

# LP42 FUSION, FISSION

12 juin 2020

MONNET Benjamin &

## Niveau : L3

## Commentaires du jury

## Bibliographie

⚡ *Energie nucléaire*, **Basdevant**

→ complet

⚡ *Physique nucléaire*, **Le Sech**

→ complet aussi mais plus succins

## Préquis

- Physique nucléaire de lycée
- Répulsion coulombienne
- Tension superficielle
- Mécanique quantique

## Expériences



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Le noyau atomique</b>	<b>2</b>
1.1	Définitions . . . . .	2
1.2	Energie de liaison . . . . .	2
1.3	Modèle de la goutte liquide . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Fission</b>	<b>3</b>
2.1	Principe et ordre de grandeur . . . . .	3
2.2	Barrière de fission . . . . .	4
2.3	Application à la fission industrielle . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Fusion</b>	<b>5</b>
3.1	Principe et ordre de grandeur . . . . .	5
3.2	Barrière coulombienne . . . . .	5
3.3	Critère de Lawson . . . . .	5

## Introduction

La physique nucléaire est née au XIX ème siècle mais marquera surtout le XX ème siècle. Elle a énormément impacté notre quotidien en particulier dans la production d'énergie et dans la culture générale populaire avec la fameuse équation d'Einstein  $E = mc^2$  connue par une grande partie de la population.

## 1 Le noyau atomique

✍ Le Sech, Basdevant

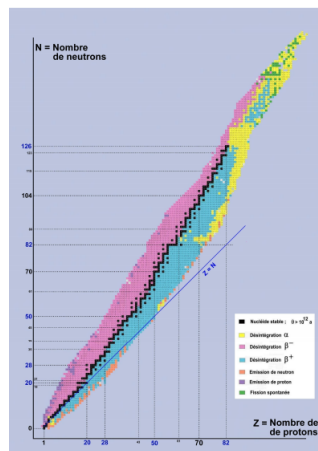
### 1.1 Définitions

Afin de mettre au clair ce dont nous allons parler, nous allons donner quelques ordres de grandeurs et introduire des notations et des définitions :

- La physique atomique se passe à l'intérieur du noyau. Nous parlons donc d'une échelle caractéristique de  $10^{-15}m$  et d'énergie de l'ordre du MeV
- On notera  $A$  le nombre de nucléons,  $Z$  le nombre de protons et  $N=A-Z$  le nombre de neutrons
- Deux noyaux sont isotopes s'ils ont la même charge  $Z$ . Par exemple, on peut distinguer l'uranium 238 qui n'est pas fissile de l'uranium 235 qui ne l'est pas (nous y reviendrons)

### 1.2 Energie de liaison

Considérons un noyau  $X_Z^A$ . Nous avons parlé précédemment de l'existence d'isotopes. On peut donc s'interroger sur leur stabilité. On représente donc ça sur une courbe  $(N, Z)$  :



On se rend alors compte qu'il y a une courbe, appelée "vallée de stabilité" qui correspond aux couples  $(N,Z)$  les plus stables, les autres subissant des réactions spontanées les faisant tendre vers cette vallée. Nous y reviendrons plus tard.

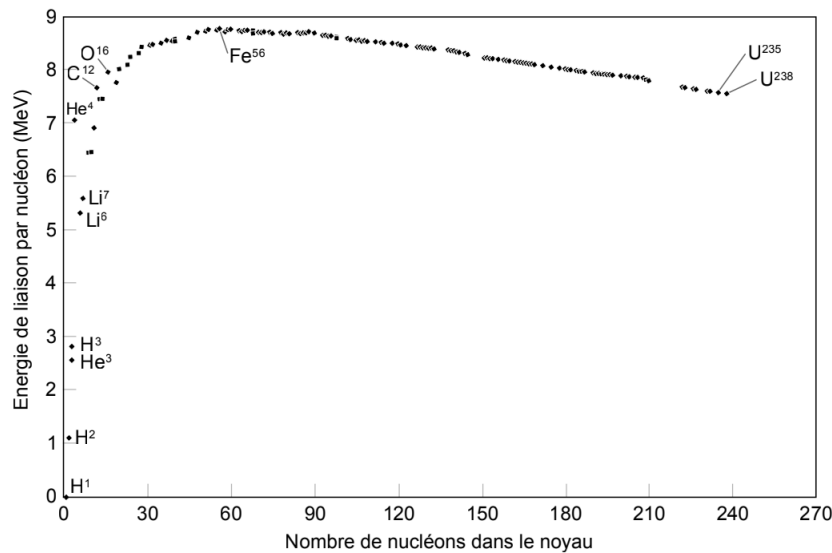
Intéressons nous maintenant à la stabilité relative des isotopes présents dans la vallée de stabilité.

$$m(A, Z) < Nm_n + Zm_p$$

La relation d'Einstein reliant la masse à l'énergie, on peut donc en conclure qu'un noyau est plus stable que les neutrons et les protons le formant séparés. Néanmoins, l'énergie gagnée est différente selon le noyau qu'on considère. Afin de pouvoir les classer, on définit l'énergie de liaison  $E_l$  comme l'énergie à fournir pour séparer un noyau atomique immobile en ses nucléons séparés à l'infini et immobiles :

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

L'énergie de liaison n'est pas un bon indicateur et il est plus intéressant de se ramener à l'énergie par nucléon pour voir ce que gagne un nucléon donné à partir du noyau. On obtient alors ce qu'on appelle la courbe d'Aston en traçant  $\frac{E_l(A, Z)}{A} = f(A)$ .



On remarque alors que l'élément le plus stable est le fer car c'est lui qui minimise l'énergie par nucléon. Comment modéliser une telle courbe ?

### 1.3 Modèle de la goutte liquide

Le Sech p27 Comme son nom l'indique, le modèle de la goutte liquide consiste à considérer le noyau comme une goutte liquide dont l'énergie de liaison s'écrit :

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

Elle est appelée formule de Bethe-Weizsäcker qui ont rajouté les deux derniers termes qui n'avaient pas été envisagés en 1935 par Van Der Waals. Expliquons l'origine de chaque terme :

- $a_V A$  correspond à une énergie volumique. En effet, en supposant une répartition de charge uniforme, on a  $V \propto A$  et correspond à l'énergie de l'interaction nucléaire forte
- $a_S A^{\frac{2}{3}}$  correspond à une énergie surfacique qui tend à déstabiliser la goutte tout comme la tension de surface déstabilise une goutte liquide
- $a_c \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}}$  correspond à l'énergie coulombienne de la sphère chargée uniformément
- $a_a \frac{(A-2Z)^2}{A}$  vient du fait que l'on observe expérimentalement que la vallée de stabilité se situe proche de  $N = Z$ .
- Le terme  $\delta(A)$  est un terme purement quantique qui vient du fait qu'un nombre pair de neutrons ou de protons est plus favorable qu'un nombre impair.

Les coefficients  $a_V$ ,  $a_S$ ,  $a_c$  et  $a_a$  sont ensuite ajustés informatiquement et le résultat est concluant. Néanmoins, on peut remarquer qu'il y a tout de même 4 paramètres ajustables, ce qui est énorme étant donné qu'avec un assez grand nombre de paramètres, on peut ajuster n'importe quel courbe.

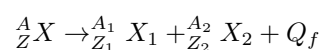
Néanmoins, en regardant de prêt la courbe d'Aston, on remarque qu'il y a des  $Z$  pour lesquels on a des minimas locaux. Ces minimas ne sont pas expliqués par le modèle de la goutte liquide et apparaît à  $Z$  ou  $N = 2, 8, 20, 50, 82, 126$ .

## 2 Fission

### 2.1 Principe et ordre de grandeur

Basdevant, p186

Lors d'une fusion nucléaire, un noyau lourd se sépare en deux noyaux plus légers. Au cours de cette réaction, des neutrons sont émis. La réaction peut donc être schématisée ainsi :

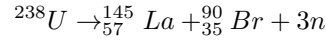


$Q_f$  est l'énergie de fission. Supposons que l'on ait initialement  $A \approx 240$  et  $X_1 = X_2 \approx 120$ . Avec  $\frac{E_l(A,Z)}{A(240)} \approx 7.6MeV$  et  $\frac{E_l(A,Z)}{A(120)} \approx 8.5MeV$ , on trouve :

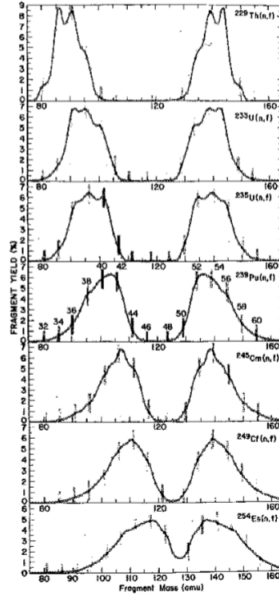
$$Q_f \approx 240 \times (8.5 - 7.6) \approx 220MeV$$

En réalité, il y a toujours des neutrons qui sont émis et l'énergie est un peu plus faible. Néanmoins, un ordre de grandeur qui peut être donné et qui montre tout l'intérêt de la fission est le suivant : 1g d'uranium 235 permet de dégager autant d'énergie que 2 tonnes de pétrole.

Pour l'Uranium, la réaction s'écrit :



On voit que la fission ne donne pas des nombres symétriques et cela provient des nombres magiques qui ont été introduits dans la première partie. On a en fait la répartition suivant :



## 2.2 Barrière de fission

Nous l'avons dit plus tôt : la fission concerne surtout les noyaux lourds. On peut essayer d'expliquer cela à l'aide du modèle de la goutte liquide. Si on imagine que la goutte se déforme en ellipsoïde (début d'une séparation), alors on peut noter le petit et le grand axe :

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

ce qui permet de vérifier la conservation du volume. On trouve alors que l'énergie que ça lui coûte vaut :

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

En conclusion, la fission n'est favorable que si :

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

En réalité, la fission est possible même si cette condition n'est pas respectée grâce à l'effet tunnel.

## 2.3 Application à la fission industrielle

Un réacteur nucléaire repose sur le principe suivant : un uranium 235 capte un neutron, ce qui l'excite et il devient  ${}^{236}\text{U}^*$  qui va se fissionner en deux noyaux plus légers et en libérant des neutrons qui vont exciter d'autres noyaux d'uranium et ainsi de suite. Afin que la réaction s'entretienne sans s'embaler, il faut que le nombre de neutrons reste donc constant. Tous les neutrons émis ne provoquent pas de nouvelles réactions de fusion. Il faut regarder le nombre suivant appelé le coefficient de multiplication neutronique :

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

Si ce nombre est égal à 1, le réacteur est stable.

Afin de récupérer l'énergie produite, la chaleur est transmise à un fluide (l'eau) qui s'évapore. La vapeur d'eau va mettre en rotation une turbine qui va permettre de récupérer l'énergie produite.

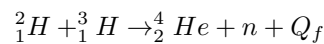
Le problème de la fission, ce sont les déchets nucléaires. En effet, il y a environ 1 kg de déchets produits par habitant et par an dont 10g qui devront être stockés sur le long terme.

### 3 Fusion

↪ Basdevant, p233

#### 3.1 Principe et ordre de grandeur

La fusion de deux atomes légers en donnent un plus lourd (voir sur courbe d'Aston). Exemple :



Ici on trouve  $Q_f = 17.5MeV$ . Pour 1g de mélange, on trouve une énergie de 340GJ ce qui est 4 fois supérieur à ce qu'on avait avec la fission!! De plus, avec le deutérium présent dans l'eau de mer, on pourrait alimenter l'humanité pendant 1 milliard d'années avec de telles réactions.

#### 3.2 Barrière coulombienne

Afin que les noyaux fusionnent, il faut que l'énergie d'interaction forte l'interaction coulombienne. La probabilité de franchir l'énergie potentielle engendré les interactions coulombiennes est donnée par l'effet tunnel :

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

Imaginons que l'on souhaite franchir la barrière de la réaction présentée précédemment avec une probabilité de  $10^{-3}$ . Cela correspond à une énergie  $E=10$  keV, ce qui correspond à une température de 115 millions de K.

#### 3.3 Critère de Lawson

Engendrer une telle réaction coûte bien évidemment de l'énergie. Afin que l'opération soit gagnante, il faut que l'énergie produite soit plus grande que celle dépenser. On peut montrer que cela revient au critère de Lawson, qui impose :

$$n_i \tau \eta >, 15.10^{20} m^{-3} s$$

où  $n_i$  est la densité volumique de noyaux,  $\tau$  le temps pendant lequel le plasma reste à la température T correspond à une énergie de 20 keV et  $\eta$  le rendement.

Quelques exemples de valeur numérique :

Type	$n\tau(m^{-3}s)$	$T(K)$
ITER	$10^{20}$	$1,7.10^8$
Etoile	$7.10^{47}$	$2.10^7$

### Questions

- C'est quoi un eV? L'énergie fournit par un Volt à un électron. C'est  $1,6.10^{-19}$
- A quel point on peut comparer le noyau d'un atome avec une goutte liquide? Effet quantique qui vient de nulle part et nombres magiques. Est-ce que tu peux réexpliquer les deux premiers termes en terme de physique nucléaire? Le terme de volume c'est l'interaction forte et la surface c'est le changement d'interaction. Pourquoi le volume varie avec A? On suppose la densité à peu près constante

- Pour le terme de symétrie, est ce que tu te souviens en quoi la symétrie stabilise? *Modèle des couches et remplissage de niveaux d'énergie*. Est-ce ue les protons et les neutrons partagent les mêmes états? *Non, y'a des couches pour chaque type*.

**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-Waiszecker 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...**

**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

## Remarques

-