

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Noyau atomique</b>	<b>2</b>
1.1	Rappels : description du noyau . . . . .	2
1.2	Énergie de liaison et défaut de masse . . . . .	2
1.3	Le modèle de la goutte liquide . . . . .	3
<b>2</b>	<b>La fission</b>	<b>4</b>
2.1	Énergie et produit de fission . . . . .	4
2.2	Barrière de fission . . . . .	4
2.3	Application aux réacteurs nucléaires . . . . .	5
<b>3</b>	<b>La fusion</b>	<b>7</b>
3.1	Principe et énergie . . . . .	7
3.2	Considérations technologiques . . . . .	7

## Introduction

En chimie, vous avez étudié des réactions qui ont lieu au niveau des molécules ou des atomes. Mais le noyau n'est jamais modifié lors de ces réactions. Cependant, le noyau n'est pas une particule immuable !

Dans la nature, on observe des réactions de fission où un noyau lourd se divise en deux noyaux plus légers. On observe également des réactions de fusion où deux noyaux légers fusionnent pour produire un noyau plus lourd.

Pourquoi observe-t-on ces deux phénomènes et comment fonctionnent-ils ? La stabilité d'un noyau atomique dépend de sa cohésion déterminée par son énergie de liaison. Les réactions nucléaires tendent toujours vers la production d'édifices de plus en plus stables.

OU

Au lycée, il a été vu que le noyau est composé de neutrons et de protons, qu'il existe des noyaux stables et des noyaux instables, (montrer le graphe de la vallée de stabilité) ainsi que la notion de radioactivité. Lors d'une réaction nucléaire, il y a conservation du nombre de nucléons et de la charge (Lois de Soddy) mais pas conservation de la masse. Or il y a conservation de l'énergie, les réactions atomiques transforment donc de l'énergie de masse en énergie cinétique. C'est cette énergie que l'on cherche à récupérer lors de la fusion et la fission. Il reste à expliquer quelle est cette énergie libérée, et pourquoi ces réactions sont possibles

Annonce du plan :

## 1 Noyau atomique

### 1.1 Rappels : description du noyau

↗ Le Sech p.17

- Le noyau atomique est la partie de l'atome contenant les protons et les neutrons : les nucléons. Il est découvert en 1911 par Rutherford.
- Le diamètre du noyau est de  $10^{-15}m$ , 5 ordg plus petit que l'atome.
- On note  $Z$  le nombre de protons du noyau,  $A$  le nombre de nucléons.  $A-Z$  est donc le nombre de neutrons.  ${}_Z^A X$
- Les neutrons et les protons ont une masse très proche ( $m \approx 1.6 \cdot 10^{-27}kg$ ). L'ordre de grandeur de l'attraction gravitationnelle entre les nucléons est  $\frac{Gm_n^2}{r^2} \approx 2 \cdot 10^{-34}N$ .
- Mais les protons sont chargés avec une charge  $+e$ . Il y a donc une répulsion entre protons. La force est  $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \approx 230N$ .
- On remarque donc que l'attraction ne suffit pas pour compenser la répulsion entre les noyaux. Or les noyaux sont stables. Il existe donc une autre interaction qui stabilise le noyau : l'interaction forte.

⚡ *Mais tous les noyaux ne sont pas stables. ...*

### 1.2 Énergie de liaison et défaut de masse

- L'énergie de liaison  $B(A, Z)$  est ce qui maintient en place les nucléons dans le noyau.
- C'est par définition l'énergie à fournir pour séparer un noyau atomique **immobile**  ${}_Z^A X$  en ses nucléons séparés et **immobiles**.
- La réaction est :  ${}_Z^A X \rightarrow Zp + (A - Z)n$
- Comme les composés sont au repos, leur énergie est  $E = mc^2$ .
- En faisant un bilan de masse, on obtient :

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

- Un noyau est stable si  $B(A, Z) > 0$ . Il est préférable, d'un pdv énergétique, pour les nucléons se s'assembler sous forme de noyau.

- **ODG:** Pour le deutérium, cette énergie vaut 2.22Mev. (Diapo avec ODG, le sech p.20)
- On remarque que  $B$  augmente quand  $A$  augmente. En effet, plus le noyau est lourd, plus il y a de nucléons. Pour étudier la stabilité des noyaux, on s'intéresse donc plus à  $B/A$  l'énergie de liaison par nucléons, qui donne la force de liaison entre les nucléons. Le tracé de  $B/A$  en fonction de  $A$  est **la courbe d'Aston**. (diapo)
- Faible  $A$  : fusion, on peut fusionner deux noyaux pour en avoir un plus stable. Haut  $A$  : fission des noyaux pour en avoir des plus stable. La limite est le Fer.
- Vallée de stabilité : les isotopes (même  $Z$ ) stables sont regroupés.

Remarques :

- On parle également de défaut de masse :  $\Delta m = B/c^2$ .
- L'énergie du cortège électronique est négligeable (les électrons sont 0.027% du noyau. Le Sech p.22.
- (Pour les noyaux lourds,  $B/A = 8\text{Mev}$ , 8% de la masse totale Basdevant page 35).
- En physique atomique, l'énergie d'un atome à 2 électrons croît avec  $Z$ . Or ici, il y a saturation des forces nucléaires. **Les nucléons n'est pas sensible à la taille du noyau, il interagit avec ses plus proches voisins.**

↓ Pour rendre compte de ces deux constats, on ne fera pas ici une modélisation quantique du système et on ne peut pas faire de physique statistique. On va donc adopter une démarche de modélisation du système pour essayer de décrire les grands comportements

### 1.3 Le modèle de la goutte liquide

Remarques :

- On constate expérimentalement que certains éléments dont le noyau possède un nombre particulier de protons ou de neutrons (un nombre dit magique) ont une énergie plus élevée que prévu par Bethe-Weisacker. Cela s'explique par le modèle en couche, ou shell-model (analogue au modèle en couche pour les électrons) qui fait apparaître les nombres magiques correspondants au remplissage complet des couches

↓ Ce modèle donne bien la forme de la courbe, et on obtient bien que le noyau le plus stable est celui du fer. Cependant, il faut être conscient des limites du modèle qui ne prédit pas par exemple les nombres magiques pour lesquels il faut faire un modèle quantifié de couches "nucléoniques". Cependant, on voit que l'on peut arriver au fer par deux chemins : la fusion et la fission et récupérer de l'énergie. Nous allons regarder tout d'abord celui qui est utilisé dans nos centrales : la fission.

## 2 La fission

### 2.1 Énergie et produit de fission

- La fission d'un noyau consiste en sa brisure spontanée ou provoquée en plusieurs noyaux fils plus stables énergétiquement parlant, et comportant des nombres de nucléons plus faible.
- N'est valable que pour les noyaux lourds, à droite du fer dans la courbe d'Aston. (prédomine pour  $A > 270$ ).
- Cette réaction permet à un noyau lourd de donner naissance à deux noyaux plus stables. Ainsi, au cours de la réaction, une énergie de fission  $Q_F$  est libérée. Cette énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique pour les produits. Dans nos centrales nucléaires, c'est cette énergie que l'on récupère avec un rendement de 33% environ.
- Prenons l'exemple de l'uranium 238 qui est un noyau fertiles. Il donne par réaction avec un neutron  $+ \beta^-$  l'uranium 233 (qui fait parti des quatre noyau fissibles connus) :  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ .
- Supposons qu'il se sépare en deux noyaux avec le même nombre de masse.
- ODG :

- On récupère cette énergie par chocs avec le milieu dans lequel se fait la réaction (eau, eau lourde, ...)
- En réalité, le fission est rarement (jamais) symétrique mais elle est généralement binaire. (on peut montrer sur daipo la forme de la distribution, Le Sech p. 71). L'uranium est plus susceptible de se fissionner en  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{145}_{57}\text{La} + ^{90}_{35}\text{Br} + 3n$  (uranium 238 présent à 99% dans la nature). Mais plusieurs réactions sont possibles, aspect statistique. *Bonus : les (2) fragments tendent à se rapprocher des nombres magiques plus stables.*
- On vient de présenter un processus de **fission spontanée**. Mais elle est très rare (odg?). Généralement, la fission est provoquée (**fission induite**) par l'absorption de neutrons. En bombardant l'uranium 235 avec des neutrons de basse énergie on obtient la fission de l'uranium 236. ( $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U}^*$  puis  $^{236}\text{U} + n \rightarrow ^{137}\text{Ba} + ^{92}\text{Y} + 3n + 3e + 3\bar{\nu}$ ). (le sech page 70). Il y a libération de neutrons lors de cette réaction, ces neutrons peuvent alors rentrer en collision avec l'uranium 235 (présent à 0.74% dans la nature) et cela provoque une réaction en chaîne.

↓ On vient de voir que la fission produisait de l'énergie. Pourquoi la fission induite est plus probable ? Mais comment à lieu cette réaction ?

### 2.2 Barrière de fission

mettre barrière énergétique + matériaux fissibles fertiles  
blabla

## 2.3 Application aux réacteurs nucléaires

On va voir ici comment utiliser à profit l'énergie libérée par la fission.

- [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Centrale\\_nucl%C3%A9aire\\_REP.png?uselang=fr](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Centrale_nucl%C3%A9aire_REP.png?uselang=fr)
- **Qu'est ce qu'une centrale ?** Une centrale est simplement une machine thermique avec comme source de chaleur la réaction nucléaire. Ici on ne va s'intéresser que au circuit primaire.
- On utilise de l'uranium 235 enrichi à 3% à 4% en fonction des pays.
- **Pourquoi l'uranium 235 ?** (i) Parce que c'est le noyau le plus lourd qu'on trouve à l'état naturel. (ii) Il est capable d'absorber les neutrons thermiques vitesse liée à l'agitation thermique du milieu, de l'ordre de 2km/s.
- **Quelle est la réaction ?** (on en a montré une avant !)  $^{235}\text{U} + n \rightarrow A + B + n\nu$ .
  - Les neutrons émis sont **rapides** ( $v \approx 20000\text{km/s}$ ).
  - La fission émet en moyenne 2.4 neutrons.
  - Les neutrons sont ralentis par des chocs avec le milieu, ce qui chauffe le fluide. Une fois devenu des neutrons thermiques (lents), ils réagissent avec l'uranium pour créer de nouvelles fissions. C'est une **réaction en chaîne**.
- **Pourquoi une centrale est stable ?**

- **L'eau du circuit primaire** : rôle de fluide caloporteur et de "modérateur" : ralentit les neutrons pour leur permettre de réaliser la réaction de fission. Elle peut atteindre 300°C et est donc maintenue à une pression de 150 bar pour rester à l'état liquide. (pour l'uranium enrichi de l'eau normale c'est ok, pour l'uranium naturel il faut de l'eau lourde).

↓  
*On a vu tout l'intérêt énergétique de la fission mais ces réactions produisent quantités de produits hautement radioactifs dont on ne sait que faire. Les réactions de fusion présentent le double avantage de produire encore plus d'énergie à masse de combustible égale tout en ne produisant que des produits faiblement radioactifs.*

## **3 La fusion**

### **3.1 Principe et énergie**

### **3.2 Considérations technologiques**

## Conclusion

La stabilité du noyau atomique est décrite par les interactions nucléaires forte, l'interaction coulombienne et des effets quantiques. Le modèle de la goutte liquide permet de décrire correctement cette stabilité mais ne rend pas compte de tous les effets, et notamment les nombres magiques. On peut exploiter cette différence pour extraire de l'énergie par fission ou fusion. Les enjeux de ce siècle seront de gérer au mieux les produits radioactifs de la fission (80% de l'énergie française) et de parvenir à maîtriser la fusion, qui est pour le moment une utopie. Il est à noter aussi que la radioactivité a des applications médicales.

## Compléments/Questions

### Questions

- Y a-t-il des différences entre les installations nucléaires françaises et étrangères ?
- Pouvez-vous redéfinir l'énergie de liaison ?
- Que savez-vous de la courbe d'Aston ?
- Comment les noyaux au delà de celui du fer ont-ils été créés ?
- Pouvez-vous expliquer les deux grands types de réactions à partir de cette courbe ?
- Comment sont produits les neutrons lents/rapides ? Quelles sont leurs différences ?
- À quoi vous fait penser le profil énergétique d'une réaction ? Coordonnée réactionnelle.
- Pourquoi faut-il enrichir l'uranium dans nos centrales nucléaires ?
- Quels sont les risques du régime surcritique ?
- Pourquoi y a-t-il plusieurs circuits d'eau dans les centrales ?
- Dans quelles conditions la fusion du coeur peut-elle survenir ?
- Quelle est la quantité typique de combustible contenue dans un réacteur ? (100 T)
- Comment le minerai est-il entreposé dans les réacteurs ? (sous forme d'assemblages de pastilles dans des barres en zirconium)
- Comment l'uranium est-il purifié ? (Anciennement diffusion gazeuse du UF 6 , par centrifugation gazeuse du UF 6 aujourd'hui) Pourquoi a-t-on changé de procédé ? (moins coûteux du point de vue énergétique).
- Savez-vous où est enrichi l'uranium en France ? (l'usine d'enrichissement la plus importante se trouve sur le site du Tricastin au sud de Montélimar).
- Combien d'uranium enrichi consomme-t-on en France chaque année ? (1000 T)
- Qu'est-ce que le Sievert ?
- Que fait-on des déchets ? De l'  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$  ?
- Pourquoi vitrifie-t-on les déchets ?
- Quel est l'intérêt de la fusion ?
- Quelle est la température typique du plasma d'ITER ?
- Qu'est-ce qu'un plasma ?
- Quel est le principe d'une bombe A ? D'une bombe H ?
- Quelle était la puissance de la bombe la plus puissante jamais testée ?

- 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 2s ? 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-Weizsäcker 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 10<sup>6</sup> K. Que représente-t-elle ?

Compléments :

**Découvert du noyau par Rutherford** : bombardement par des particules  $\alpha$  d'une feuille d'or, la répartition angulaire est la même que pour une cible constituée de particules ponctuelles de charge  $+Ze$ . La diffusion par des neutrons (non chargés) permet de montrer que la charge et la masse du noyau sont répartis de la même manière.

**Interaction forte** : agit entre les quarks, portée  $10^{-15}m$ . Il y a 6 quarks.

**Isotopes, isotones, isobares**. Les isotopes ont les mêmes propriétés chimiques/atomiques. Les isobares ont des propriétés nucléaires semblables.

**Conservation dans une réaction nucléaire** (i) Energie-impulsion, moment cinétique, charge électrique (ii) Nombre baryonique : nombre total de nucléons. Nombre leptonique ( $L=1$  pour électron, muon, tauon, neutrinos associés,  $L=-1$  pour leur antiparticule,  $L=0$  pour quarks, baryons, mésons, bosons). Isospin.

**Densité de charge nucléaire** On la mesure en envoyant des électrons suffisamment rapides sur le noyau.

**Saturation nucléaire** Le bord abrupt de la distribution de nucléons dans le noyau indique que c'est comme si un nucléon interagit avec un nombre limité et fixe de ses voisins : c'est la saturation nucléaire.

**Mesure de l'énergie de liaison** Cela revient à mesurer la masse du noyau, ce qui est fait en spectrométrie de masse : on le dévie dans un champ magnétique.

**Potentiel de Yukawa** C'est la fonction de Green de l'équation de Helmholtz, comme le potentiel coulombien est la fonction de Green de l'équation de Poisson. Son expression est  $V(r) = h\bar{c} \exp -r/r_0/r$ . La portée est de l'ordre de la longueur d'onde Compton de la particule de masse  $m$  échangée (gluons pour l'interaction forte).

**Isospin** Le proton et le neutron sont traités comme deux états différents  $T_3 = \pm 1/2$  d'un même être physique d'isospin  $1/2$  : le nucléon. En additionnant deux nucléons, on obtient  $I = 0$  (singulet) et  $I = 1$  (triplet), comme quand on associe des spin  $1/2$ .

**Modèle quantique** (i) Choix d'un potentiel nucléaire moyen : harmonique, Yukawa, Saxon-Woods. Pour les protons, on ajoute la répulsion coulombienne, qui va réhausser les niveaux d'énergie des protons, par rapport aux neutrons (ii) on résout l'équation de Schrödinger, on a des niveaux d'énergie et les remplissages des couches donnent les nombres magiques (iii) les trois premiers nombres magiques (2,8,20) sont bons mais pas les suivants, qui dépendent du potentiel (iv) Pour trouver les bons nombres magiques, il faut prendre en compte l'interaction spin-orbite, qui est dominant.

**Stabilité des neutrons dans les noyaux** Un neutron libre est instable sous  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ . Mais dans un noyau, par le principe de Pauli, le proton produit doit avoir une énergie plus grande que les autres protons qui remplissent les couches (d'énergie plus haute que celle des neutrons à cause de la répulsion coulombienne). D'où la stabilité de  $n$  dans les noyaux.

**Modèle du gaz de Fermi** Les nucléons sont assimilés à deux gaz de Fermions, neutrons et protons. Les particules sont sans interaction mutuelles mais enfermées dans une même sphère de dimension du noyau. Les interactions apparaissent implicitement par le fait qu'ils sont confinés dans la même enceinte. Ce modèle permet de calculer  $a_V$ ,  $a_S$ ,  $a_A$  (même s'il y a un facteur 2) de la formule de Bethe-Weizsäcker en fonction de la densité  $\rho$  de matière nucléaire et apporte une justification supplémentaire à cette formule.

**Conséquences des nombres magiques** He, O, Ca sont doublement magiques, ce qui explique leur forte énergie de liaison. [Basdevant] fusion de l'hélium en C et O (mystère pendant longtemps), systèmes borroméens, noyaux superlourds.

**Section efficace (différentielle)** Cette notion intervient dans des expériences de diffusion (quantiques aussi)  $dn = NF(d\sigma/d\Omega)d\Omega$  où  $dn$  est le nombre de particules détectées par unité de temps,  $N$  le nombre de particules de la cible. Diffusion de sphères dures, diffusion de Rutherford (potentiel Coulombien). La section efficace est l'intégrale sur

$d\Omega$  de la section efficace différentielle. Elle ne converge pas pour la diffusion de Rutherford. Dans l'approximation de Born (? , diffusion élastique ?), c'est la transformée de Fourier du potentiel.