

Niveau : Licence (L2)

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

Bibliographie :

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

Plan amélioré :

Introduction

## 1. Autour du noyau

### a) Caractérisation de l'atome (rappel)

- Caractéristiques du noyau
- Nombre de protons et de neutrons
- Dimensions

### b) Interactions dans le noyau

- Forces dans le noyau (interaction forte, ...)
- Cohésion et stabilité des noyaux (vallée de stabilité, formule de Bethe-Weizsäcker, ...)

### c) Énergie de stabilisation et stabilité

- Défaut de masse du noyau (Différence entre la somme des masses de tous les nucléons (Proton et neutron) d'un noyau et la masse de ce même noyau)
- Courbe d'Aston ( courbe représentant l'énergie de liaison par nucléon des noyaux atomiques, en fonction de leur nombre de masse.)

## 2. Fission nucléaire

Le phénomène de fission nucléaire induite est décrit le 17 décembre 1938 par deux chimistes du Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie de Berlin : Otto Hahn et son jeune assistant Fritz Strassmann.

### a) Définition

La fission nucléaire est l'éclatement d'un noyau instable en deux noyaux plus légers et quelques particules élémentaires. Cet éclatement s'accompagne d'un dégagement de chaleur, c'est à dire d'énergie.

Exemple → fission de l'Uranium

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-fission-nucleaire-2462/>

b) Les différentes formes de radioactivité

Formes de radioactivité par fission : alpha, bêta

c) Aspects énergétiques d'une réaction nucléaire

Exemple d'une réaction de fission (Uranium)

- Calcul de l'énergie libérée par une réaction de fission
- Comparaison par rapport à une combustion parfaite

d) La centrale nucléaire

Principe de fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisé

Aspects énergétiques et puissance d'un réacteur

Pb de stabilité de centrale : régulation de la croissance exponentielle du nombre de réaction par unité de temps en fonction du nombre de neutron qui sont utilisés (ODG)

### 3. Fusion nucléaire

La découverte des réactions de fusion date du début du xxe siècle. Après quelques expériences, l'astrophysicien Arthur Eddington suggère en 1920 que l'énergie des étoiles est due à la fusion de noyaux d'hydrogène en hélium. En 1934, Ernest Rutherford réalise la première réaction de fusion en laboratoire (entre atomes de deutérium).

a) Définition

La fusion nucléaire (ou thermonucléaire) est le processus dans lequel deux noyaux atomiques s'assemblent pour former un noyau plus lourd.

→ Noyau stable

Cette réaction est à l'œuvre de manière naturelle dans le Soleil et la plupart des étoiles de l'Univers, dans lesquelles sont créés tous les éléments chimiques autres que l'hydrogène et la majeure partie de l'hélium.

Exemple de la fusion de l'hydrogène → Genèse de l'Univers

b) Réaction de fusion et confinement magnétique

Exemple d'une réaction de fusion (deutérium ou hydrogène)

- Calcul de l'énergie libérée par une réaction de fusion

c) Comparaison entre la fusion et la fission

- Bilan par comparaison entre la fusion et la fission
- Bilan énergétique et technologique

### Conclusion

La fusion et la fission constituent deux voies pour produire de l'énergie. Les controverses économiques et technologiques liées à la fusion ralentissent son exploitation et ouvre sur d'autres possibilités pour produire de l'énergie électrique.

## Leçon présentée

Plan :

### I.Énergie disponible dans le noyau atomique

- 1.Cohésion du noyau
- 2.Stabilité des noyaux
- 3.Le modèle de la goutte liquide

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

- 1.Réaction, énergie et produits de fission
- 2.Mécanisme de la fission
- 3.La fission par neutron thermique : Réacteurs nucléaires

### III.La fusion, mécanisme de stabilisation des noyaux légers

- 1.Propriétés de la fusion
- 2.La fusion comme processus originel de la matière
- 3.Idéalité de la fusion réalisée sur terre

## NOTES

### 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.

### I.Énergie disponible dans le noyau atomique

#### 1.Cohésion du noyau

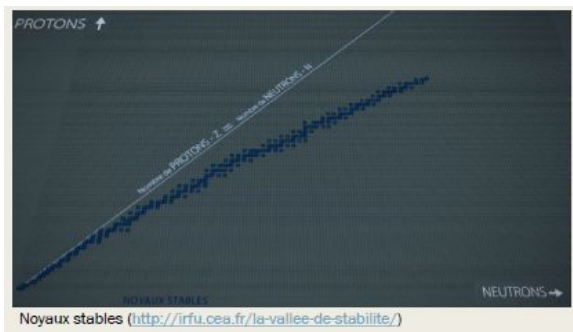
Le noyau est le coeur de l'atome. Il est constitué de protons chargés positivement et notés par la suite  $p$  et de neutrons notés par la suite  $n$ . Les protons et les neutrons forment les nucléons. Pour chaque atome, on désignera par  $Z$  le nombre de protons,  $N$  le nombre de neutrons et  $A$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

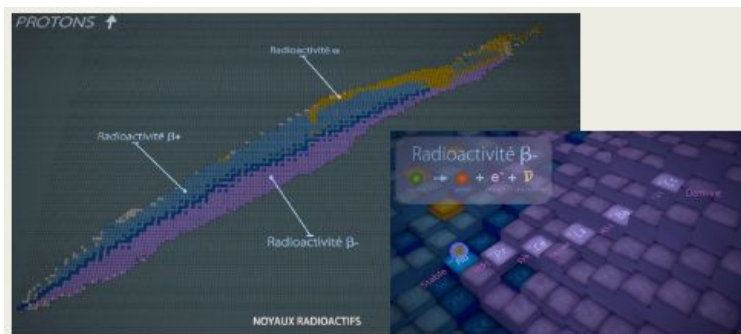
Parmi les noyaux pairs, on distingue encore deux groupes les noyaux pair-pair et impair-impair.

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 coeur 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.



*Interaction électrostatique/interaction forte équilibrée => noyau stable*



## 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.

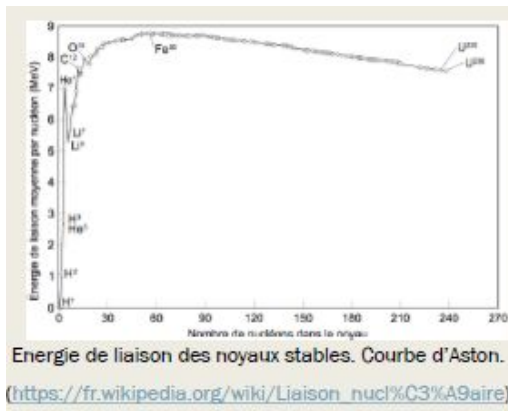
On remarque par ailleurs que la masse de l'ensemble des nucléons non liée est toujours supérieure à la masse du noyau considéré. Ainsi, on définit l'énergie de liaison comme étant l'excédent d'énergie dû à la différence de masse observée avec : [24], (pp. 22-23)

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

avec  $M(A, Z)$  le défaut de masse  $M(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n$ . 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.

*Radioactivité : moyen pour le noyau d'être le plus stable possible.*



Plus énergie de liaison va être forte, plus les noyaux vont être stable

Fer = noyau le plus stable (nombre de nucléon = parfait équilibre entre interaction forte / énergie électrostatique)

### 3. Le modèle de la goutte liquide

Un des premiers modèles nucléaire proposé 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  $\alpha$ , 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) :

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

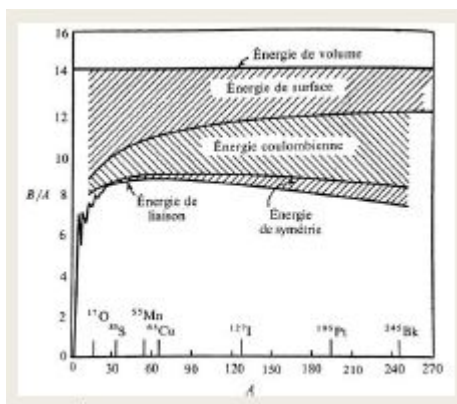
$$E_l(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm a_p \frac{1}{A^{1/2}}$$

Formule de Bethe-Weizsacker (1935)

est ce que c'est la même ?

calculer les termes de Bethe-Weizsacker à partir des données de l'interaction forte

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



Corrélation entre le modèle de la goutte liquide et la courbe d'Aston

(L. Valentin, Le monde subatomique)

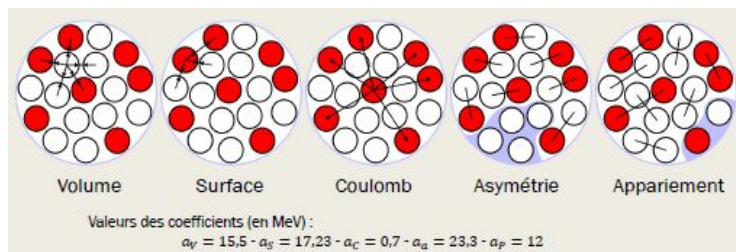
- le premier terme est le terme de volume qui reflète les interactions entre proches voisins, ainsi comme  $V$  est proportionnel à  $A$  et est en  $R^3$
- le second terme  $a_s$  est un terme de surface, il va abaisser l'énergie de liaison et on peut le rapprocher à un terme de tension superficielle.
- 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'asymétrie 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.

Niels-Bohr en 1935.

$$E_v = E_f$$

5 termes :

- terme de volume (prop au volume)
- terme de surface (prop à la tension de surface)
- terme de coulomb (si on applique le théorème de Gauss, on le retrouve)
- terme d'asymétrie (prend en compte les différences de charges entre les différents éléments, provient également de la mécanique quantique)
- terme d'appariement (mécanique quantique qui intervient dans la physique nucléaire)



Historiquement on a essayé de faire de la fusion avant la fission, mais c'est de la fission que l'on a obtenu.

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.

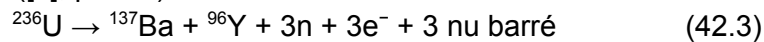
## II. La fission nucléaire : mécanisme d'allègement des noyaux lourds

### 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)

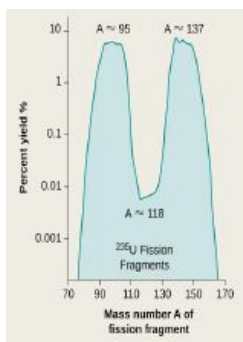
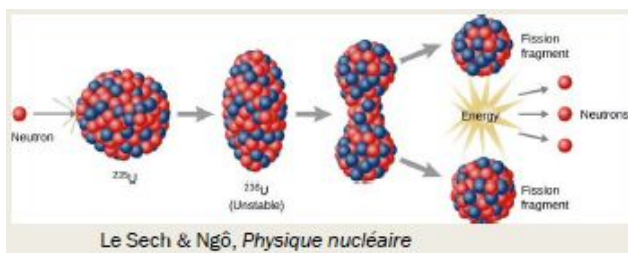
Si l'on suppose que les deux noyaux produits par fission ont pour caractéristique  $Z/2$  et  $A/2$ , on peut alors estimer l'ordre de grandeur de l'énergie de fission :

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.



*Uranium 235 temps de demi vie plus important = plus stable*

*Uranium 236 plus instable*

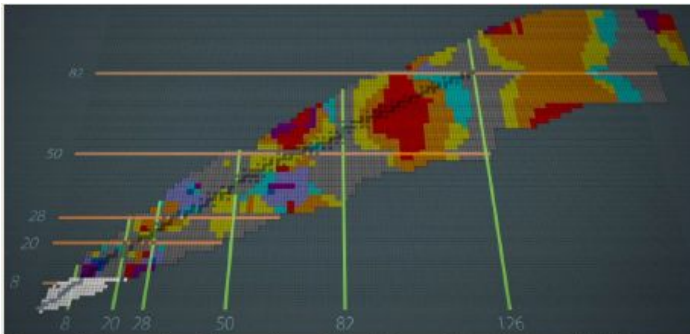
*Réaction en chaîne.*

*Si on bombarde des atomes d'uranium et que y'a plus de neutron qui sorte, il faut s'assurer que la réaction continue et que la réaction ne dégénère pas.*

*=> il faut maîtriser le processus. But des réacteurs nucléaires.*



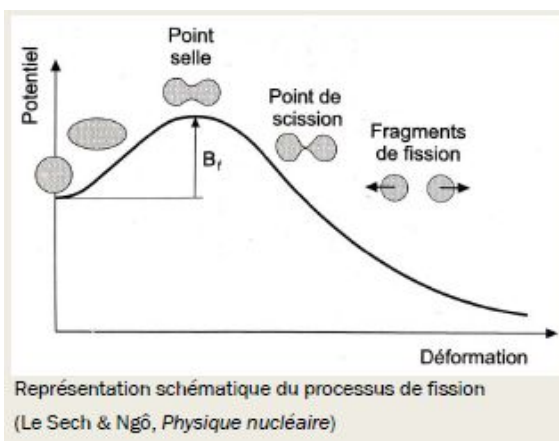
La forme des noyaux (<http://irfu.cea.fr/la-vallee-de-stabilite/>)



Noyaux sphériques et nombres magiques (<http://irfu.cea.fr/la-vallee-de-stabilite/>)

## 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 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 à  $\sim 10^{16}$  s) ou induite par apport extérieur d'énergie (photon, neutron, ...); voir [4], p. 189. C'est le principe des réacteurs nucléaires.



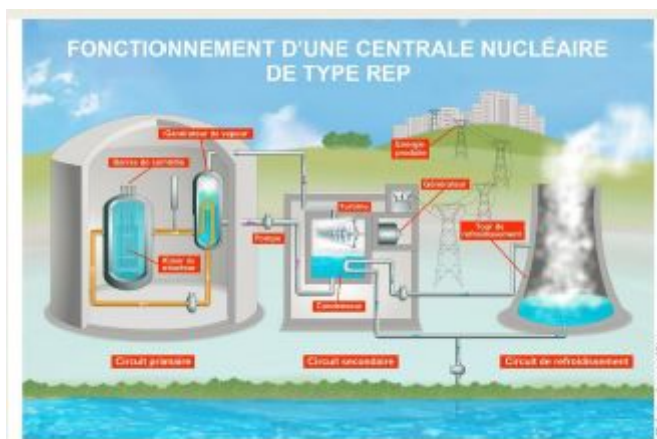
## 3. La fission par neutron thermique : Réacteurs nucléaires



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.



Ralentissement des neutrons par un modérateur : ♦hydrogène : eau normale (→réacteurs eau légère) ou eau lourde (→réacteurs à eau lourde)  
♦ou carbone(→réacteur saugraphite)

*Section efficace ; pour maîtriser le processus de fission (pas dégénérer), on essaye d'avoir un ratio de 1. Cad 1 neutron qui va bombarder un uranium.*

*Rôle du modérateur de réaction.*

*Une fois qu'on a l'énergie, on l'a sous forme de chaleur. On récupère cette chaleur que l'on transforme en électricité. On va avoir plusieurs circuits pour ne pas "contaminer ce que l'on obtient en énergie"*

*"contamination" = moins de CO2 et de gaz à effet de serre*

*Mais pb des déchets nucléaires*

*Fusion = pourrait être la solution.*

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.

### III. La fusion, mécanisme de stabilisation des noyaux légers

#### 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).

*il faut confiner ce que l'on veut fusionner.*

*Confinement inertiel (au niveau des étoiles)*

*Soleil a une masse volumique très importante +  $T$  élevée  $\Rightarrow$  fusion va pouvoir aboutir*

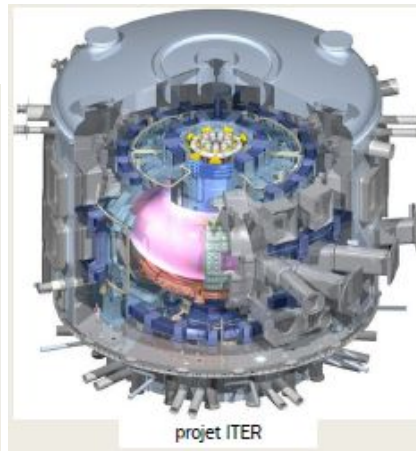
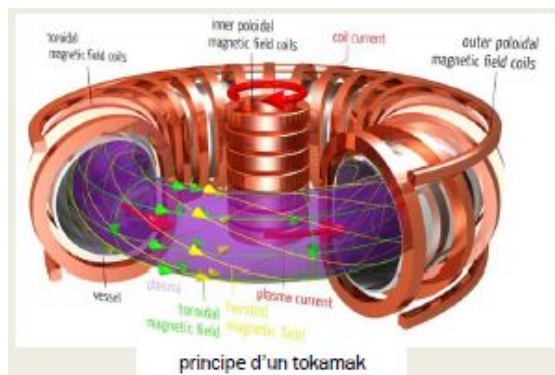
*Pour faire la même chose à notre échelle, il faudrait atteindre une température très élevée*

*Confinement magnétique = avec un champ magnétique.*

#### 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.



### 3. Idéali   de la fusion réalisée sur terre

Le confinement inerti   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.

*Début de la recherche au niveau de la fusion.*

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 lib  re 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, toutefois elle risque de prendre encore des années, ainsi le recours aux énergies renouvelables est une des pistes envisagées.

Remarques :

Il manque l'aspect quantitatif → Calculer : Application de la formule

Différence énergétique par le gain attendu pour une réaction

permet d'illustrer l'énergie de liaison par noyau

Dans un atome d'uranium une telle énergie par nucléon, combien je gagne quand j'ai un uranium qui se casse en deux

permet de donner des ODG de l'énergie qu'on gagne.

Pb de stabilité de centrale : régulation de la croissance exponentielle du nombre de réaction par unité de temps en fonction du nombre de neutron qui sont utilisés

ODG qu'on en retire sont intéressants.

Calcul illustratif Alpha v et alpha s

calculer les termes de Bethe-Weizsacker a partir des données de l'interaction forte

Iter sans parler de plasma ? Si on a de la culture dessus c'est bien d'en en parler du plasma on est à 1 ODG au dessus en terme de nrj d'électrons donc on arrache sans s'en rendre compte

illustre bien

En développer un sur les trois :

qu'est ce que c'est que l'iter

OU genèse de l'univers :

hydrogène, grossissement des noyaux, fer, tellement énergie cinétique qui va à l'inverse

Nous on fait => energie de masse on la transforme en énergie cinétique

Et là il s'est passé : Energie cinétique => énergie de masse

(sinon y'aurait pas d'uranium sur terre)

Fusion de noyau plus léger

OU fonctionnement du soleil

Questions :

- Premier terme proportionnel au volume, est ce que vous pouvez développer ?

Prendre en compte le volume des nucléons.

On prend un nucléon et on regarde tout ses proches voisins ainsi que leur énergie.

- Pour construire le alpha v qu'est ce qu'on doit connaître (l.3) ?
- Est ce qu'on connaît l'interaction forte pour deux nucléons? Elle dépend de quoi cette interaction forte ?

De la distance entre deux nucléons.

De la présence de ces nucléons;

- Est ce qu'on a besoin de connaître la position des nucléons pour savoir l'interaction forte ? Dans le cadre de ce modèle (goutte liquide) ?

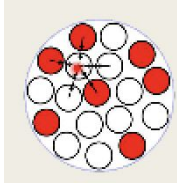
Oui on a besoin de le savoir dans la réalité.

Simplification : Mais dans ce modèle (goutte liquide), on considère uniquement l'interaction de paire; déterminée indépendamment de la position des autres, de leurs natures. Juste fonction de la distance.

Décroît très vite avec la distance et devient négligeable au delà d'un diamètre d'un nucléon. Pb à N particules devient un problème entre 2 particules.

- En surface, combien on a de voisins qui vont contribuer à son énergie de liaison?

Sur le dessin 5.



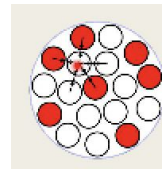
distance préférentielle pour interaction forte, (attractive à forte portée, répulsive à courte portée)

chaque flèche d'interaction abaisse d'une quantité, d'un lien, l'énergie du noyau.

Soit deux nucléons se touche ça fabrique un lien, soit ils ne se touchent pas et dans ce cas on est en interaction à courte portée → néglige l'action quand on est à une distance de plus d'un diamètre (caricature).

alpha v fait le lien entre le minimum de potentiel (nucléon nucléon) on est au minimum de potentiel quand on est au plus proche voisin et énergie quasi nulle quand on est pas au plus proche voisin.

13/2 pour ne pas les compter deux fois  
Nombre de points de contact entre nucléon  
→ 6 voisins pour le milieu.



13 nombre de voisins de sphères dans un réservoir de même taille.  
Elle a dit que c'était comme en cristal : pas vraiment c'est pas un cube hein => là c'est comme si on remplissait un seau de balle.

Interaction de paire

goutte liquide pas rigoureusement vrai car phénoménologique mais apporte des informations importantes.

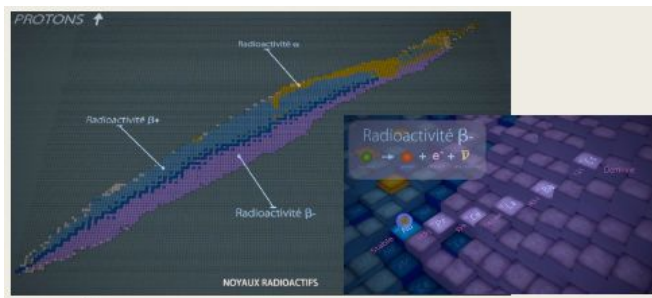
interaction proton neutron et neutron neutron est rigoureusement identique donc c'est pour ça qu'on s'en fiche de la nature des nucléons

- Pourquoi force de gravité négligeable dans le noyau ?

Loi de newton entre deux protons et l'interaction électromagnétique on a force interaction électromagnétique beaucoup plus importante en interaction gravitationnelle.

Gravité dominante à grande échelle et moins à petit échelle mais ce n'est pas par rapport au masse mais aux autres forces en présence.

- Energie totale ou énergie par nucléon dans le schéma (1.2 radioactivité) ?



cela ressemble à une banane (forme)

légèrement incurvé dans une direction et fortement incurvé dans une autre direction.

un noyau d'hydrogène avec une énergie plus forte

Noyau plus stable

interaction faible

- Quels sont les transformations du noyau dans lesquels on va se déplacer facilement (pour un même lien énergétique) => petit schéma dans le graph

c'est plus facile de descendre que de monter x)

c'est plus facile de changer le nombre de proton et de neutron (a nombre de nucléon constant)

La vallée est très étroite var pour chaque nombre de nucléon y'a un nombre maximum de neutron et de proton

Au bord de la vallée, il va pas changer de neutron ou de proton

on est capable de donner un nombre à chaque point. → permet de savoir si le noyau existe

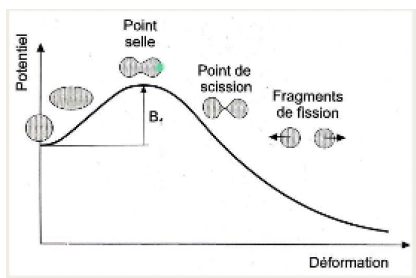
est ce qu'on est capable de passer d'un état à un autre

énergie haute à énergie basse (donc on est au milieu et on descend de la banane en suivant le bleu foncé, ou alors on descend perpendiculairement à la ligne bleue)

il ne suffit pas que l'énergie diminue, il faut aussi que la réaction soit possible (barrière de potentiel à passer)

Pas de barrière de potentiel en descendant → spontanée → bêta ; mais il y en a en haut donc c'est plus difficile besoin d'aide → la fission spontanée ne se fait pas (schéma II.2)

fission spontanée que pour très peu d'atome, il faut les aider en les bombardant.



barrière de potentiel à franchir  
métastabilité avec des barrières plus ou moins grande.

Il manque la troisième dimension ! Et on travail à A constant !

A constant = direction perpendiculaire à la banane

- Pour la fusion il y a une question de température, et vaincre la répulsion coulombienne. Quelle rôle joue la température?

Besoin de confinement !

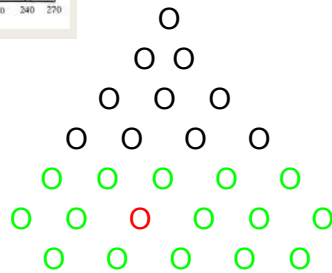
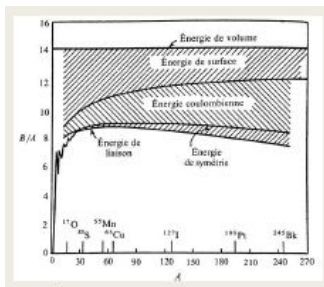
Température c'est l'état d'agitation, la probabilité de choc sera plus importante à haute température. Mais pas que le choc, on en veut beaucoup et il faut aussi de grandes vitesses.

- Comment on quantifie la notion d'agitation ?

Avec l'énergie cinétique.

- Energie par noyau ou par nucléon? Est ce qu'on retrouve le terme proportionnel à A (ou a) ?

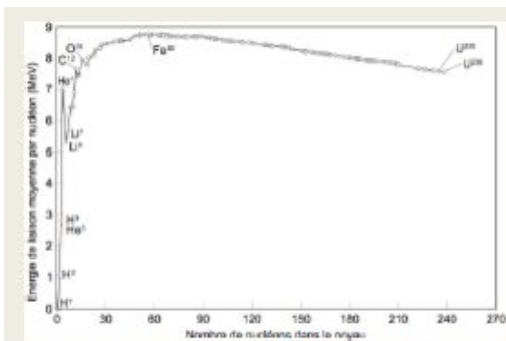
Ici non, énergie de volume plate



mais en tout cas => A chaque couche, tu enlèves une balle :)

- Définition de NRJ de liaison par nucléon ?

C'est par noyaux !!



Energie de liaison des noyaux stables. Courbe d'Aston.

([https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison\\_nucl%C3%A9aire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_nucl%C3%A9aire))

Cette énergie de liaison que l'on a divisé par le nombre de nucléon.

Energie de liaison par nucléon : énergie de liaison par noyau que l'on divise par nucléon, et c'est pour ça que l'on a une énergie

énergie de liaison par nucléon = position moyenne d'un nucléon pris dans une certaine maille.

NRJ de masse par nucléon est nrj de réf. Comme on s'intéresse à la différence cette réf disparaît.

Energie de masse : bcp plus grande

différence de masse d'un noyau

et somme des masses

toute petite correction par rapport à l'énergie de masse.

quand on casse les noyaux on conserve le nombres de nucléons, comment à évolué l'énergie en fonction de comment se mette dans l'espace les nucléons (soit dans un noyau soit dans plusieurs noyaux).

On considère toujours le même nombre de nucléon.

- Banana valley !