

LP 41 : Fusion Fission

Extrait des rapports de Jury

2013 LP 46 : Le noyau : stabilité, énergie. Applications. Le nouvel intitulé de cette leçon doit inviter les candidats à réfléchir à la physique sous jacente aux phénomènes de fusion et de fission nucléaires.

Bibliographie :

- Hecht, Physique
- Le nucléaire expliqué par des physiciens, Bonche
- Energie nucléaire, Basdevant
- Valentin Physique subatomique noyaux et particules

Niveau :

L2

Pré requis :

- Energies chimiques
- Radioactivité (première)
- Thermodynamique
- Classification périodique
- Equivalence masse énergie, notion de défaut de masse

Idées à faire passer :

Importance de l'interaction forte au sein du noyau => peut libérer de l'énergie en quantité considérable pour une même masse.

Introduction

La physique nucléaire a marqué le monde dans le domaine militaire et politique. L'arme nucléaire qui n'a été utilisée que deux fois en août 1945 et a bouleversé l'échiquier mondial et la politique internationale depuis lors. Depuis les catastrophes de Tchernobyl et Fukushima, le grand public a plutôt peur du nucléaire mais indéniablement, le nucléaire permet de récupérer des énergies considérables. Particulièrement par le biais de réactions de fission et de fusion.

Unités utilisées en physique nucléaire

- unités typiques de la physique atomique : Angström et électronvolt
- échelles de la physique nucléaire : femto mètre (ou fermi), $1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$ et $\text{MeV} = 10^6\text{eV}$. Les dimensions nucléaires sont de l'ordre de quelques fm et les énergies de liaison de quelques MeV, c'est-à-dire environ 1% de l'énergie de masse (ou de la masse) des nucléons

I- Quelques éléments de physique nucléaire

I-1 Constitution

Découverte du noyau atomique : 1911 Rutherford

1932 : découverte du neutron

Un noyau : ${}^A_Z X$

A : nombre de masse (neutron + nucléon)

Z : nombre de protons

Particule	charge	spin (h)	masse au repos (MeV)	masse (uma)
proton	+e	+1/2	938,272	1,007
neutron	0	+1/2	939,566	1,008
électron	-e	+1/2	0,511	$5,485 \cdot 10^{-4}$

Actuellement, les masses en physique atomique sont souvent exprimées en unité de masse atomique unifiée (uma), telle que l'atome de carbone neutre (${}^{12}_6\text{C}$) a une masse exactement égale à 12.00000 uma

$$1 \text{ uma} = 1.660540 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931.494 \text{ MeV}/c^2$$

I-2 Forces d'interactions

Force	Intervient entre	Intensité (N)	Portée effective
gravitationnelle	toutes les masses	10^{-34}	illimitée
faible	toutes les particules sauf le photon	10^{-2}	$\approx 10^{-14} \text{ m}$
électromagnétique	charges électromagnétiques	10^2	illimitée
forte	particules subnucléaires et subnucléoniques	10^4	quelques 10^{-15} m

→ Les intensités (en N) sont celles de deux protons distants de 2 fm (centre à centre)

La force nucléaire encore appelée force forte ou interaction forte

- Force de répulsion entre deux protons (loi de Coulomb) 50N. → Répulsion énorme à l'échelle de la petite taille des protons → existe une autre force suffisamment attractive sinon aucun noyau autre que celui de l'hydrogène ne pourrait exister.
 - force nucléaire lie neutrons et protons pour former les noyaux. portée effective de quelques fermis. très attractive → donne aux nucléons une énergie potentielle qui peut atteindre 100 MeV. répulsive à des distances inférieures à environ 0.5 fm (deux nucléons ne peuvent pas occuper la même position dans l'espace) dépend des spins des particules en interaction.
- Pour séparer un nucléon du noyau, une énergie aussi grande que 8 MeV est nécessaire, alors qu'une énergie de 13.6 eV suffit pour séparer l'électron du proton dans l'atome d'hydrogène pour

l'ioniser. → même masse de combustible peut libérer une énergie des millions de fois plus grande que l'énergie libérée par des réactions chimiques.

I.4 Isotopes

isotopes d'un élément donné ont le même nombre de protons mais des nombres de neutrons N différents et c'est le même élément chimique

II. Transmutations nucléaires

II.1 Stabilité et énergie

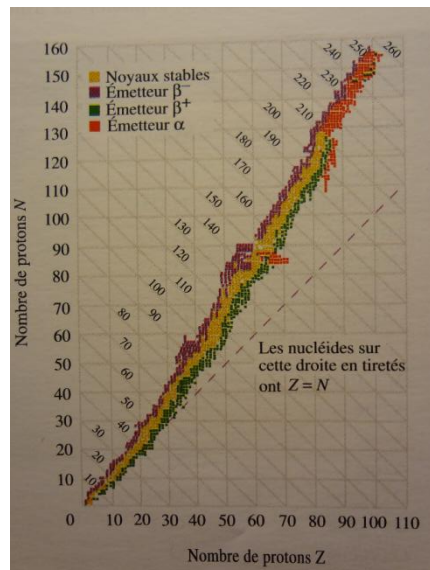


Figure 1: Un diagramme de N en fonction de Z pour les nucléides stables et instables. La vallée de stabilité est la bande jaune qui représente les noyaux stables. Chaque paire de valeurs entières de N et Z dans la région colorée correspond à un nucléide.

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

Energie de liaison par nucléon et stabilité

- Einstein 1905 : l'énergie E d'un corps de masse m au repos est : $E=m.c^2$.
- variation d'énergie ΔE peut s'accompagner d'une variation de masse Δm et réciproquement → équivalence masse-énergie $\Delta E = \Delta m.c^2$
- Pour un système composé de plusieurs corps : énergie interne : énergie de repos de ces particules, énergie thermique et énergie potentielle...)
Réaction de fusion : ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_1\text{He} + {}^1_1\text{H} + \text{énergie}$ (cinétique communiquée aux noyaux)
- Réaction chimique (interaction électrique) qq eV
- Réaction nucléaire (interaction forte) MeV

Energie de liaison

- C'est l'énergie qu'il faut fournir à une liaison pour la casser (c'est comme en chimie), énergie qu'il faut fournir à un nucléon pour l'arracher au noyau.

Energie de liaison nucléaire : l'énergie de liaison d'un noyau quelconque ${}^A_Z\text{X}$ représente l'énergie nécessaire pour séparer les noyaux en protons et neutrons libres.

$$B({}^A_ZX) = (Nm_n + Z M({}^1_1H) - M({}^A_ZX))c^2$$

On peut aussi la voir comme l'énergie qui est libérée lors de la formation de liaison.

Exemple : ${}^1_0n + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + \gamma$ (deutéron)

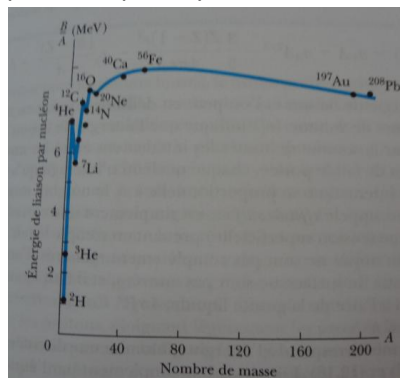
En se liant, le système des 2 particules a perdu une certaine quantité d'énergie sous forme de rayonnement, il y a une diminution de la masse du système.

Défaut de masse du système :

$$\begin{aligned} \Delta m &= \text{masse (proton)} + \text{masse (neutron)} - \text{masse (deutéron)} \\ &= 1.007276 + 1.008665 - 2.013553 \\ &= 0.002388 \text{ uma} \end{aligned}$$

Ce défaut de masse correspond à l'énergie de liaison, pour casser la liaison, il faudra fournir 2.224 MeV

- Planck : Tout système lié a une masse inférieure à la somme des masses de ses constituants
- 1913 : Langevin applique au noyau : l'assemblage des nucléons pour former un nucléide s'accompagne d'une conversion de la masse en énergie.
- Défaut de masse équivalent à l'énergie de liaison totale du nucléide
- En disant cette énergie par le nombre total de nucléons \rightarrow valeur moyenne de l'énergie de chaque nucléon dans le système composé \rightarrow énergie de liaison par nucléon.
- comparer stabilité relative des différents nucléides \rightarrow connaître l'énergie de liaison par nucléon : on calcule l'énergie de liaison pour chaque noyau connu et on divise par le nombre de masse



Si on sélectionne un nucléide d'un côté ou de l'autre du maximum de la courbe de l'énergie par nucléon et si on modifie sa structure de façon à le déplacer vers le sommet (nickel, fer...) une grande quantité d'énergie est libérée.

- Fusion de 2 noyaux légers (H par exemple) \rightarrow le nucléide formé est plus proche du sommet de la courbe \rightarrow énergie est libérée \rightarrow chacun des nucléons est plus comprimé et individuellement plus massif qu'avant la fusion $\Delta m =$ énergie libérée par processus de fusion
- On partage un noyau lourd en petits fragments \rightarrow transforme la masse. L'énergie de liaison dans les fragments est plus haute que dans le noyau initial qui s'est partagé \rightarrow fission nucléaire \rightarrow libère grande énergie.
- Ce n'est pas un hasard si H et U sont aux extrémités de la courbe
- On définit l'énergie de désintégration Q comme l'opposé de l'énergie de liaison.

Si $B > 0$ un nucléide est stable

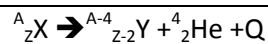
Si $B < 0$ un nucléide est instable

II.2 lois de Soddy :

- Conservation de l'énergie-impulsion
- du nombre de nucléons
- du nombre de charge électrique

II.3 Désintégration alpha.

- rare dans les nucléides légers (bien qu'il y ait un petit agglomérat d'émetteurs α autour de $Z=60$).
- Prédomine au dessus de $Z=82$, où il n'y a aucun nucléide stable
- transforme les nucléides et déplace à la fois Z et N vers la vallée de stabilité.



- **Noyau père, noyau fils et énergie de désintégration.**
- C'est un réarrangement \rightarrow change pas le nombre total de nucléons ou la charge totale des noyaux de part et d'autre de la réaction mais elle modifie la masse totale.
- La quantité d'énergie Q libérée est donnée par $Q=(m_X-m_Y-m_\alpha)c^2$ L'énergie de désintégration (en J) apparaît sous la forme de l'énergie cinétique totale du nucléide-fils et de la particule alpha. Une valeur positive de Q signifie que le processus lieu spontanément. Dans le cas des noyaux lourds, **Q a une valeur moyenne d'environ 5 MeV**
- Ex ${}^{298}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{U} + {}^4_2\text{He} + 4.3 \text{ MeV}$
- arrêté par quelques centimètres d'air, une feuille de papier ou la peau.

II.4 Désintégration bêta

Elle peut prendre 3 formes distinctes :

- **Désintégration β^-** : un électron (${}^0_{-1}e$) est émis par un noyau lorsqu'un neutron se transforme en un proton. $n \rightarrow p + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}_e$ nucléide radioactif : ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}_e + Q$
- **Désintégration β^+** : un positron (${}^0_{+1}e$) est émis par un noyau lorsqu'un proton se transforme en un neutron. $p \rightarrow n + {}^0_{+1}e + \nu_e$ nucléide radioactif : ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e + \nu_e + Q$
- **capture d'un électron**, un des électrons orbitaux dans une couche interne du nuage est attiré par le noyau et transforme un proton en neutron. nucléide radioactif : ${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \nu_e + Q$
- arrêté par quelques mètres d'air, une feuille d'aluminium ou 1 cm de tissus humain.

II.5 Transition γ

- Après une désintégration alpha ou bêta, un noyau fils peut être momentanément dans un état excité ; c'est-à-dire avec un nucléon dans un niveau d'énergie plus haut que l'état fondamental. \rightarrow relaxation rapide pour atteindre la configuration énergétique la plus basse possible.
- différence d'énergie (de 1keV à 1MeV) émise sous forme d'un ou plusieurs photons gamma.
- Comme dans le cas d'un atome, on peut exciter un noyau en lui fournissant la bonne énergie. Cela peut se faire avec l'absorption d'un photon gamma de la bonne fréquence ou être le résultat d'une collision avec une particule massive. Par exemple, un neutron lent peut être absorbé par un noyau d'uranium-238 qui devient excité ${}^{239}\text{U}^*$. En revenant à son état fondamental, ce dernier émet un photon gamma selon la réaction ${}^1_0n + {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{U}^* \rightarrow {}^{239}\text{U} + \gamma$

- Lorsqu'on l'observe indépendamment de sa source nucléaire, un photon gamma est identique à un photon de même énergie produit par un autre processus. C'est seulement parce que les différences entre les niveaux d'énergie nucléaires sont très élevés que ces rayons gamma sont en général bien plus énergétiques que les photons émis dans les transitions atomiques des électrons.
- peut traverser plusieurs centaines de mètres d'air ou plus. Il traverse l'organisme d'un être humain et nécessite une dizaine de cm de plomb pour être arrêté.

Radioactivité artificielle et naturelle

La radioactivité peut être naturelle mais aussi artificielle (cette découverte valut à Irène et Jean Frédéric Joliot-Curie un prix Nobel en)

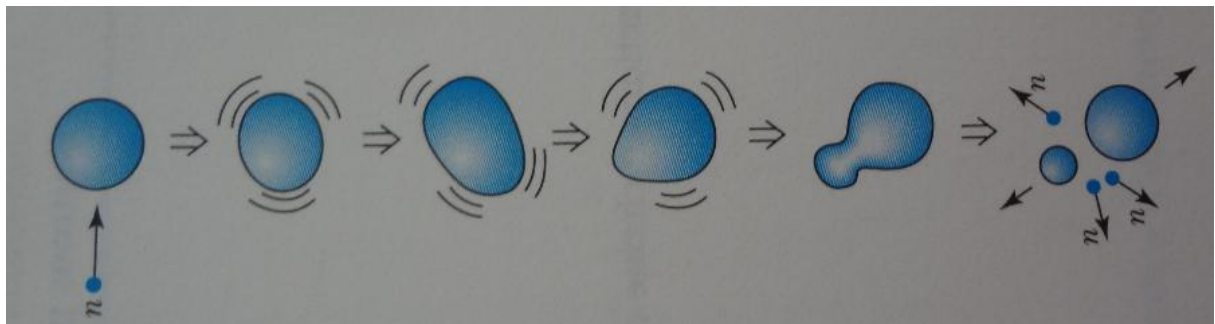
- **Réaction de fusion du tritium avec l'hydrogène :** $^1_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + 19.8\text{MeV} = 3.174 \cdot 10^{-12}\text{J}$
- **Réaction de fission :** $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U} \rightarrow ^{139}_{56}\text{Ba} + ^{86}_{36}\text{Kr} + 11^1_0\text{n} + 128.6\text{MeV} = 2.06 \cdot 10^{-11}\text{J}$
- **Réaction de combustion de une tonne de charbon** $3.27 \cdot 10^{10}\text{J}$
- pour avoir l'équivalent $5.1 \cdot 10^{-2}\text{g}$ de tritium ou 0.62g d'uranium
- ODG : En 2006, la France a produit 450 TWh d'électricité à partir des centrales nucléaires.
 → représente la transformation d'une masse de 18 kg en énergie. En fait, la masse transformée est supérieure car les centrales ont un rendement dû au principe de Carnot, de 33%. Les 2/3 de l'énergie produite par un réacteur sont perdus en chaleur. Tous les en, la France transforme un peu plus d'une cinquantaine de kg de matière en énergie.

III. La fission

III-1 Mécanisme

Un noyau se sépare en 2 fragments de fission (un est sensiblement plus gros que l'autre)

Concerne les noyaux avec $A > 220$ (car plus de protons, interaction coulombienne plus forte)



Au début la force nucléaire attractive contrebalance Coulomb, puis énergie de surface augmente
 → interaction à courte portée réduite → nucléons extérieurs entourés de moins de nucléons → force nucléaire diminue → on atteint l'énergie critique = la barrière de fission → fission

- Fission spontanée (traversée de la barrière coulombienne par effet tunnel) temps de $\frac{1}{2}$ vie beaucoup plus long → nucléide qui a le plus grand taux de fission naturelle ^{238}U $t_{1/2} = 8.2 \cdot 10^{15}$ ans désintégration α $4.5 \cdot 10^9$ ans → se fait plutôt par désintégration α

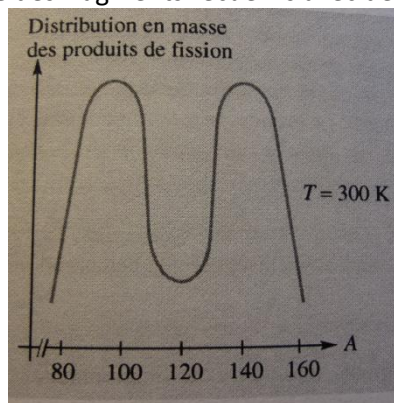
- Discussion menée jusque là concernait noyau se trouvant naturellement dans leur état fondamental. Fission peut aussi être induite par une réaction nucléaire. Un neutron absorbé par un noyau lourd forme un noyau très excité qui peut rapidement fissionner.
- Les produits de fission ont un rapport N/Z trop élevé, → instables émettent en plus des neutrons + désintégration β. En gros on récupère 200MeV qui se retrouve dans l'énergie cinétique des produits de fission mais les neutrons, les particules β, les neutrinos et les rayons γ emportent typiquement 30/40 MeV d'énergie cinétique.

Exemple de la fission de l'uranium

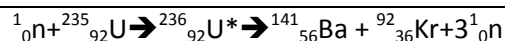
- uranium naturel est formé de 3 isotopes uranium 234 (à l'état de trace), uranium 235 (0.72%) et uranium 238 (99.27%). C'est l'uranium 235 qui a subi la fission. (L'uranium 238 ne peut subir la fission que s'il est bombardé avec des neutrons rapides).

Fission de l'uranium 235

- noyau d'uranium 235 se scinde en deux fragments de masses différentes : le premier est constitué de noyaux de types A =9 et le second de noyaux de type A=140. Sur la figure suivante, on voit la répartition en masse des fragments recueillis avec des neutrons thermiques.



Exemple d'une réaction de fission de l'uranium 235



Les expériences montrent que ${}^{235}\text{U}$ et ${}^{239}\text{Pu}$ fissionnent facilement après avoir absorbé des neutrons thermiques (des neutrons de très basse énergie). Le noyau de ${}^{238}\text{U}$ nécessite un neutron d'au moins 1 MeV d'énergie cinétique pour fissionner facilement. Quand il absorbe un neutron de moindre énergie ${}^{239}\text{U}^*$ a plus de chance de se désintégrer par α que par fission

Les réactions en chaîne

Faire le schéma

- Si un nucléide qui est bombardé par un neutron émet deux neutrons à son tour, alors le processus de fission peut continuer de lui-même. En pratique pour l'uranium, environ 2 à 3 neutrons rapides sont émis à chaque fission ce qui libère une énergie de environ $3.2 \cdot 10^{-11}\text{J}$. C'est une grande énergie à l'échelle atomique mais une petite énergie à l'échelle humaine. Mais si le premier noyau qui subit une fission libère deux neutrons, ces deux neutrons peuvent provoquer la fission de deux autres noyaux et ainsi de suite. Après 80 fissions, $1.2 \cdot 10^{24}$ atomes auront fissionné en une fraction de milliseconde ce qui libère une énergie de $3.8 \cdot 10^{13}$ Joules, équivalent

d'environ 10 tonnes de TNT. C'est de cette technique que sont nés la bombe atomique mais aussi les réacteurs nucléaires.

- Dans un milieu contenant des noyaux fissiles dans lequel on a initié une fission, certains des neutrons libérés peuvent à leur tour induire une fission. Les autres peuvent s'échapper du milieu, être capturés par les noyaux fissiles sans conduire à une fission ou par d'autres noyaux présents dans le milieu. → coefficient de multiplication neutronique k comme le rapport du nombre de fission des générations $n+1$ et n .
 - Si $k > 1$, le nombre de neutrons croît exponentiellement et le milieu est dit sur critique. Comme le temps séparant deux générations de neutrons est très court, on a vite une évolution divergente. Le système se comporte comme un amplificateur : une faible quantité d'énergie initiale génère beaucoup d'énergie. C'est ce qui se passe dans une bombe atomique de type A, où l'on confine au maximum le milieu pour générer l'énergie la plus grande possible avant de la libérer
 - Si $k < 1$, le milieu sous critique, les réactions de fissions s'arrêtent spontanément

III-2 Production d'énergie

- Un réacteur nucléaire est un système dans lequel on entretient une réaction en chaîne de fission par des neutrons. Son architecture, selon le but choisit sera différente. Un réacteur nucléaire peut être dédié à produire :
 - ✓ Des faisceaux de neutrons pour des applications scientifiques, technologiques ou médicales
 - ✓ De la chaleur pour le chauffage urbain ou industriel
 - ✓ De l'énergie mécanique pour la propulsion navale
 - ✓ De l'électricité
- Dans un réacteur nucléaire, on pilote la population de neutrons pour extraire l'énergie de façon continue et k n'est que très faiblement supérieur à k au démarrage. Une fois la puissance nominale atteinte, on pilote le réacteur en restant au voisinage de $k=1$. Principe de surgénération

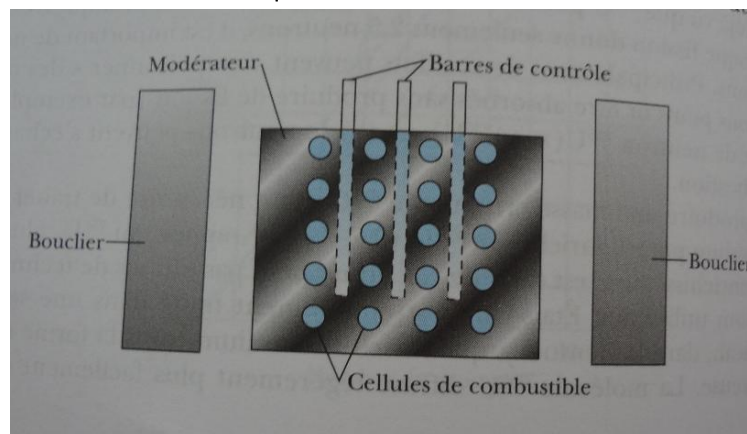
Il existe deux grandes familles de réacteur :

- **réacteurs à neutrons lents ou réacteurs thermiques.** utilisent grande probabilité de capture des neutrons thermiques par l' ^{235}U . Comme les neutrons émis par la fission pour la majeure partie rapide → les ralentir. → matériau modérateur. Le ralentissement se fait lors des collisions élastiques des neutrons avec les noyaux du modérateur. Un bon modérateur ne doit absorber que très faiblement les neutrons (transparence) et être constitué de noyaux légers pour que le ralentissement soit le plus efficace possible. L'eau lourde offre un bon compromis entre ralentissement et transparence (35 chocs en moyenne pour thermaliser) ce qui permet d'utiliser de l'uranium naturel comme combustible. L'eau légère est plus efficace en terme de ralentissement (19 chocs en moyenne) mais absorbe d'avantage les neutrons, ce qui nécessite d'utiliser un combustible contenant de l'uranium légèrement enrichi. Le graphite peut également être choisi. Il ralentit moins efficacement les neutrons mais les absorbe faiblement (115 chocs pour thermaliser les neutrons)
- **réacteurs à neutrons rapides** n'ont pas de modérateur utilisent une forte proportion de noyaux fissiles car la probabilité de fission est beaucoup plus faible

- Une fois atteinte sa puissance nominale, un réacteur nucléaire doit travailler dans un régime où le nombre de neutrons induisant les fissions de la génération $n+1$ est égal à ceux de la génération n . $k=1$. S'il n'y avait que des neutrons prompts (émis dans des temps très courts), le système divergerait très vite. Pour les réacteurs français, ce temps est de $2.5 \cdot 10^{-5}$ s, soit 40 000 générations de neutrons par seconde. Avec $k=1.0005$ la puissance serait multipliée par près de 483 millions en 1 seconde et on n'aurait matériellement pas le temps de contrôler la réactivité du réacteur.
- existe des neutrons retardés dont certains sont émis plusieurs dizaines de secondes après (11s en moyenne) ce qui permet de contrôler la réaction en chaîne. Ceci conduit à une période apparente plus grande de l'ordre de 85s. Le pilotage de la réactivité du réacteur se fait avec des barres de contrôle qui contiennent des éléments qui absorbent beaucoup de neutrons (cadmium, bore...) ou par exemple de l'eau contenant de l'acide borique.
- Les premières centrales nucléaires fonctionnaient à l'uranium 238. Entre 1952 et 1969, la France opta pour des centrales nucléaires de production d'électricité, selon la filière Uranium-Graphite-Gaz, car elle ne possédait pas à l'époque d'usine d'enrichissement d'uranium. Après 1969, elle abandonna cette filière car trop coûteuse et de rendement médiocre pour celle des réacteurs à Eau sous Pression (REP). Actuellement, la plupart des réacteurs nucléaires fonctionnent avec de l'uranium 235, ce qui exige d'enrichir l'uranium naturel car le minerai d'uranium n'en contient en moyenne que 0.7%.

III.3 Aspect technologique

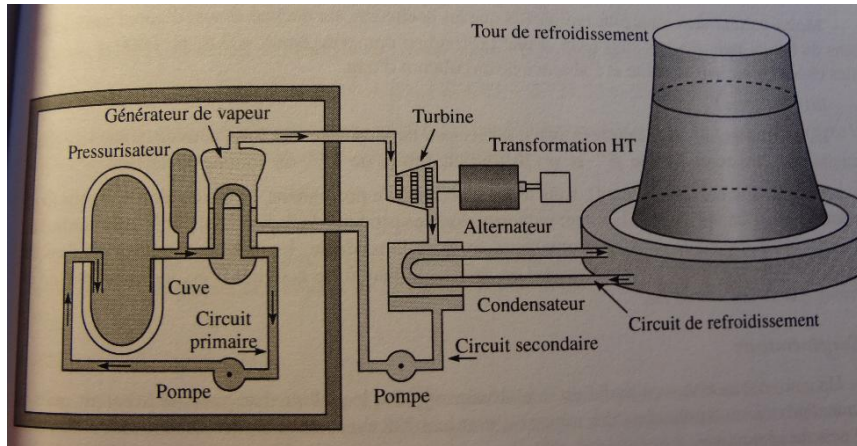
- Réduire la perte des neutrons par échappement → étendre la zone de combustion. → éléments combustibles disposés selon des arrangements réguliers au sein du modérateur
- barres de contrôle → limitent les taux de réaction des réacteurs nucléaires. Cadmium.
- Système de sécurité : lâche automatiquement barres de contrôle dans le milieu en cas d'urgence



Description d'un réacteur nucléaire

- aux moins deux sources thermiques
 - source chaude → circuit primaire d'eau (cuve du réacteur, pompes pour faire circuler l'eau, un pressurisateur dont la fonction est de fixer la pression dans le circuit et un générateur de vapeur)
 - source froide : circuit secondaire de vapeur d'eau qui reçoit l'énergie du générateur de vapeur ; la pression étant de 70 bars, la température de la vapeur est de l'ordre de 560 K. Cette vapeur d'eau actionne une turbine qui entraîne un alternateur, lequel fournit à sa sortie une puissance électrique, qui alimente le primaire d'un transformateur haute

tension. Pour refroidir l'eau du circuit d'eau secondaire, soit on réchauffe un fleuve ou la mer, situés à proximité, soit on réchauffe l'air atmosphérique en favorisant sa circulation de bas en haut, dans des tours de réfrigération. Le panache blanc, que l'on aperçoit au sommet de ses tours est formée par la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air de refroidissement.

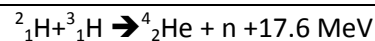


IV. La fusion

IV-1 Mécanisme

Définition : deux noyaux légers vont fusionner pour créer un noyau plus lourd libérant ainsi de l'énergie

- énergie solaire provient des réactions nucléaires de fusion qui se produisent à l'intérieur du soleil. force de gravitation au cœur de l'étoile telle que l'on obtient des densités et des températures suffisantes pour déclencher des réactions thermonucléaires.
- L'homme essaye depuis des décennies, de réaliser des réactions de fusion semblables pour produire de l'énergie mais il n'y a réussi qu'avec la bombe H. La fusion n'est pas encore domestiquée pour produire industriellement de grandes quantités d'énergie.
- fusion de deux noyaux légers, comme le deutérium et le tritium libère plus d'énergie par nucléon que la fission. Ainsi la réaction (D-T) qui correspond à la fusion du deutérium et du tritium est :



Le noyau d'Hélium emmène 3.5 MeV et le neutron 14.1 MeV. L'énergie libérée dans une fission est de 0.85 MeV/nucléon alors que celle libérée lors de la fusion est de 3.5 MeV/nucléon, soit environ 4 fois plus

- fusion beaucoup plus difficile à réaliser que la fission. un neutron peut facilement s'approcher et pénétrer dans un noyau d'uranium car il n'a pas de charge électrique. Il est en revanche très difficile de faire fusionner deux noyaux légers car chargés positivement et se repoussent. Cela se produit dans le soleil où l'hydrogène se transforme en hélium à des températures de 1 à 15 millions de degrés. Cette fusion est dite thermonucléaire car elle est induite par l'énergie cinétique d'agitation thermique des noyaux.

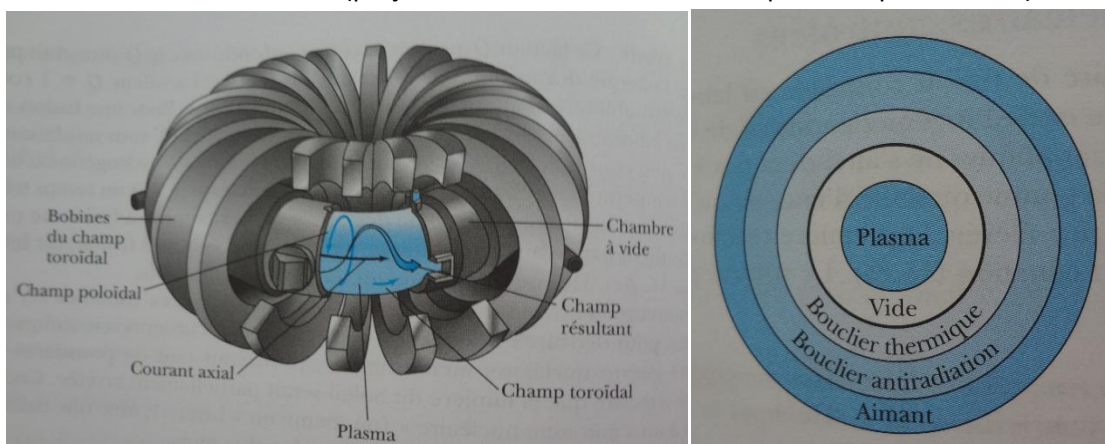
IV-2 Conditions de réalisation

- fusion thermonucléaire réalisée au sein d'un plasma issu du mélange deuterium et tritium. Pour que la fusion thermonucléaire D-T ait lieu, il faut :
 - ✓ Une température élevée pour que les ions surmontent la barrière de répulsion électrostatique qui les repousse grâce à l'énergie cinétique d'agitation thermique. Les températures nécessaires pour la fusion D-T sont de l'ordre de 10^8K
 - ✓ Une forte densité de particules pour qu'il y ait un grand nombre de collisions entre les ions $n=2 \text{ à } 3 \cdot 10^{20} \text{ ions /m}^3$
 - ✓ Un temps de confinement long pour que la température et la densité du plasma restent élevés et qu'une quantité suffisante du combustible fusionne (1 à 2 s)
 - ✓ Un confinement sans contact car aucun matériau ne peut résister à des conditions si extrêmes
- bilan de puissance d'un réacteur de fusion est positif s'il satisfait au **critère de Lawson**. Pour un mélange D-T à 10^8K il faut $n \cdot \tau_e > 10^{20} \text{ s/m}^3$ avec n la densité de particules contenues dans le plasma et τ_e le temps de confinement de l'énergie. L'objectif des recherches actuelles est d'atteindre l'ignition, c'est-à-dire une réaction auto entretenue. La **condition d'ignition** est alors $T_0 \cdot n_0 \cdot \tau_e > 10^{22} \text{ MJ.K.s/m}^3$. n_0 et T_0 sont respectivement la densité et la température du plasma au centre de celui-ci et τ_e le temps de confinement de l'énergie.

IV.3 Comment faire ?

Deux voies sont possibles pour réaliser la fusion nucléaire :

- **Le tokamak** : confiner le plasma chaud à l'intérieur d'un tore par un champ magnétique qui l'empêche de toucher les parois de la chambre. voie la plus prometteuse pour réaliser un réacteur de fusion industriel (projet ITER à Cadarache en France pour remplacer le JET)



- Le **confinement inertiel** dont la voie la plus prometteuse est d'utiliser de puissants faisceaux lasers pour comprimer et chauffer un mélange D-T enfermé dans des microbilles en verre. Le confinement inertiel met en jeu une densité de particule plus grande pendant des temps plus courts. Les applications sont plus tournées vers la simulation d'armes nucléaires que vers la production d'énergie. Même si l'on arrive au niveau de la microbille à produire plus d'énergie que ce que l'on a injecté, le rendement des faisceaux lasers est si faible que l'on consomme globalement plus d'énergie que l'on produit.

Conclusion

Vers un changement de temporalité ?

La radioactivité a été découverte il y a environ un siècle. Elle a démontré que la matière n'est pas fondamentalement stable, que l'atome n'est pas systématiquement immuable ni insécable. Dans un premier temps, cette radioactivité a obligé les physiciens à insérer la durée et la finitude, autrement dit la temporalité, dans le champ de leur préoccupations. Le résultat est celui que nous connaissons : l'univers est maintenant considéré comme un processus réglé par la succession de phénomènes radioactifs ; il a un âge et son histoire est célèbre (big bang). Avec la radioactivité, c'est l'instable, l'éphémère et même le furtif qui ont trouvé place dans une physique jusqu'alors rivée à la seule permanence. Depuis, un basculement s'est produit. Ce n'est plus seulement la temporalité de la matière que la radioactivité évoque aujourd'hui, mais son éternité relative. C'est aux déchets nucléaires, susceptibles d'être enfouis profondément dans le sol pendant des centaines de milliers d'années que l'on doit ce renversement. La temporalité toute neuve qu'apportait la radioactivité s'est irréversiblement dilatée. En moins d'un siècle, la radioactivité aura donc agi comme une catapulte temporelle : si sa découverte a exhibé l'instable, son usage force maintenant, sinon à envisager, du moins à évoquer le très long terme.