
LP42 : FUSION, FISSION..

Niveau

Commentaires du jury

- 2017 : Un exposé purement descriptif des réactions de fusion et de fission nucléaires est insuffisant.
- 2014 : Cette leçon peut être abordée de manières diverses, mais on peut raisonnablement s'attendre à ce que les candidats aient quelques notions sur la structure et la cohésion nucléaire, les formes de radioactivité et les interactions mises en jeu, les réacteurs nucléaires, le confinement magnétique.
- 2013 : [À propos du nouveau titre] Le nouvel intitulé de cette leçon doit inviter les candidats à réfléchir à la physique sous-jacente aux phénomènes de fusion et fission nucléaires. Jusqu'en 2013, le titre était : Le noyau : stabilité, énergie. Applications.
- 2012 : Le modèle de la goutte ne peut être simplement énoncé. Le candidat qui ferait le choix d'en parler doit commenter la physique inhérente à chaque terme du modèle. Cette leçon ne peut se réduire à un catalogue d'informations diverses et variées, mais les candidats doivent dégager du temps pour les applications.
- 2011 : Le modèle de la goutte ne peut être simplement énoncé. Le candidat qui ferait le choix d'en parler doit commenter la physique inhérente à chaque terme du modèle. Cette leçon ne peut se réduire à un catalogue d'informations diverses et variées.
- 2009, 2010 : L'énergie est un point central et les applications ne doivent pas être traitées trop rapidement en fin de leçon.
- 2008 : Les applications doivent être envisagées. Parmi elles, figure l'énergie nucléaire, qu'il paraît difficile de ne pas aborder

Bibliographie

- Site CEA avec super vidéo
-

pré-requis

Expériences

—

Table des matières

1	Le noyau atomique	2
1.1	Définitions	2
1.2	Energie de liaison	3
1.3	Modèle de la goutte liquide	5
2	Fission	6
2.1	Principe et ordre de grandeur	6
2.2	Barrière de fission	9
2.3	Application à la fission industrielle	10

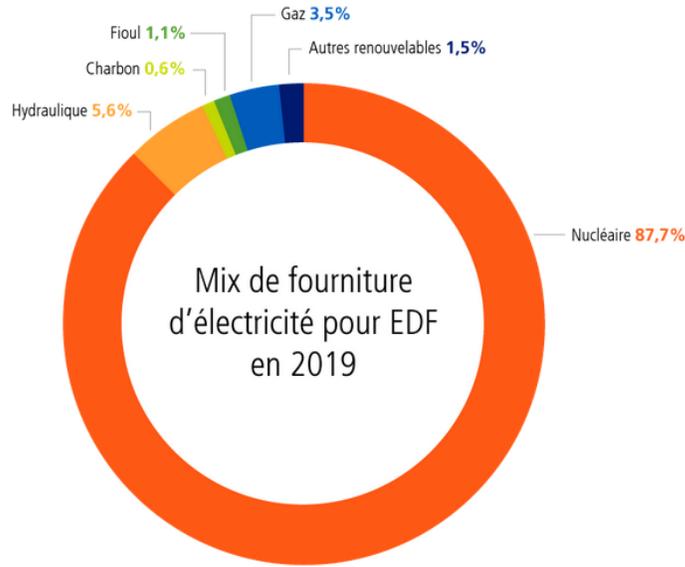


FIGURE 1 – Energie EDF 2019

3 Fusion	11
3.1 Principe et ordres de grandeur	11
3.2 Barrière coulombienne	11
3.3 Critère de Lawson	12

Remarque : L'interaction nucléaire forte serait à l'interaction forte ce que les interactions de van der Waals sont aux interactions électrostatiques (l'un est l'interaction l'autre la résultante)

Introduction

Physique nucléaire, centrales, énergie, radioactivité.

Née au début du XIX^e siècle, la physique nucléaire aura profondément marqué le XX^e siècle. Contrairement au autre domaine de la physique, elle a marqué l'ensemble de la population mondiale en particulier avec la formule d'Einstein $E = mc^2$, à la fois associé au génie d'un homme et à la capacité de destruction qu'à acquis l'Homme. Elle ne se contente pas d'impacter seulement nos technologies mais aussi notre façon de penser et notre place dans le monde. Le retraitement et stockage des déchets nucléaires est devenu une préoccupation et nous invite à réfléchir à ce que nous laissons à nos descendant. La physique nucléaire a radicalement changé les domaines militaires et politique et ce alors que l'arme nucléaire n'a été utilisée que deux fois. Les applications de la physique nucléaire sont multiples que ce soit la production d'énergie ou l'utilisation de la radioactivité en médecine, archéologie, physique fondamentale ... De ce fait la physique nucléaire et le domaine de la physique ayant le plus marqué et transformé notre société. Elle est aussi le domaine le plus controversé, sa mise en place et sa manipulation soulevant de nombreuses questions.

1 Le noyau atomique

1.1 Définitions

physique nucléaire = physique du noyau.

On sait que les atomes sont constitué d'un noyau depuis l'expérience de Rutherford (1911) (jet de particules α (He^{2+}) sur une feuille d'or, on détecte tout autour avec un détecteur basé sur la fluorescence, on observe qu'il y a des rebond à des angles non prévus par le modèle antérieur : le pudding de Thomson)

On a donc un noyau (10^{-15}m) entouré d'électrons. Tout cela forme l'atome (10^{-10}m). Nous on ne s'intéresse qu'au noyau ici. L'énergie caractéristique du noyau est de l'ordre de 1MeV.

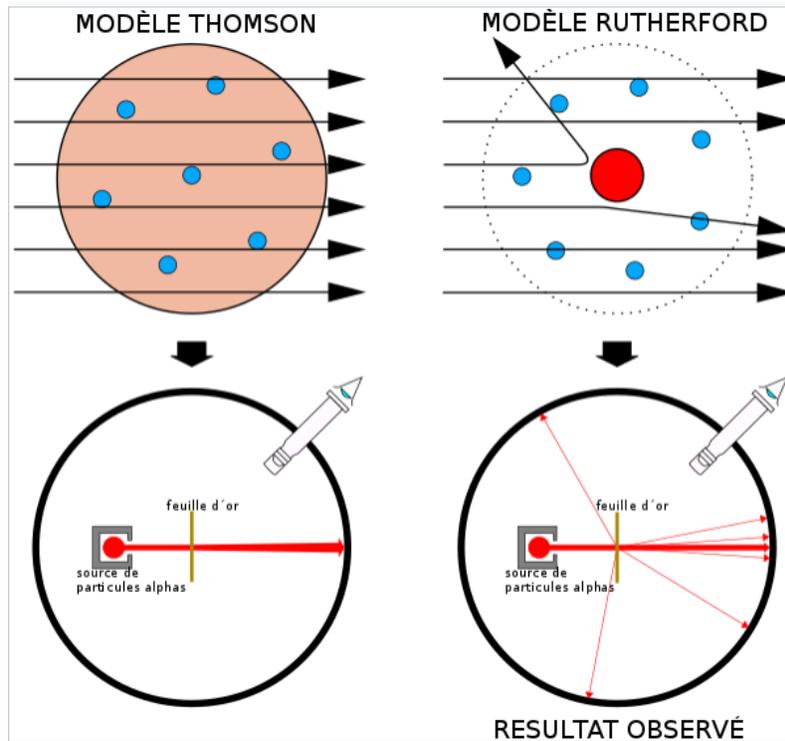


FIGURE 2 – Rutherford

On désigne les noyaux par deux nombres : A le nombre de nucléons (protons et neutrons) et Z le nombre de protons. On en déduit $N=A-Z$ le nombre de neutrons. Le couple (A,Z) ne désigne pas complètement l'état d'un noyau. Tout comme l'atome, un noyau possède plusieurs états quantiques accessibles avec la possibilité de passer d'un état à l'autre par absorption/émission d'un photon gamma. Les photons émis définissent alors le spectre du noyau qui permet de l'identifier de la même façon que les spectres des transitions électroniques des atomes. La durée de vie des états excités est de l'ordre de 10^{-12} s. On désigne du coup par (A,Z) l'état fondamental du noyau.

Deux noyaux sont isotopes si ils possèdent la même charge Z . Deux atomes isotopes ont des propriétés chimiques semblables car leur cortège électronique est identique par contre leurs propriétés nucléaires seront complètement différentes. Ex l'uranium 238 n'est pas fissile (voir définition plus bas) alors que l'uranium 235 l'est.

Deux noyaux sont isotones si ils ont le même nombre N de neutrons. Deux noyaux sont isobares si ils possèdent le même nombre de masses A . Ils auront alors des propriétés nucléaires semblables. Cela vient dû fait que l'interaction nucléaire forte ne fait pas de distinction entre neutron et proton.

La répulsion coulombienne entre protons tend à déstabiliser le noyau. Sa cohésion provient en fait de l'interaction nucléaire forte, de courte portée $\approx 1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$

Interaction faible : L'interaction faible n'est ni attractive ni répulsive comme c'est le cas des autres interactions fondamentales. Son effet est de changer des particules en d'autres particules moyennant certaines contraintes. Elle est responsable de l'instabilité de certaines particules et noyaux. Elle est à l'origine de la radioactivité β et gouverne la cinétique de la fusion des noyaux d'hydrogène dans le Soleil qui nous fournit l'essentiel de l'énergie que nous utilisons sur Terre. L'interaction faible agit sur toutes les particules (quarks et leptons), dont les neutrinos. Ces derniers sont seulement sensibles à cette interaction ce qui explique la difficulté de les détecter. La portée de l'interaction faible est très courte, de l'ordre de $10^{-18}\text{m} = 10^3\text{fm}$. L'interaction faible viole la symétrie P , la symétrie C et le produit CP

La symétrie CPT est une invariance des lois physiques par transformation, dans n'importe quel ordre, de la conjugaison de charge, de la parité et du renversement du temps

1.2 Energie de liaison

Stabilité des isotopes. Vallée de la stabilité : les couples N,Z les plus stables, en noir sur la courbe. Les autres noyaux font des réactions spontanées.

Edifice	Noyau	Atome
Stabilité	Interaction forte	Interaction électromagnétique
Taille	10^{-15}m	10^{-10}m
Echelle d'énergie	MeV	10 eV

FIGURE 3 – *Ordre de grandeur*

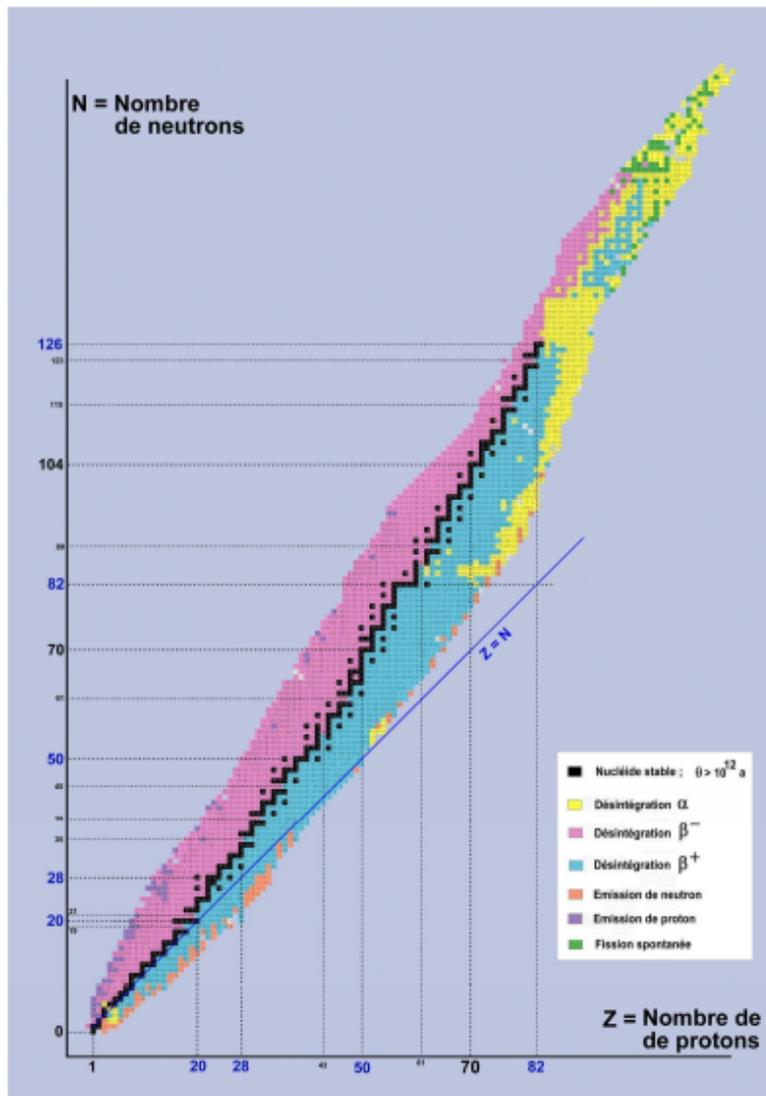


FIGURE 4 – *Stabilité des noyaux en fonction de leurs N et Z .*

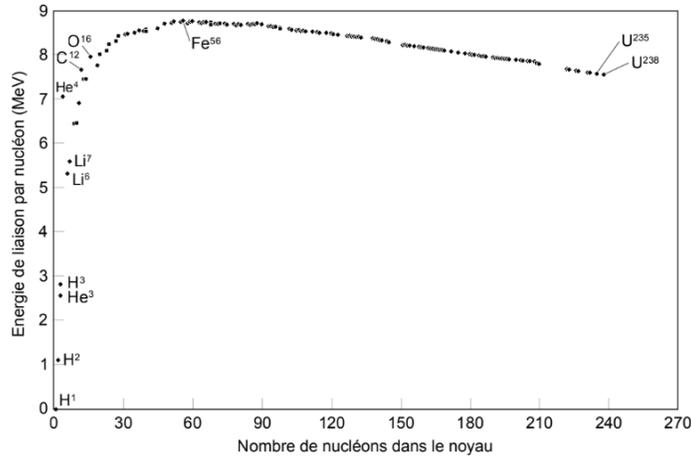


FIGURE 5 – Courbe d’Aston. Il faut insister sur les valeurs : donner des valeurs numériques c’est important

Défaut de masse : On remarque le défaut de masse des atomes : la masse du noyau n’est pas égale à la masse des nucléons.

$$m(A, Z) < (A - Z)m_n + Zm_p$$

Mesures de masse : mesure masse proton *Idée :* tu l’isole avec un piège électromagnétique puis tu le fais osciller en rajoutant des petits champs et à partir de la pulsation cyclotron tu remontes à la masse

Pour le neutron : on fait une réaction de photodésintégration du deutérium qui permet de remonter à la différence de masse entre proton et neutron. lien vers la page wikipédia.

Pendant qu’on y est : la masse de l’électron est plus facile à mesurer. On mesure le rapport e/m en accélérant des électrons.

Ce défaut de masse représente en générale environ 1% de la masse du noyau (On le voit sur la courbe d’Aston...)

À l’aide de la formule d’Einstein, on remonte à la différence d’énergie, qui explique la stabilité des noyaux.

Sauf que l’énergie gagnée dépend des noyaux considérés. On définit l’énergie de liaison comme l’énergie à fournir pour séparer un noyau atomique immobile en ses nucléons séparés, à l’infini (sans interaction entre eux) et immobiles :

$$E_l(Z, A) = (A - Z)m_n c^2 + Zm_p c^2 - m_{\text{noyau}} c^2$$

Le défaut de masse s’écrit alors : $\Delta m = \frac{E_l(Z, A)}{c^2}$.

L’énergie de liaison seule n’est pas un bon indicateur car elle augmente avec le nombre de nucléon du noyau. On définit donc l’énergie de liaison par nucléon E_l/A . Elle donne la force de liaison entre les nucléons.

Le tracé de $f(A)$ est la courbe d’Aston :

La courbe a un maximum : il correspond au fer. C’est lui qui minimise l’énergie par nucléon.

La saturation de l’énergie de liaison par nucléon provient de la portée finie de l’interaction nucléaire forte. Si l’interaction était de portée infinie on s’attendrait à ce que l’énergie de liaison croisse comme A^2 . L’interaction étant de portée finie, l’énergie de liaison va croître comme A .

Si l’on zoom sur la courbe d’Aston on constate que certains atomes sont anormalement stables et ce pour des valeurs précises de N et Z . On appelle ces valeurs les nombres magiques : 2, 8, 20, 50, 82, 126.

Comment modéliser cette courbe ?

1.3 Modèle de la goutte liquide

L’interaction nucléaire forte étant une résultante des interactions fortes entre quarks, Bohr a proposé en 1935 de les traiter comme les forces de Van der Waals qui sont les résultantes des interactions dipolaires. Pour cela il a fait une analogie entre le noyau et une goutte d’eau menant au modèle de la goutte liquide. Le modèle a été amélioré par Bethe et Weizsäcker en ajoutant deux termes de nature quantique pour obtenir la formule de Bethe-Weizsäcker.

Hypothèses

— Le noyau est modélisé par une goutte liquide de matière nucléaire, sphérique et incompressible

- interaction nucléaire forte de courte portée et indépendante de la nature du nucléon
- la densité volumique de charge et de nucléons est homogène

On trouve :

$$E_l(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta(A)$$

L'idée n'est pas de trouver la formule mais de discuter chacun des termes physiquement :

- $a_v A$ Terme de volume : Comme $V \propto A$ (plus il y a de nucléons et plus le volume est grand), on en déduit également que le rayon $r \propto A^{1/3}$. Ce terme traduit la stabilisation due à l'interaction nucléaire forte.
- $-a_s A^{2/3}$ Terme de surface qui destabilise (comme pour une goutte) : La tension de surface prend en compte le fait que les molécules à la surface de la goutte ne sont pas entouré uniquement de molécule d'eau. C'est aussi le cas dans le noyau, les nucléons en périphérie ne sont pas complètement entouré d'autres nucléons et il faut donc prendre en compte qu'ils sont plus instable que ceux du centre du noyau.
- $-a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$: prend en compte l'interaction coulombienne entre les protons. L'énergie coulombienne d'une sphère chargé étant proportionnelle à Q^2/R avec Q ça charge et R son rayon, celle d'un noyau sera proportionnel à $Z^2/A^{1/3}$.
- Les deux dernier termes sont quantique et il ne peuvent s'expliquer aussi simplement : $-a_a \frac{(1(2Z)^2}{A}$ est le terme d'assymétrie. Il favorise les atomes avec le même nombre de protons que de neutrons. Initialement il est donné de manière phénoménologique pour expliquer pourquoi à faible masse les noyaux stables ont autant de protons que de neutrons.
- $\delta(A)$ est le terme d'appariement. Aussi donné de manière phénoménologique il ne peut être expliquer que par un modèle quantique faisant apparaître l'interaction d'échange : Il représentant l'appariement des neutrons et des protons. Il est nulle pour les noyaux avec nombre de neutron et proton pair-impair ou impair-pair et vaut $a_p/A^{1/2}$ pour un noyau pair-pair et $-a_p/A^{1/2}$ pour un noyau impair-impair.

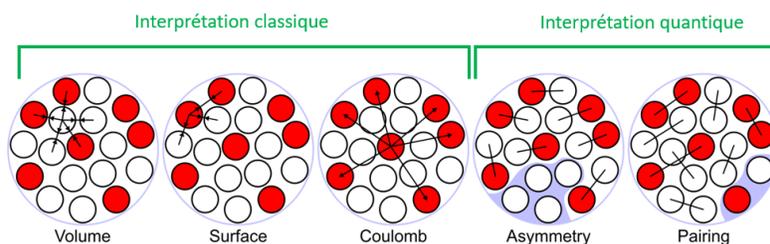


FIGURE 6 – *Modèle de la goutte liquide*

Défaut du modèle

- C'est assez phénoménologique le rajout de terme ad hoc pour les partie quantique
- Il y a un grand nombre de paramètre d'ajustement...
- Il n'explique pas les nombre magique

Mais c'est déjà pas mal. Pour aller plus loins on fait un modèle en couche qui ressemble à ce qu'on peut faire pour les couches électronique. mais avec deux systèmes de couche (pour proton et neutron) et il faut prendre en compte le couplage spin orbite.

2 Fission

Basdevant, énergie nucléaire, p. 185. Poly de A. Essig.

2.1 Principe et ordre de grandeur

Lors d'une fission nucléaire, un noyau lourd se sépare en 2 noyaux plus légers. Au cours de cette réaction, des neutrons sont émis, ainsi que de l'énergie. La fission est énergétiquement possible lorsque $A > 100$, et est dominante par rapport aux autres phénomènes pour $A > 270$.

L'énergie de la réaction est libérée sous forme forme d'énergie cinétique des noyaux fils et de rayonnement γ .

Rayonnement gamma : un rayonnement électromagnétique de très haute énergie : sa longueur d'onde est inférieure à la dizaine de nanomètre, sa fréquence est supérieure à 30 pétaHertz (30×10^{15} Hz).

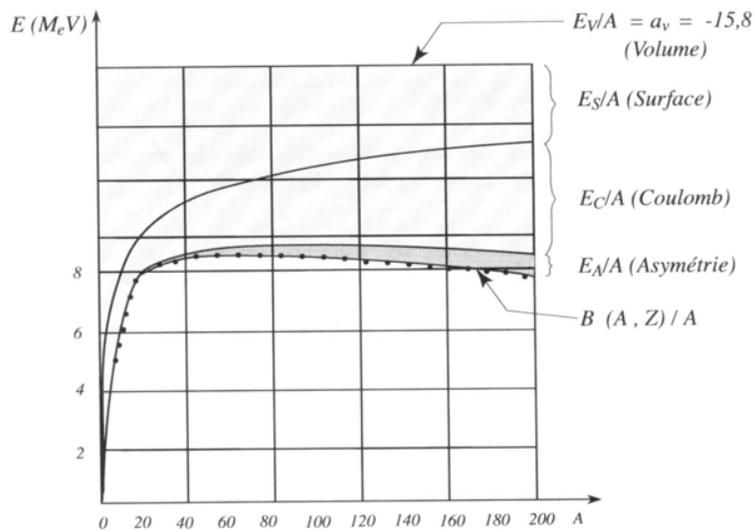


FIGURE 7 – Influence de chaque terme

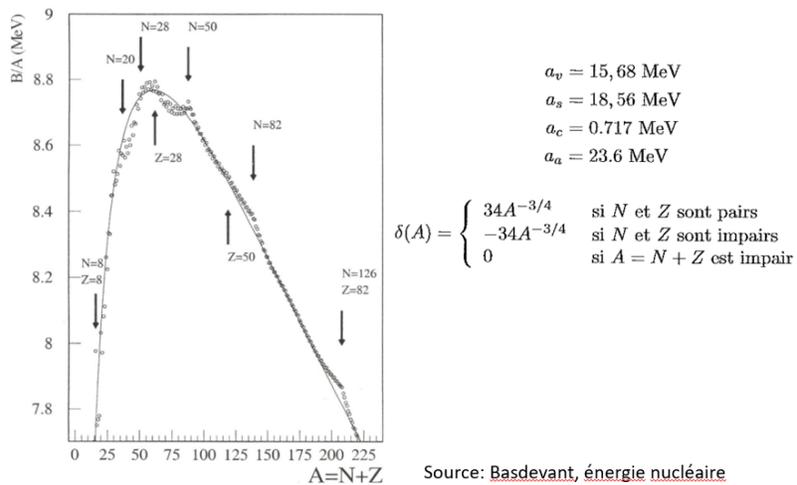


FIGURE 8 – Basdevant à pas le même terme quantique que celui de Essig... Le passer sous silence ?

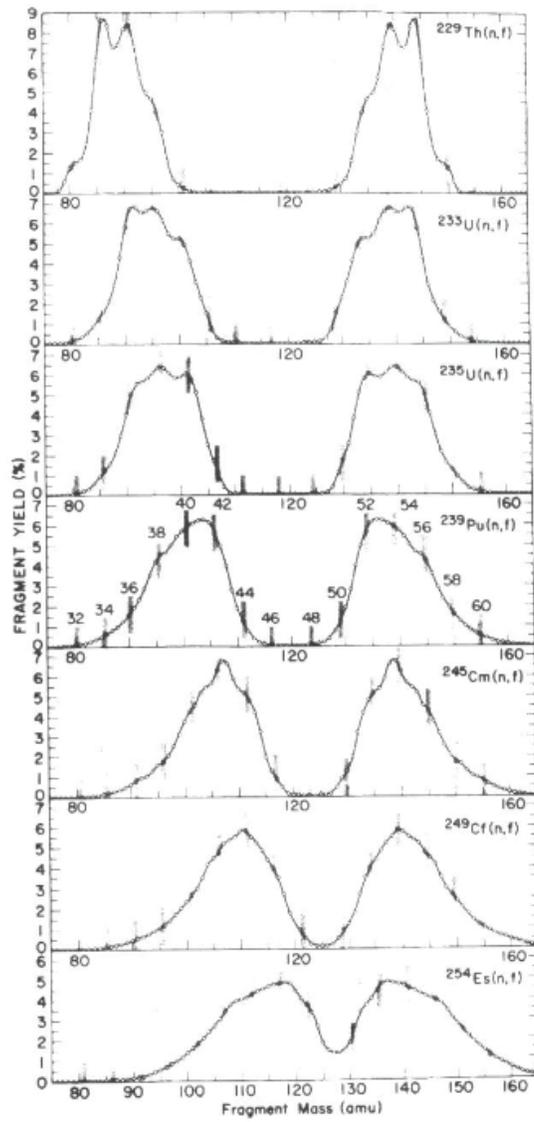


FIGURE 9 – Produits de fission pour différents noyaux. Des noyaux fils sont privilégiés. Les nombres magiques expliquent en partie cette structure.

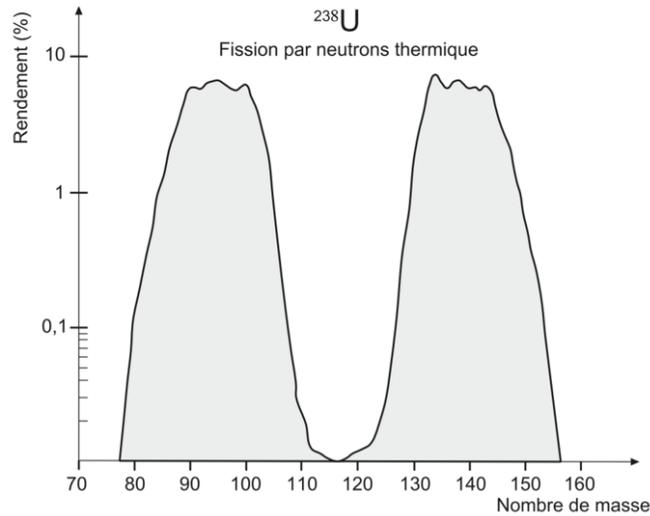
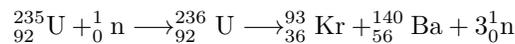


FIGURE 10 – *Assymétrie uranium*

Fission nucléaire induite :



Ordre de grandeur : on considère un noyau $A = 240$ qui se désintègre en deux noyaux $A = 120$. On lit l'énergie correspondante sur la courbe d'Aston : $El(A = 240)/A = 7.6 \text{ MeV}$; $El(A = 120)/A = 8.5 \text{ MeV}$. La différence d'énergie libérée est :

$$\Delta E = 2 \times 120 \times E_l(120) - 240 \times E_l(A = 240) = 220 \text{ MeV}$$

En réalité, comme une partie de l'énergie est perdue en énergie cinétique, on garde seulement l'ordre de grandeur de 200 MeV.

On convertit en tonnes équivalent pétrole (TEP) : 1g d'uranium fournit autant d'énergie que la combustion de 2 tonnes de pétrole.

2.2 Barrière de fission

Principe : On considère que la fission a lieu lors d'un processus de déformation du noyau. L'énergie de surface du noyau augmente lors de ce processus mais comme l'espace occupé par le noyau est plus grand, l'énergie coulombienne diminue. Il y a une barrière énergétique appelé barrière de fission à franchir. L'énergie d'activation nécessaire pour franchir la barrière est de l'ordre de 6 MeV (neutron thermique a une énergie de 0.025 eV). Il est important de noter que la fission spontanée est rare et mais qu'elle peut être provoquée par l'absorption d'un neutron. Il est possible de généraliser le modèle de la goutte liquide pour qu'il prenne en compte la déformation du noyau.

Déformation du noyau :

On considère une déformation ellipsoïdale : c'est le début d'une séparation. Notons le demi grand axe et le demi petit axe :

$$a = R(1 + \epsilon) \quad \text{et} \quad b = \frac{R}{\sqrt{1 + \epsilon}}$$

On considère une élongation selon une direction, et une contraction dans les 2 directions orthogonales. La volume d'un ellipsoïde étant $V = \frac{4}{3}\pi abc$, la déformation considérée conserve le volume.

Cette déformation implique une augmentation de la surface, et donc de l'énergie de surface.

Cette déformation implique les variations des énergies suivantes :

Energie de surface :

$$a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} \rightarrow a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{1}{5}\epsilon^2\right)$$

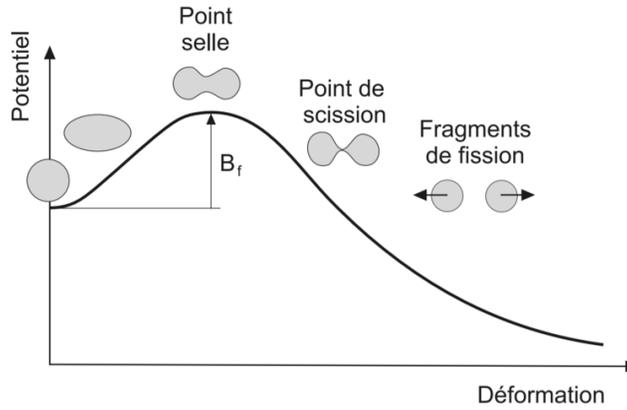


FIGURE 11 – Barrière de fission

Energie coulombienne :

$$a_s A^{2/3} \left(1 + \frac{2}{5} \epsilon^2 \right)$$

Au premier ordre. Cela donne la différence d'énergie :

$$\Delta E = \frac{\epsilon^2}{5} \left(2a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right)$$

Donc la fission est énergétiquement favorable si :

$$\frac{Z^2}{A} > \frac{2a_c}{a_s} \approx 49$$

En réalité, ce critère n'est pas parfaitement respecté, à cause de l'effet tunnel.

2.3 Application à la fission industrielle

Un réacteur nucléaire repose sur le principe suivant : un ^{235}U capte un neutron, ce qui l'excite et le fait fissionner en 2 noyaux plus légers. Cette réaction libère entre 2 et 3 neutrons, qui peuvent alors exciter d'autres noyaux. C'est la réaction en chaîne.

Si on laisse faire, il y a emballement, car le nombre de neutrons produits est trop grand : c'est pourquoi on utilise des modérateurs qui absorbent les neutrons. Le graphite est un élément ralentisseur performant, ainsi que l'eau lourde.

Coefficient de multiplication neutronique :

$$k = \frac{\text{nombre de neutrons qui génèrent des fissions à l'étape } n+1}{\text{nombre de neutrons qui génèrent des fissions à l'étape } n}$$

Si ce nombre est inférieur à 1, la réaction s'éteint : on absorbe trop de neutrons avec les modérateurs. À l'inverse, si $k > 1$, la réaction provoque l'emballement du réacteur. En régime de fonctionnement stationnaire, on doit être à $k = 1$.

Neutrons thermiques et limites : dans les réacteurs classiques, le neutron émis par fission a une assez faible probabilité de provoquer une fission, parce qu'il est trop énergétique. On utilise des ralentisseurs à neutrons, qui sont les mêmes matériaux que les modérateurs de neutrons. À plus faible énergie, la probabilité de fission est beaucoup plus importante.

Certains réacteurs, à neutrons rapides, n'ont pas de ralentisseurs de neutrons, mais nécessitent un combustible plus enrichi.

Récupération de l'énergie : La chaleur du réacteur est transmise à un fluide (de l'eau le plus souvent) qui s'évapore, et fait tourner une turbine. Le cycle suivi est un cycle de type Rankine (*Compression, vaporisation près du fluide caloporteur, détente dans la turbine, liquéfaction*). Il y a 3 circuits dans une centrale nucléaire. La puissance maximale d'un gros réacteur nucléaire est de 900MW.

Problème : la fission nucléaire provoque la formation de 1kg de déchets nucléaire par an et par habitant en France. Parmi ce kilogramme, 10g doivent être stockés sur le long terme. Sans oublier l'eau chaude déversée dans les rivières pas les centrales, ce qui modifie l'écosystème.

3 Fusion

3.1 Principe et ordres de grandeur

La courbe d'Aston prédit que la fusion de deux noyaux légers libère encore plus d'énergie que la fission nucléaire :



La fusion est possible pour tout les atomes à gauche du fer Fe dans la courbe d'Aston. Pour 1g de deutérium, l'énergie libérée par la réaction est de 340 GJ correspondant à 8 T de pétrole. **Avantage :**

- La disponibilité des réactifs : le deutérium, présent à l'état naturel en quantités importantes dans les océans (1g de deutérium par 300 L d'eau de mer), le tritium (pour la réaction de fusion « deutérium + tritium »), qui peut être produit par bombardement neutronique du lithium 6 selon $6\text{Li} + \text{n} \rightarrow \text{T} + \text{He}$ ODG : En effet, le deutérium contenu dans 1 m³ d'eau peut potentiellement fournir autant d'énergie que la combustion de 668 t de pétrole. Les réserves mondiales en minerai de lithium suffiraient théoriquement à garantir plus d'un million d'années de fonctionnement.
- Son caractère essentiellement "propre" : les produits de la fusion eux-mêmes (principalement de l'hélium 4) ne sont pas radioactifs. Les déchets potentiels se limitent, lorsque la réaction utilisée émet des neutrons rapides, aux matériaux environnants, qui peuvent capturer ces neutrons et devenir à leur tour des isotopes radioactifs. Les neutrons ne sont pas confinés électromagnétiquement car ils ont une charge électrique nulle. Ils sont donc susceptibles d'être capturés par les noyaux d'atomes de la paroi de l'enceinte, qu'ils transmutent parfois en isotopes radioactifs (phénomène d'activation). L'activation peut à son tour s'accompagner de production de noyaux d'hélium, susceptibles de fragiliser les matériaux de structure.

Par contre pour que deux noyaux fusionnent il faut les rapprocher. Hors l'interaction coulombienne s'y oppose. Il y a encore une barrière à franchir.

3.2 Barrière coulombienne

Pour réaliser le processus de fusion il faut que l'interaction nucléaire forte prenne le pas sur la répulsion stérique. C'est le cas pour des distances < 10 fm. On désigne par a la distance en-deçà de laquelle les forces nucléaires l'emportent. La barrière coulombienne a une hauteur alors de $Z_1 Z_2 e^2 / (4\pi\epsilon_0 a)$ La barrière tunnel est d'autant plus importante pour les noyaux lourds, plus chargés : dont la fusion concerne les noyaux légers. Plus l'énergie des noyaux est élevée, plus la probabilité de tunnel augmente.

Pour avoir fusion il faut donc passer par effet tunnel à travers la barrière de potentiel. La probabilité de passage est donnée par le facteur de Gamov (Approximation WBK) :

$$P \propto \exp\left(-2 \int_a^b \sqrt{\frac{2(V(r) - E)m}{\hbar^2}} dr\right)$$

Pour $E = 1 \text{ keV}$, $P \simeq 10^{-13}$, pour $E = 10 \text{ keV}$, $P \simeq 10^{-13}$ sachant que $E = 10 \text{ keV}$ correspond à une température de 115 million de K.

Il faut une installation permettant d'atteindre de très grande température. A ces températures, la matière est sous la forme de plasma. Le taux de réaction (nombre de réaction par seconde) et donc l'énergie dégagée seront proportionnelles à la densité de d et de t, il faut donc confiner ce plasma pour augmenter la densité. ODG : barrière tunnel 4 keV

Fusion stellaire : Dans les étoiles, le confinement est fait par la gravitation (qui est gigantesque). Au sein du Soleil, par exemple, la fusion de l'hydrogène, qui aboutit, par étapes, à produire de l'hélium, s'effectue à des températures de l'ordre de quinze millions de kelvins. 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.

Type	Confinement	$n (m^{-3})$	$\tau (s)$	$n\tau (m^{-3}.s)$	$T (K)$
ITER	Magnétique	10^{20}	1	10^{20}	$1, 7.10^8$
Laser	Inertiel	10^{31}	10^{-11}	10^{20}	10^8
Etoile	Gravitationnel	7.10^{30}	10^{17}	7.10^{47}	2.10^7

FIGURE 12 – *Confinement*

Confinement magnétique La fusion par confinement magnétique (FCM) est une méthode de confinement utilisée pour porter une quantité de combustible aux conditions de température et de pression désirées pour la fusion nucléaire. Le combustible doit au préalable être converti en plasma, celui-ci se laisse ensuite influencer par les champs magnétiques. Dans ces configurations, les particules composant le plasma suivent une trajectoire dépendant de leurs propriétés magnétohydrodynamiques et des lignes d'un champ magnétique généré par le plasma lui-même ou par des aimants. Un dispositif est appelé le Tokamac

On peut chauffer par :

- Chauffage ohmique, ceci permet de monter à 2à3keV
- par injection d'un faisceau d'atomes neutres accélérés.ceci permet de monter à 10 à20 keV
- Le chauffage par micro-ondes à haute fréquence

Confinement inertiel par laser : Dans cette voie, l'énergie est apportée par un faisceau de lumière laser ou bien par un faisceau de particules chargées (électrons ou ions) à une bille de combustible de qq mm de diamètre. L'ionisation et le chauffage rapide de la paroi externe de la cible conduit à une expansion du plasma. Puissance laser 1 PétaWatt, la densité atteint $10^{31}m^{-3}$, la température 10^7K . Ces conditions conduisent à un nombre très important de réactions de fusion, pendant environ 10 pico secondes. Le coeur brûle pendant un temps de l'ordre de $10^{-11}s$, sa cohésion étant maintenue par inertie, puis il explose sous l'effet de l'énergie thermonucléaire libérée. Un problème important, concerne l'uniformité de l'irradiation de la cible pour réaliser une implosion la plus sphérique possible.

3.3 Critère de Lawson

Pour des exploitation commerciale il faut que l'énergie libérée par fusion soit supérieure à celle consommée pour former et entretenir le plasma

Pour chauffer le gaz et le transformer en plasma (température nécessaire pour atteindre la fusion) il est nécessaire de dépenser de l'énergie. Soit n la densité d'ions (noyaux) dans le plasma qui occupe un volume V à la température T . On appelle τ le temps de confinement pendant lequel le plasma peut être maintenu à la température T de façon cohérente (soleil : $\tau = 10^{17}s$, ITER : $\tau = 1 s$). L'énergie pour créer le plasma est $W_{th} = 3nk_bT$ (3/2 par ions et électrons).

De plus l'énergie générée pendant un temps τ est

$$W_f = \frac{n^2}{4} \langle \sigma v \rangle V_f \tau$$

On trouve cette énergie en considérant qu'il y a autant de tritium que de deuterium et en observant que le taux de réaction est $\Gamma = n_d n_t \sigma$ avec v la vitesse relative, et σ la section efficace de la réaction de fusion que se calcul avec la probabilité de passage de la barrière de potentiel ... je sais pas trop, mais il y a la dépendance en n^2 Ensuite Q_f est l'énergie libéré par la réaction de fusion.

On en déduit le critère de Lawson : Comme on ne récupère pas tout l'énergie on a pour que le réacteur produise plus d'énergie qu'il n'en consomme :

$$W_{th} < \eta W_f n \tau > L$$

On peu étudier $\langle \sigma v \rangle$ avec Gamov et la statistique de maxwell Boltzman. On montre que ce terme est maximal pour une température de $T = 20keV \simeq 250$ million K. Donc pour $\eta = 1$ on a :

$$n\tau > 1.5 \times 10^{20} m^{-3}s$$

Ou on fait une étude graphique : *Les pertes par rayonnement proviennent essentiellement de l'émission de raies des atomes incomplètement ionisés.* **Sécurité :** De nombreuses difficultés sont à relever en ce qui concerne la fiabilité et la sécurité pour un fonctionnement sur le long terme. Elles varient selon le type de réacteur. Elles concernent notamment

- stabilité du plasma

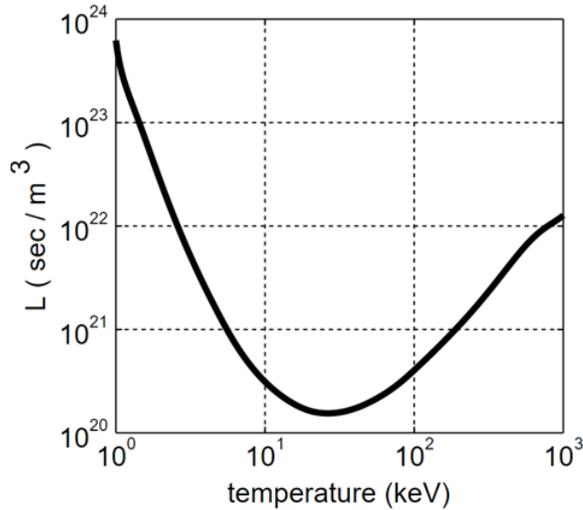


FIGURE 13 – *Etude graphique T_{min}*

- le confinement magnétique qui doit être constant
- la gestion de températures et pression très élevées
- la gestion du tritium dans les filières en produisant et consommant
- les risques combinés de corrosion et radiolyse pour les solutions fonctionnant à température et/ou pression élevée
- le risque sismique et de tsunami

L'objectif ici ne se limite pas à l'obtention des conditions d'ignition du mélange deutérium-tritium (on vise une puissance nucléaire de 1,5GW), il est de maintenir ces conditions en régime d'équilibre stationnaire pendant une durée de 1000 secondes

Conclusion

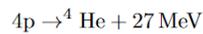
La stabilité du noyau atomique est décrite par les interactions nucléaires fortes, l'interaction coulombienne et des effets quantiques. On a développé le modèle de la goutte liquide, qui est semi-empirique. Il rend compte des résultats expérimentaux mais ne rend pas compte de tous les effets (les nombres magiques par exemple). La différence de stabilité des noyaux peut être utilisée pour extraire de l'énergie par fission ou fusion, mais avec un gros problème de déchets nucléaires pour la fission, et une limite technologique pour la fusion (notons aussi que les rayons gamma émis par fusion rendent les structures radioactives aussi, mais c'est moins grave que pour la fission). Les phénomènes radioactifs sont également utilisés dans le domaine médical, en datation,...

Ouverture sur la nucléosynthèse, Camille Normand :

3.3 Nucléosynthèse stellaire - optionnel

↪ Basdevant p.255

La réaction de fusion globale qui a lieu au sein du Soleil est :



Supposons le Soleil à l'équilibre. Afin de conserver sa luminosité $L_{\odot} = 4 \times 10^{23} \text{ kW} = 2.5 \times 10^{45} \text{ eV/s}$, combien faut-il réaliser de réaction de fusion par seconde ?

Il en faut $r = \frac{L_{\odot}}{27\text{MeV}} = 9 \times 10^{37}$ réactions/s. Or pour chaque réaction, 4 protons sont consommés. La variation du nombre de protons pendant dt est $\frac{dp}{dt} = 4r = -4 \times 10^{38}$ protons/s.

Ainsi le Soleil consomme $\frac{dp}{dt} m_p \sim 4 \times 10^{11} \text{ kg/s}$ de protons. Cette masse est à comparer avec la masse solaire $M_{\odot} \sim 10^{30} \text{ kg}$.

Si la source d'énergie du Soleil était :

- la fission : il faudrait fissionner $5 \times 10^{12} \text{ kg/s}$ d' ${}^{235}\text{U}$,
- le pétrole : il faudrait brûler 10^{19} kg de pétrole/s