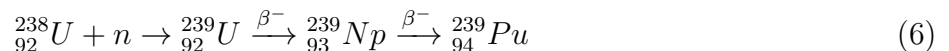
Pour fissionner, ce noyau doit franchir une barrière, la **barrière de fission** qui correspond à une énergie d'activation. Comme pour l'émission  $\alpha$ , il faudra de nombreuses tentatives avant de franchir cette barrière par effet tunnel sauf si l'énergie est suffisamment haute pour la franchir classiquement. Dans le cas de l'uranium 236 il faut environ 6 MeV pour franchir la barrière de fission.

## 2.1 Fission induite

Lorsqu'un neutron pénètre dans l'uranium 235 sans autre énergie que l'énergie thermique, l'apport de son énergie de séparation est suffisant pour que le noyau composé formé d'uranium 236 se déforme et finisse par se rompre en deux fragments plus légers. Les voies de rupture sont multiples mais les plus fréquentes conduisent à deux fragments de masse inégales. Il s'agit de ce que l'on appelle la fission asymétrique. Les deux fragments produits quels qu'ils soient, sont riches en neutrons et donc, en règle générale, émetteurs  $\beta^-$ .

L'uranium 236 formé après capture d'un neutron thermique par l'uranium 235 possède une énergie d'excitation de 6,42 MeV ce qui est supérieur à sa barrière de fission (fission provoquée par neutrons thermiques). La capture d'un neutron par l'uranium 238 conduit à la formation d'un noyau 239 possédant une énergie d'excitation de 4,76 MeV. Celle-ci est inférieure à la barrière de fission de l'uranium 239 (environ 5,7 MeV). Néanmoins, la fission pourra survenir si le neutron incident apporte un complément d'énergie sous forme cinétique : c'est la fission provoquée par neutrons rapides. [A savoir. L'intérêt d'utiliser des neutrons lents \(ou thermiques\) est d'avoir de grandes sections efficaces de capture à cause des effets quantiques \( \$\lambda\$  est grand devant la taille du noyau\).](#)

Les noyaux subissant une fission après capture de neutrons thermiques sont dits noyaux **fissiles** et sont en nombre très limité. On utilise l'uranium 235 car il présente l'avantage d'être le seul existant à l'état naturel (présent à 0,72% dans l'uranium). On peut par exemple citer un autre fissile, l'isotope plutonium 239 que l'on peut former après capture d'un neutron par l'uranium 238. La chaîne de production s'écrit :



On appelle dans ce cas l'isotope d'uranium 238 noyau **fertile** car il donne lieu, après capture d'un neutron, à la formation d'un noyau fissile.

Plus généralement, on constate que les noyaux lourds ayant un nombre impair de neutrons sont fissiles, par exemple :  ${}_{90}^{229}\text{Th}$ ,  ${}_{92}^{233}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ,  ${}_{93}^{238}\text{Np}$  ou  ${}_{94}^{241}\text{Pu}$ . Les noyaux ayant un nombre pair de neutrons sont fertiles, par exemple :  ${}_{90}^{232}\text{Th}$ ,  ${}_{92}^{234}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{238}\text{U}$  ou  ${}_{94}^{238}\text{Pu}$ .

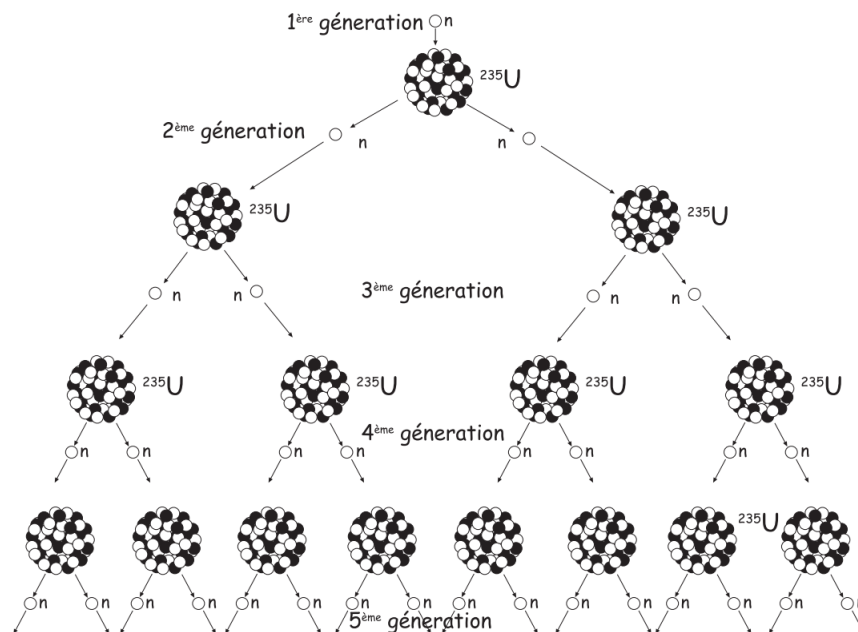
## 2.2 Centrales nucléaires

Le but d'une centrale nucléaire est de produire de l'électricité. La fission produit de la chaleur qui est utilisée pour chauffer de l'eau et fabriquer de la vapeur. Cette dernière est utilisée dans une turbine pour produire de l'énergie mécanique qui est transformée en électricité avec un alternateur.



En effet, la rupture en deux fragments s'accompagne d'une émission statistique de neutrons rapides (énergie cinétique moyenne de  $2 \text{ MeV}$  soit une vitesse d'environ  $20000 \text{ km/s}$  ( $v(\text{km/s}) = 0,13\sqrt{T(K)}$ )), quelque fois un seul, souvent 2, 3 ou 4, rarement 5 ou 6. Par exemple, leur nombre moyen est de 2,47 et 2,89 pour l'uranium 235 et le Pu 239. Les neutrons ainsi produits ont une certaine probabilité de provoquer à leur tour une fission, tous les neutrons produits lors de la fission n'introduisent pas nécessairement une nouvelle fission, ils peuvent s'échapper du milieu si la taille de celui-ci est trop petite ou être capturés par d'autres noyaux présents dans le milieu. Suivant la nature du milieu et sa géométrie, d'une génération à la suivante, leur nombre est multiplié par un facteur  $k$  (coefficient de multiplication neutronique). Trois cas se présentent :

- Si  $k > 1$  le milieu est **surcritique** : le nombre de neutrons croît exponentiellement.
- Si  $k < 1$  le milieu est dit **sous-critique** et les réacteurs de fission s'arrêtent spontanément.
- Si  $k = 1$  le milieu est dit **critique**.



**Première réacteur nucléaire créé par l'homme 1942 Chicago, Enrico Fermi. REGARDER.**

L'énergie totale libérée dans le cas de la fission de  $^{235}_{92}\text{U}$  est de  $210 \text{ MeV}$ . Environ 80% de l'énergie libérée lors de la fission est emportée sous forme cinétique par les fragments de fission, et se trouve donc récupérable sous forme thermique. Les fragments étant excités, ils se déséxcitent par radioactivité  $\beta$  et  $\gamma$  également récupérable à l'énergie des neutrinos près et c'est essentiel pour l'exploitation industrielle, par émission de neutrons.

Les réacteurs utilisés au niveau industriel sont des réacteurs à neutrons lents, ce qui signifie qu'on exploite la fission des noyaux  $^{235}_{92}\text{U}$ . Comme les neutrons émis lors de la fission sont rapides, on utilise un **modérateur** pour les ralentir et les thermaliser (par collisions élastiques sur les noyaux du modérateur). Un bon modérateur ne doit pas absorber trop les neutrons car il faut qu'il en reste un nombre suffisant pour entretenir la réaction en chaîne.

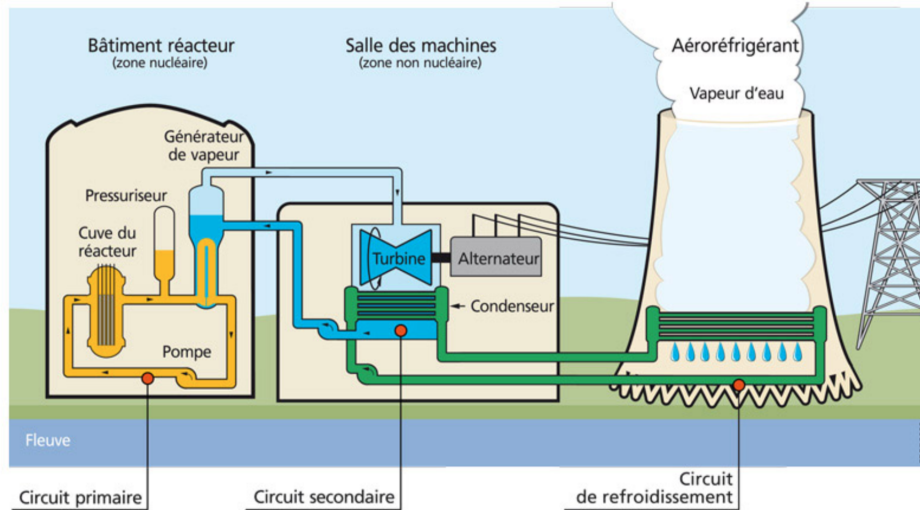
Parmi les modérateurs utilisés : l'eau lourde  $D_2O$  (coût élevé), l'eau légère (système plus efficace mais absorbe plus les neutrons ce qui nécessite d'utiliser un combustible enrichi en  $^{235}_{92}U$ ), le graphite est aussi une possibilité car il est assez transparent aux neutrons, son inconvénient est de ne pas pouvoir simultanément servir de fluide caloporteur pour extraire la chaleur du coeur du réacteur.

La plus part de réacteurs (environ 90%) sont des réacteurs à eau. L'eau joue à la fois le rôle de modérateur et de caloporteur. Parmi ceux-ci les plus nombreux (trois quarts) sont les réacteurs à eau sous pression REP ou **PWR**, *pressurized water reactor* avec deux circuits, mais il existe aussi des réacteurs bouillants **BWR** *boiling water reactor* où il n'y a qu'un circuit. D'autres types de réacteurs comme les CANDU canadiens utilisent de l'eau lourde comme modérateur et le plus souvent comme caloporteur. Les réacteurs graphite-eau bouillante (RMBK) appartiennent à une filière spécifique à l'ancienne Union Soviétique. Le réacteur de Tchernobyl appartenait à cette catégorie. En France les réacteurs utilisés sont les REP.

**Remarque.** Accident à Fukushima, 11 mars 2011, séisme, tsunami qui endommage 4 des 6 réacteurs. Des explosions d'hydrogène libéré lors de l'interaction entre le coeur en fusion (corium) et le béton ont volatilisé le haut de trois bâtiments réacteurs ce qui a entraîné la fuite de produits radioactifs. Les réacteurs étaient de type BWR. Les PWR ont une enceinte capable de confiner l'hydrogène lorsque celui-ci est produit et d'éviter les explosions d'hydrogène. Ce n'est pas le cas des BWR.

Dans les réacteurs à eau sous pression français on distingue le circuit primaire qui contient le coeur du réacteur dans une cuve en acier de forte épaisseur et un circuit fermé, *le circuit primaire*, où l'eau circule sous pression, donc sous forme liquide. L'eau sert à la fois de modérateur et de caloporteur pour extraire la chaleur du coeur qui est à une température d'environ  $300^\circ C$  en fonctionnement. La chaleur du circuit primaire est transmise à un circuit secondaire (isolé en termes de transfert de matière pour éviter toute contamination) grâce à un échangeur de chaleur : le générateur de vapeur. La vapeur produite alimente une turbine qui entraîne un alternateur pour produire de l'électricité. En sortie de turbine, la vapeur est refroidie, condensée et renvoyée dans le générateur de vapeur. Le rendement de ce type de réacteur est d'environ 33% ce qui signifie que l'on rejette  $2kWh$  de chaleur dans l'environnement lorsqu'on produit  $1kWh$  d'électricité.

### Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire avec aéroréfrigérant



Un réacteur nucléaire doit fonctionner à régime proche du régime critique et sa **puissance doit être contrôlée**. Il y a plusieurs méthodes pour cela, certaines actives, d'autres passives.

- Barres de contrôle. Ce sont le principal moyen de contrôler la réactivité d'un réacteur. Elles sont constituées d'un matériau fortement absorbant vis à vis de neutrons. C'est le cas du cadmium ou gadolinium pour les réacteurs thermiques ou de l'acier pour les réacteurs rapides.
- Poisons neutroniques. Lorsqu'un réacteur à neutrons lents fonctionne, le combustible s'appauvrit petit à petit en matière fissile et s'enrichit en produits de fission donc certains sont des poisons pour la fission car ils ont une grande section efficace de capture neutronique. La réactivité diminue donc au cours du temps et pour compenser cet effet on incorpore un poison neutronique consommable qui est petit à petit consommé lors du fonctionnement du réacteur en augmentant la réactivité. S'il est bien dosé cette augmentation compensera la diminution due à l'apparition des poisons neutroniques. On utilise comme poison consommable de l'acide borique, mélangé à l'eau.
- Coefficient de vide. L'augmentation de la température a aussi pour effet, lorsque le modérateur est liquide, de diminuer la densité du modérateur et donc le rapport de modération. Lorsque le coefficient de vide est négatif (réacteurs à eau pressurisée), la réactivité diminue ce qui va dans le sens de stabiliser le réacteur. Si ce coefficient est positif, la réactivité augmente avec la possibilité d'emballement du réacteur (c'est le cas du réacteur RMBK à Tchernobyl).
- L'effet Xénon. Au cours du fonctionnement du réacteur, on obtient parmi les produits de fission du Xenon 135. Ce noyau est caractérisé par une très grande section efficace de capture neutronique. Lorsque le réacteur est en fonctionnement il s'établit un équilibre entre la production de Xenon 135 et sa destruction par les neutrons : sa concentration est alors très faible. Lorsqu'on arrête le réacteur, le Xenon continue à se produire mais il n'est plus détruit et s'accumule empoisonnant le coeur du réacteur. Sa présence peut empêcher de démarrer le réacteur par suite d'une chute de réactivité due au xénon. Si on lève les barres de contrôle pour augmenter la réactivité, le xénon disparaît alors très vite lorsque le flux de neutrons s'établit et on peut avoir un saut de réactivité dangereux. C'est ce qu'il s'est passé à Tchernobyl qui de plus avait un coefficient de vide positif.

**Remarque.** Le combustible pour les REP ou réacteurs à eau bouillante est de l'uranium légèrement enrichi en uranium 235 (3 – 4%) afin de compenser l'absorption d'une partie de neutrons par les noyaux d'hydrogène de l'eau.

Comme toute activité industrielle, le nucléaire produit des déchets. L'énergie nucléaire produit en France 78% de l'électricité et cela conduit à 1 kg de déchets nucléaires par habitant par an.

**Transition** Une solution au problème des déchets pourrait-être la fusion nucléaire car les produits ne sont pas radioactifs. On va voir qu'en revanche cela pose des gros problèmes techniques.

## 3 Fusion

### 3.1 Principe

Si la fission d'un noyau fissile libère une grande quantité d'énergie, la fusion de certains noyaux légers en libère plus. La réaction de fusion est un processus où deux noyaux atomiques légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd. Calculons l'énergie libérée par la réaction de fusion du deutérium et tritium :



On peut calculer l'énergie libérée en sachant que  $\epsilon_l(D) = 2,224 \text{ MeV}$ ,  $\epsilon_l(T) = 8,481 \text{ MeV}$  et  $\epsilon_l(\alpha) = 28,29 \text{ MeV}$  :

$$Q = 28,29 - (2,224 + 8,481) = 17,58 \text{ MeV} \quad (8)$$

La fusion n'aura lieu que si les deux noyaux sont en contact, par contre ces deux noyaux se repoussent à cause de leurs charges positives. La fusion n'est possible que si l'agitation thermique, c'est à dire l'énergie  $E_c$  des noyaux, est suffisamment importante (environ 350 keV) ce qui correspond à une température de :

$$T = \frac{2E_c}{3k_B} = 2,7 \cdot 10^9 \text{ K} \quad (9)$$

La température interne du Soleil n'est que de  $15 \cdot 10^6 \text{ K}$ . Ainsi, les réactions de fusion exigent des températures très élevées, ce qui permet aux noyaux de se rapprocher suffisamment malgré la répulsion électrostatique.

L'énergie libérée par la fusion est trois ou quatre fois plus grande que celle libérée par la fission. C'est pour cette raison que grands projets de recherches sont en cours pour utiliser cette source d'énergie.

Le processus de fusion le plus important dans la nature est celui qui alimente les étoiles. Le résultat net est la fusion de quatre protons en une particule alpha (noyau d'hélium 4), accompagnée de la libération de deux positrons, de deux neutrinos (qui transforment deux des protons en neutrons) et d'énergie, mais diverses réactions individuelles sont impliquées selon la masse de l'étoile. Dans les étoiles de taille similaire ou inférieure à celle du Soleil, la chaîne proton-proton prédomine. Dans les étoiles plus lourdes, le cycle carbone-azote-oxygène (CNO) est le plus important. Les deux types de processus sont à l'origine de la création de nouveaux éléments dans

le cadre de la **nucléosynthèse stellaire**. D'autres processus entrent en jeu dans les explosions d'étoiles massives en supernovas, qui mènent à la création d'éléments lourds, dans le cadre de la nucléosynthèse explosive.

Aux températures et densités du cœur des étoiles, le taux de réaction de fusion est notablement peu élevé. Par exemple, à la température ( $T \approx 15 \text{ MK}$ ) et à la densité ( $160 \text{ g/cm}^3$ ) du cœur du Soleil, le taux de libération d'énergie est seulement de  $276 \text{ } \mu\text{W/cm}^3$  environ le quart du débit de chaleur par unité de volume d'un humain au repos. Ainsi, la reproduction en laboratoire des conditions du cœur des étoiles à des fins de production d'énergie de fusion est totalement impossible à mettre en pratique.

### 3.2 Fusion contrôlée

Le contrôle des réactions de fusion pose des problèmes technologiques considérables qui sont encore loin d'être résolus, notamment l'obtention de températures de l'ordre de plusieurs  $\text{MK}$ . Deux voies peuvent être utilisées pour réaliser la fusion thermonucléaire sur Terre dans le but de produire de l'énergie :

- Confinement inertiel en bombardant le mélange D-T soit avec plusieurs faisceaux laser intenses synchronisés, soit avec un faisceau d'ions lourds. On peut ainsi comprimer le mélange D-T et atteindre des températures entre 50 et 100 millions de degrés ce qui initie la fusion nucléaire.
- Avec un plasma de basse densité à haute température pendant un temps long. On utilise un confinement magnétique dans des systèmes que l'on appelle Tokamak.

Pour que la fusion contrôlée soit rentable, il faut que l'énergie fournie par les réactions soit inférieure à l'énergie à fournir à l'installation où ont lieu les réactions. Ce critère est appelé le **critère de Lawson**.

Le projet **ITER** en construction en France à Cadarache, est un projet international visant à comprendre et étudier les propriétés d'un plasma thermonucléaire. On fusionne essentiellement un deutérium et un tritium. Ces deux produits sont abondants sur Terre.

## Conclusion

## A savoir

- L'électron est une particule fondamentale, le proton et le neutron ne le sont pas. Ils sont formés de particules élémentaires : les quarks qu'on ne peut pas isoler mais dont les interactions ont pour conséquence de former les nucléons et de gouverner leurs interactions.
- Interaction forte : responsable de la cohésion des noyaux. Elle augmente avec la distance. Nulle quand la distance de séparation est nulle.
- Interaction faible : intervient dans la radioactivité bêta des noyaux. Elle n'est ni attractive ni répulsive, son effet est de changer des particules en d'autres particules moyennant certaines contraintes. Elle gouverne la cinétique de la fusion des noyaux d'hydrogène dans le Soleil. Elle agit sur toutes les particules (quarks et leptons), dont les neutrinos (seulement sensibles à cette interaction, ce qui explique la difficulté de les détecter)
- Symétries. Les interactions forte et EM conservent la parité, le renversement du temps et la conjugaison mais pas l'interaction faible