

**Titre :** Structure et stabilité des noyaux atomiques. Applications de l'énergie nucléaire

**Présentée par :** Alfred Hammond

**Rapport écrit par :** Léa Chibani

**Correcteur :** Elias Khan

**Date :** 02/05/2020

**Bibliographie de la leçon :**

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Cours Noyaux et Particules /Elias Khan			

**Plan détaillé**

**Niveau :** Licence

**Prérequis :** interactions fondamentales/radioactivité/constitution du noyau/électrostatique/réaction chimique/électronvolt

**Bibliographie :** Cours de Mr Khan/

**Introduction :** Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, plusieurs études ont été menées afin de connaître la structure des noyaux et développer des applications :

- Rutherford (1911): noyau très localisé par rapport à la densité de charge électronique (noyau 10-15m vs/ atome 10-10m)
- Marie Curie découvre la radioactivité.
- Jusqu'à la conception de la bombe H (années 50) et des premières centrales nucléaires afin de produire de l'énergie électrique.

**Problématique :** Quel est la structure des noyaux et comment peut-on récupérer de l'énergie grâce à leur stabilisation et comment l'utilise-t-on ?

**[1 :30]**

**I)Stabilité des noyaux et radioactivité**

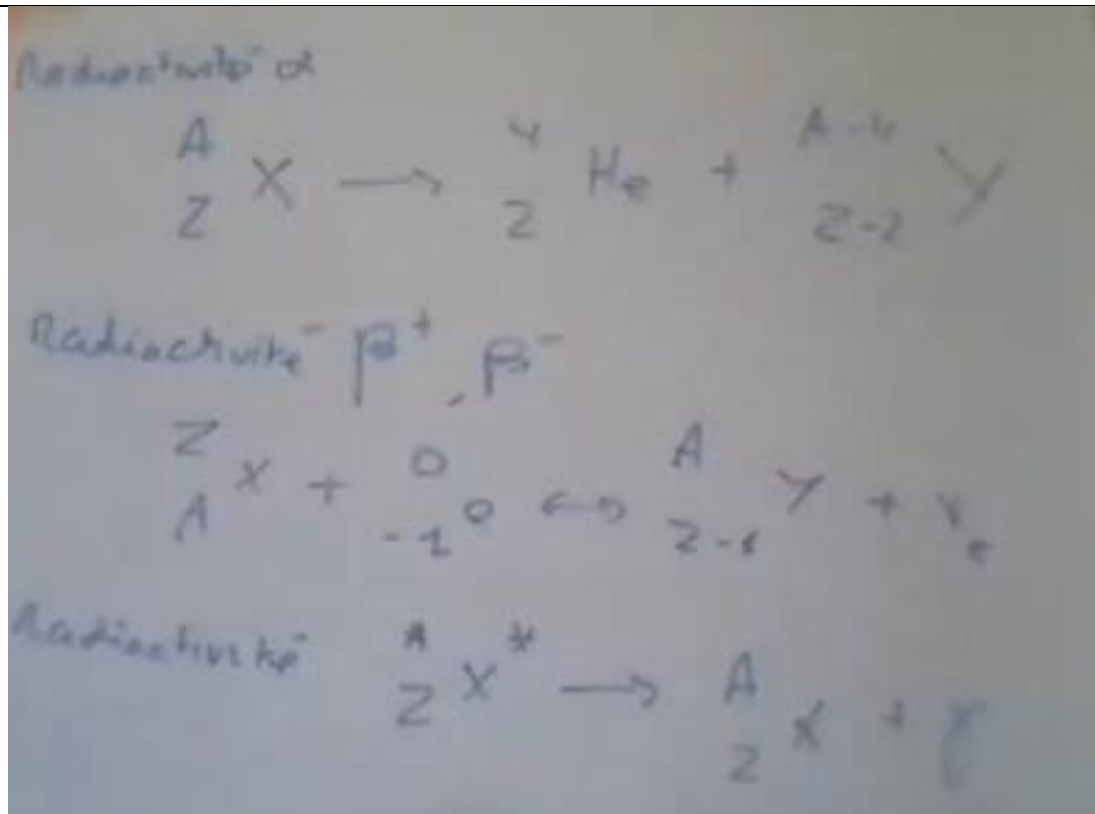
#### **A) Radioactivité et structure du noyau**

-1896 Becquerel découvre la radioactivité par hasard. (échantillon radioactif près d'une plaque photographique).

Pierre et Marie Curie, pionniers dans la radioactivité artificielle → des noyaux atomiques (pères) peuvent se transformer en d'autres noyaux (fils)

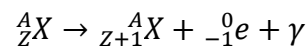
On connaît aujourd'hui différents types de radioactivité :

-Plusieurs types de radioactivité : bêta +/bêta - / alpha : rappel des équations :



**Attention a bien mettre les indices et ne pas les inverser....** Ecrire beta + et beta – avec couleurs différentes

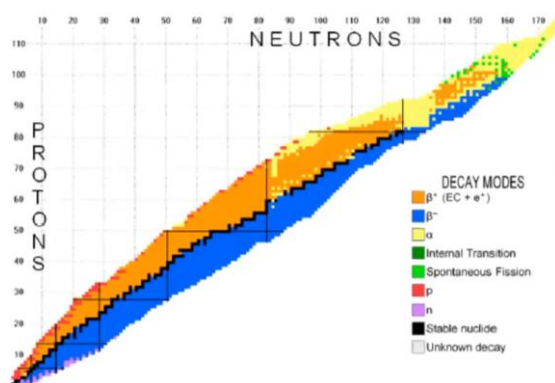
L'équation de la radioactivité beta est fautive la bonne est:



*On émet aussi des neutrinos dans les réactions mais on n'en parle pas (il faut avoir équilibre particule/antiparticule du même côté ou particule/particule de part et d'autre de la flèche).*

-Noyau = système de N neutrons et Z protons liés. Certains sont instables et donc se désintègrent en noyaux fils plus stables. [slide Vallée de la stabilité]

Experimentalement, on constate l'évolution suivante pour les éléments du tableau périodique (slide)



**Si on utilise cette image modifier la légende car on ne connaît pas les transitions, p, n et internes**

Dire abscisse+ordonnées. On constate :

Il semble avoir un ratio de stabilité entre protons et neutrons même si ce n'est pas tout à fait linéaire. On appelle cette zone la vallée de stabilité. Nous calculerons plus tard ce ratio.

- si on a trop de neutrons par rapport au nombre de protons on fait radioactivité beta -, un neutron du noyau fils se transforme en proton avec émission d'un électron (conservation de la charge) et éventuellement de photons.

Si on a pas assez de neutrons par rapport au nombre de protons c'est un proton qui se transforme en neutron par émission d'un positon.

La radioactivité ramène des noyaux à vers une configuration plus stable. La radioactivité étant un processus spontanée, il faut que l'énergie du noyau fils soit plus faible que l'énergie du noyau père.

(On verra ceci quand on parlera du  $Q$  de réaction, il faut que  $Q > 0$ )

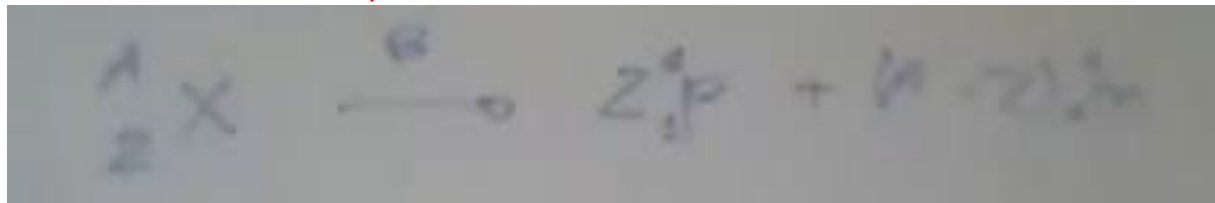
- La radioactivité alpha nécessite d'un noyau de taille conséquente (en général  $A > 130$ )

-Ce qui nous intéresse est de savoir si ces réactions produisent de l'énergie ? si oui peut-on la récupérer ?

On commence par quantifier l'énergie d'un noyau. Pour cela on utilise **l'énergie de liaison**, qui est la différence d'énergie entre un état où les nucléons du noyau sont liés et un état où ces nucléons ont été séparés. Cette énergie donne le surplus d'énergie associée à la dissociation du système.

*Rq. Si il y a une barrière de potentielle, il faudrait fournir techniquement plus d'énergie que l'énergie de liaison pour dissocier le système. En toute rigueur aussi il y a un effet d'appariement des noyaux ce qui rend les noyaux avec un nombre pair de protons/neutrons plus difficile à dissocier.*

**NE PAS ÉCRIRE B ET FLECHE, SÉPARER DANS UN TABLEAU ÉTAT LIÉ ET ÉTAT DISSOCIÉ**

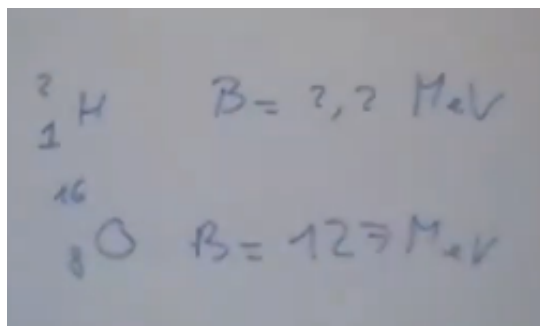


On suppose les produits immobiles après la réaction. L'énergie à fournir B correspondante serait égal à :

$$B = Z m_p c^2 + (A-Z) m_n c^2 - M(X)$$

(la deuxième masse est celle du neutron), équation 1.2 du poly. **Il manque un  $c^2$  à la dernière masse.**

Cette énergie est positive (c'est une énergie à fournir) qui traduit la stabilité de la matière liée à la formation de noyaux. On donne ODG :



Pour uranium : 1801 ev.

Ces énergies positives nous montrent que l'état de noyau est beaucoup plus stable que l'état où les nucléons sont séparés, d'où le fait que les noyaux existent.

La cohésion du noyau est fondamentalement différente à celle, par exemple, des liaisons chimiques qui correspondent à une énergie beaucoup plus faible ( $\sim 10$  ev).

### B) Origine de la cohésion des noyaux [8 :00]

-Comment expliquer que les protons et neutrons qui coexistent forment un édifice avec une grande cohésion ?

La cohésion du noyau est essentiellement due à l'interaction forte. À priori il est difficile de comprendre comment un nombre de protons de faible masse peuvent être si proches les uns des autres. La raison est l'existence de l'interaction forte.

L'interaction forte n'est pas la seule à exister dans le noyau. En effet, il est difficile de comprendre pourquoi ajouter un neutron qui est électriquement neutre pourrait déstabiliser un noyau et engendrer la radioactivité bêta -. La raison est l'existence de l'interaction faible.

C'est au final un équilibre entre ces interactions et la répulsion coulombienne des protons qui rend un noyau stable ou pas.

*Rq. L'interaction coulombienne intervient dans la radioactivité alpha.*

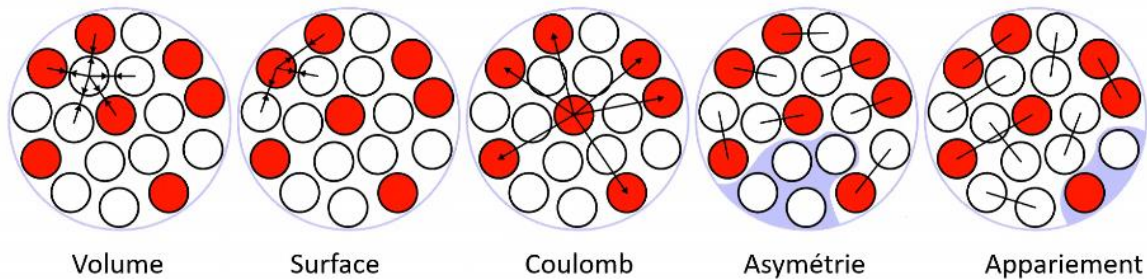
- Nous avons défini l'**énergie de liaison** précédemment, Il existe un modèle qui permet d'estimer l'énergie de liaison en modélisant les interactions.

-Modèle de la goutte liquide : Bethe Weissäcker analogie avec la cohésion d'une goutte liquide

$$B(N, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A} + \delta$$

c.f cours p.5.

Discussion avec slide Modèle de la goutte liquide :



**Premier terme** : - stabilisation par interaction forte, seul terme strictement stabilisant. C'est le terme de volume. Le rayon du noyau est  $\sim A^{1/3}$  \* rayon donc un terme proportionnel au volume en A. Chaque nucléon interagit avec tous les autres et on obtient alors un terme proportionnel à A stabilisant.  **$a_v \sim 16 \text{ MeV}$**

**Deuxième terme** : énergie surfacique, un nucléon à la surface interagit avec moins de voisins. La stabilisation est alors plus faible et on retire au premier terme une certaine quantité d'énergie.  **$a_s \sim 17 \text{ MeV}$**

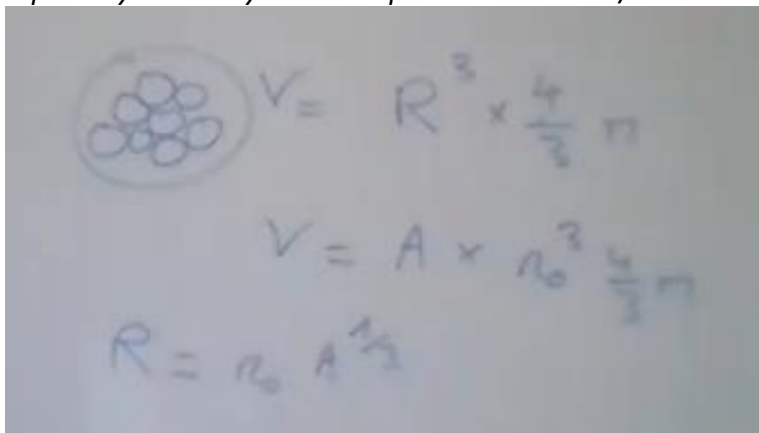
**Troisième terme** : énergie coulombienne. Proportionnel au nombre de protons au carré (Z) et on divise par le rayon  $A^{1/3}$  pour avoir une forme similaire à l'énergie coulombienne.  **$a_c \sim 0.7 \text{ MeV}$**

**Quatrième terme** : liée à l'interaction faible, nous pouvons avoir conversion entre protons et neutrons mais globalement on pénalise un déséquilibre entre les deux. Rq. Il est aussi lié à la statistique de fermi-dirac.  **$a_a \sim 13 \text{ MeV}$**

**Cinquième terme** : terme quantique, quantifie l'énergie d'appariement entre deux nucléons de même type. Il est positif ou négatif selon la parité des neutrons/protons dans le noyau.  **$\Delta \sim 1-2 \text{ MeV}$**

Rq. Les constantes du modèle sont à ajouter par des mesures expérimentales (par exemple on peut ajuster la courbe d'aston avec)

Rq. Le rayon du noyau se comporte comme  $A^{1/3}$  car on utilise le modèle des boules ?



*R est le rayon du noyau, mais le volume est aussi approximé par la somme du volume des sphères \*(nucléons), alors en égalisant les deux équations on trouve la formule  $R = r_0 A^{1/3}$  avec  $r_0$  une constante. Hyp : les nucléons sont en contact les uns des autres, interaction forte.*

### C) Critère de stabilité

Le modèle de la goutte liquide nous permet de calculer la configuration la plus stable d'un noyau avec un nombre de masse donné par rapport à la désintégration bêta. En effet, nous allons supposer que B varie de manière continue avec Z. Insister que comme on a défini B, B est l'énergie liée à la cohésion du noyau. Si B est maximale par rapport à Z, alors nous aurons pour un nombre de nucléons donné la configuration la plus stable.

Si on fait le calcul on trouve (donner directement le résultat) :

$$\left. \frac{\partial B(A, Z)}{\partial Z} \right|_{A=\text{cst}} = 0 \quad (1.5)$$

Un calcul direct de l'équation (1.5) utilisant l'équation (1.4) pour B(A,Z), où N est remplacé par A-Z, donne le comportement de la vallée de stabilité (par rapport à la désintégration Bêta) visible sur la carte des noyaux (figure 1.1) :

$$Z = \frac{A}{2 + (a_C/2a_A)A^{2/3}} \simeq \frac{A}{2 + 0,015A^{2/3}} \quad (1.6)$$

Donc pour un noyau léger ( $Z < 20$ ), on trouve que un noyau avec un nombre de protons et neutrons égaux ne sera pas sujet à la désintégration bêta. Un noyau lourd quant à lui sera plus stable avec un nombre de neutrons supérieur au nombre de protons.

Or il existe d'autres types de réaction nucléaires. La fusion et la fission.

**DEF fission** : Réaction nucléaire par laquelle un noyau se scinde en plusieurs autres noyaux plus légers, de façon spontanée ou suite à un bombardement de particules énergétiques (neutrons ou noyaux-spallation). (1939 Lise Meitner, Otto Hahn, et autres. Ils bombardent des noyaux avec des alpha pour obtenir des noyaux plus lourds)

**DEF fusion** : Réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux atomiques se combinent pour former un noyau plus lourd (1<sup>ère</sup> réaction de fusion Mark Oliphant 1932).

Ce sont ces deux types de réactions nucléaires avec lesquelles on pourrait produire de grandes quantités d'énergie de manière fiable.

Pour évaluer la quantité d'énergie qu'une réaction nucléaire peut produire nous introduisons une nouvelle quantité, le quotient de réaction.

- Si on a une réaction  $1+2 \rightarrow 3+4$ , on définit le quotient de réaction  $Q = B_3 + B_4 - B_1 - B_2$  qui représente l'énergie libérée par la réaction.

- Si  $Q > 0$  ceci veut dire que l'énergie du système à l'entrée est supérieure à l'énergie du système en sortie.

Si B3 et B4 sont plus grands que B1 et B2, ceci veut dire qu'en sortie les noyaux 3 et 4 sont plus stables que les noyaux 1 et 2.

Ceci nous indique aussi que pour que un noyau soit radioactif, il faut que le Q de réaction de la désintégration radioactive soit positive.

Avec  $Q > 0$  nous indique aussi que il a de l'énergie dégagée lors de la réaction.

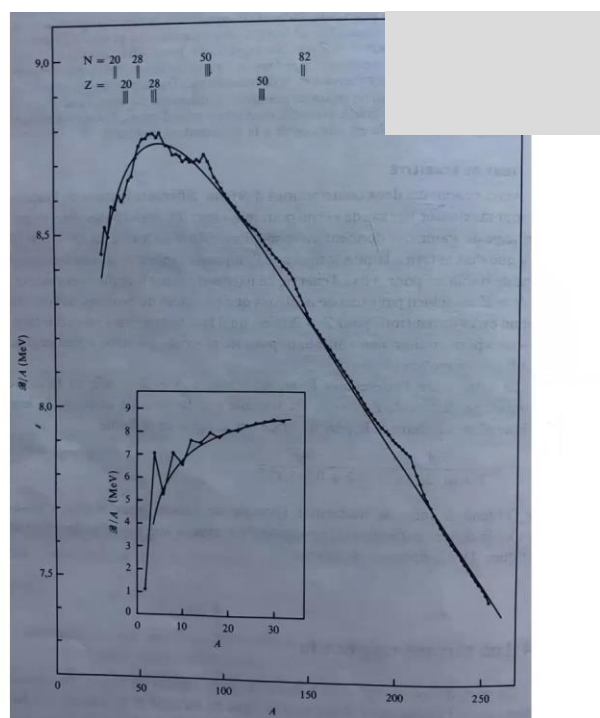
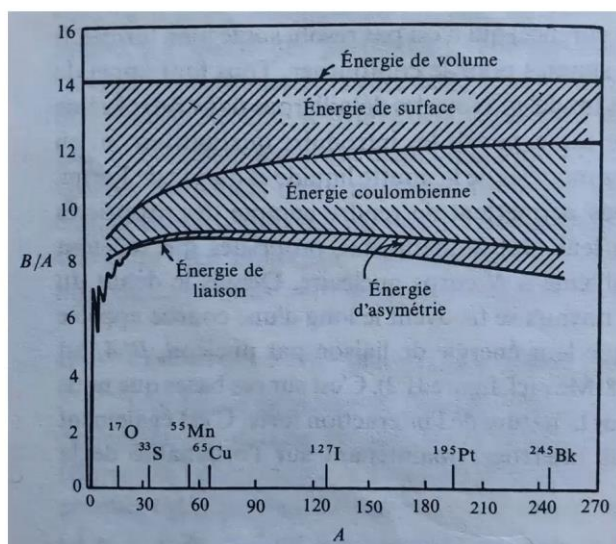
-Ce qui est plus intéressant est la quantité libérée par nucléons :  $Q/A = \langle B/A \rangle_{\text{sorti}} - \langle B/A \rangle_{\text{entrée}}$  :

$$\frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \left[ A_3 \cdot \left( \frac{B_3}{A_3} \right) + A_4 \cdot \left( \frac{B_4}{A_4} \right) \right] - \frac{1}{A} \left[ A_1 \cdot \left( \frac{B_1}{A_1} \right) + A_2 \cdot \left( \frac{B_2}{A_2} \right) \right] = \langle B/A \rangle_s - \langle B/A \rangle_e \quad (1.8)$$

où  $A = A_1 + A_2 = A_3 + A_4$  est le nombre total de nucléons et  $B/A$  représente l'énergie de liaison par nucléon.

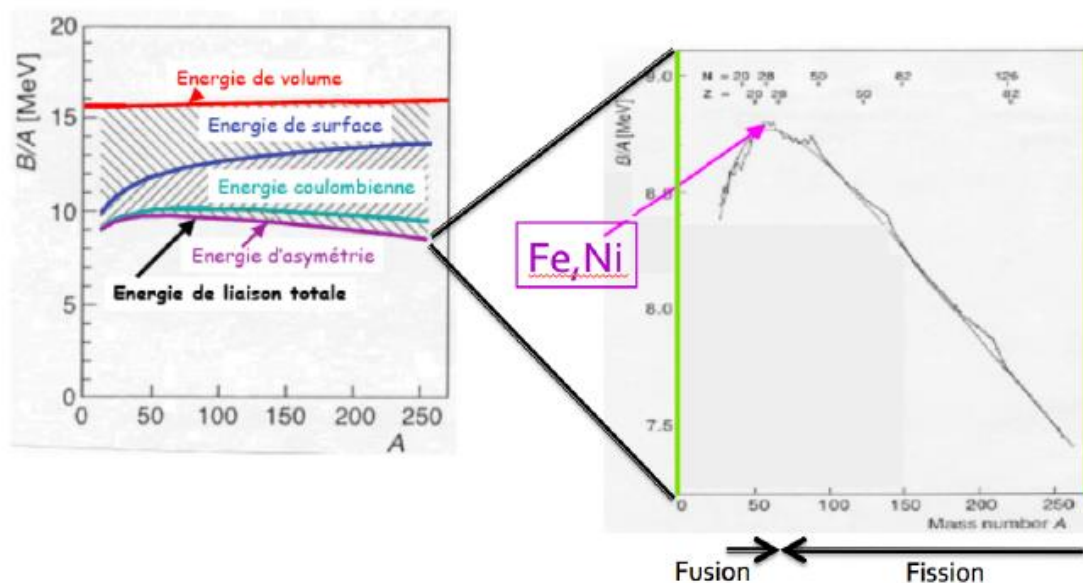
Rq : Une autre manière de présenter le Q de réaction, pas forcément essentielle à la leçon. La courbe d'Aston utilise cette formulation mais on n'a pas besoin de l'explicitier, juste dire à quoi elle correspond.

-Courbe d'Aston : représente  $B/A = f(Z)$ .



On peut trouver la courbe d'Aston sur internet, si non utiliser, il faut beaucoup expliquer par contre (CF cours p. 7):





À gauche on sépare les différentes contributions de l'énergie de liaison pour un noyau. À droite on a la somme des termes mais grossie pour observer la tendance.

On peut maintenant introduire la fission et la fusion nucléaire qui sont

Ce qui nous intéresse est produire de l'énergie, donc le  $Q$  de réaction de la fusion et la fission doivent être positifs.

En d'autres termes l'énergie de liaison doit être plus élevée pour les noyaux fils que pour les noyaux père.

La courbe d'Aston est croissante pour des noyaux « légers » (max pour Fe, Ni). Pour ces noyaux la fusion nucléaire dégage de l'énergie.

Pour des noyaux plus lourds la courbe d'Aston est décroissante, la fission nucléaire dégage de l'énergie pour ces noyaux.

[20 :00]

Nous avons jusqu'à présent regardé des critères énergétiques, cependant, nous n'avons pas encore discuté de quand la fission est possible. En effet, Il est beaucoup plus courant de voir dans la nature la désintégration alpha ou bêta, mais rarement de la fission. Pourquoi ?

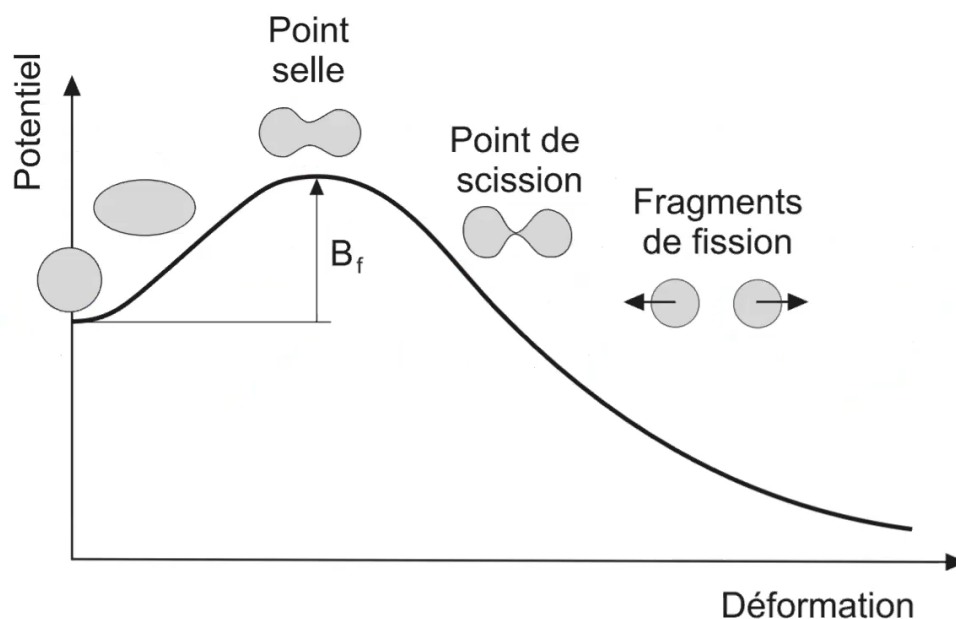
## II) Utilisation de l'énergie de la fission nucléaire

### A) Paramètre de fissilité

-Que se passe-t-il lors de la fission ? Un noyau donne plusieurs autres, donc si on observe la géométrie du noyau père celui-ci va se déformer pour donner au moins deux fragments. Or il est plus avantageux pour un noyau d'avoir une surface extérieure la plus faible possible pour maximiser le nombre d'interactions entre nucléons. Cf. terme de surface.

**Il existe une barrière de fission [slide]**

# Barrière de fission



La barrière de potentielle est due à la compétition entre le terme énergie de surface ( minimise la déformation) et le terme énergie de répulsion coulombienne qui tend lui à déformer le noyau.

Donc, même si un noyau lourd est moins stable que deux noyaux plus légers, il existe une barrière de potentiel qui rend improbable de fissionner spontanément. Experimentalement, la barrière a une hauteur de environ 5-6 MeV. Pour rappel, l'énergie d'agitation thermique vaut 0.025 eV.

**Rq dire ceci si on veut parler de fission spontanée.**

Donc d'un point de vue classique, les noyaux ne peuvent pas fissionner spontanément. Or, nous sommes dans le domaine de la MQ et l'effet tunnel existe. Il n'est pas nécessaire de passer la barrière de potentiel, il suffit de la traverser par effet tunnel. Cependant il ne faut pas que la barrière soit trop épaisse. On peut alors introduire le paramètre de fissilité comme fait dans le cours p. 9 2.1.1. Ne pas trop dire à ce sujet quand même, c'est complexe.

-Comment surmonter cette barrière ? Il faut apporter de l'énergie au noyau !

Fission induite : Nous allons envoyer un neutron pour qu'il soit proche d'un noyau, ce noyau va capturer l'électron ce qui entraîne :

- une déformation du noyau pour accommoder le nouveau neutron ce qui modifie l'énergie de surface et un apport d'énergie liée aux interactions entre le nouveau neutron et les nucléons du noyau.

**Fission par neutron thermique**

- Les nucléons étant des fermions sont plus stables quand ils forment des paires. Donc si le noyau a un nombre de neutrons impair, la capture du nouveau neutron vas apporter un surplus d'énergie qui vas permettre au noyau de passer au-dessus de la barrière de potentiel.

Fission induite par neutrons lents : les noyaux lourds ont beaucoup de protons, donc un terme d'énergie de répulsion coulombienne grand. Ainsi il suffit d'envoyer un neutrons avec une certaine énergie cinétique (ici faible d'où neutrons lents), pour qu'il soit capturé par un noyau et que l'énergie de liaison acquise permette de surmonter la barrière de fission.

On peut faire le calcul pour l'uranium 235 (expliquer que cest l'isotope de l'uranium avec 235 nucléons):

$$m_n c^2 + M(A-1)c^2 = M(A)c^2 + E^* \quad (2.2)$$

puisque la réaction se fait quasiment au repos. L'énergie d'excitation  $E^*$  gagnée par le noyau A est donc

$$E^* = [m_n + M(A-1)]c^2 - M(A)c^2 = S_n, \quad (2.3)$$

d'après la définition (1.3) de l'énergie de séparation. Il existe ainsi quelques noyaux pour lesquels  $S_n$  est supérieur à la barrière de fission. Par exemple  $S_n(^{236}\text{U})=6,5$  MeV. La capture d'un neutron lent par le  $^{235}\text{U}$  donne donc un noyau de  $^{236}\text{U}$  qui fissionne. En revanche la capture d'un neutron lent par le  $^{238}\text{U}$  donne un noyau de  $^{239}\text{U}$  qui ne fissionne pas, car  $S_n(^{239}\text{U})=4,8$  MeV qui est inférieur à la hauteur de la barrière de fission. On voit ici le rôle crucial de l'appariement et la nécessité d'avoir un noyau ayant un nombre impair de neutrons pour permettre la fission suite à la capture d'un neutron lent.

L'énergie gagné est de 6,5 MeV ce qui est suffisant pour passer la barrière de potentiel. On utilise alors des neutrons dit thermiques qui ont une énergie de 0.025 eV (énergie de l'agitation thermique à T ambiant).

À noter que il est possible aussi que le noyau se desexcite par radiation gamme et vibration. La fission n'arrive pas systématiquement.

### Fission par neutron rapide

Que se passe t'il si on a un nombre pair de neutrons ? Prenons l'exemple de l'Uranium 238. Le même calcul que précédemment nous amène à  $E = 4,8$  MeV, plus faible que la hauteur moyenne de la barrière.

Il n'y a alors pas de fission. Solution ? On donne une énergie cinétique aux neutrons de l'ordre de 1-2 MeV. Les neutrons sont dit alors « rapides » et l'énergie totale qu'ils apportent à un noyau d' $\text{U}238$  est suffisant pour provoquer une fission.

Quel avantage à utiliser des neutrons rapides ?

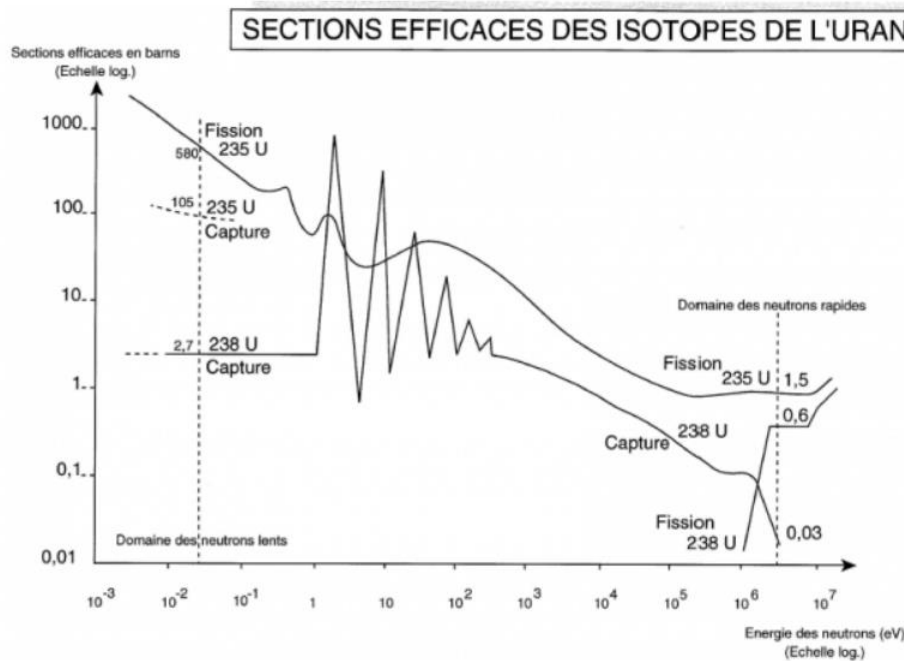
- la génération de neutrons donne le plus souvent des neutrons rapides

- ils permettent de fissionner plus de noyaux

Pourquoi utiliser alors des neutrons lents ?

Montrer slide avec section efficace

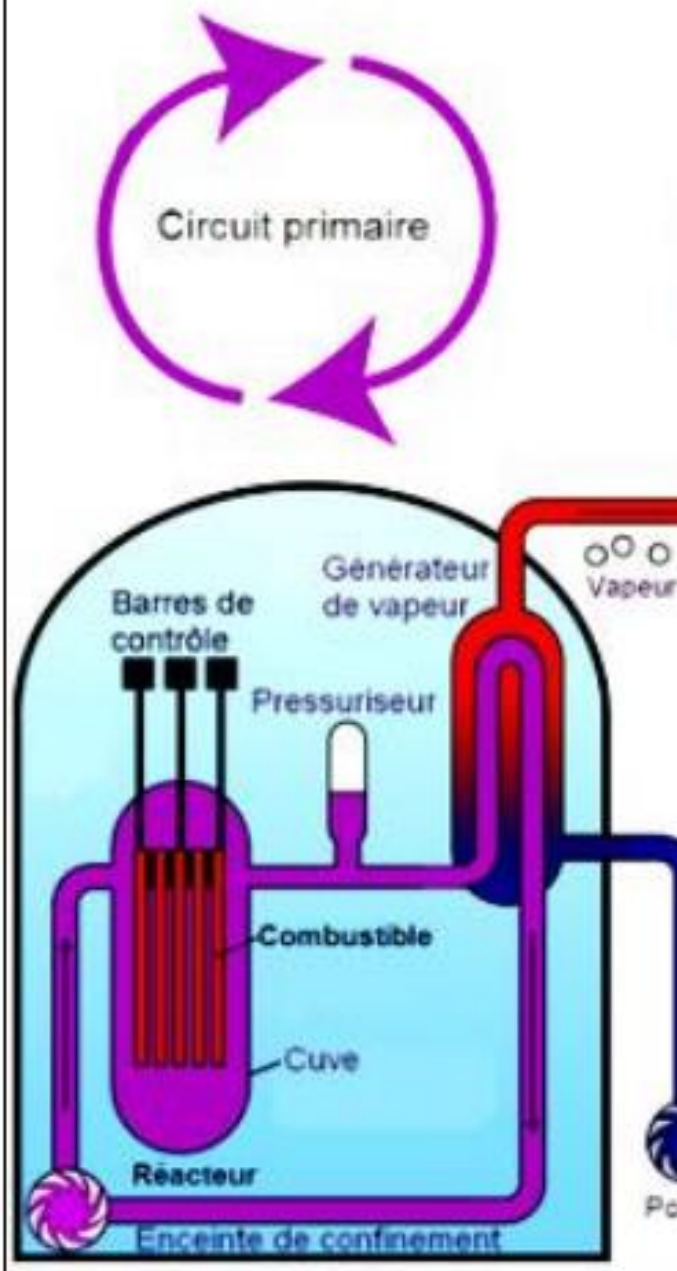
**SLIDE :** <http://propulsion-nucleaire.e-monsite.com/pages/explication-technique/neutronique.html> 06.03.2020



Un neutron lent a une probabilité d'être capté 1000 fois plus importante que un neutron rapide pour l'uranium 235. Cette probabilité est très importante dans le fonctionnement des réacteurs nucléaires comme nous allons le voir à continuation.

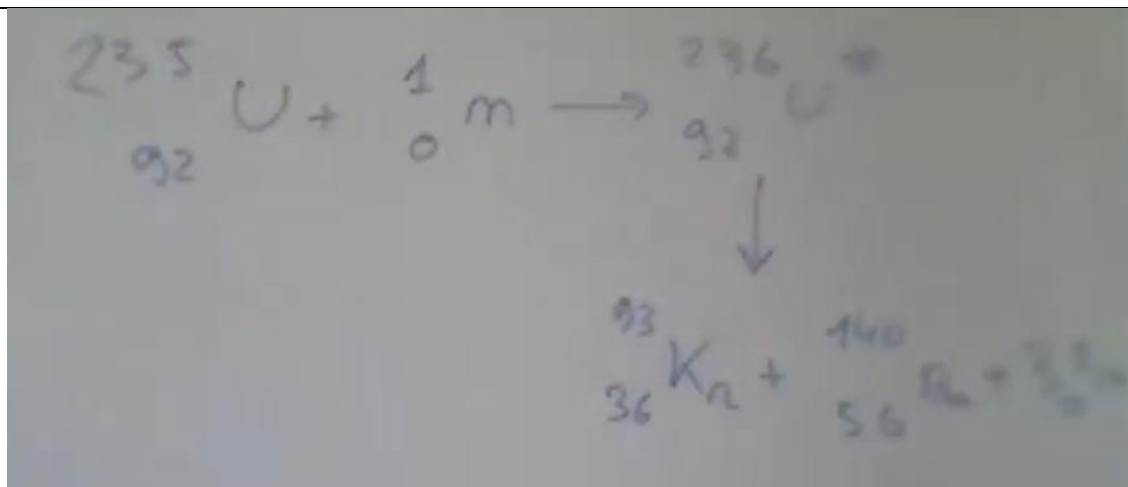
### **B) Fonctionnement d'une centrale EPR**

On regarde le cœur du réacteur nucléaire le plus courant en France. Le réacteur à eau pressurisé EPR.



Dans le cœur d'un réacteur nucléaire c'est l'endroit où est le combustible (Uranium enrichi 235 enrichissement de 3-5% max). Le combustible est dans des crayons. Ces crayons sont en contact avec un circuit d'eau lourde dit primaire. Eau lourde c'est eau deutérée.

On amorce la réaction nucléaire avec un générateur de neutrons (matériau radioactif). Imaginons que un premier noyau d'uranium 235 fissionne. On a alors la réaction :



(la fi c'est du Ba et 3 neutrons, c'est un exemple de réaction les produits de la fission peuvent être différents).

Cette réaction produit entre 2-4 neutrons supplémentaires. Ce sont des neutrons rapides qui partent dans des directions aléatoires. Du à leur énergie, il est très probable que aucun de ces nouveaux neutrons provoque une fission.

Dans ce cas la réaction s'arrêterai. Or Ces neutrons rapides subissent des collisions élastiques avec les molécules d'eau lourde. Ceci rechauffe l'eau lourde et diminue l'énergie cinétique des neutrons qui sont alors en partie renvoyés dans les crayons de combustible avec une énergie moindre (thermique) et provoquent alors des fissions.

L'objectif est qu'il y ait un nombre constant de neutrons dans le cœur du réacteur afin d'avoir un nombre constant de fissions dans le temps et que la réaction soit contrôlée.

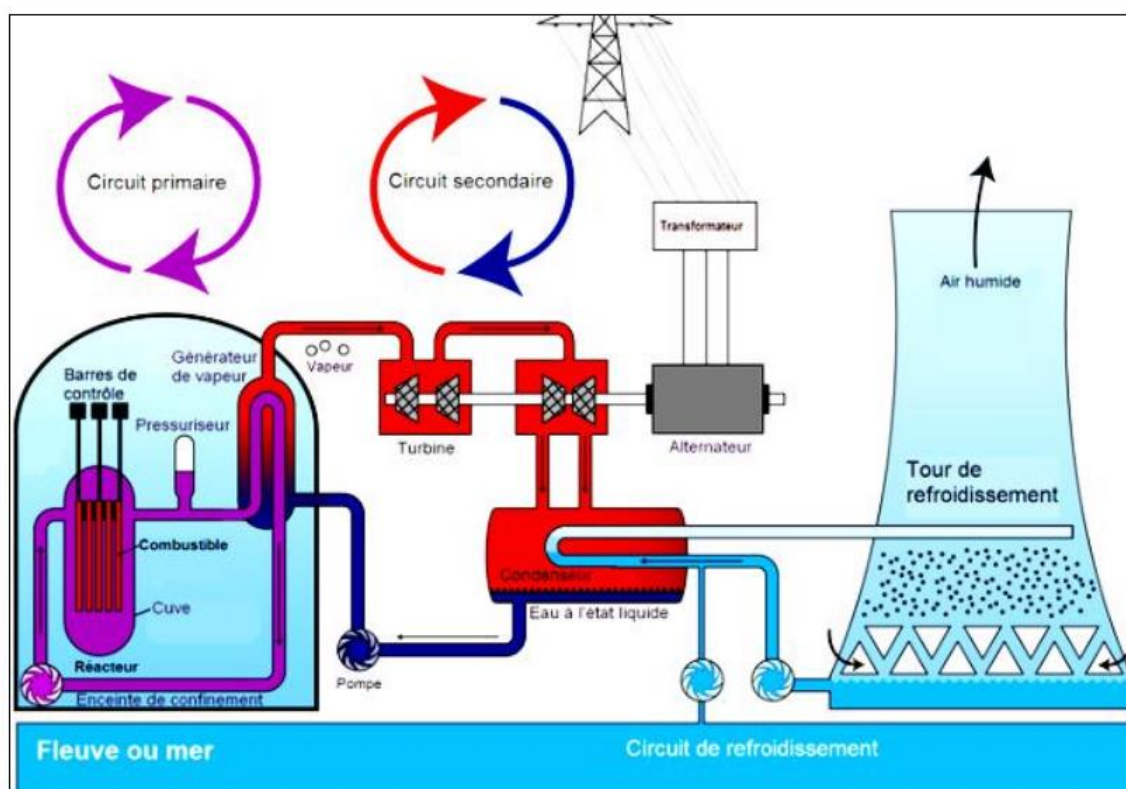
En effet, on veut que un seul des neutrons libérés lors d'une fission provoque une fission en régime permanent.

Le circuit d'eau primaire est utilisé comme **modérateur**, il augmente la probabilité qu'un neutron issu d'une fission provoque une fission.

On utilise l'eau deutérée plutôt que de l'eau normale car l'eau peut capturer des neutrons aussi ! L'eau deutérée a une section efficace de capture 1000 fois plus faible (0,00046 barn contre 0,33 barn. <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-eau-lourde-18078/>).

Dans le cœur il y a aussi des barres de contrôle qui ont une section efficace de capture des neutrons importante. Ces barres sont utilisées pour diminuer la probabilité qu'un neutron issu d'une fission provoque une fission (diminuent le nombre de neutrons disponibles). On les utilise pour réguler la réaction nucléaire.

On peut aussi injecter du Bore liquide dans le circuit d'eau primaire pour diminuer fortement le nombre de neutrons au cas où la réaction s'emballe.



Le schéma ci-dessus illustre le principe de fonctionnement d'un réacteur à eau sous pression.

Le circuit d'eau primaire sert à chauffer un deuxième circuit d'eau isolée dit secondaire qui est en contact avec des turbines qui produisent l'électricité. Les deux circuits d'eau primaire sert donc aussi de fluide caloporteur.

Finalement il y a un circuit d'eau tertiaire qui est utilisée pour refroidir le circuit d'eau secondaire.

Ceci illustre le fonctionnement d'un réacteur nucléaire.

**Lire la p. 14 du cours pour ne pas dire des betises sur l'enrichissement de l'Uranium.**

Un des grands problèmes de l'énergie nucléaire est la gestion des déchets.

-Cependant, la production de noyaux lourds fils est un problème, ainsi que leur diversité. Autre solution : on peut envisager l'autre côté de la courbe d'Aston → **la fusion**

<http://robert.jobard.free.fr/savoir/centrale-nucleaire>

**largement 40 minutes ici.**

**III) La fusion, une solution miracle ? (cette partie n'a presque pas été traitée)**



D'après la courbe d'Aston (Fig. 1.2), la fusion d'éléments légers est exo-énergétique. Les avantages sont i) l'abondance des éléments légers comparés à ceux nécessaires à la fission, ii) l'absence de la très grande variété de déchets, contrairement à la production d'énergie par fission, et iii) la plus grande énergie libérée par nucléon en raison de la pente plus prononcée de ce côté de la courbe d'Aston.

**A) La fusion dans les étoiles**

**B) La fusion sur Terre**

**C) Propriétés**

Je vous réfère ici au Poly de Monsieur Khan car, tout y est très bien expliqué 😊

**Rq. On a 0.7% d'Uranium 235 dans un kg d'uranium le reste c'est du 238**  
**Caser le mot auto-entretenue**

### Questions posées par l'enseignant

**Question 1 : quand tu as écrit la réactivité beta +, tu as écrit : noyau + électron ? Peut-il y avoir une réactivité beta avec un électron ?**

Il faut faire attention, la désintégration bêta – : produit un électron et un antineutrino // bêta + : produit un positron et un neutrino. La capture électronique est le processus tel que le noyau père absorbe un de ses propres électrons orbitaux. C'est un processus qui est en compétition avec la désintégration bêta+. En effet, les deux donne le même noyau fils

**Question 2 : Est-il possible d'expliquer pourquoi certains atomes sont radioactifs et certains non ? C'est quoi la radioactivité ?**

-La radioactivité décrit la transformation d'un noyau père (spontanée ou stimulée) en un noyau fils (plus stable).

-Certains nucléides peuvent effectuer des désintégrations radioactives spontanément si l'énergie de désintégration Q (où le quotient de réaction) est positif. Le coefficient de réaction est :

$1+2 \rightarrow 3+4$



$Q = -B_1 - B_2 + B_3 + B_4 > 0$  alors les énergies de liaisons des noyaux fils sont plus grandes ; Noyau fils plus stable  $\rightarrow$  désintégration spontanée.

Question 3 : Au niveau des interactions, quels rôles jouent l'interaction EM et l'interaction faible dans la stabilité des noyaux ?

-Répulsion coulombienne (EM) a pour conséquence que deux protons se repoussent (force répulsive « longue » portée)

-interaction faible permet d'expliquer que les neutrinos pénètrent très facilement la matière. En effet, ils ne sont pas chargés donc ne subissent pas la répulsion coulombienne. Pour expliquer ce qui les font interagir on parle d'interaction faible. Pourquoi **faible** ? Car en fait un neutron libre a un temps de vie très long par rapport au temps de vie des particules libres qui subissent l'interaction forte. **To sum up : plus l'interaction est forte, plus les processus qu'elle induit sont rapides**

Question 4 bis : Interactions liées aux types de radioactivité ?

-Radioactivité bêta+/- : interaction faible

-désintégration alpha : interaction forte / électromagnétique

Question 5 : Pourquoi le rayon du noyau se comporte en  $A^{1/3}$  ?

Le rayon du noyau est R. La densité du noyau est presque indépendante du nombre de masse A. Donc le nombre de nucléons contenus dans le noyau est simplement proportionnel à son volume  $\frac{4}{3}\pi R^3$  d'où : le résultat

Question 5 bis : Qu'est ce qui justifie ce postulat : le volume du noyau est proportionnel au nombre de nucléon ?

Question 6 : Le terme d'appariement est-il un terme attractif ou répulsif dans la formule de Weizsäcker ?

-Si Z pair et N pair : le terme  $\delta > 0$  il est stabilisant ie il augmente l'énergie de liaison

-Si pair et impair :  $\delta = 0$  pas d'effet

-Si Z impair/Nimpaire :  $\delta < 0$  il est déstabilisant ie l'énergie de liaison diminue, l'édifice est moins stable

Question 7 : Expliquer d'où vient l'expression de  $Q/A$  ?

Ici il faut faire attention. Pour la réaction  $1+2 \rightarrow 3+4$  on a

$$Q = B_3 + B_4 - B_1 - B_2$$

$$Q/A = (B_3 \cdot A_3/A_3 + B_4 \cdot A_4/A_4 - B_1 \cdot A_1/A_1 - B_2 \cdot A_2/A_2)/A$$

Question 8 : Comment expliquer la forme générale de la courbe d'Aston ?

Forme générale vient de l'ajustement de la formule de Bette Weizsäcker ?

Question 9 : D'où viennent les écarts entre l'ajustement via la formule de Weizsäcker et la courbe d'Aston ?

Question 9 bis : Les couches sont-elles prévues par la formule de Weizsäcker ?

-Les écarts viennent du modèle en couche. En effet, les protons et neutrons sont des fermions. Ils sont régis par la stat de Fermi-Dirac. Et l'énergie des noyaux est quantifiée comme celle d'un OH. Il y a des structures très stables. On peut faire l'analogie avec les configurations électroniques des atomes. Pour des atomes dont les couches électroniques sont complètes il y a une stabilité. Ici pareil.

-Le modèle en couche n'est pas prévu par la formule de Weizsäcker

Question 10 : Pourquoi dans le calcul sur ..., on dérive par rapport à A constant ?

Dans toutes désintégrations, il y a conservation de **la charge, le nombre de masse A, la quantité de mouvement, du moment cinétique et bien sur de l'énergie de masse (rien ne se perd, rien ne se crée....tout se transforme lol)**

Question 11 : Peut-on expliquer l'existence de la barrière de fission dans la courbe montrant le processus de fission ?

Pour fissionner il faut arriver à déformer le noyau → donc vaincre la tension superficielle cohésive. L'énergie qui permet d'aider à la déformation du noyau est l'énergie de répulsion coulombienne. Il y a donc une compétition entre ses deux formes d'énergie : la barrière de fission résulte de cette compétition **énergie de déformation VS répulsion coulombienne**

Question 12 : Ce n'était pas clair, pourquoi les neutrons lents aident à faire fissionner un noyau ?

En fait, dans les « gros » noyaux avec Z grands, le terme de répulsion coulombienne est assez grand pour vaincre avec un apport très faible d'énergie extérieur la tension de surface cohésive. Ainsi, un neutron avec une certaine énergie cinétique permet d'engendrer la déformation et la fission du noyau (pourvu que son  $E_c \gg$  barrière de fission). Le fait qu'il soit lent, augmente les chances d'être capturé par le noyau père car il reste plus longtemps au proche contact de celui-ci.

Question 13 : Tu as dit qu'il y avait qu'une dizaine de noyaux qui fissionnent spontanément ... et pas d'autres, comment on sait ça ?

Pour qu'un noyau soit dit **fissile**, il faut que le terme d'énergie répulsion Coulombienne  $\gg$  terme tension de surface cohésive afin que le noyau se déforme. Cela donne :  **$Z^2/A =$  paramètre de fissibilité. De plus, il faut savoir que la fission spontanée utilise l'effet tunnel pour passer la barrière de fission. Pas besoin d'un neutron lent qui apporte l'énergie nécessaire cette fois-ci**

$$a \frac{Z^2}{A^{1/3}} > b A^{2/3}, \text{ soit } \frac{Z^2}{A} \gtrsim 30$$

Question 13 bis : Combien fissionnent non spontanément avec neutrons lents ?

Il n'y a que 7 noyaux qui fissionnent par absorption d'un neutron lent. Ces noyaux ont tous en commun d'avoir un nombre de neutrons impairs. Ainsi grâce à la capture du neutron, leur nombre de neutrons devient pair, et il gagne en stabilité car leur énergie de liaison augmente.

Une caractéristique commune à ces 7 noyaux est leur nombre impair de neutrons. En effet, un noyau ayant  $N$  impair et capturant un neutron, libère l'énergie d'appariement gagnée par la formation d'une paire supplémentaire de neutrons, ce qui permet de passer au-dessus de la barrière de fission. Ainsi la conservation de l'énergie totale de la réaction  $n + (A-1) \rightarrow A^*$  donne :

$$m_n c^2 + M(A-1)c^2 = M(A)c^2 + E^* \quad (2.2)$$

puisque la réaction se fait quasiment au repos. L'énergie d'excitation  $E^*$  gagnée par le noyau  $A$  est donc

$$E^* = [m_n + M(A-1)]c^2 - M(A)c^2 = S_n, \quad (2.3)$$

d'après la définition (1.3) de l'énergie de séparation. Il existe ainsi quelques noyaux pour lesquels  $S_n$  est supérieur à la barrière de fission. Par exemple  $S_n(^{236}\text{U})=6,5$  MeV. La capture d'un neutron lent par le  $^{235}\text{U}$  donne donc un noyau de  $^{236}\text{U}$  qui fissionne. En revanche la capture d'un neutron lent par le  $^{238}\text{U}$  donne un noyau de  $^{239}\text{U}$  qui ne fissionne pas, car  $S_n(^{239}\text{U})=4,8$  MeV qui est inférieur à la hauteur de la barrière de fission. On voit ici le rôle crucial de l'appariement et la nécessité d'avoir un noyau ayant un nombre impair de neutrons pour permettre la fission suite à la capture d'un neutron lent.

On appellera par convention noyau fissile, les noyaux comme le  $^{235}\text{U}$  qui donnent lieu à une fission suite à une capture d'un neutron thermique.

Question 14 : Quelle est la limite d'enrichissement de l'uranium 235 ?

Dans un réacteur à eau pressurisée, on a quel taux d'enrichissement du coup ?

-L'**enrichissement de l'uranium** est le procédé consistant à augmenter la proportion d'**isotope fissile** dans l'**uranium**.

-En fait, il y a une notion de masse critique qui permet d'enclencher la réaction en chaîne afin de faire plusieurs fissions. La **masse critique** d'un matériau **fissile** est la quantité de ce matériau nécessaire au déclenchement d'une **réaction nucléaire en chaîne** de **fission nucléaire**. Elle dépend des propriétés **nucléaires** du matériau considéré (**section efficace** de fission, et nombre de **neutrons** produits par la fission), mais aussi de ses propriétés physiques (en particulier de sa **densité**), de sa **forme** et de sa **pureté**.

En effet, un matériau fissile est un matériau qui contient des atomes lourds (ex. : **uranium 235**) qui se cassent (fission) sous l'impact d'un neutron. Le résultat de cette fission consiste en des produits résiduels de fission, de l'énergie (principalement thermique) et l'émission de deux à trois nouveaux neutrons, qui eux-mêmes vont casser d'autres noyaux, etc., d'où le terme de « réaction en chaîne ».

Néanmoins, ce processus est théorique. En simplifiant, tous les neutrons ne sont pas absorbés par un noyau fissile : certains sont absorbés par des impuretés, d'autres sortent du matériau sans avoir pu rencontrer un noyau à casser.

Ainsi, en faisant varier la taille, la densité, la pureté du matériau, la forme même, une plus grande proportion de neutrons va être efficace. Pour une quantité minimale de matériau, la réaction en chaîne peut démarrer, c'est ce qu'on appelle la « masse critique ».

**Dans une centrale, justement on contrôle les réactions pour pas qu'il n'y ait de réactions en chaîne qui diverge bien que les échantillons soient de masse > masse critique. Pour cela, on met des modérateur et on enrichit**

**-Le taux d'enrichissement est de quelques pourcent en uranium 235**

Question 15 : Pourquoi l'eau lourde peut être utile dans le cadre du ralentissement des neutrons ?

L'eau lourde sert de modérateur efficace lorsque l'on utilise l'uranium avec un taux naturel en Uranium 235 (qui est le noyau fissile) car l'eau lourde ne capture que très faiblement des neutrons.

### 2.2.3 Modérateur

Dans le cas de neutrons lent, la probabilité de fission domine celle de capture de neutron. Il est ainsi très avantageux de ralentir les neutrons rapides produits par la fission. Cela se passe par collisions élastiques sur un noyau léger, de manière à ralentir efficacement les neutrons. L'eau joue en général ce rôle : elle est donc à la fois caloporteur et modérateur (fonctionnement d'un REP- Réacteur à Eau Pressurisé). Il existe aussi des réacteurs (comme par exemple les RBMK russes) qui ont un modérateur en graphite. Dans le cas de l'eau lourde, sa faible probabilité de capture de neutrons permet d'en utiliser une plus grande quantité que l'eau normale, et ainsi ralentir les neutrons pour atteindre le régime avantageux des neutrons lents même avec de l'uranium naturel.

Question 16 : Pourquoi faut-il que la collision ait lieu avec un noyau pas trop gros pour qu'il y ait un ralentissement efficace ?

-Alors là, il faut se plonger dans l'étude des collisions. On sait que le transfert d'énergie cinétique se fait efficacement si les deux particules ont des masses très proches. Donc comme le neutrons à une masse trèèèèèèèèèèè faible, il ne faut pas des atomes trop lourds/trop gros pour les ralentir.

Question 17 : Peux-tu préciser ce que tu voulais dire quand tu as dit que si la réaction s'emballait, ça faisait exploser la centrale ?

Question 17 bis : L'explosion est de quelle nature ? Et pourquoi ?

(je n'ai plus le contexte donc difficile d'y répondre )

Question 18 : Quand tu as parlé de Fukushima, tu as dit que la réaction était auto-entretenue, cad ?

-En fait, il y a eu défaillance du système de refroidissement, qui n'a pas refroidi le milieu contenant les déchets nucléaires qui continuaient, eux, à produire de l'énergie thermique. Il y a eu surchauffe et le tout a explosé.

### 2.2.5 Déchets

Le principal défaut d'un réacteur à fission est la production de déchets que représente notamment l'ensemble des noyaux fils générés lors de fissions et en bout de chaîne de désintégration  $\beta^-$ . Ils sont donc variés, avec des durées de vie très différentes comme discuté ci-dessous. La conséquence est double : i) même lorsque la réaction en chaîne est coupée, les déchets continuent à produire de l'énergie en raison de leur désintégrations Béta (puisque  $Q_\beta > 0$  par définition d'une radioactivité). Ainsi juste après l'arrêt d'un réacteur, la puissance produite est encore de l'ordre de 6% de la puissance nominale. Il faut donc continuer à absorber cette chaleur dégagée sinon l'enceinte monte en température et provoque des réactions chimiques parasites (oxydation de gaines de combustibles en Zr avec dégagement d'hydrogène), pouvant mener à des explosions (au sens chimique et non nucléaire). ii) Certains déchets résiduels ont une très longue durée de vie  $\beta^-$  (allant jusqu'à 20 millions d'années), il faut donc les stocker et les isoler, ou essayer de les transmuter/recycler. Il n'y a pas à l'heure actuelle de solution bien établie à ce problème.

Les actinides mineurs (Am, Np, Cm, ...) produits par capture de neutron sur l'uranium ou le polonium constituent aussi des déchets. Ils sont émetteurs alpha avec des durées de vie souvent supérieures à 10 000 ans.

**Question 19 : La première réaction que tu as montré dans les étoiles était proton + proton, pourquoi on pourrait pas faire proton + neutron pour devenir du deutérium ?**

Il ne peut pas y avoir de réaction entre p et n car le temps de vie du neutron au sein du Soleil est très faible.

Un premier exemple de fusion avec dégagement d'énergie est la fusion stellaire. Le rayonnement du Soleil s'obtient par une succession de réactions de fusion d'éléments légers, initiée par une réaction de fusion par interaction faible :



En effet, le neutron isolé étant absent du Soleil en raison de son temps de vie ( $\tau_n \simeq 15$  min), la réaction ci-dessus est la seule pouvant conduire à la fusion vers un élément  $A=2$ , car le deuton est le seul noyau  $A=2$  lié. Le Soleil compense la faible production par interaction faible par son grand

**Question 20 : Pourquoi, si le neutron a un temps de vie très faible, il est stable dans un noyau ?**

-Le neutron est très stable dans le noyau car il suit le principe d'exclusion de Pauli (c'est un fermion) Ainsi il remplit des niveaux d'énergie. On pourrait s'attendre à ce que le neutron fasse beaucoup de collisions avec les autres particules et diffuse. Or, beaucoup de niveaux énergétiques sont déjà occupés, ainsi la probabilité qu'il en occupe un autre après collision est faible. Donc les neutrons sont assez stables dans le noyau malgré son temps de vie faible

**Question 21 : Tu as dit que l'uranium était produit dans les étoiles ?**

-Non c'est dans les supernovas

**Question 22 : Du coup comment l'uranium est produit ?**

-Lors d'événements de types supernova/mort d'étoiles, il y a libération d'une énorme quantité de neutrons. Ainsi, certains noyaux peuvent se retrouver avec Z protons et 200 neutrons. Ensuite, il y a des désintégrations radioactives (béta – qui convertissent neutrons en protons) pour former des édifices stables présents dans la vallée de la stabilité. ☺

**Question 23 : Peut-on retrouver la valeur de l'ordre de 1MeV pour la fission de l'uranium sur la courbe d'Aston ?**

Oui il suffit de regarder l'énergie de liaison par nucléons du noyau père (Uranium environ 7,5 MeV) et des noyaux fils (environ 8,5 MeV). Donc 1 MeV de diff, et il y a environ 240 nucléons, donc...une réaction de fissions produit environ (en odg) 240 MeV → **énorme pour un seul évènement atomique...(c'est par exemple 1 million de fois plus que l'énergie libérée par la combustion d'une molécule d'essence.....)**

#### Commentaires donnés par l'enseignant

Utilisation du plan classique structure du noyau, puis fission, puis fusion

La partie sur la structure du noyau a été traitée de manière pertinente

La partie fission a été traitée de manière moins précise

La partie fusion, toujours délicate (cf ci-dessous), n'a pas été traitée de manière très structurée. La fusion stellaire a bien été abordée, mais il faut bien en délimiter le cadre afin de ne pas ouvrir la porte à trop de notions (et de questions) sur l'astrophysique.

Bonnes réponses aux questions en général.

Partie réservée au correcteur

### **Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)**

Cette leçon est délicate car elle fait appel à des notions (selon la dénomination au programme officiel du concours). Il faut donc en permanence se poser la question de la pertinence des explications selon le critère équation vs. notion.

Plan classique mais pertinent : structure du noyau, puis fission, puis fusion

### **Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates**

Il est essentiel de présenter la structure du noyau avec les notions clés d'énergie de liaison et de radioactivité ( $Q$  de réaction  $>0$ ). Le modèle de la goutte liquide est un incontournable qui permet de préparer les explications relatives à la fission et la fusion, entre autres.

La structure en couches du noyau, ainsi que la superfluidité nucléaire, sont deux notions qui peuvent aussi apporter de nombreux éclaircissements à la leçon, mais peuvent donner lieu à des lourdeurs et de la confusion, si elles ne sont pas utilisées de manière précise et synthétique.

Un autre point délicat de cette leçon est de vouloir trop en dire, avec un plan assez chargé lors du triptyque classique : i) structure du noyau ii) fission iii) fusion. En effet, la partie sur la fusion est la plus ardue à expliquer en termes d'équations simples et pertinentes, et il faut redouter une fin de leçon trop rapide et vague. Cela peut être par exemple évité en ne donnant que la fission comme exemple de production d'énergie nucléaire, et en n'évoquant la fusion que dans les ouvertures ou la conclusion.

### **Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)**

### **Bibliographie conseillée**

Fascicule dédié de E. Khan  
Le monde subatomique (L. Valentin) : chap 4  
Physique Nucléaire (Le Sech, Ngo) : chap 10