

LP42 - Fusion, fission

Cléments COLLÉAUX et DE LA SALLE

15 juin 2020

Niveau : L3

Bibliographie

- ⚡ *Énergie nucléaire*, **Basdevant** → La base solide, tout y est et c'est très clair
- ⚡ *Physique subatomique, noyaux et particules*, **Valentin** → Quelques détails en plus
- ⚡ *Physique nucléaire*, **Le Sech, Ngô** → Parfois plus pédagogique que Basdevant

Prérequis

- Modèle de l'atome
- Effet tunnel
- Vallée de stabilité et radioactivités
- Tension de surface

Expériences

- 👤 Singe, ça part en réacteur nucléaire (+1)

Table des matières

Table des matières	1
1 Le noyau	2
1.1 Structure du noyau	2
1.2 Énergie de liaison	2
1.3 Courbe d'ASTON et modèle de la goutte liquide	3
2 Fission	6
2.1 Énergie et produits de fission	6
2.2 Barrière de fission	8
2.3 Réacteur nucléaire	9
3 Fusion	11
3.1 Énergie et produits de fusion	11
3.2 Barrière de fusion	12
3.3 Réacteur de fusion	12

Introduction

1 Le noyau

1.1 Structure du noyau

♣ *Le Sech, Ngô, p.17*

♣ *Valentin, p.8*

En 1911, l'expérience de RUTHERFORD démontre la structure de l'atome avec un noyau. Dès lors, les études du noyau se succèdent pour aboutir au modèle qu'on connaît aujourd'hui : un noyau est constitué de **protons** et de **neutrons**. On note habituellement Z le nombre de protons et $A = Z + N$ le nombre de **nucléons** (protons + neutrons).

Ainsi un noyau est ainsi caractérisé par ces deux nombres qu'on note habituellement :



La taille d'un noyau est typiquement de $10^{-15}m$, c'est donc 10^{-5} fois plus petit que l'atome lui-même !

Intuitivement, on a du mal à comprendre pourquoi des particules de charges de mêmes signes restent collées. La stabilité du noyau provient de la **force nucléaire forte** (résultante de l'interaction forte) qui est largement dominante à cette échelle de longueurs.

Remarque

Les masses du proton et du neutron sont de l'ordre de 10^{-27} kg... On peut s'amuser à montrer que la gravitation est totalement négligeable

1.2 Énergie de liaison

♣ *Basdevant, p.33*

♣ *Le Sech p.22*

Premièrement, il est important de remarquer qu'on peut associer, selon la théorie de la relativité restreinte une énergie à toute particule au repos.

Définition : Énergie de masse

On appelle **énergie de masse**, l'énergie d'une particule de masse m au repos :

$$E_m = mc^2$$

Remarque

À cause de cette correspondance, on note souvent les masses des particules en MeV. Il faut garder à l'esprit que la véritable unité est le MeV/c²

OG

proton	$1.673 \cdot 10^{-27}$ kg	938.3 MeV
neutron	$1.675 \cdot 10^{-27}$ kg	939.6 MeV
uranium 235	$3.902 \cdot 10^{-25}$ kg	218.9 GeV

On remarque alors que

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

$$E_m(A, Z) < (A - Z)E_{m,n} + ZE_{m,p}$$

Ce qui traduit le fait que la liaison est bien stabilisante : il coûte de l'énergie de casser l'atome.

Définition : Énergie de liaison et défaut de masse

À partir de cette considération, on peut définir l'**énergie de liaison** E_l , définie positivement, de sorte que

$$B(A, Z) = (A - Z)m_n c^2 + Zm_p c^2 - m(A, Z)c^2$$

On parle aussi parfois de **défaut de masse** :

$$\Delta m = \frac{B}{c^2}$$

OG

Cette énergie de liaison quantifie la stabilité de la liaison... Et les valeurs sont gigantesques :

Deutérium	${}^2_1\text{H}$	2.225 MeV
Fer	${}^{56}_{26}\text{Fe}$	492.28 MeV
Uranium 235	${}^{235}_{92}\text{U}$	1783.2 MeV

À titre de comparaison, si on veut casser une mole d'atome d'uranium 235 (environ 235 g), il faut donc une énergie de $1783.2 \cdot 10^6 \times 1.6022 \cdot 10^{-19} \times 6.022 \cdot 10^{23} = 172.0 \cdot 10^{12}$ J ! Sachant que la chaleur latente de l'eau est de $2265 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, il faut donc 10^8 fois plus d'énergie pour casser 1 mole d'uranium que pour évaporer 1 kg d'eau. Réciproquement, on imagine la quantité d'énergie qu'on peut récupérer !

1.3 Courbe d'ASTON et modèle de la goutte liquide

↪ *Le Sech p.29*

On comprends donc que plus le noyau grandit, plus le nombre de liaisons augmente et donc on pourrait en conclure que plus le noyau est stable... En réalité, si l'énergie totale de liaison augmente, cela ne veut pas dire que chaque liaison est toujours aussi stabilisante. La donnée vraiment intéressante est donc l'**énergie de liaison par nucléon** dans un noyau :

$$\frac{B}{A}$$

On est ainsi amenés à tracer la **courbe d'ASTON**, qui représente B/A en fonction de A pour les isotopes les plus stables.

Remarque

On pourrait détailler un peu ce que cette phrase soulignée veut dire avec la vallée de stabilité mais c'est un peu juste de l'aborder dans le cadre de cette leçon, surtout que ça nous mènerait automatiquement à parler de radioactivité, ce qui n'est pas dans le sujet.

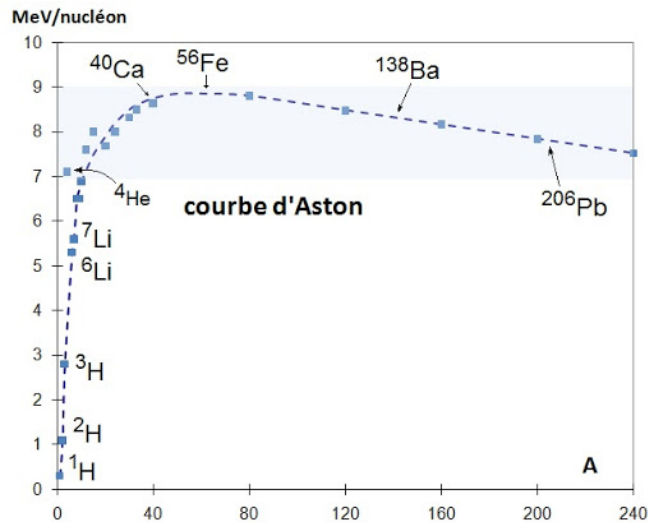


FIGURE 1.1 – Quelques points expérimentaux ainsi que la modélisation de la goutte liquide

Il y a plusieurs remarques à faire sur cette courbe :

1. On observe un maximum au niveau du ^{56}Fe . Ceci signifie que l'isotope 56 du fer possède le plus stable des noyaux, c'est là que chaque nucléon apporte une énergie de liaison la plus grande.
2. La remarquable stabilité du fer explique son abondance dans l'univers (6e élément le plus abondant) et sur Terre (2e après l'oxygène, 35% de la masse de la Terre)
3. Puisque le fer est le plus stable des noyaux, les petits noyaux, vont avoir tendance à fusionner (**fusion**), tandis que les plus gros vont se casser (**fission**) pour tendre vers le fer
4. Il existe des anomalies pour $Z, N \in [2, 8, 20, 28, 50, 82, 126]$, où la stabilité semble anormalement haute (pour ^4He , il y a $Z = 2$ et $N = 2$, d'où une très grande stabilité relative!). Ces nombres sont appelés **nombre magique** et leur origine est quantique (comparable à la stabilité des atomes lorsqu'une couche électronique est remplie). *▲ Le Sech, Ngô, p.23*

▲ Basdevant, p.67

▲ Le Sech, Ngô, p.27

Pour essayer de comprendre cette forme, il existe un modèle (posé par BOHR en 1935 et affiné par BETHE et VON WEIZSACKER plus tard) redoutablement efficace : le **modèle de la goutte liquide**. Le but de ce modèle est de faire l'analogie avec les forces de VAN DER WAALS et la stabilité d'une goutte liquide. Voici la formule proposer pour modéliser la courbe :

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

Tentons d'expliquer chacun des termes :

1. Le premier terme est un **terme volumique** (en effet, le volume du noyau est proportionnel à A). Ceci est dû au fait que l'interaction soit à courte portée, sinon le terme serait en A^2 .
2. Le deuxième terme est un **terme surfacique** (en effet si le volume est en A , alors la surface du noyau est en $A^{2/3}$). Son origine repose exactement sur les mêmes considérations que la tension superficielle (les nucléons à la surface sont moins stabilisés)
3. Le troisième terme est un terme de **répulsion coulombienne** des protons : l'interaction coulombienne est bien en $q_1 q_2 / r$
4. **Terme d'asymétrie**. Suivant les observations de la vallée de stabilité, les noyaux qui contiennent autant de protons que de neutrons ($A - 2Z = 0$) sont favorisés. On remarque aussi que rompre cette asymétrie est de moins en moins cher si A augmente (d'où le $1/A$)
5. Le dernier terme est un **terme d'appariement**, plus favorable lorsque N ou Z sont pairs :

$$\delta(A) = \begin{cases} -a_p/A^{1/3} & \text{si } (N, Z) \text{ sont pairs} \\ +a_p/A^{1/3} & \text{si } (N, Z) \text{ sont impairs} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

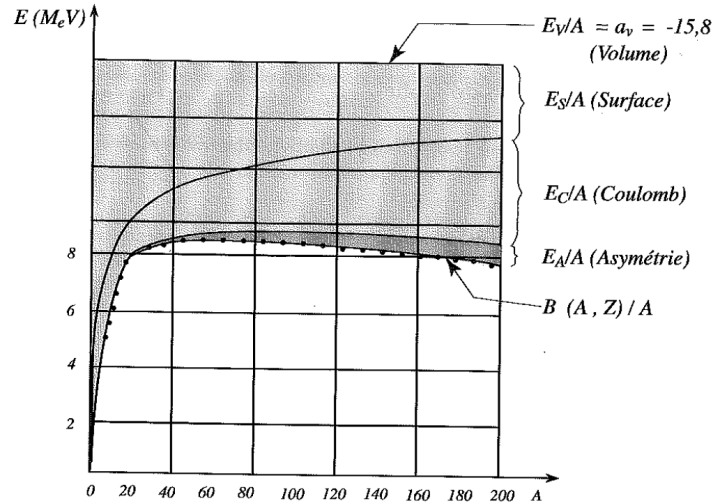


FIGURE 1.2 – Contribution des différents termes dans la formule de BETHE et VON WEIZSACKER

Résolution

Le fit donne les valeurs suivantes (en MeV) :

a_v	15.68
a_s	18.56
a_c	0.717
a_a	23.6
a_p	34

On remarque que l'interaction coulombienne est relativement peu importante par rapport au reste... Ce qui est logique

Laibe

D'après Laibe, faut faire gaffe : la goutte liquide c'est pas juste une régression à cinq paramètres. En réalité y en a qui sont trouvés théoriquement. Malheureusement je trouve rien qui dit ça dans la biblio... :/

Même si le fit semble parfait, ce modèle présente quelques défauts :

1. C'est un modèle empirique, même si on essaye d'interpréter chaque terme, leur origine profonde nous échappe
2. Il y a 5 degrés de liberté... Ça devient vraiment beaucoup, avec 8 on peut dessiner un éléphant : <https://youtu.be/uazPP0ny3XQ>
3. Ce modèle n'explique pas les nombres magiques !

2 Fission

♣ *Le Sech, Ngô, p.70*

♣ *Basdevant, p.186*

2.1 Énergie et produits de fission

La courbe d'Aston nous a permis de comprendre que l'élément le plus stable était le Fer car il possède l'énergie de liaison par nucléon maximale.

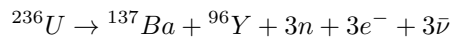
On s'attend donc à ce que des noyaux plus gros ($N > 56$) aient une facilité à s'alléger pour rejoindre la stabilité du Fer. Cette étude rapide de la courbe d'Aston nous permet de comprendre l'origine du phénomène de fission nucléaire.

Définition : Fission nucléaire

La fission nucléaire désigne la fragmentation, spontanée ou provoquée, d'un noyau lourd en deux noyaux fils plus légers.

Précisons la notion de noyau lourd : la fission est possible dès $A = 100$ et spontanée dès $A = 270$. Le seul noyau fissile (qui peut subir une réaction de fission sous l'effet d'un bombardement de neutrons) naturel est l'uranium 235.

Exemple de la fission de l'uranium 236 ^{236}U



La fission de l'Uranium 236 (soit la réaction de fission de ^{235}U induite par des neutrons), crée des noyaux de Baryum et d'Yttrium, qui sont les noyaux fils, ou **noyaux fragmentés finaux**, des neutrons libres (qui seront à l'origine des réacteurs nucléaires) et des leptons libres. Des photons énergétiques peuvent aussi être émis. Les particules émises emportent avec eux l'énergie fournie par la réaction sous forme d'énergie cinétique. On remarque que cette réaction vérifie la conservation de la charge, du nombre leptonique et du nombre de nucléons.

Avec l'écriture de la réaction ci-dessus on pourrait croire qu'il s'agit de la seule réaction de fission possible pour l'uranium 236. Cela n'est pas le cas, plusieurs couples de noyaux fils sont possibles, il faut raisonner en

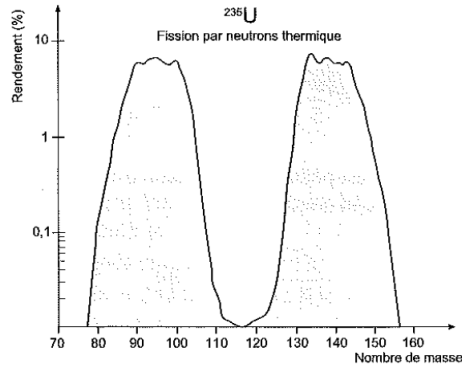


FIGURE 2.1 – Caption

termes statistiques. Les différents couples de noyaux fils possibles sont représentés pour différentes fission par la courbe de probabilité suivante :

On vérifie bien que pour ^{235}U , les noyaux fils ^{137}Ba et ^{96}Y ne sont pas les seuls possibles : on observe un pic de probabilité pour $A \simeq 95$ et $A \simeq 135$, la fission est asymétrique (ne donne pas deux noyaux fils identiques) et binaire (seulement deux pics localisés).

Nous savons que la fission nucléaire est utilisée comme source d'énergie, essayons donc de déterminer l'énergie libérée la réaction de fission d'un atome d'uranium 236.

Au vu de ce que nous avons déjà vu au cours de la partie I, nous pouvons calculer un ordre de grandeur de l'énergie E produite comme

$$\begin{aligned}
 E &= 137 \times B(N = 137) + 96 \times B(N = 96) - 236 \times B(N = 236) \\
 E &= 137 \times 8.3 + 96 \times 8.6 - 236 \times 7.5
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

On trouve $E = 192.7 \text{ MeV}$ ce qui correspond à l'ordre de grandeur expérimental de 200 MeV.

Neutrons

On garde à l'esprit que des neutrons sont émis, en moyenne 1.5, avec chacun une énergie de 8 MeV

OdG

On peut alors calculer l'énergie libérée par la fission d'un gramme d'uranium 235 :
 On trouve $E_{1g} \simeq 80 \text{ GJ}$. À comparer avec les 42 MJ obtenus par la combustion de 1 kg de pétrole. 1 kg d'uranium pur donne alors autant d'énergie que 2 tonnes de pétrole ! Il convient de préciser que l'uranium 235 n'est pas pur à l'état naturel (dans le minerai naturel 0.74 % de ^{235}U et le combustible nucléaire c'est . à 4 %) et que les étapes de purifications nécessaires coûtent de l'énergie.

| Cherchons maintenant à expliquer le mécanisme de fission

2.2 Barrière de fission

⚡ LP41

Pour expliquer la fission, reprenons le modèle de la goutte liquide décrit précédemment. On considère le noyau père sous forme d'une goutte dans laquelle on entrevoit déjà la forme des noyaux fils séparés d'une distance r_0 . La fission nucléaire suppose l'éloignement des noyaux fils et donc la déformation de la bulle correspondant au noyau père.

Cette déformation de la bulle s'accompagne d'une modification de son énergie telle qu'elle a été définie précédemment. Quand la bulle se déforme, sa surface augmente et donc **l'énergie de tension superficielle augmente**. En revanche, cette augmentation de la distance entre les noyaux fils entraîne une diminution de l'interaction coulombienne, **l'énergie d'interaction électrostatique augmente** donc. Ainsi, quand la distance r entre les noyaux fils varie entre r_0 et $+\infty$, l'énergie potentielle du système passe par un maximum.

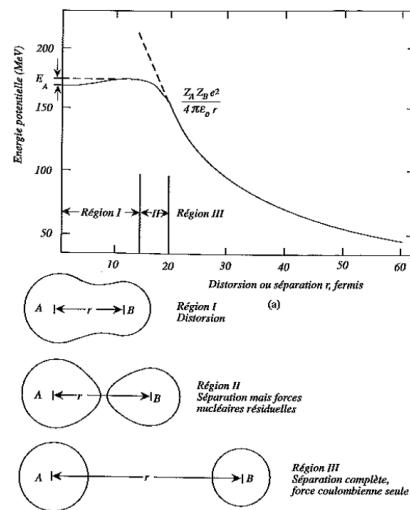


FIGURE 2.2 – ⚡ Basdevant p.90

En d'autres termes, entre les états initial et final de la fission, il y a une barrière de potentiel à franchir. On note E_A l'énergie d'activation la différence d'énergie entre ce maximum et l'énergie initiale. E_A correspond donc à la taille de la barrière de potentiel à franchir. En pratique, $E_A \simeq 7$ MeV. Les différents types de fissions (spontanée ou provoquée) diffèrent alors par la manière dont cette barrière de potentiel est franchir

- fission spontanée : la barrière de potentiel peut être traversée par effet tunnel. Cependant, compte tenu des masses entrant en jeu, la probabilité est généralement très faible : la durée de vie de l'uranium 238 est de l'ordre de 10^{16} années ce qui est assez grand..
- fission provoquée : on apporte une énergie au noyau via une autre particule comme un photon, une énergie suffisamment grande pour passer la barrière de potentiel. Attardons nous quelques temps sur l'utilisation de neutrons (qui ne ressentent pas l'attraction électrostatique).

Calcul

Askip y a un calcul qu'on peut faire sur le critère de fusion avec $\frac{Z^2}{A}$. Ouais tout à fait, faut checker dans *Le Sech p.73* .

♣ *Basdevant, p.191*

On peut calculer l'énergie ΔE apportée par un neutron à un noyau ^{235}U , on trouve alors :

$$\Delta E = T_n + B_n$$

où on note T_n l'énergie cinétique du neutron et $B_n = B(A+1, Z) - B(A, Z)$ l'opposé de l'énergie de liaison du neutron dans le noyau.

Si le neutron apporte au noyau une énergie supérieure à E_A alors la fission aura lieu mais cette condition n'est pas exclusive, il suffit que $E_A - \Delta E$ soit suffisamment faible pour que l'effet tunnel soit rapide (on rappelle que plus la barrière de potentiel est faible plus l'effet tunnel est rapide). Expérimentalement, il faut que $E_A - \Delta E < \Delta E_S = 1 \text{ MeV}$, avec ΔE_S le seuil de fission.

Si on a déjà $B_n > E_A$, alors des neutrons avec une faible énergie cinétique ($T_n \simeq 1/40 \text{ eV}$ suffisent à provoquer la fission. On parle alors de **neutrons lents ou thermiques**. Si en revanche $B_n < E_A$, alors il faut que le neutron ait une énergie cinétique suffisante pour provoquer la fusion. On parle alors d'énergie seuil T_n^{seuil} :

$$T_n^{\text{seuil}} = \Delta E_S - B_n \quad (2.2)$$

Le tableau ci-dessous répertorie quelques données :

	Noyau initial (A, Z)	Noyau final (A + 1, Z)	ΔE_S (MeV) pour (A + 1, Z)	$B_n(A + 1, Z)$ (MeV)	T_n (MeV) (seuil)
noyaux fissiles par capture de neutrons thermiques	$^{233}_{92}\text{U} + n \rightarrow$	$^{234}_{92}\text{U}$	5,4	6,9	
	$^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow$	$^{236}_{92}\text{U}$	5,7	6,3	
	$^{239}_{94}\text{Pu} + n \rightarrow$	$^{240}_{94}\text{Pu}$	5,5	7,3	
noyaux fissiles par capture de neutrons énergétiques	$^{232}_{90}\text{Th} + n \rightarrow$	$^{233}_{90}\text{Th}$	6,4	5,1	1,3
	$^{234}_{92}\text{U} + n \rightarrow$	$^{235}_{92}\text{U}$	5,8	5,3	0,5
	$^{238}_{92}\text{U} + n \rightarrow$	$^{239}_{92}\text{U}$	6,0	4,8	1,2

FIGURE 2.3 – Basdevant

| *Nous sommes donc armés pour comprendre comment marche une centrale nucléaire !*

2.3 Réacteur nucléaire

♣ *Le Sech p.217*

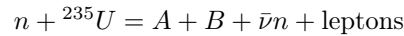
On l'a vu, une réaction de fission nucléaire dégage une quantité phénoménale d'énergie. Le but des centrales nucléaires est de récupérer cette énergie produite dans les réacteurs pour chauffer de l'eau qui va faire tourner des turbines.. Les produits de fission emportent l'énergie dégagée. L'énergie cinétique des

fragments lourds, ralentis immédiatement, chauffe le combustible (*Le Sech, p.187*). Il s'agit juste d'une machine thermique ayant pour source d'énergie la fission nucléaire.

Petit point vocabulaire sur les combustibles nucléaires :

- les trois combustibles nucléaires utilisés sont ^{233}U , ^{235}U et ^{239}Pu car ils fissionnent rapidement par capture de neutrons thermiques. On parle de **matériaux fissibles**
- sur ces 3 matériaux fissibles, un seul existe à l'état naturel, ^{235}U . Les deux autres sont instables au vu de la désintégration α et doivent donc être fabriqués dans les réacteurs par capture de neutrons rapides ($T_n \simeq 1 \text{ MeV}$) à partir de **matériaux fertiles** ^{238}U ou ^{232}Th

Let's focus on un réacteur fonctionnant avec de l'uranium 235. En notant A et B les noyaux fils, sa réaction de fission s'écrit



$\bar{\nu}$ représente le nombre moyen de neutrons produits, on a $\bar{\nu} = 2.4$. Comme $\bar{\nu} > 1$, on conçoit qu'il puisse y avoir un effet multiplicateur, les neutrons se multiplient de génération en génération et le taux de réaction augmente. On qualifie ce phénomène de réaction en chaîne.

Neutrons

Les neutrons émis sont des neutrons rapides, avec une vitesse de l'ordre de 20 000 km/s, qui sont ralentis (circuits de refroidissement par eau) pour refaire une fission

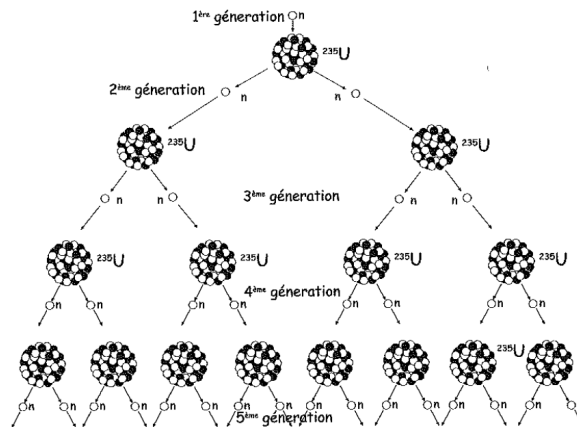


FIGURE 2.4 – *Le Sech p.219*

Cependant, tous les neutrons produits ne provoquent pas de fission (sinon ça diverge en même temps...), certains sont capturés par d'autres noyaux et d'autres peuvent s'échapper du milieu. Pour quantifier cela, on définit le coefficient de multiplication neutronique k

$$k = \frac{\text{nb de neutrons provoquant une fission à l'étape } n + 1}{\text{nb de neutrons provoquant une fission à l'étape } n}$$

- si $k < 1$, le régime est dit sous-critique, de moins en moins de neutrons sont utiles et la réaction en chaîne s'arrête d'elle-même.

- si $k > 1$, le régime est dit surcritique, de plus en plus de neutrons sont utiles et la réaction en chaîne s'emballe
- $k = 1$, le régime est dit critique, la réaction en chaîne est contrôlée, c'est le régime de fonctionnement des centrales nucléaires.

Masse critique

↪ *Ngô, p.201 + 224*

Les paramètres pouvant influencer ce nombre k sont la géométrie et la masse du matériau fissile. Il existe une masse critique (minimale), en dessous de laquelle, la réaction en chaîne n'est pas possible ($k < 1$). Cette masse dépend de la géométrie, notamment elle est beaucoup plus faible pour une sphère que pour un parallélépipède.

Pour conclure, on peut préciser qu'en France les réacteurs nucléaires utilisent des neutrons lents car ils sont capturés plus facilement par les noyaux d'uranium que les neutrons énergétiques (différence de section efficace). Pour ralentir les neutrons, on utilise un *modérateur* (eau lourde D₂O par exemple..) pour les ralentir et les thermaliser par collisions élastiques sur les noyaux du modérateur.

	σ_f	σ_γ	$\bar{\nu}$	η
Neutrons thermiques				
²³³ U	524	69	2,51	2,29
²³⁵ U	582	108	2,47	2,08
²³⁸ U	0	2,7	0	0
²³⁹ Pu	750	300	2,91	2,08
Neutrons rapides (~2 MeV)				
²³⁵ U	1,27	0,10	2,46	2,28
²³⁸ U	0,52	2,36	2,88	0,52
²³⁹ Pu	2	0,10	2,88	2,74

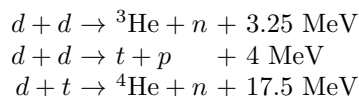
3 Fusion

3.1 Énergie et produits de fusion

↪ *Le Sech p.234*

↪ *Valentin p.195*

De même que pour la fission, on remarque sur la courbe d'ASTON, que la fusion de petits atomes ($A < 56$ en dessous du fer) pour en former de plus gros est un processus stabilisant, donc exothermique. Voici quelques exemples :



Ainsi les énergies dégagées sont grandes que pour la fission (on avait 200 MeV pour passer de environ 240 à 120 nucléons, c-à-d environ 1.7 MeV par nucléon... Ici 4 MeV pour passer de 2 à 3 nucléons, ça correspond à 4 MeV par nucléon). D'ailleurs cela se voit sur la courbe d'ASTON, puisque la pente est plus raide en montée (fusion) qu'en descente (fission).

OdG

Il faut un OdG pour un gramme de d

Définition : Fusion nucléaire

Processus au cours duquel, deux noyaux légers réagissent pour former un noyau plus lourd en libérant également de l'énergie.

Remarque

La fusion des atomes d'hydrogène en hélium dans les étoiles est la réaction est la réaction initiatrice universelle! Sans elle, il n'y aurait aucun autre atome dans l'univers.

Mais l'avantage de la fusion n'est pas seulement énergétique : les réactifs sont bien plus abondants que ceux utilisés pour la fission : dans 300 L d'eau de mer on trouve 1 g de Deutérium de telle sorte que l'eau de mer assurerait la consommation énergétique de l'homme sur un temps de l'ordre du milliard d'années! (↪ *Basdevant, p.233*) (et on n'a pas de problème de masse critique, mais ne pas en parler pour ne pas tendre le bâton... ↪ *Basdevant, p.204*).

3.2 Barrière de fusion

↪ LP41

Comme pour la fission, il existe une barrière énergétique à franchir pour que l'énergie soit libérée ensuite... Cette fois-ci, on ne l'interprète pas avec le terme surfacique de la goutte liquide, mais avec le terme coulombien. Rapprocher deux noyaux (chargés positivement tous les deux) coûte de l'énergie avant qu'ils ne se rapprochent d'une distance inférieure à 10 fm, à ce moment, l'interaction forte devient prédominante et la fusion est spontanée.

Le principe est le même que précédemment, cette barrière peut être franchie par effet tunnel avec une probabilité qui augmente lorsque l'énergie des noyaux :

$$\begin{aligned} E = 1 \text{ keV} & \quad P \sim 10^{-13} \\ E = 10 \text{ keV} & \quad P \sim 10^{-3} \end{aligned}$$

On remarque également que la taille de la barrière augmente si la charge des noyaux augmente... La fusion des noyaux légers est donc majoritaire à faible énergie.

3.3 Réacteur de fusion

La fusion nucléaire, bien que présentant de nombreux avantages, n'est pas utilisée encore aujourd'hui pour produire de l'énergie pour des problèmes techniques :

- Pour donner aux noyaux une énergie suffisante, il est nécessaire d'atteindre des températures très élevées, de l'ordre de 10^7 K. De même il faut une forte pression.
- Il faut donc, pour que la production soit rentable, que l'énergie dépensée pour maintenir le réacteur à cette température soit plus faible que l'énergie récupérée (critère de LAWSON).
- Pour ne pas endommager le matériel utilisé (n'importe quel métal fond à cette température), il est nécessaire de confiner le plasma pour qu'il ne soit pas en contact avec le réacteur. On peut utiliser pour ça soit un confinement magnétique (Tokamak), soit un confinement inertiel par laser... Dans tous les cas, c'est encore beaucoup d'énergie nécessaire!

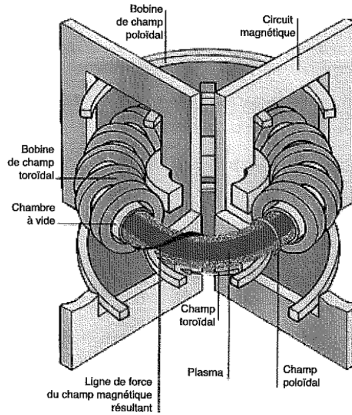


FIGURE 3.1 – Schéma de fonctionnement d'un Tokamak (réacteur de fusion nucléaire)

Critère de LAWSON

✦ *Basdevant, p.239*

On note τ le temps pendant lequel le plasma garde sa température T . Puisque l'énergie volumique nécessaire pour maintenir le tokamak à la température T est $3nk_B T$, alors la puissance nécessaire à fournir est

$$P_{\text{cout}} = 3 \frac{nk_B T}{\tau}$$

Où n est la densité de réactifs. De plus, on peut calculer la puissance fournie par les réactions :

$$P_{\text{fournie}} \propto n^2$$

Ainsi, on obtient un critère appelé **critère de LAWSON** :

$$n\tau > \alpha$$

Où α vaut (en supposant que toute l'énergie créée est récupérée) $1.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$

Type	$n(\text{m}^{-3})$	$\tau(\text{s})$	$T(\text{keV})$
Tokamak ITER	10^{20}	1	10 à 20
Inertiel (grav)	10^{31}	10^{-11}	10
Soleil Laser	$7 \cdot 10^{30}$	10^{17}	1,3

FIGURE 3.2 – Comparaison des données pour les trois différents types de fusion : pour les étoiles, le temps τ est très très grand, ce qui fait que le critère est facilement vérifié. Pour ITER, τ est plus grand que dans le confinement laser, mais en contre-partie, la densité de noyau est beaucoup plus faible... Mais le produit de l'ordre de $10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$

Questions

Comment ont pu se former initialement les gros noyaux (uranium, ...)? Quelques questions supplémentaires sur les différents termes de la goutte liquide. Le modèle de la goutte liquide est-il encore utilisé? Connaissez-vous d'autres modèles? Points communs et différences entre force électrostatique et d'interaction forte? Vous avez parlé de confinement (magnétique, inertiel), pouvez-vous en détailler un?

Comment fonctionnent les confinements magnétiques et inertiels? Sur quelle force repose le confinement magnétique? Dans quels centres de recherche l'une ou l'autre de ces méthodes est-elle employée? Pourquoi faut-il un temps de confinement de 1 ou 2 s? La première fission, réalisée par Fermi, dégageait quelques kW, qu'en pensez-vous? Pourquoi les expériences actuelles de développement de la fusion sont-elles de dimension beaucoup plus grandes que celle de Fermi? Qu'est-ce qu'une section efficace? Sur quelle condition nécessaire de la fusion intervient-elle? Le modèle de la goutte liquide est-il suffisant pour tout expliquer? Sur quoi repose-t-il? Quelles sont ses limites? Modèle semi-empirique. Quels termes de l'expression de l'énergie de liaison de Bethe-Weizsaecker permet-il d'expliquer? D'où viennent les autres termes? Que signifie que le noyau d'uranium est dans un état excité? Peut-on faire une analogie avec l'excitation d'un atome et les niveaux électroniques? Comment voir les niveaux d'énergie du noyau? Vous avez supposé dans le calcul d'ODG pour l'énergie cinétique des neutrons thermiques une température de 106 K. Que représente-t-elle?

Notion d'atome : depuis quand? Quand a été découvert le proton? le neutron? l'électron? 1887 : proton
1897 : électron (Thompson)
Rutherford

Tu mets $E=mc^2$ en prérequis, c'est quoi? ça vient d'où? Théorie de la relativité restreinte, pseudo-norme du vecteur impulsion, énergie au repos.

Différents types de radioactivité? Beta, alpha (émission d'une particule alpha = noyau d'hélium), gamma (émission de rayons gamma)

Pourquoi la radioactivité alpha émet un noyau d'He et pas autre chose? Noyau d'He particulièrement stable (ça se voit bien sur la courbe d'Aston) donc plus facile à expulser qu'un proton.

Nombres magiques? Expliquent les éléments particulièrement stables

Autres types d'interactions que forte? Gravitation, Electrostatique, faible

Modèle de la goutte liquide : proposée par qui? 1935

Combien d'éléments dans le tableau périodique? 118

Plus gros noyau qui existe à l'état naturel? Uranium

Différence entre thorium et uranium? Il existe quatre familles radioactives (uranium, thorium,) = suivant le types de réaction radioactives possibles.

On utilise surtout l'uranium car les autres familles ne sont plus vraiment présentes à l'état naturel

Quand a été découverte la radioactivité? P et M Curie, PN en 1907

La radioactivité c'est mal? Très utilisée dans le domaine médical (on injecte des produits radioactifs pour "voir" dans le corps)

Critère sur la stabilité des noyaux à partir du modèle de la goutte liquide? Possible pour la fission spontanée

Fission : cycle de vie de l'uranium? Extraction, enrichissement, réaction nucléaire, stockage provisoire, une partie est enterrée, une partie est retraitée (à la Hague) : mise en solution, extraction...

★ Comment marche Tokamak?

Confinement magnétique du plasma qui est formé de particules chargées. Pas juste un tore

Beaucoup de centrales en France ? Dans quel autre pays y en a beaucoup ? Oui 56 Japon

Exemples de catastrophes nucléaires ? Tchernobyl, Fukushima, et une aux US

On en fait quoi des centrales quand on les arrête ? Première centrale nucléaire de France (Brennilis en Bretagne), seule qui a été arrêtée en France, et on sait pas quoi en faire

Qu'est-ce qu'on utilise pour refroidir le réacteur ? Sodium liquide (avant : eau lourde)
Projet pour les EPR : eau pressurisée

Fusion : directement possible si on met deux noyaux côte-à-côte ? Effet tunnel qui fait que le fusion marche

Uranium : il nous reste quoi comme ressources ? 50-100 ans

A part un Tocamak, on peut faire comment pour confiner ? LASER (LMJ par exemple)

Est-ce qu'on sait faire de la fusion ? ITER : on arrive à atteindre les conditions pendant 1 min
Bombe H : seule fois où on a réussi à faire de la fusion (avec l'aide de la fission) mais on ne sait pas la contrôler

★ Comment on mesure la température du Soleil ?

5 800 K, on considère le Soleil comme un corps noir et on utilise la loi de Stefan. On regarde la luminosité du Soleil.

★ Comment montrer avec cette méthode que c'est d'origine nucléaire ? réaction forte, elle vient d'où fondamentalement ?

Portée par les gluons (mais ça répond pas à la question de la portée, enfin si ça vient de la masse non nulle des gluons)

★ Et la faible ?

Explique la radioactivité β , portée de 10^{-18} m

★ Pourquoi la courbe d'Aston pique autour du Fer ?

C'est un nombre magique (écart expérimental au modèle de la goutte liquide, bien plus stable, rapport particulier entre Z et $A - Z$)

★ Et la nucléosynthèse primordiale du coup ?

Fusion nucléaire, 4 protons qui forment de l'hélium mais ça s'arrête au Fer

★ Et du coup l'Or il vient d'où ?

★ Comment on mesure l'énergie de liaison ? Avec les masses de noyaux ? On compte l'énergie des électrons aussi

- ★ Modèle de la goutte liquide, tu peux expliquer le terme en $Z(Z - 1)$?

Coulombien, et $Z(Z - 1)$ parce que interaction entre le noyau qui a déjà donné une particule et celui qu'il n'en a pas donné

- ★ Modèle purement phénoménologique?

- ★ Pourquoi on cherche à équilibrer le nombre de protons et de neutrons?

Principe d'exclusion de Pauli, avec un n en trop y a désintégration beta

- ★ Qu'est-ce que ça explique pas ce modèle?

Nombres magiques

- ★ Qu'est-ce qu'il faut rajouter pour expliquer une étoile à neutrons?

Un tere gravitationnel, on a une goutte liquide géante

- ★ Fission spontanée, et pour les gros noyaux c'est dur de faire la fission spontanée mais uranium instable, il se passe quoi?

Radioactivité α (noyau d'hélium)

- ★ Si la réaction s'emballe dans un réacteur?

Neutrons captés par quelque chose..

- ★ Une centrale c'est une machine thermique, ça pose un problème pour le réchauffement climatique?

Source d'eau = source froide (un fleuve) et ça modifie le fleuve

- ★ Hypothèse de la formule du taux de probabilité barrière potentiel fusion, forme du potentiel,..

cf \blacktriangle LP41

- ★ Plasma, propagation des ondes dans un plasma?

RdD, gna gna gna

- ★ Charge de l'électron, comment elle est définie?

eV c'est l'énergie nécessaire pour arracher un électron

Remarques

- On peut prendre les aspects énergie verte en fil rouge
- Les calculs de barrière de potentiel c'est bien
- Goutte liquide
- On peut pousser un peu plus sur les limites des modèles et sur les aspects technologiques
- Dans les réactions chimiques c'est l'eV qui est mis en jeu
- h et e c'est défini maintenant
- Ça pique autour du Fer compétition entre tension de surface et Coulomb (à droite tu relaches le terme de Coulomb beaucoup plus vite que tu relaches le terme de tension de surface)
- les éléments plus lourds que le Fer ça vient des supernovae
- Les coefficients dans la formule de la goutte liquide on peut les obtenir en considérant un gaz de fermions dans un puit de potentiel
- On peut parler de la section efficace qui décroît très vite avec l'énergie donc même si ça s'emballe ça explose pas (équilibre à grande température donc ça chauffe et y a plus rien donc ça explose pas)