

Chapitre 42

Fission, Fusion

Niveau : LICENCE

Prérequis : _____

- Interactions fondamentales
- Structure de la matière, structure électronique des atomes
- Radioactivités alpha et bêta.
- Bases de relativité, $E = mc^2$
- Électrostatique, interaction coulombienne, section efficace
- Effet tunnel

Plan : _____

1. Énergie disponible dans le noyau atomique

2. La fission nucléaire : mécanisme d'allègement des noyaux lourds

3. La fusion, mécanisme de stabilisation des noyaux légers

Bibliographie : _____

- [24] Le Sech and Ngô, Physique nucléaire
- [4] Basdevant and Rich, Énergie nucléaire
- [35] L. Valentin, Le monde subatomique

Idées à faire passer : La cohésion des nucléons est favorable en énergie du fait de l'interaction forte. Ainsi, la fusion des noyaux légers ou la fission des noyaux lourds libère une quantité d'énergie sous forme d'énergie cinétique. Cette énergie, si elle est bien sûr faible devant les énergies de notre échelle pour une unique réaction, devient largement exploitable dès lors que la masse de réactif devient macroscopique. C'est à la récupération de cette énergie que l'on s'intéresse ici.

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

42.1 Énergie disponible dans le noyau atomique

42.1.1 Cohésion du noyau

Le noyau est le cœur de l'atome. Il est constitué de protons chargés positivement et notés par la suite \mathbf{p} et de neutrons notés par la suite \mathbf{n} . Les protons et les neutrons forment les nucléons. Pour chaque atome, on désignera par Z le nombre de protons, N le nombre de neutrons et A le nombre de nucléons.

On appelle isotope, deux noyaux qui ont le même nombre de protons Z . On désignera par noyaux pairs, des noyaux où Z et N ont la même parité, sinon on parlera de noyaux impairs. Parmi les noyaux pairs, on distingue encore deux groupes les noyaux pair-pair et impair-impair.

Il existe quatre interactions fondamentales pour assurer la cohésion du noyau ([24], chapitre 1) et si l'on néglige l'interaction gravitationnelle alors il ne reste que trois interactions que sont :

- l'interaction électromagnétique qui est au cœur des réactions chimiques et qui stipule que deux corps de même charge se repoussent, or les protons au sein d'un noyau restent ensemble et donc une autre force intervient ;
- l'interaction forte qui stabilise le noyau et qui, en compétition avec l'interaction électromagnétique, assure la cohérence des noyaux : cette compétition va donner des noyaux stables et instables.
- l'interaction faible régit la radioactivité bêta des noyaux.

42.1.2 Stabilité des noyaux

On parle de noyau stable lorsque son temps de demi-vie est supérieur à l'âge de l'Univers (de l'ordre de 10^{17} s. Les noyaux situés qui ne sont pas dans la ligne des noyaux stables se désintègrent par radioactivité. Ainsi, la radioactivité est le moyen pour ses noyaux de rejoindre la droite des noyaux stables.

On remarque par ailleurs que la masse de l'ensemble des nucléons non liée est toujours supérieure à la masse du noyau considéré. Ainsi, on définit l'énergie de liaison comme étant l'excédent d'énergie dû à la différence de masse observée avec : [24], (pp. 22-23)

$$E_l = \Delta M(A, Z)c^2 \quad (42.1)$$

avec $\Delta M(A, Z)$ le défaut de masse $\Delta M(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n$. En observant la courbe d'Aston, on remarque que la stabilité des noyaux n'est pas uniforme, il y a des noyaux "plus" stables que d'autres. Ainsi, les noyaux pairs-pairs ont une énergie de liaison supérieure aux noyaux impairs-impairs.

Même si dans tous les cas leur temps de demi-vie sont largement macroscopiques on peut avoir intérêt à déstabiliser certains d'entre eux qui vont alors migrer vers des noyaux plus stables et libérer le surplus d'énergie de liaison. On a donc intérêt à estimer précisément ces énergies de liaison mais la résolution exacte de la configuration du noyau est un problème à A corps évidemment insoluble analytiquement. On va chercher à l'estimer à partir d'un modèle effectif, le modèle de la goutte liquide.

42.1.3 Le modèle de la goutte liquide

Un des premiers modèles nucléaires proposés par Niels Bohr en 1935 est le modèle de la goutte liquide. Le nom de goutte liquide vient du fait que comme les molécules d'une goutte

d'eau, les nucléons interagissent fortement avec leurs plus proches voisins. Alors, le rayon, la densité, l'énergie de volume et la tension superficielle vont permettre de décrire les propriétés des nucléons. [4], p. 68

Ce modèle marche bien pour expliquer la radioactivité β , l'énergie de liaison et la fission spontanée même s'il reste relativement simple et fonctionne pour les gros noyaux. A partir d'une certaine taille de noyau ($A > 16$), on estime l'énergie de liaison qu'on appelle B à l'aide d'une approche semi-empirique grâce à la **formule de Bethe-Weizsacker** ([24], pp. 29-31) :

$$B(A, Z) = a_v A + a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N - Z)^2}{A} + \delta(A) \quad (42.2)$$

Chaque terme a une signification que l'on va expliquer :

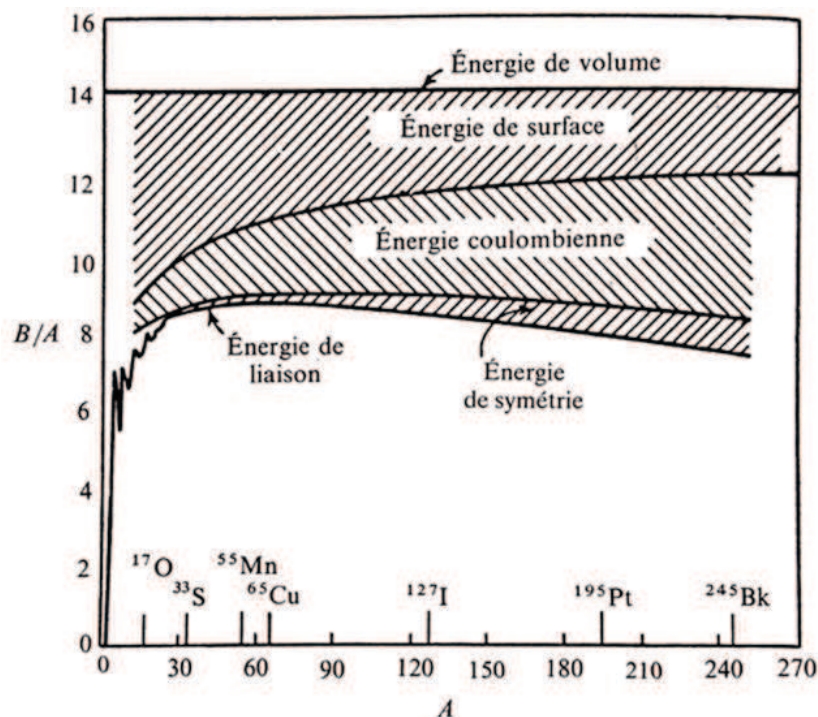


FIGURE 42.1 – Modèle de la goutte liquide (Valentin)

- le **premier terme** est le terme de volume qui reflète les interactions entre proches voisins, ainsi comme V est proportionnel à A et est en R^3
- le **second terme** a_s est un terme de surface, il va abaisser l'énergie de liaison et on peut le rapprocher à un terme de tension superficielle.
- le **terme en a_c** est un terme de répulsion coulombienne des protons. Ce terme va favoriser un excès de neutrons par rapport aux protons. On peut retrouver facilement ce terme à l'aide du théorème de Gauss par exemple.
- le **terme en a_a est** un terme d'assymétrie provenant de la mécanique quantique et qui va favoriser la symétrie entre les protons et les neutrons.
- $\delta(A)$ est le terme quantique d'appariement : les fermions appariés sont davantage liés grâce à la force d'échange existante.

Transition : Ainsi, les noyaux les plus stables sont situés autour du Fer. Les noyaux plus lourds vont avoir tendance à se diviser en noyaux plus petits et plus stables, c'est la fission. Les noyaux plus légers vont avoir, eux, tendance à s'agréger pour s'alourdir, c'est la fusion. On va étudier les deux processus dans la suite, à commencer par celui qui aujourd'hui le mieux maîtrisé à savoir la fission.

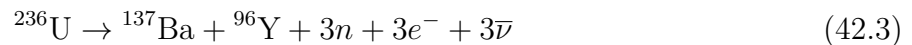
42.2 La fission nucléaire : mécanisme d'allègement des noyaux lourds

42.2.1 Réaction, énergie et produits de fission

La fission nucléaire se définit comme étant le processus par lequel un noyau lourd se scinde en deux noyaux plus légers. Ce processus ne concerne que les noyaux lourds. [4], p. 185 (chapitre 6)

Si l'on suppose que les deux noyaux produits par fission ont pour caractéristique $Z/2$ et $A/2$, on peut alors estimer l'ordre de grandeur de l'énergie de fission :

Prenons l'exemple de la fission d'un élément, l'uranium 236. Elle est décrite par la réaction suivante ([4], p. 186) :



Or, le même noyau ne produit pas forcément le même nombre de produits finaux alors on raisonne de façon statistique et la fission n'est pas symétrique. Cette dissymétrie peut s'expliquer par le fait qu'il existe des noyaux "plus stables" que d'autres, ce qui se voit avec la forme de certains noyaux.

Certains noyaux sont parfaitement sphériques alors que d'autres possèdent des formes oblongues, ce qui est expliqué par le modèle en couche du noyau (cf. [4], p. 78) et les nombres magiques qui correspondent à des couches fermées en proton et/ou en neutron.

42.2.2 Mécanisme de la fission

On cherche à partir d'un noyau sphérique à obtenir deux noyaux sphériques, le mécanisme est alors celui représenté sur la figure ci-dessous et permet de garder une énergie de volume identique. Ainsi, l'énergie électromagnétique baisse puisque les charges de même signe

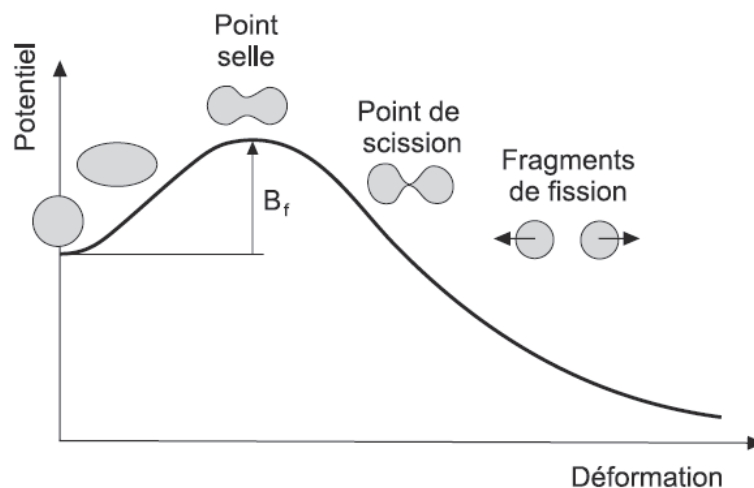


FIGURE 42.2 – Représentation du processus de fission ([24] p 72)

s'éloignent pendant que l'énergie de surface augmente. Ainsi, on observe un maximum d'énergie potentielle et la fission peut être spontanée (effet tunnel on a alors $\tau \geq 10^{16}$ s) ou induite par apport extérieur d'énergie (photon, neutron, ...); voir [4], p. 189. C'est le principe des réacteurs nucléaires.

42.2.3 La fission par neutron thermique : Réacteurs nucléaires

Le principe de la fission par neutron thermique est de provoquer une réaction en chaîne en libérant des neutrons qui seront capturés et provoqueront la fission, ce qui aura pour effet de libérer à nouveau des neutrons et ainsi de suite ([24], p. 225)

Pour avoir une réaction en chaîne, il faut alors que le nombre de fissions nucléaires soient supérieures au nombre de neutrons perdus. En effet, tous les noyaux ne sont pas capables d'enclencher des réactions en chaîne. Pour la réaction nucléaire, les ingrédients sont alors :

- le combustible : c'est forcément un noyau fertile (qui donne un noyau fissile par absorption de neutron), en général de l'uranium 235 car il est facilement trouvable.
 - un modérateur de réaction ([35], p. 195) : Il faut que les neutrons puissent-être absorbés par les atomes d'uranium pour provoquer la fission, et pour cela ils doivent avoir une section efficace la plus grande possible. La section efficace de fission neutron-noyau diminue avec l'énergie cinétique des neutrons : il faut donc ralentir les neutrons produits. Pour cela, on utilise des réacteurs à eau pressurisée (PWR en anglais) [4], p. 183
 - Contrôle : [24], p. 229.
 - Fluide caloporteur : pour extraire la chaleur du cœur, [24], p. 226
- Problèmes : [35], p. 187 et [4] pour les problèmes liés aux déchets.

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

42.3 La fusion, mécanisme de stabilisation des noyaux légers

42.3.1 Propriétés de la fusion

La fusion nucléaire peut se définir par l'assemblage de deux noyaux légers en un noyau plus lourd. C'est le processus de fusion d'atomes d'hydrogènes en atome d'hélium qui est notamment responsable de l'énergie solaire que l'on reçoit. ([4], p. 233-235)

Si on prend l'exemple des fusions conduisant au noyau d'hélium alors on a une réaction particulièrement exothermique puisque l'hélium possède une énergie de liaison très importante.

Les difficultés engendrées pour pouvoir provoquer une fusion humaine sont notamment d'ordre technique, l'une d'elle étant la "barrière coulombienne". En effet, l'interaction faible qui régit la fusion et permet de contrebalancer l'interaction coulombienne ne se manifeste que lorsque les noyaux sont suffisamment proches (10 fm). Pour arriver à franchir cette barrière, il faut alors une haute température et une haute compression ([4], p. 238).

42.3.2 La fusion comme processus originel de la matière

La fusion dans les étoiles qui demande une température très élevée est permise par le confinement inertiel. Comme son nom l'indique, la température élevée est atteinte car la matière est concentrée dans un petit espace et ne peut s'échapper. C'est la gravitation qui va permettre ce confinement.

Ainsi dans le Soleil, cette fusion thermonucléaire est non contrôlée conduit à la fusion d'atomes d'hydrogène pour donner un atome d'hélium qui lui-même va subir la fusion et ainsi la fusion aboutit à des atomes de plus en plus lourd jusqu'au fer et ensuite, comme il n'y a plus de matière à fusionner, l'étoile peut s'effondrer en supernova.

42.3.3 Idéalité de la fusion réalisée sur terre

Le confinement inertiel demandant des masses considérables, pour réaliser la fusion sur Terre, on privilégie alors le confinement magnétique. Un des projets les plus connus est sans doute le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). L'idée ici est d'utiliser le champ magnétique pour emprisonner un plasma qui doit monter suffisamment en température pour permettre la fusion. Ainsi, ITER a pour projet de créer et maintenir le plasma pendant 400 secondes. Mais cela n'est que le début puisqu'il faudra un autre réacteur nucléaire de fusion pour pouvoir produire de l'électricité à l'échelle industrielle. Alors, cette production ne sera pas opérationnelle avant la fin du siècle voir le début du siècle suivant.

Conclusion : Le noyau est donc une source considérable d'énergie du fait de l'interaction forte qui maintient sa cohésion pourtant déstabilisée par les interactions coulombiennes. Si nous sommes aujourd'hui capables de contrôler la fission nucléaire et d'exploiter l'énergie qu'elle libère dans les centrales dites nucléaires, chacun à bien conscience du danger qu'elles présentent et de l'intérêt de développer une source d'énergie plus sûr, pourquoi pas la fusion nucléaire qui risque de prendre encore des années ainsi le recours aux énergies renouvelables est une des pistes envisagées.

Commentaires

Bibliographie :

- [24] Le Sech & Ngô, *Physique nucléaire*.
- [35] L. Valentin, *Le monde subatomique*.
- [4] Basdevant & Rich, *Énergie nucléaire*.