

# LP 42 - Fusion, Fission

30 mars 2017 - Présenté par David Dumont

Correction : S. Paillat<sup>1</sup>, G. Pillet<sup>2</sup>

---

## Rapports du jury

**2014** Cette leçon peut être abordée de manières diverses, mais on peut raisonnablement s'attendre à ce que les candidats aient 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.

**2013** Le nouvel intitulé de cette leçon doit inviter les candidats à réfléchir à la physique sous-jacente aux phénomènes de fusion et fission nucléaires.

Jusqu'en 2013, le titre était : Le noyau : stabilité, énergie. Applications.

**2012** Le modèle de la goutte ne peut être simplement énoncé. Le candidat qui ferait le choix d'en parler doit commenter la physique inhérente à chaque terme du modèle. Cette leçon ne peut se réduire à un catalogue d'informations diverses et variées, mais les candidats doivent dégager du temps pour les applications.

## Commentaires généraux

Globalement la leçon s'est bien déroulée malgré un manque de temps passé sur la fusion. Par contre la séance de questions était moins convaincante. Pas mal de choses présentées n'étaient pas bien maîtrisées. N'hésitez pas à parler plus de choses simples et essentielles si vous n'avez pas le temps d'approfondir certaines notions intéressantes mais secondaire (modèle en couche, nombre magique, "démonstration" du critère de Lawson)

Puisque les notions théoriques liées à la physique nucléaire sont rapidement très complexes, cette leçon peut/doit être abordée sous un angle expérimental. On peut dégager les notions clés de ces phénomènes avec quelques diagrammes, et courbes expérimentales.

Une autre particularité de la leçon est qu'il faut faire beaucoup d'ordres de grandeurs, notamment au niveau des énergies mises en jeu. Ca a été le cas dans cette leçon.

Attention aussi à prendre des exemples concrets lorsqu'on introduit les réactions de fusion et de fission.

1. samuel.paillat@ens-lyon.fr

2. grimaud.pillet@ens-lyon.fr

3. Voir à ce propos la LP 40 des agrégatifs de 2015, qui regorge d'ordres de grandeurs.

## Retour sur la leçon présentée

### Introduction

L'introduction était bien, David a amené les notions de fission et fusion comme des phénomènes naturels que l'on rencontre sur Terre ou dans les étoiles. Cependant on aurait pu mettre plus en avant les enjeux actuels et très importants de la fusion et de la fission : Problème de stockage des déchets nucléaires et de sécurité des centrales à fission, Avancement des projets de réacteurs à fusion... Ces sujets se retrouvent souvent dans l'actualité et font débat, ce qui est le cas de très peu de leçons !

## 1 Le noyau atomique

### 1.1 Énergie de liaison

Cette première partie a été bien traitée. Des ordres de grandeurs sur les énergies mises en jeu lors de réactions chimiques et nucléaires étaient les bienvenues, mais on aurait pu aller plus loin et comparer ces valeurs aux énergies auxquelles nous sommes confrontés quotidiennement (par exemple l'énergie nécessaire pour faire bouillir 1L d'eau<sup>3</sup>).

Présenter la courbe d'Aston est un passage obligé dans cette leçon. On doit bien introduire la nécessité de comparer les énergies de liaison par nombre de nucléons, ce qui a été le cas dans la leçon présentée.

On aurait pu débiter cette partie sur un rappel rapide de la constitution d'un atome, les échelles associées, les forces en jeu et leurs ordres de grandeurs. Cela aurait évité des erreurs à ce propos lors des questions !

### 1.2 Le modèle de la goutte liquide

La présentation de ce modèle était quelque peu floue. Les hypothèses du modèle ont été bien établies, mais les différents termes n'ont pas toujours été justifiés correctement.

La première chose est d'expliquer l'analogie avec une goutte : L'interaction nucléaire forte qui agit entre deux nucléons a une forme similaire à l'interaction de Van der

Waals. D'ailleurs, la force que l'on considère entre deux nucléons n'est pas strictement l'interaction forte : c'est la résultante de toutes les interactions fortes qui ont lieu entre les gluons des 2 nucléons, exactement comme la force de Van der Waals est la résultante des interactions coulombiennes entre les cortèges électroniques de deux molécules.

Ne pas hésiter à faire un grossier schéma d'un noyau afin de compter le nombre d'interactions et ainsi retrouver facilement les facteurs importants dans le modèle (le  $A$  dans le terme de volume,  $A^{2/3}$  dans le terme de surface,  $Z^2$  dans le terme de répulsion). Les termes d'origine quantique ont été très brièvement introduits, mais lors des questions, David n'a pas su expliquer leur origine. Il faut avoir un minimum de notions sur ces termes pour les questions. Le terme d'asymétrie provient du confinement (qui crée une quantification) et du principe d'exclusion de Pauli. Il peut donc s'expliquer en considérant une analogie avec les niveaux d'énergies électroniques. Le terme d'appariement provient de l'interaction spin-spin entre les protons et neutrons, mais il est difficile d'en dire plus au niveau de la leçon.

Plusieurs choses sont possibles concernant le modèle de la goutte liquide :

Le présenter entièrement, c'est à dire parler des 5 termes mis en jeu, et décrire l'origine de chacun semble risqué. Cela laisse peu de temps pour parler de fission et de fusion, et ce n'est pas dans l'esprit du changement de titre de la leçon.

Si l'on souhaite quand même parler de ce modèle, on peut alors détailler seulement les 3 premiers termes, qui sont facilement explicables (et qui permettent de retrouver la courbe d'Aston), et admettre les deux termes d'origine quantique. Cependant on ne peut pas totalement occulter ces deux termes, sinon le modèle ne donnera que des noyaux stables avec 0 protons. On peut d'ailleurs montrer la courbe de stabilité (N,Z) pour introduire la nécessité de compléter ce modèle.

Une autre possibilité est de ne pas parler du tout de cette modélisation. Il faut alors plus se reposer sur des courbes expérimentales. Ça a l'avantage de laisser plus de temps pour parler de fission et fusion, notamment des aspects technologiques récents, ce qui est sans doute plus ce qu'attend le jury.

À la fin de cette partie, David a présenté les limites de ce modèle en parlant de la stabilité de certains noyaux qui s'écartaient fortement du modèle. Là encore on aurait pu introduire ce fait avec une courbe expérimentale (l'analogie de l'énergie d'ionisation pour les électrons), qui permet de montrer l'existence de ces nombres magiques. David a présenté un graphique du déplacement des niveaux d'énergies des nucléons lorsque l'on considère le couplage entre le spin et le moment cinétique du nucléon, mais n'a pas su expliquer ce qu'elle signifiait. Il ne

faut surtout pas faire ça !! Si vous présentez une courbe extraite d'un livre, il faut savoir ce qu'elle représente ! En outre, parler des nombres magiques dans cette leçon peut s'avérer dangereux. C'est du temps passé à ne pas parler de fission et de fusion, et cela peut amener des questions techniques sur le modèle en couche et ses limites.

## 2 Fission

### 2.1 Énergie et produits de fission

La définition de la fission a été encore faite sur un exemple abstrait ( $X \rightarrow Y + Z$ ). De plus, David a pris un exemple concret juste après pour faire des calculs ce qui rendait l'exemple abstrait superflu.

Il faut définir tout de suite sous quelle forme se retrouve l'énergie libérée, plutôt que de mettre  $Q_{fus}$  dans le bilan de la réaction.

Le calcul de l'énergie typique libérée lors d'une réaction de fusion et la comparaison avec l'énergie libérée par le pétrole était pertinent.

### 2.2 Barrière de Fission

Cette partie aurait dû être l'occasion d'introduire la notion de probabilité de réaction de fission, et des différentes réactions possibles. On peut présenter des données expérimentales qui montrent que la fission spontanée est très rare, et qu'on cherche donc à augmenter cette probabilité de réaction en faisant de la fission provoquée.

On peut étoffer cette partie si on le souhaite, en présentant le modèle de Gamov. Même si ce modèle est très schématisé, il permet d'avoir une intuition des différents aspects de la fission (dépendance de la probabilité de fission en fonction de la masse, fonctionnement de la fission provoquée...), et explique entre autres pourquoi on observe principalement des fissions asymétriques (alors que le modèle de la goutte liquide prévoit des fissions symétriques).

### 2.3 Applications aux réacteurs nucléaires

Dans cette partie, on revenait sur la notion de réaction provoquée et l'explication plus détaillée de l'absorption des neutrons. Cependant la distinction entre neutrons lents et neutrons rapides n'a pas été très claire, notamment au niveau de la production de ces neutrons. Les neutrons rapides sont des produits directs de la fission alors que les neutrons lents sont produits plus tard par désintégration  $\beta$  des produits initiaux de la réaction mère. Il faut également avoir une idée de pourquoi la section efficace dépend de la vitesse des particules.

Il est important de noter que c'est grâce à ces neutrons lents que dans les centrales, on peut contrôler une réaction nucléaire et toujours rester dans le cas critique. Il ne faut cependant pas se perdre dans des détails technologiques sur les nouveaux réacteurs nucléaires et leurs conceptions.

### 3 Fusion

Il restait peu de temps (un peu moins de 10 minutes) à David pour développer cette partie. Si l'on choisit ce type de plan (le noyau, fission, fusion), il faut viser un quart d'heure par partie, voire 10 minutes sur la première partie et environ 2x20 minutes pour les deux autres.

#### 3.1 Principe et énergie

Les enjeux de la fusion ont été bien introduits et un exemple concret a été pris pour calculer un ordre de grandeur. Attention, la comparaison avec la réaction de fission n'est pas si simple. Ce qui a été fait dans la leçon a été de comparer l'énergie dégagée lors de la réaction d'une mole d'uranium 235 avec celle produite par une mole de tritium + deutérium. Premièrement l'uranium naturel contient moins de 1% d'uranium 235. Celui utilisé pour les centrales est enrichi à hauteur de quelques pourcent, mais le processus d'enrichissement coûte de l'énergie, de même que l'extraction de l'uranium. Pour la fusion, il faudrait aussi prendre en compte l'énergie utilisée pour régénérer le tritium. Idéalement si l'on veut faire une comparaison d'énergie récupérable entre les deux réactions, il faudrait prendre tout ces facteurs en compte.

#### 3.2 Barrière coulombienne

La notion de répulsion coulombienne à vaincre pour créer la fusion a été bien introduite. Puis la probabilité de franchissement de la barrière a été explicitée, ce qui a permis de discuter la dépendance en la masse et l'énergie. Cette discussion est tout à fait analogue à celle sur la barrière de fission. Des ordres de grandeurs ont été fait (trop rapidement par manque de temps), mais ont bien permis de comprendre la difficulté de réaliser une réaction de fusion : Créer des particules suffisamment énergétiques pour qu'elle puissent vaincre la barrière coulombienne. David n'a cependant pas détaillé l'importance du confinement. Cette notion aurait du être abordé dans une troisième partie appelée Critère de Lawson mais qui n'a pas été faite par manque de temps.

#### 3.3 Nucléosynthèse stellaire

Cette partie a été débutée alors qu'il restait 2 minutes! Ce n'est pas du tout la bonne chose à faire. Il

y a de grandes chances pour que les membres du jury n'écotent rien d'une partie commencée dans la précipitation 2 minutes avant de finir. En l'occurrence, David aurait du prendre plus son temps pour finir la partie sur la barrière coulombienne (qui a été abrégée) et conclure en évoquant le critère de Lawson.

C'est difficile, car il faut s'adapter en temps réel, sélectionner les informations importantes, et surtout ne pas vouloir à tout prix faire rentrer de force tout ce qu'on avait prévu. Pensez-y lorsque vous préparer vos plan, vos dernières sous-parties doivent pouvoir être enlevées/modulées si besoin.

### Questions posées

- Quelle est la définition d'un noyau stable? Temps de demi-vie d'éléments (Le fer, l'uranium, un proton)?
- Énergie de liaison d'un électron? Comparaison avec celle d'un nucléon dans le noyau. Quelle est la différence entre une réaction chimique et une réaction nucléaire?
- D'où vient l'analogie avec le modèle de la goutte liquide? Comparaison entre l'interaction de Van der Waals et l'interaction nucléaire?
- Quelle est la portée de l'interaction forte? Différence entre l'interaction forte et l'interaction nucléaire (forte)?
- Quelle est l'origine du terme d'appariement? Du terme asymétrique? Pourquoi une dépendance en  $Z^2$ ?
- Qu'est ce que le modèle en couche? Lien avec les nombres magiques?
- Pourquoi plusieurs réactions de fissions sont-elles possible?
- D'où proviennent les neutrons thermiques/lent? Pourquoi réagissent-ils plus que les neutrons rapides? Quel intérêt pour le contrôle des réacteurs nucléaires?
- Comment produire du tritium? Temps de demi-vie?

Pour finir, n'oubliez pas que ces commentaires ne font que refléter l'avis des correcteurs, qui peuvent se tromper. Vous avez tout à fait le droit de ne pas les suivre (et vous avez même le devoir de ne pas les suivre aveuglément). En fin de compte c'est vous qui devez décider ce que vous faites de vos leçons.

Nous restons à votre disposition, par mail, en TP, ou lors de futures corrections, pour toute question, suggestion ou remarque.