

LP 42 – FUSION, FISSION

7 avril 2019

Marc Lagoin (discussion) & Ramborghi Thomas

Niveau : L3

Commentaires du jury

- Il ne faut pas se contenter d'un exposé descriptif sur les réactions de fusion et de fission
- Le candidats doit avoir 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.
- Si l'on évoque le modèle de la goutte liquide il faut l'exploiter.
- Les ordres de grandeurs sur les énergies et les applications sont importantes dans cette leçon.

Bibliographie

- ♣ *Énergie nucléaire*, **Basdevant** Pour la fusion et la fission
- ♣ *Physique nucléaire*, **Le Sech** Pour l'étude du noyau

Prérequis

- Modèle de l'atome
- Nucléons, isotopes
- Interaction forte/coulombienne
- Effet tunnel

Table des matières

1	le noyau atomique	2
2	fission	3
2.1	Énergie et produits libérés	3
2.2	mécanisme de réaction et barrière de fission :	4
2.3	réacteurs nucléaire	4
3	fusion	5
3.1	Énergie d'activation	5
3.2	Taux de réaction	5
3.3	Critère de Lawson	6

Introduction

Applications bien connues bombe nucléaire et centrale nucléaire.

1896 découverte de la radioactivité par Becquerel

L'étude de la fusion et de la fission passe par la compréhension du noyau atomique

Découverte d'une source potentielle importante d'énergie : fission et fusion

1 le noyau atomique

- positionnement du problème en ordre de grandeurs :

taille d'un noyau atomique 10^{-15}m

masse d'un nucléon $1,67 \times 10^{-27}\text{kg}$ Ces val sont très petites donc on utilise plutôt les $\text{MeV}c^{-2} = 1,78 \times 10^{-30}\text{kg}$

$$m_{\text{électron}} = 511\text{keV}c^{-2}, m_{\text{proton}} \approx 938\text{MeV}c^{-2}, m_{\text{neutron}} \approx 940\text{MeV}c^{-2}$$

- Importance de l'énergie de liaison :

Énergie des nucléons \neq énergie du noyau \rightarrow énergie de liaison abaisse E_{tot} de l'édifice. On def énergie de liaison par nucléon

Ex avec E liaison importante : le noyau d'hélium (particule α) $\Delta M(\text{parnucléon}) = 7,08\text{MeV}c^{-2}$

Plus généralement : $\Delta M(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n - M(A, Z)$

Attention à la convention de signe ici l'énergie est en réalité abaissée.

Atome complet, on tient compte des électrons. Cependant leur masse est négligeable devant celle du noyau. Ex pour le deutérium $\Delta E_{\text{électron}} = 13,6\text{eV}$ et $\Delta E_{\text{noyau}} = 2,22\text{MeV}$

Flexcam : fig 1.2 p35 Basdevant $\rightarrow E_{\text{liaison}/A}(A)$

- Vallée de stabilité $N(Z)$

Représente les 256 noyaux naturels stables (le + lourd étant le Bismuth $Z = 83$ et $N = 209$)

Certains pourraient être considérés comme stables car période de désintégration très longue. Ex : $Pb(Z = 82 \text{ et } A = 204)$ à une période de $1,4 \times 10^{17}\text{ans}$

Flexcam : fig 2.3 p26 Le Sech \rightarrow vallée de stabilité $N(Z)$

- modèle de la goutte liquide

Dans les années 1930, un modèle semi-empirique fut développé donnant approximativement la masse d'un noyau par l'expression :

$$M(A, Z)c^2 = Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 - a_v A + a_s A^{\frac{2}{3}} + a_c \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} + a_a \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta$$

Supposition ici noyau = goutte liquide \rightarrow justification : énergie de liaison par nucléon varie peu lorsque le nombre de masse est sup à 40 de même pour la densité puisque le rayon évolue en $A^{\frac{1}{3}}$ \rightarrow incompressibilité comme les liquides. Les forces inter-moléculaires sont semblables aux forces nucléaires dans les noyaux (attractive à courte portée). On peut noter qu'il existe des modèles plus élaborés tel que le nuclear shell models.

On reprend l'expression de liaison d'un noyau + formule proposé en 36 pour obtenir :

$$\Delta E_{\text{noyau}} = a_v A - a_s A^{\frac{2}{3}} - a_c \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta$$

1^{er} terme : terme de volume, force nucléaire de courte portée \rightarrow plus proche voisin uniquement. Analogie Van der Waals pour les liquides : nb de nucléons \times densité d'énergie par nucléon.

2nd terme : terme de surface correction car moins de nucléon autour.

3^{ème} terme : terme de répulsion coulombienne des protons dans le noyau.

4^{ème} terme : terme d'asymétrie. Pour Z sup à 40, nb de neutron sup à nb de proton. Or interaction nucléaire préfère un nb =. donc terme correctif proportionnel à la diff proton-neutron et inversement proportionnel à la masse du noyau.

δ : force d'appariement des nucléons =0 pour les noyaux pair-impair (A et Z), = $a_p \frac{1}{A^{\frac{1}{2}}}$ pour pair-pair et = $-a_p \frac{1}{A^{\frac{1}{2}}}$ pour impair-impair.

Il est important de noter que le modèle de la goutte liquide ne donne pas des valeurs de masse satisfaisantes pour les atomes possédant Z ou $A - Z$ égale à un nombre magique. Il n'explique pas non plus le moment magnétique ni le spin les noyaux. Cependant il permet quand même d'expliquer qualitativement la stabilité des noyaux et les réactions de désintégration en chaîne.

Avec ce modèle, on peut déterminer les atomes stables pour un A donné. On réécrits l'énergie de liaison par puissance de Z . Pour A impair, On trouve une parabole dont le min nous donne le Z stable (minimisation de l'énergie). Pour A pair, on a 2 paraboles $\rightarrow Z$ min correspond à la moyenne de 2 (voir 3) noyau stables.

2 fission

Fusion et fission = 2 grosses sources d'énergie.

Def d'une fission en s'aidant d'un bilan réactif-produit et positionnement sur le graphique $E_{\text{liaison}/A}$ fct de A .

2.1 Énergie et produits libérés

- Énergie libérée :

Calcul de énergie libérée pour $A = 240$ nucléons : on suppose qu'il se fragmente en $2 \times A = 120$.

On regarde sur la courbe l'énergie de liaison par nucléon en fonction de A les énergies de liaison correspondantes. Ici $E_{\text{liaison}/A}(A = 240) \approx 7,6\text{MeV}$ et $E_{\text{liaison}/A}(A = 120) \approx 8,5\text{MeV}$.

Si l'on suppose que l'énergie lib est égale à la diff des énergies de liaison, on obtient : $\Delta E \approx 2 \times 120 \times 8,5 - 240 \times 7,6\text{MeV} \approx 220\text{MeV}$.

En réalité il y a toujours des neutrons produits d'où : $\Delta E \approx 220 - n_{\text{neutrons}} \times 8,5\text{MeV} \approx 200\text{MeV}$ Ce résultat est en faite indépendant du noyau lourd initial considéré.

Ordre de grandeurs : comparaison E_{lib} pour 1 g d'uranium = $200\text{MeV} \times (\text{le nombre de noyau dans un } 1\text{g}) = 81\text{GJ}$ avec énergie libérée par 1 kg de pétrole 42MJ.

- Produits obtenus :

Pour 1 noyau ini il peut en avoir plusieurs \rightarrow probabilité.

La distribution est la plupart du temps binaire et est donc composée de 2 pics.

Flexcam : fig 6.1 p188 Basdevant \rightarrow fragments de divers noyaux.

\neq catégories de produits : fragments de fission, particules promptes émises direct par les fragments, particules retardées émises par les produits après désintégrations.

Les neutrons produits (2,47 pour l'uranium) vont engendrer une réaction en chaîne (leur énergie moyenne est de 0,7MeV). Les fragments produits sont souvent instables et vont de désintégrer jusqu'à atteindre un composé stable.

2.2 mécanisme de réaction et barrière de fission :

Flexcam : fig 6.2 p190 Basdevant \rightarrow Énergie d'un noyau déformé.

Lorsque l'on déforme le noyau, la surface donc l'énergie surfacique augmente. On a également une diminution de l'énergie de répulsion coulombienne \rightarrow 2 phénomènes en compétition, d'où le graphique \rightarrow barrière de potentiel à franchir.

2 moyens : fission spontanée dont le temps de demi-vie peut être très long. Ex 10^{16} ans pour l'uranium. fission induite par absorption d'un photon (photofission) ou par capture d'un neutron.

On peut refaire le calcul du gain en énergie dans le cas où un neutron arrive avec une énergie cinétique E_c sur un noyau. L'énergie utilisable après formation du nouveau est de :

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_{\text{tot-initial}} - E(\text{noyau équivalent avec } A+1, Z) \\ &= ((A+1-Z)m_n c^2 + Zm_p c^2 - E_{\text{liaison}}(A, Z) + E_c) - ((A+1-Z)m_n c^2 - Zm_p c^2 + E_{\text{liaison}}(A+1, Z)) \\ &= E_c + \Delta E_{\text{liaison}} \end{aligned}$$

Cette énergie doit être sup à l'énergie d'activation E_A (ou proche car effet tunnel possible)

Si $\Delta E_{\text{liaison}} > E_A$, des neutrons thermiques (énergie = $k_b T$) suffisent à déclencher la réaction sinon il faut des neutrons accélérés.

On déf. $E_{\text{seuil}} = E_A - 1\text{MeV}$

Flexcam : Tab 6.1 p193 Basdevant \rightarrow valeur énergie seuil et énergie de liaison pour montrer les 2 cas précédent.

NB : noyau pair-pair sont plus liés donc c'est ceux que l'on retrouve dans la seconde ligne et impair-impair moins liés donc neutrons thermiques suffisent. (cf terme appariement)

2.3 réacteurs nucléaires

Les premiers réacteurs fonctionnels ont vu le jour dans les années 1950 (Marcoule en 1956 pour une puissance de 40MW).

Énergie nucléaire = énergie concentrée 1 million de fois plus que les énergies fossiles \rightarrow quantité de déchets produits beaucoup plus faibles mais plus dangereux pour certains et mettant beaucoup plus de temps à se décomposer pour d'autres ! L'énergie nucléaire représentant 78% de l'énergie produite, nous arrivons à un bilan de 1kg de déchets nucléaires par habitant et par an dont 10 grammes devront être stockés sur du long terme. 2 façons de les traiter : cycle ouvert (les laisser tel quel = États-Unis pour éviter la prolifération de matière nucléaire) vs cycle fermé (valoriser les déchets qu'il est possible de réutiliser = France).

Ordre de grandeurs : 450TWh d'électricité ont été produits en 2006 par les centrales nucléaires françaises (Rendement = 33%) ce qui correspond à une masse de 54kg.

Les neutrons émis ont une énergie de l'ordre de 2MeV. À ces vitesses, la section efficace est réduite donc la proba de capture aussi. Ils doivent donc être ralentis. De plus les neutrons rapides ont souvent des collisions élastiques donc

sans interaction à l'inverse des neutrons lents.

Pour qu'une réaction en chaîne s'installe, une partie des neutrons produits et ralentis doivent à leur tour engendrer une fission. On définit le coefficient de multiplication neutronique k comme le rapport du nombre de neutrons entre une génération et la suivante. si $k > 1$ milieu surcritique, $k < 1$ sous-critique et $k = 1$ critique.

Le ralentissement peut s'effectuer à l'aide l'eau légère qui est un modérateur très efficace mais qui absorbe des neutrons \rightarrow il faut donc de l'uranium enrichis. L'eau lourde (D_2O) peut aussi être utilisé et est peu absorbant mais couteuse. Ces 2 exemples ont l'avantage de servir aussi de fluide caloporteur à l'inverse du graphique.

Des réacteurs à neutrons rapide existe également. Il faut alors des fluide calo plus efficace pour contrer la baisse de la section efficace (Na, Hg, Pb, He) ainsi qu'un enrichissement en uranium 235 (noyau fissile). Ce flux rapide permet de transformer l'uranium 238 (noyau fertile) en Pu (plutonium) qui est fissile en ainsi valorisé cette isotope dominant dans la nature.

Jusqu'ici nous avons un gain d'énergie sous forme de chaleur. Dans une centrale, cette chaleur permet la production de vapeur entrainant des turbines \rightarrow énergie méca + transformateur = énergie électrique.

Les neutrons évoqués jusqu'ici sont des neutrons prompts. Ces derniers sont produits trop rapidement pour pouvoir contrôler k dès lors qu'il est plus grand que 1. L'idée est donc de se placer légèrement en dessous et de contrôler finement la valeur à l'aide de neutrons retardés qui eux sont émis en aval de la fission. Ce contrôle s'effectue à l'aide de barres de contrôle (matériau absorbant les neutrons), de poisons neutroniques (produit de fission à grande section efficace),ect ...

3 fusion

Fusion = première source d'énergie à travers l'univers. Sources potentiel d'énergie immense (l'eau de mer assurerait nos besoins sur des milliard d'années) et plus propre que la fission.

Ordre de grandeurs : prenons la réaction deutérium + tritium = hélium + neutron + ΔE . Ici $\Delta E = 17.5\text{MeV}$ soit 3.5MeV par nucléons. L'énergie produite pour un gramme du mélange initiale produit autant d'énergie que 8 tonnes de pétrole.

3.1 Énergie d'activation

Tout comme la fission, la fusion nécessite de passer un barrière énergétique qui est trop élevé pour que son franchissement par effet tunnel puisse être observée. Elle est dû à une répulsion coulombienne à courte portée. Il faut en effet approcher des particules chargées à des distances de 10fm (interaction faible).

+ les particules sont chargées + la barrière à franchir est haute.

+ les particules ont d'énergie + la probabilité qu'elle y arrive est élevé.

Pour donner à une particule une énergie (par agitation thermique) de l'ordre du keV et lui permettre ainsi de tunneler, il faut une température de 115MK (plasma à cette température). On parle ici de réaction thermonucléaire puisque l'énergie apporté est thermique.

3.2 Taux de réaction

Si l'on note N_d et N_t le nombre de noyau de deutérium et de tritium par unité de volume, la proba pour que d subisse une fusion avec t est : $P = N_t v_d \sigma(v)$ soit un taux de réaction de réaction à la température T : $R = N_d N_t \langle v \sigma(v) \rangle$.
+ la température est élevée, + R augmente.

+ les densités N_d et N_t sont important, + R l'est également. On a pour cela 3 méthodes de confinement : gravitationnel (étoile), inertiel (explosion thermonucléaire, fusion par laser) et magnétique (Tokamak).

3.3 Critère de Lawson

Pourquoi n'arrivons pas à produire de l'électricité grâce à la fusion alors que l'utilisation de la première bombe H date de 1952 ? Il faut pour cela que l'énergie libérée par la fusion soit au min égale aux installations l'engendrant : il s'agit du critère Lawson. Calculons ces 2 énergies. Nous prendrons $N_d = N_t = \frac{N_{tot}}{2}$ car il s'agit de la proportion qui max $N_d \times N_t$ pour $N_{tot} = N_d + N_t$ donnée.

Énergie à apporter pour obtenir une température T : $E_{fournie} = 2 \frac{3}{2} k_B T$

Énergie électrique produite par la fusion : $E_{produite} = R \tau E_{fusion} \eta = (\frac{N_{tot}}{2})^2 \langle v \sigma(v) \rangle E_{fusion} \eta$

η est le rendement de conversion de l'énergie de produite par la fusion en énergie électrique et τ le temps de confinement durant lequel le plasma garde sa cohésion (donc ses prop thermonucléaires).

Le critère de Lawson s'écrit : $N_{tot} \tau > \frac{1}{\eta} \frac{12 k_B T}{E_{fusion} \langle v \sigma(v) \rangle}$

Pour l'atteindre, il faut : de fort confinement (N_{tot} élevé), des temps de confinement élevés τ et une bonne conversion électrique η . Que l'on utilise un confinement magnétique ou un confinement inertiel, nous obtenons des résultats à 1 ou 2 ordre de grandeurs du critère de Lawson.