

# LP00 – Titre

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

**Niveau :**

**Commentaires du jury**

**Bibliographie**

✦ *Le nom du livre, l'auteur*<sup>1</sup>

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

**Prérequis**

➤ prérequis

**Expériences**

☞ Biréfringence du quartz

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Le noyau atomique</b>	<b>3</b>
1.1	Rappel : Description du noyau . . . . .	3
1.2	Energie de liaison . . . . .	4
1.3	Modèle de la goutte liquide . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Fission</b>	<b>8</b>
2.1	Énergie et produits de fission . . . . .	8
2.2	Barrière de fission . . . . .	9
2.3	Application aux réacteurs nucléaires . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Fusion</b>	<b>11</b>
3.1	Principe et énergie . . . . .	11
3.2	Barrière de fusion . . . . .	12
3.3	Critère de Lawson . . . . .	13
3.4	Radioactivité . . . . .	16
	3.4.1 Applications . . . . .	16
	3.4.2 Action des rayonnement sur la matière vivante . . . . .	17
3.5	Fission . . . . .	17
	3.5.1 Applications . . . . .	17

## Jury

L'énergie est un point central et les applications ne doivent pas être traitées trop rapidement en fin de leçon

## Préparation

Ressources : pages wiki, Basdevant, Sech (scholarvox), ma fiche, Essig

Plan : trouver un calcul à faire :  $S(E)$  du Basdevant section efficace pour la fusion, manipuler la goutte liquide, Lawson suffit, terme d'appariement (DL, cf. wiki anglais)

Passage : il faut dégager du temps pour les applications

Questions : int. forte, faible (portée, médiateurs, cf. texte), 🍷 **expérience de Rutherford**, **section efficace**, histoire de la radioactivité, modèle en couches, calcul/origine du terme de coulomb, nucléosynthèse stellaire (Basdevant p.255), pourquoi le 1er réacteur de fermi tournait à 1kW ?

Culture : <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2018/05/refdp2018-60.pdf>

## Introduction

**Réactions nucléaires** En chimie, on étudie 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 !

**Radioactivité** En effet, en 1896, Becquerel découvre la radioactivité : des noyaux instables peuvent se transformer en d'autres noyaux. Au cours du XXe siècle s'est développé la physique nucléaire, qui s'intéresse à l'étude du noyau des atomes et aux réactions nucléaires : radioactivité, fusion et fission.

**Applications** La compréhension de la physique nucléaire se traduit notamment dans ses applications dans le domaine militaire et de l'énergie. **ODG:** 71% de l'énergie française vient du nucléaire, soit 379 TWh.

**Problématique** On va s'intéresser aux processus de fusion et fission. Pourquoi observe-t-on ces deux phénomènes et comment fonctionnent-ils ? Leur compréhension passe par celle du noyau atomique

## 1 Le noyau atomique

### 1.1 Rappel : Description du noyau

**Description du noyau** Le noyau est composé de nucléons : les neutrons et les protons. On le décrit dans son état fondamental avec  $(A, Z)$  où  $A$  est le nombre de masse/de nucléons et  $Z$  le nombre de protons/numéro atomique (sinon il faut préciser le niveau d'excitation).

**Interactions mises en jeu** La répulsion coulombienne entre protons tend à déstabiliser le noyau. Sa cohésion provient en fait de l'interaction nucléaire forte, de courte portée **ODG:**  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ . *mesuré par Rutherford en 1911, cf. wikipedia L'interaction faible responsable de la désintégration  $\beta$  a une portée plus courte de  $10^{-18} \text{ m}$ .*

**Bonus : comment sonder le noyau ?** La diffusion d'électrons de haute énergie permet de mesurer la densité de charge du noyau et les réactions nucléaires utilisant des hadrons comme sonde permettront d'accéder à sa distribution de masse. Pour mesurer la densité de charge d'un noyau par diffusion d'électrons de haute énergie, il faut utiliser un faisceau d'électrons possédant une énergie cinétique importante, de l'ordre de  $100 - 1000 \text{ MeV}$ , pour que la longueur d'onde de de Broglie associée soit plus petite que les dimensions du noyau qui peut être de plusieurs fm. L'électron est relativiste à ces énergies puisque son énergie de masse au repos n'est que de  $0,5 \text{ MeV}$ . Le résultat important des mesures est que la densité de matière est approximativement constante à l'intérieur du noyau et que sa valeur est à peu près la même quel que soit le noyau considéré. Cela vient de la propriété de saturation des forces nucléaires qui sont de courte portée. On observe aussi que la densité de matière diminue progressivement à la surface ce qui fait qu'il est difficile de précisément définir le rayon d'un noyau.

**Bonus : bilan des interactions fondamentales** Les interactions électro-faibles (transmise par les bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z$ ) et **électro-fortes (transmise par les gluons, au nombre de huit)**, électromagnétiques (transmise par les photons) et la gravitation (existe-il un graviton ?). La portée  $d$  d'une interaction fondamentale est  $d = \mathcal{O}(\hbar/m_{\text{boson}} c)$ , ce qui explique que les interactions faibles et fortes sont de faibles portées alors que les interactions électromagnétiques et gravitationnelles sont de portée infinie. Finalement, les trois premières interactions ont été intégrées à un modèle théorique unique, la gravitation étant étudiée séparément. *La théorie qui décrit l'interaction forte est la chromodynamique quantique.*

**Bonus : liberté asymptotique** Contrairement à l'interaction électromagnétique ou à la gravitation, dont l'intensité décroît avec la distance, l'interaction forte croît avec la distance. Plus deux quarks sont proches, plus leur interaction est faible. Dans la limite asymptotique où leur distance de séparation est nulle, cette interaction disparaît. Cette propriété est désignée sous le nom de liberté asymptotique

**Bonus : interaction faible** L'interaction faible n'est ni attractive ni répulsive comme c'est le cas des autres interactions fondamentales. Son effet est de changer des particules en d'autres particules moyennant certaines contraintes. Elle est responsable de l'instabilité de certaines particules et noyaux. Elle est à l'origine de la radioactivité  $\beta$  et gouverne la cinétique de la fusion des noyaux d'hydrogène dans le Soleil qui nous fournit l'essentiel de l'énergie que nous utilisons sur Terre.

L'interaction faible agit sur toutes les particules (quarks et leptons), dont les neutrinos. Ces derniers sont seulement sensibles à cette interaction ce qui explique la difficulté de les détecter. La portée de l'interaction faible est très courte, de l'ordre de  $10^{-18} \text{ m} = 10^{-3} \text{ fm}$ . L'interaction faible viole la symétrie  $\mathbb{P}$ , la symétrie  $\mathbb{C}$  et le produit  $\mathbb{CP}$ .

**Bonus : bosons vecteurs** En physique quantique, l'interaction se fait par échange de particules. Ces particules, qui sont les vecteurs de l'interaction, sont en nombre limité. Ce sont (i) le photon virtuel pour l'interaction électromagnétique (ii) les bosons intermédiaires  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  pour l'interaction faible (iii) les gluons, au nombre de 8, pour l'interaction forte. / On parle de boson vecteur car le spin des bosons du modèle standard est  $s = 1$ . Il y a donc trois composantes ( $\pm 1, 0$ ) pour la projection  $s_z$  tout comme un vecteur. Une particule de spin zéro est appelé particule scalaire car il n'y a qu'une composante, comme pour un scalaire.

**Bonus : masse du proton/neutron, argument anthropique** Le neutron a une masse légèrement supérieure au proton, ce qui explique qu'il se désintègre en proton par canal  $\beta^-$ . *The only reason that any neutrons still exist is because, within a few minutes after the hot big bang that made the universe, some neutrons stuck themselves to protons. The strong neutron-proton binding force changes the energy balance – not by much, but enough to stabilise the neutrons.* Had the Great Designer done it the other way round, with protons about 0.1% heavier than neutrons, disaster would ensue. Under these circumstances, isolated protons would turn into neutrons rather than the other way around. Some protons would be saved by attaching to neutrons. But hydrogen, the simplest chemical element, does not contain a stabilising neutron; hydrogen atoms consist of just a proton and an electron. In this backward universe, hydrogen could not exist. Nor could there be any stable long-lived stars, which use hydrogen as nuclear fuel. Heavier elements such as carbon and oxygen, made in large stars, might never form either. Without stable protons there could be no water and probably no biology. The universe would be very different. Nucleons are made of quarks; protons (uud) and neutrons (udd). The key point is that the majority of the nucleon mass comes from quark interactions and the current ability to calculate this (via QCD) is currently beyond our theoretical abilities.

**Bonus : hadrons : baryons et mésons** Les hadrons sont constitués de quarks. Les baryons contiennent trois quarks et les mésons un quark et un antiquark. La structure du proton est (uud) et celle du neutron (udd). Compte tenu des propriétés des quarks, les baryons sont des fermions car ils ont un spin demi entier. Les mésons sont des bosons car leur spin est entier ou nul. Les hadrons et les mésons interagissent par les forces nucléaires mais celles-ci sont compliquées car elles résultent de l'interaction des quarks et des gluons et l'on ne sait pas, dans la pratique, déduire de la chromodynamique quantique l'interaction nucléaire entre les nucléons dans un noyau.

**Bonus : expérience de Wu** Les interactions forte et électromagnétique conservent la parité mais pas l'interaction faible. D'abord suggéré par Lee et Yang, ceci a été montré expérimentalement par l'expérience de Wu en 1957 lors de l'étude de la radioactivité  $\beta^-$  du  $^{60}\text{Co}$  dans un champ magnétique : on constate que l'émission des électrons est plus probable dans la direction opposée au champ magnétique. Les expériences qui ne conservent pas la parité permettent de définir de manière absolue la droite et la gauche.

**Bonus : symétrie CPT** La symétrie CPT est une invariance des lois physiques par transformation, dans n'importe quel ordre, de la conjugaison de charge, de la parité et du renversement du temps. Une violation de CPT aurait comme conséquence une violation de l'invariance de Lorentz, qui est la base de la relativité. Pour cette raison, l'invariance CPT est appelée théorème CPT. L'invariance CPT signifie que si certaines lois de la physique ne sont pas invariantes pour l'une des trois transformations, elles ne le sont pas pour au moins une des deux transformations restantes. Toutes les interactions, sauf l'interaction faible, sont invariantes dans chacune de ces trois transformations. Le théorème CPT prédit que les particules et les antiparticules ont la même masse, la même durée de vie si elles sont instables mais une charge opposée, un moment magnétique opposé et, dans le cas des hadrons, une saveur opposée.

**Ordre de grandeur, comparaison avec l'atome** On donne des ordres de grandeur pour mettre en perspective :

Edifice	Noyau	Atome
Stabilité	Interaction forte	Interaction électromagnétique
Taille	$10^{-15}\text{m}$	$10^{-10}\text{m}$
Echelle d'énergie	MeV	10 eV

Pourquoi les énergies du noyaux sont beaucoup plus grandes ? C'est le confinement sur des longueurs plus courtes. Le rapport des tailles est  $10^{-5}$ , le rapport des énergies est  $10^5$ . Le principe de Heisenberg donne  $\Delta p \sim \hbar/\Delta x$ .

## 1.2 Energie de liaison

**Définition : énergie de liaison** Tout comme une molécule possède une énergie de liaison qui quantifie sa stabilité, on peut quantifier la stabilité d'un noyau avec l'énergie de liaison. [La définition rigoureuse est sur fiche.](#)

**Bilan de masse** Tous les composés sont au repos et infiniment éloignés : l'énergie de chacun correspond à son énergie de masse  $E = mc^2$

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

**Ordre de grandeur** On donne un tableau En général, cette énergie est  $10^6$  fois supérieure à l'énergie des électrons atomiques, d'où l'intérêt énergétique des réactions nucléaires. **ODG:** 200 MeV par réaction. L'équivalent énergétique de 1 tonne de pétrole est 2g d'uranium, soit 300 kWh. (facteur  $10^6$  encore)

**Courbe d'Aston** L'énergie de liaison  $B$  augmente avec le nombre de nucléons  $A$  : il est donc difficile de comparer la stabilité de deux noyaux distincts. On utilise donc l'énergie de liaison moyenne par nucléons  $E_l(A, Z)/A$  **ODG:** 8 MeV/nucléon. On trace  $E_l(A, Z)/A$  en fonction de  $A$ , en choisissant pour  $A$  le  $Z$  le plus lié, c'est la courbe d'Aston.

**Interprétation : saturation** On pourrait s'attendre à ce que l'énergie d'interaction croît comme le nombre de paires  $A(A-1)/2$ . Mais en fait on voit une saturation : cela est dû à la courte portée de l'interaction forte. Un nucléon interagit avec un nombre limité de voisins  $z$ , d'où  $E_l(A, Z)$  se rapproche plus d'une évolution linéaire en  $A$ . Elle est maximum au fer, ce qui indique sa grande stabilité. *En fait, il est maximum au nickel 62, mais c'est un isotope moins courant.*

**Fusion et fission** De plus, on peut interpréter la possibilité de fusion et fission. A gauche du fer, il est énergétiquement favorable de fusionner les noyaux légers. A droite du fer, il est énergétiquement favorable de casser les noyaux lourds.

**Bonus : mesure des masses** On mesure des masses atomiques, il faut retrancher la masse des électrons et le cortège électronique.

↓ On veut expliquer la forme de la courbe d'Aston.

### 1.3 Modèle de la goutte liquide

↗ wikipedia anglais, polyessig

**Présentation, historique** Le modèle de la goutte liquide a été proposé par Bohr en 1935 puis amélioré par Bethe et Weizsäcker qui ont ajouté deux termes. Ce modèle s'inspire de celui d'une goutte liquide, c'est un modèle semi-empirique.

#### Hypothèses

- Le noyau est une goutte liquide de matière nucléaire, sphérique et incompressible,
- interaction forte de courte portée et indépendante de la nature du nucléon,
- la densité volumique de charge et de nucléons est homogène.

Ce modèle vise à modéliser la masse d'un noyau en fonction du nombre de nucléons. L'analogie avec la goutte d'eau provient de la ressemblance entre l'interaction forte et l'interaction de Van der Waals à l'origine de la cohésion de la goutte. Cependant pour le noyau, il existe une force répulsive à longue portée : l'interaction électromagnétique, ici l'interaction électrostatique. Ce modèle conduit à la formule semi-empirique de Bethe-Weisacker pour l'énergie de liaison on pourrait discuter des interaction 1 à 1 avec le dessin de wikipedia et écrire les termes au fur et à mesure :

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

Les coefficients  $a_V$ ,  $a_S$ ,  $a_C$  et  $a_A$  sont empiriques (*en fait on peut estimer  $a_V$ ,  $a_S$ ,  $a_A$  avec un modèle de gaz de Fermi*). Mais les dépendance en  $A$  et  $Z$  de chaque terme a une interprétation physique simple, en ayant à l'esprit que  $R \sim A^{1/3}$  pour une goutte homogène.

- $a_V A$  est le **terme de volume** (car  $A \propto V$ ). Il représente la cohésion de volume de l'interaction nucléaire forte (qui agit indifféremment sur les neutrons et les protons, d'où son indépendance vis-à-vis de  $Z$ ). Il est de l'ordre de grandeur de l'énergie de liaison d'un nucléon entouré par un nombre constant de voisins (40 MeV, en fait légèrement plus petit, cf. wikipedia). *Le fait qu'il soit proportionnel au volume provient de la saturation de l'interaction forte, tout comme les interactions de Van der Waals. Pour une distribution électrostatique, l'énergie n'est pas proportionnelle au volume !*
- $-a_S A^{2/3}$  est le **terme de surface** (car  $A^{2/3} \propto S$ ). Il provient aussi de l'interaction nucléaire forte (donc même remarque quant à sa dépendance en  $A$  uniquement), et agit comme une correction du terme précédent (les nucléons à la surface du noyau ont moins de voisins que ceux du centre : le terme de volume surestime donc l'énergie de liaison globale. Le terme de surface apporte cette correction qui est négative/déstabilisante). Il est analogue à une tension de surface et tend à minimiser la surface du noyau.

- $-a_C Z(Z-1)/A^{1/3}$  est le **terme de Coulomb**, et représente la répulsion électrostatique entre protons. L'énergie d'une distribution de charge totale  $Ze$  répartie sphériquement est proportionnelle à  $Z^2/R$ , d'où la dépendance. On utilise plutôt  $Z(Z-1)$  car la répulsion électrostatique n'existe que pour plus d'un proton. *Si on faisait le calcul pour  $Z$  charges discrètes équidistantes en moyenne, on trouverait un facteur de  $Z(Z-1)$ .* Ce terme favorise un excès de neutron par rapport aux protons. *One can also understand the asymmetry term intuitively, as follows. It should be dependent on the absolute difference  $|N - Z|$ , and the form  $(A - 2Z)^2$  is simple and differentiable, which is important for certain applications of the formula. In addition, small differences between  $Z$  and  $N$  do not have a high energy cost. The  $A$  in the denominator reflects the fact that a given difference  $|N - Z|$  is less significant for larger values of  $A$ .* Sinon, le calcul détaillé est sur la page wiki anglaise. Le point de départ est  $E_k = \frac{3}{5}(N_p \varepsilon_{Fp} + N_n \varepsilon_{Fn})$  et  $E_k = C(N_p^{5/3} + N_n^{5/3})$
- $-a_A(A - 2Z)^2/A$  est le **terme d'asymétrie**. Il traduit le fait qu'un noyau est stabilisé lorsque  $A/2 \sim Z$ . Ce terme n'a pas d'interprétation classique *i.e.* pas d'analogie chez la goutte. Cela provient du principe d'exclusion de Pauli. Schématiquement, le principe de Pauli dit que deux fermions ne peuvent pas être dans le même état. Mais les neutrons et les protons ne sont pas les mêmes particules, donc peuvent occuper simultanément des énergies basses, tandis que faire un noyau d'un seul type de nucléons uniquement force à les mettre dans des niveaux de hautes énergies.
- $\delta(A, Z)$  est le **terme d'appariement** et n'a pas non plus d'analogie classique. Il représente les effets d'interaction d'échange/couplage de spin : l'énergie du noyau est plus faible lorsque les nucléons sont appariés par couples de spin total nul, ce qui n'est possible que lorsque  $A - Z$  et  $Z$  sont pairs. (cf wikipedia). Les conséquences sont (i) parmi les 161 noyaux de  $A$  pair stables, seuls 5 sont impair-impair. (ii) les noyaux de  $A$  impair n'ont qu'un seul isobare stable (ii) pour  $A$  pair, il existe plusieurs isobares stables en général, de  $Z$  et  $N$  pairs. *Two protons with the same quantum numbers (other than spin) will have completely overlapping wavefunctions and will thus have greater strong interaction between them and stronger binding energy. This makes it energetically favourable (i.e. having lower energy) for protons to form pairs of opposite spin. The same is true for neutrons. C'est le contraire pour les électrons d'un atome : leur interaction est répulsive et le principe de Pauli favorise l'alignement des spins.*

**Valeur des coefficients** Cette formule est semi-empirique, et les valeurs des coefficients proviennent d'ajustements à des données expérimentales. **On donne les valeurs, l'échelle d'énergie est le MeV, comme attendu.** On peut recommander les signes des coefficients selon leur effet stabilisant/déstabilisant. *Un modèle théorique de gaz de Fermions permet de calculer  $a_V$ ,  $a_S$ ,  $a_A$ .*

**Succès du modèle** Bien que le modèle soit semi-empirique avec beaucoup de coefficients il permet de reproduire la courbe d'Aston. Les écarts par rapport aux valeurs expérimentales ne sont appréciables que pour les noyaux très légers qui doivent être traités cas par cas (faible statistique de nucléons). Partout ailleurs les fluctuations n'excèdent pas le pour cent. Néanmoins en dilatant ainsi l'échelle de  $B/A$  (cf. figure Valentin), on observe la présence d'effets faibles mais systématiques. **On peut commenter les nombres magiques ici ou plus tard**

**Contribution de Bethe et Weizsäcker** La contribution de Bethe et Weizsäcker sont les deux derniers termes, indispensable pour retrouver les propriétés discutées.

**Contribution relative** **On montre le graphe p68 Basevant** Le terme de surface domine à petit rayon, comme pour une goutte : les effets capillaires se ressentent aux petites échelles *i.e.* rapport surface/volume grand. On voit que pour les noyaux lourds, le terme Coulombien devient de plus en plus grand, car il ne subit pas d'effet de saturation contrairement à l'interaction nucléaire : sa portée est plus grande.

**Maximum au fer** La maximum correspond à la compétition entre répulsion coulombienne (domine à grand  $A$ ) et terme de surface (domine à petit  $A$ ). Le reste des termes est constant (volume) ou négligeable.

### Limites

- Cette formule est avant tout phénoménologique. On doit rajouter deux termes quantiques sans justification fondamentale et quantitative.
- Cette formule utilise 5 paramètres libres.
- N'explique pas les nombres magiques. Certains noyaux sont exceptionnellement liés par rapport à leurs isotopes/isobares voisins. Cela correspond à un phénomène de couches complètes, semblable à celui des gaz rares en physique atomique.

**Application : stabilité et radioactivité  $\beta$**  On montre le graphe de la vallée de la stabilité. Ici, on regarde la stabilité par rapport à la radioactivité  $\beta$ , donc cela ne rend pas dans la cadre d'un titre "Fusion, fission". On examine les noyaux stables à la désintégration  $\beta$ , qui s'effectue à  $A$  constant. Les noyaux stables sont définis comme étant des noyaux qui maximisent l'énergie de liaison  $B_A(Z)$  à  $A$  fixé. Pour un nombre de masse donné  $A$ , on s'aperçoit que la formule de Bethe-Weizsäcker fournit une équation quadratique en fonction de la charge  $Z$ . On a ainsi

$$B_A(Z) = \left(-a_c A^{-\frac{1}{3}} - 4a_a A^{-1}\right) Z^2 + \left(a_c A^{-\frac{1}{3}} + 4a_a\right) Z + (a_v - a_a) A - a_s A^{\frac{2}{3}} \pm a_p A^{-\frac{1}{2}}$$

Pour  $A$  impair, le terme d'appariement est nul, il n'y a qu'une seule parabole. Pour  $A$  pair, le terme d'appariement peut prendre deux valeurs selon la parité de  $Z$ , donc il y a deux paraboles. Quand une désintégration  $\beta$  s'effectue, la parité de  $Z$  change donc le noyau passe d'une parabole à l'autre. On voit qu'il y a deux canaux indépendants de désintégration  $\beta$ , donc deux noyaux stables pour  $A$  pair. En cherchant les valeurs de  $Z$  entières qui annulent la dérivée  $B_A(Z)$  par rapport à  $Z$ , on peut obtenir une équation donnant les noyaux de la vallée de stabilité

$$\frac{\partial B_A(Z)}{\partial Z} = 0 \rightarrow Z = \frac{a_c A^{-\frac{1}{3}} + 4a_a}{2 \left(a_c A^{-\frac{1}{3}} + 4a_a A^{-1}\right)} \approx \frac{1}{2} \frac{A}{1 + A^{2/3} \frac{a_c}{4a_a}}$$

La valeur du rapport des coefficients  $\frac{a_c}{a_a} = \frac{0,7}{23,6}$  Le terme  $\frac{a_c}{4a_a} A^{-1/3}$  est petit devant 1. Dans la réalité, il faut, en outre, tenir compte de la différence de masse neutron-proton pour s'assurer de la stabilité par rapport à la désintégration bêta. Dans le cas des noyaux de  $A$  pair, il y a deux paraboles décalées de  $2\delta$ . La situation est alors plus compliquée. La valeur  $Z_{\min}$  trouvée représente la moyenne de deux noyaux stables proches, voire trois dans certains cas.

**Vallée de la stabilité** On considère qu'un isotope est stable s'il n'a pas de radioactivité détectable. Si on les répertorie dans un graphe  $(N, Z)$ , on constate qu'ils sont concentrés autour de  $N = Z$ , à cause du terme d'appariement. Pour les noyaux plus lourds, la répulsion coulombienne favorise  $N > Z$ . En dehors de la vallée de la stabilité, les noyaux instables sont sujets à la désintégration  $\beta$  ou  $\alpha$  ou fission (gros noyaux). Les noyaux lourds (uranium et au-delà, pour lesquels  $N$  et  $Z$  sont grands donc  $A$  est grand) se désintègrent généralement suivant une radioactivité  $\alpha$ , qui leur fait perdre deux neutrons et deux protons, et les rapproche de l'origine. Les noyaux qui présentent un excès de neutrons par rapport aux noyaux stables de même nombre de masse  $A$  sont situés au-dessus de la courbe. Ils sont l'objet d'une radioactivité  $\beta^-$  : un neutron est converti en proton, expulsant du noyau un électron (et un antineutrino). Le nombre total de nucléons reste inchangé, mais  $Z$  augmente d'une unité et  $N$  diminue d'une unité. Le point représentatif du nucléide se déplace d'une case en diagonale vers la vallée. Les noyaux qui présentent un excès de protons par rapport aux noyaux stables de même nombre de masse  $A$  sont situés au-dessous de la courbe. Ils sont généralement l'objet d'une radioactivité  $\beta^+$  : un proton est converti en neutron, émettant un positron (et un neutrino). Le nombre total de nucléons reste inchangé, mais  $Z$  diminue et  $N$  augmente. Le point représentatif du nucléide se déplace d'une case en diagonale (vers le haut et la gauche). Pour des déséquilibres plus importants, d'autres formes de radioactivité peuvent apparaître : les atomes fortement déficitaires en neutrons peuvent expulser un proton, et inversement, les atomes fortement déficitaires en protons peuvent émettre un neutron.

**Bonus : familles radioactives** La radioactivité  $\beta$  ne changeant pas  $A$  et la radioactivité  $\alpha$  diminuant  $A$  de 4 unités, lors d'une désintégration en chaîne tous les noyaux auront la même valeur de  $A$  modulo 4. De ce fait il existe 4 familles :  $A = 4k$ ,  $A = 4k + 1$ ,  $A = 4k + 2$  et  $A = 4k + 3$  Seulement 1 représentant pour chacune de ces familles à une durée de demi vie suffisamment longue pour être présent naturellement sur Terre. Ils sont les départs des chaînes de désintégration :  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{237}\text{Np}$ . Trois des chaînes de désintégration finissent sur le plomb  $\text{Pb}$  qui est doublement magique et la dernière fini sur le bismuth  $\text{Bi}$ , voisin du plomb, qui est lui aussi magique.

**Bonus : synthèse des éléments** Jusqu'au fer, les éléments légers sont nucléosynthétisés par fusion dans les étoiles sous l'effet du confinement gravitationnel. Les éléments lourds sont formés dans les supernovae.

**Bonus : étoile à neutrons** On peut modéliser une étoile à neutrons avec une goutte liquide géante en ajoutant un potentiel gravitationnel.

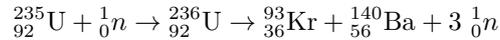
**Bonus : modèle de la gouttelette liquide** Ce modèle a été proposé par William D. Myers et Wladyslaw J. Swiatecki dans les années 1970. Il ajoute deux paramètres supplémentaires au modèle de la goutte liquide, à savoir la compressibilité de la matière nucléaire et l'asymétrie locale proton-neutron.

Si les noyaux en dehors de la vallée de stabilité sont radioactifs, ils peuvent aussi entrer en jeu dans des réactions nucléaires, dont la fission et la fusion. On va commencer par présenter la fission



## 2 Fission

**Définition : fission nucléaire** La fission consiste en la transformation d'un noyau lourd, appelé noyau père en deux noyaux plus légers, les noyaux fils *éventuellement d'autres produits*. **On donne un exemple**



. La fission est induite par capture de neutron.

**Noyaux lourds** Cette réaction permet à un noyau lourd de donner naissance à deux noyaux plus stables. La fission d'un noyau n'est donc envisageable que pour les noyaux lourds, i.e. ceux situés à droite du Fer dans le diagramme d'Aston. **ODG:** La fission existe pour  $A > 100$  et domine pour  $A > 270$ . C'est  $E_{Coulomb}$  qui devient trop grand. **On peut remonter la courbe d'Aston.**

### 2.1 Énergie et produits de fission

**Exemple fission induite de l'uranium par capture de neutron** On va raisonner sur un exemple : fission induite de l'uranium par capture de neutron  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{36}^{93}\text{Kr} + {}_{56}^{140}\text{Ba} + 3 {}_0^1n$ . En absorbant un neutron, un noyau d'atome  ${}^{235}\text{U}$  se transforme ainsi en  ${}^{236}\text{U}$ , un isotope de l'uranium, dans un état excité de 6,2 MeV. Dans le cas de la fission induite, la durée de vie moyenne du noyau composé est de l'ordre de  $10^{-14}\text{s}$ . *Dans 16 % des cas l'énergie est dissipée par rayonnement électromagnétique et le noyau d' ${}^{236}\text{U}$  reste intact. Dans 84 % des cas, cette énergie suffit pour que le noyau puisse franchir la barrière de fission, de 5,7 MeV et se fragmenter en deux autres noyaux comme le krypton 93 ( ${}^{93}\text{Kr}$ ) et le baryum 140 ( ${}^{140}\text{Ba}$ )* **ODG:** 200 MeV par réaction. La fission de la totalité des atomes d'uranium  ${}^{235}\text{U}$  fissiles contenus dans une tonne d'uranium naturel, qui contient en masse 0,7202 % d' ${}^{235}\text{U}$ , donne  $10^{14}$  joules (= 570 600 GJ (gigajoules)) soit plus de 10 000 fois plus d'énergie que la combustion d'une tonne d'équivalent pétrole qui dissipe 41,86 GJ).

**Exemple : possibilité de fission** La fission est possible si la variation de masse entre deux noyaux  $Z/2A/2Y$  issus du noyau  $ZAX$  est positive ou nulle. On peut estimer ce critère d'après le modèle de la goutte liquide. **On écrit le principe de calcul avec l'expression de  $Q$ .**

$$Q_{\text{Fission}} = 2B\left(\frac{A}{2}, Z_1\right) - B(A, Z)$$

On utilise la courbe d'Aston pour calculer les valeurs : on prendra  $A = 240$

$$\frac{B}{A(240)} = 7,6\text{MeV} \quad \frac{B}{A(120)} = 8,5\text{MeV} \quad \text{On trouve } Q = 216\text{MeV}$$

En réalité, il faut prendre en compte le nombre de neutrons émis (2,5 en moyenne) avec une énergie de 8,5 MeV. On trouve  $Q = 200\text{MeV}$  *De plus la fission est asymétrique !*

**Fission asymétrique** En fait, la fission ne produit pas de produit unique mais une distribution statistique à deux pics. Statistiquement, les fragments ont des masses différentes, c'est la fission asymétrique. **On montre un graphe exemple pour l'uranium 235.** La fission asymétrique n'est pas expliquée par le modèle de la goutte liquide. Cette distribution asymétrique est due aux nombres magiques évoqués précédemment. Les fragments tendent à remplir leurs couches (modèle quantique du noyaux) i.e. se rapprocher des nombres magiques afin d'être plus stables.

**Energie utile** 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. L'énergie cinétique des fragments et des particules émises à la suite d'une fission finit par se transformer en énergie thermique, par l'effet des collisions et des interactions avec les atomes de la matière traversée, sauf pour ce qui concerne les neutrinos, inévitablement émis dans les désintégrations  $\beta$ , et qui s'échappent toujours du milieu (ils peuvent traverser la Terre sans interagir). On récupère l'énergie thermique : c'est le principe des centrales nucléaires qu'on va développer par la suite. **On montre le tableau wiki.** Lors de la fission provoquée d'un seul noyau  ${}^{235}\text{U}$ , on peut s'attendre à récupérer une énergie  $\Delta E$  voisine de 200MeV. L'énergie totale libérée lors de la fission ressort égale à 202,8 MeV dont 9,6 MeV n'est pas récupérable puisque communiquée aux neutrinos émis. En pratique l'énergie récupérable en réacteur de puissance, compte tenu : de l'énergie communiquée aux neutrinos, de la puissance résiduelle restante dans les éléments combustibles déchargés du cœur, de l'énergie des gammas et neutrons dissipée dans les structures entourant le réacteur, correspond sensiblement à 193,0 MeV par noyau d'uranium  ${}^{235}\text{U}$  fissionné. *Dans le cas d'une explosion/bombe nucléaire seules les énergies libérées à court terme sont à*

considérer pour évaluer la puissance.

**Application numérique** L'uranium naturel contient en masse 0,7202 % d'uranium fissile  $^{235}\text{U}$ . Mais les réacteurs peuvent fissionner l'intégralité de l'uranium naturel extrait du sous-sol. Dans cette hypothèse, 2g d'uranium équivaut 1 tonne de pétrole soit 42 GJ soit 11 MWh.

**Bonus : réacteurs à neutrons rapides** Une première solution est de les ralentir (« thermaliser ») par un modérateur (eau, graphite ou eau lourde) qui leur fait perdre leur énergie par chocs successifs. Ils sont alors appelés neutrons thermiques, « permettant une réaction en chaîne efficace et donc un meilleur rendement du réacteur pour l'uranium 235 dont la probabilité de fission par neutrons thermiques est élevée »<sup>2</sup>. C'est cette solution qui est utilisée dans les réacteurs actuels (types REP, REB...).

L'autre solution est de choisir délibérément de ne pas incorporer de modérateur. On a alors des neutrons rapides, dont l'énergie cinétique est élevée. Ces neutrons rapides ont l'avantage de faire fissionner tous les noyaux lourds et non les seuls matériaux fissiles. L'utilisation de neutrons rapides limite également les captures stériles (c'est-à-dire les captures ne donnant pas lieu à une nouvelle fission), ce qui tend à améliorer l'efficacité du réacteur.

En revanche, le taux de fuite des neutrons hors du cœur (neutrons qui sont donc perdus pour le réacteur) est plus élevé, et la probabilité de fission par neutrons rapides plus faible que dans un réacteur à neutrons thermiques. Il est donc nécessaire d'avoir un cœur plus enrichi en matériau fissile.

Par ailleurs, des matériaux fertiles peuvent être disposés en périphérie du cœur (on parle de couverture fertile) de manière à utiliser les neutrons de fuite. C'est le principe de la surgénération : récupérer les neutrons sortants pour transmuter un matériau a priori inutilisable (fertile mais non fissile) en matériau fissile. Les RNR correspondent à trois des six types de réacteurs nucléaires de génération IV.

↓ Mécanisme de la fission ?

## 2.2 Barrière de fission

**Déformation** Reconsidérons le modèle de la goutte liquide pour le noyau de  $^{236}\text{U}$ . Au cours de la réaction, la goutte se déforme vers une ellipsoïde. Cette déformation augmente l'énergie de tension superficielle (déstabilisant) et diminue l'énergie de répulsion coulombienne puisque les fragments s'éloignent (stabilisant), qui domine. Pour de faibles déformations et pour les gros noyaux, la déformation stabilise le noyau.

**Barrière de fission** Ainsi, quand le rayon de la goutte varie entre  $R_0$  le rayon initial de la goutte et l'infini (fragments séparés), l'énergie potentielle du système passe par un maximum. Comme l'énergie d'activation sur une coordonnée réactionnelle en chimie, il existe une barrière de potentiel appelée barrière de fission. On appelle énergie d'activation la barrière d'énergie associée. **ODG:**  $E_A \sim 7\text{MeV}$  contre  $E_A \sim 1\text{eV}$  pour des liaisons chimiques. Selon le mode de franchissement de la barrière d'énergie, on distingue plusieurs fissions : spontanée ou induite par neutron.

**Possibilité de fission avec le modèle de goutte liquide : compétition surface-Coulomb** On compare les termes de surface et de Coulomb

$$\Delta E > 0 \Leftrightarrow \frac{Z^2}{A} > \frac{2a_c}{a_s} = 50 \quad (2)$$

Donc d'après le modèle de la goutte liquide, la fission est possible si la variation de masse entre deux noyaux  $^{A/2}_Z\text{Y}$  issus du noyau  $^A_Z\text{X}$  est positive ou nulle. Cette condition est vraie si  $\frac{Z^2}{A} \geq 18$ , ce qui correspond à la région du zirconium. Au-delà du rapport  $\frac{Z^2}{A} \geq 50$ , le noyau est instable et fissionne spontanément.

**Fission spontanée** : la barrière de potentielle peut être franchie par effet tunnel. Cependant, vu les masses en jeu ( $10^3$  plus qu'un électron, la probabilité de franchissement est très faible. **ODG:**  $\tau < 10^{16}$  années. C'est pourquoi pour l' $^{92}_{235}\text{U}$  la fission spontanée est minoritaire devant la désintégration  $\alpha$ .

**Fission induite par neutron** : le noyau lourd absorbe un neutron dont l'énergie cinétique lui permet de franchir la barrière d'activation.

**Possibilité de réaction en chaîne** Il y a libération de neutrons lors de la réaction de fission. Ces neutrons vont pouvoir entrer en collision avec d'autres noyaux de  $^{92}_{235}\text{U}$  et provoquer une réaction en chaîne.

## 2.3 Application aux réacteurs nucléaires

### Site Thibierge

**Principe** On a vu que les produits de fission avaient une énergie cinétique de 200 MeV. Ils sont freinés le milieu modérateur (eau, eau lourde  $D_2O$ , graphite). La chaleur produite lors de la fission de noyaux fissiles d'uranium 235 ou de plutonium 239 est évacuée par un fluide caloporteur (eau, sodium liquide) et peut alors être utilisée pour transformer de l'eau en vapeur, permettant ainsi d'actionner une turbine pouvant produire directement de l'énergie mécanique puis par l'intermédiaire d'un alternateur, de l'électricité. C'est cette technique qui est à l'œuvre dans les réacteurs nucléaires destinés à produire de l'électricité. **On montre un schéma ODG:** Le rendement est de 33% environ.

**Réacteur nucléaire** La France compte 19 centrales nucléaires en exploitation, dans lesquelles tous les réacteurs (58 au total) sont des réacteurs à eau pressurisée REP. Actuellement, ces installations fournissent près de 80% de l'électricité produite en France. Une centrale nucléaire REP est constituée de deux grandes zones :

- une zone nucléaire (dans le bâtiment réacteur), où ont lieu les réactions nucléaires de fission, qui produisent de l'énergie thermique et chauffent ainsi l'eau sous pression circulant dans le circuit primaire. L'eau pressurisée joue le rôle de fluide caloporteur et de "modérateur". Elle peut atteindre  $300^\circ$ . Cet est donc maintenue à une pression de 150 bar pour rester à l'état liquide. Le transfert d'énergie thermique entre le circuit primaire et le circuit secondaire se fait dans le générateur de vapeur, où la surface d'échange entre les deux fluides peut atteindre près de 5000 m<sup>2</sup> (réseau de tubulures).
- une zone non nucléaire (salle des machines). Dans cette partie, semblable à celle utilisée dans les centrales thermiques classiques, s'écoule de l'eau dans un circuit secondaire. Cette eau est évaporée dans le Générateur de Vapeur (GV) par absorption de la chaleur produite dans la zone nucléaire, puis elle entraîne une turbine (T) couplée à un alternateur produisant de l'électricité, ensuite elle est condensée au contact d'un refroidisseur (rivière, mer ou atmosphère via une tour aéroréfrigérante) et enfin, elle est comprimée avant d'être renvoyée vers le générateur de vapeur

**ODG:** puissance électrique  $P_e = 900$  MW

**Bonus : cycle de Rankine** 🚫 **Il faut avoir des notions sur le cycle de Rankine.** Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique endoréversible qui comprend deux isobares et deux adiabatiques. Le cycle, parcouru dans le sens moteur par l'eau du circuit secondaire, est composé des quatre transformations suivantes :

- 1→2 : Compression adiabatique et réversible (isentropique) dans la pompe d'alimentation, de travail fourni négligeable.
- 2→3 : Vaporisation isobare et irréversible : pendant l'échange avec le fluide caloporteur lui-même chauffé par les réactions du réacteur nucléaire.
- 3→4 : Détente adiabatique réversible (isentropique) dans la turbine : c'est l'étape moteur.
- 4→1 : Liquéfaction isobare et irréversible dans le condenseur, par échange avec le circuit de refroidissement.

**Pourquoi l'uranium 235 ?** C'est le noyau le plus lourd qu'on trouve à l'état naturel. Les neutrons émis lors de la fission sont dits rapides et ont une vitesse de l'ordre de 20 000 km/s. Une fois qu'un neutron thermique est absorbé, l' $^{235}U$  (devenu  $^{236}U^*$ ) fissionne en émettant  $N = 2.4$  neutrons en moyenne. Ces derniers sont ralentis par le milieu (ce qui dégage de la chaleur) puis vont causer de nouvelles fissions : on a initié une réaction en chaîne.

**Uranium enrichi** Dioxyde d'uranium 235. [équation de fission]. Il est réfractaire *i.e.* résiste à la chaleur ( $T_{fus} = 2800^\circ C$ ), stable dans l'eau. Matériau fissile. Enrichi = 3 à 5 % en  $^{235}U$  en fonction des pays. Des noyaux suffisamment instables doivent être utilisés afin de ne pas se désintégrer par émission  $\alpha$  trop rapidement. L'industrie nucléaire utilise de l' $^{235}U$  qui est capable d'absorber les neutrons dits thermiques qui ont une vitesse liée à l'agitation thermique du milieu de l'ordre de 2 km/s. **ODG:** 2 MeV par neutron émis.

**Coefficient de multiplication neutronique** Tous les neutrons émis ne provoquent pas de nouvelles réactions de fission. Certains s'échappent du milieu tandis que d'autres sont captés par d'autres noyaux qui ne fissionnent pas. En conséquence, suivant le nombre de neutrons générant effectivement de nouvelles réactions de fission (les neutrons effectifs), la réaction peut s'emballer, s'arrêter ou être stationnaire. Afin d'y voir plus clair, on introduit le coefficient de multiplication neutronique  $k$  comme le "nombre de neutrons produits par une réaction de fission qui pourront effectivement induire une fission à nouveau".

Trois régimes sont possibles :

- $k > 1$  régime surcritique : le nombre de neutrons croît exponentiellement et la réaction diverge,

- $k < 1$  régime sous-critique : les réactions de fission s'arrêtent instantanément,
- $k = 1$  régime critique : les réacteurs de nos centrales sont maintenus dans ce régime, en ajustant le milieu modérateur (il faut compenser la diminution de la concentration en réactifs aussi).

**Bonus : bilan de neutrons** Lors de la fission, des neutrons rapides sont tout de suite ( $10^{-14}$  s) émis, ils sont dits neutrons instantanés (anciennement nommés neutrons prompts). Puis, après l'émission de ces neutrons instantanés, les produits de fission commencent leur décroissance radioactive. Ces décroissances radioactives vont engendrer la libération de neutrons rapides avec une latence de 13 secondes en moyenne ; ces neutrons libérés juste après des désintégrations  $\beta$  sont appelés neutrons retardés.

**Thermalisation et ralentissement des neutrons** La raison principale pour laquelle on cherche dans un réacteur thermique à ralentir les neutrons issus de fission pour les amener au niveau d'énergie (de vitesse) thermique est liée au fait que la probabilité qu'une rencontre d'un neutron thermalisé avec un atome fissile donne lieu à la fission de l'atome rencontré est sensiblement 250 fois plus élevée que dans le cas où le neutron possède une énergie (une vitesse) élevée voisine de son énergie initiale. *Cela constitue donc un système de rétroaction modératrice : si la réaction s'emballé, le milieu chauffe mais les neutrons sont alors trop rapides pour causer de nouvelles fission : la section efficace diminue avec l'énergie cinétique du neutron incident.*

**Capture de neutron, sécurité** La section efficace diminue fortement avec l'énergie : cela fournit un mécanisme de modération qui empêche la divergence. Il y a aussi des pics de résonance. Si  $k$  franchit une certaine valeur seuil, des barres d'absorbants de neutrons sont introduits dans le milieu pour endiguer la divergence. Les absorbants de neutrons les plus prolifiques sont les isotopes radioactifs d'éléments qui arrivent à se stabiliser en absorbant un neutron. Un exemple est le xénon 135 (demi-vie d'environ 9,1 heures), qui absorbe un neutron pour devenir l'isotope stable au xénon 136. De plus, si la température augmente, l'élargissement Doppler augmente les chances d'atteindre un pic de résonance. En particulier, l'augmentation de la capacité à absorber les neutrons à haute température de l'uranium 238 (et de le faire sans fission) est un mécanisme de rétroaction négative qui contribue à maintenir les réacteurs nucléaires sous contrôle.

**Masse critique** Il ne suffit pas que le facteur de multiplication des neutrons soit plus grand que 1 pour que la réaction en chaîne s'entretienne : d'une part, les neutrons sont instables et peuvent se désintégrer, mais ceci joue peu, car leur temps de vie moyen est de près d'un quart d'heure, mais surtout, ils peuvent sortir du milieu où l'on essaie de faire une réaction en chaîne. Il faut qu'ils aient une collision avant de sortir, sinon ils ne participent plus à la réaction en chaîne. L'épaisseur moyenne du milieu fissile doit donc être assez grande pour assurer une probabilité suffisante pour les neutrons de rencontrer un noyau fissile. Ceci amène à la notion de masse critique de l'élément fissile, qui est une masse en dessous de laquelle on ne peut plus garder suffisamment de neutrons, quelle que soit la forme de la charge fissile, pour maintenir la réaction. Ceci explique pourquoi l'on ne peut pas avoir de mini-réacteurs nucléaires

**Puissance maximale** Limitée par la résistance des matériaux et aux conditions de refroidissement. **ODG: 900 MW**

**Aspects environnementaux** Les centrales sont proches des fleuves et chauffent leur eau, ce qui modifie l'écosystème (la solubilité de O<sub>2</sub> diminue, les plantes respirent moins).

On a vu tout l'intérêt énergétique de la fission mais ces réactions produisent, en fin de chaîne, quantités de produits hautement radioactifs : les déchets radioactifs. 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 Fusion

### 3.1 Principe et énergie

**Fusion** Le principe de la fusion est le pendant de la fission pour les atomes légers. Deux noyaux légers fusionnent pour former un noyau plus lourd et plus stable tout en libérant de l'énergie.

**Exemple**



**Courbe d'Aston** Sur la courbe d'Aston, la fusion est effective pour les noyaux situés à gauche du fer car le noyau formé, se trouvant à leur droite, est plus stable.

**Energie libérée** L'énergie libérée par nucléon est plus importante que pour une réaction de fission. La réaction de l'exemple libère 17.5MeV soit 3.5MeV par nucléons contre seulement 0.8MeV pour une réaction de fission.

**Application à l'énergie, avantages** Ainsi, la fusion est plus efficace en énergie, à masse de réactif fixé. La fusion présente deux intérêts majeurs :

- la disponibilité des réactifs : le deutérium, présent à l'état naturel en quantités importantes dans les océans (1g de deutérium par 300 L d'eau de mer), le tritium (pour la réaction de fusion « deutérium + tritium »), qui peut être produit par bombardement neutronique du lithium 6 selon  $6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + \text{He}$  **ODG:** En effet, le deutérium contenu dans 1 m<sup>3</sup> d'eau peut potentiellement fournir autant d'énergie que la combustion de 668 t de pétrole. Les réserves mondiales en minerai de lithium suffiraient théoriquement à garantir plus d'un million d'années de fonctionnement.
- son caractère essentiellement "propre" : les produits de la fusion eux-mêmes (principalement de l'hélium 4) ne sont pas radioactifs. Les déchets potentiels se limitent, lorsque la réaction utilisée émet des neutrons rapides, aux matériaux environnants, qui peuvent capturer ces neutrons et devenir à leur tour des isotopes radioactifs. *Les neutrons ne sont pas confinés électromagnétiquement car ils ont une charge électrique nulle. Ils sont donc susceptibles d'être capturés par les noyaux d'atomes de la paroi de l'enceinte, qu'ils transmutent parfois en isotopes radioactifs (phénomène d'activation). L'activation peut à son tour s'accompagner de production de noyaux d'hélium, susceptibles de fragiliser les matériaux de structure.*
- pas de masse critique comme en fission

**Non linéarité** La fission est gouvernée par des équations de transport de neutron, qui sont linéaires. On peut donc faire des essais à faible puissance. La fusion est non linéaire, ce qui explique la difficulté.

## 3.2 Barrière de fusion

**Barrière tunnel** Les noyaux sont soumis à la répulsion coulombienne et doivent se rapprocher à moins de 10 fm pour que les forces nucléaires entrent en action. On se trouve encore dans le cas d'un franchissement de barrière de potentiel par effet tunnel. La hauteur de la barrière est  $\Delta E = Z_1 Z_2 / (4\pi\epsilon_0 r)$  avec  $r \sim 10\text{fm}$ . La barrière tunnel est d'autant plus importante pour les noyaux lourds, plus chargés : dont la fusion concerne les noyaux légers. Plus l'énergie des noyaux est élevée, plus la probabilité de tunnel augmente.

**Chauffage**  L'énergie des noyaux provient de l'agitation thermique. Ainsi, pour atteindre des noyaux ayant cette énergie, ie cette vitesse, il faut chauffer. **ODG:** Température autorisant les réactions de fusion. On a  $T \sim E/k_B \sim 10\text{keV}/k_B \sim 115 \times 10^6 \text{ K}$ . À ces températures, la matière est sous la forme de plasma. Le taux de réaction (nombre de réaction par seconde) et donc l'énergie dégagée seront proportionnelles à la densité de  $d$  et de  $t$ , il faut donc confiner ce plasma pour augmenter la densité. **ODG:** barrière tunnel 4 keV (10 keV pour atteindre le critère de Lawson)

**Fusion stellaire** Dans les étoiles, le confinement est fait par la gravitation (qui est gigantesque). Au sein du Soleil, par exemple, la fusion de l'hydrogène, qui aboutit, par étapes, à produire de l'hélium, s'effectue à des températures de l'ordre de quinze millions de kelvins,. Dans les étoiles de taille similaire ou inférieure à celle du Soleil, la chaîne proton-proton prédomine. Dans les étoiles plus lourdes, le cycle carbone-azote-oxygène (CNO) est le plus important. Les deux types de processus sont à l'origine de la création de nouveaux éléments dans le cadre de la nucléosynthèse stellaire. D'autres processus entrent en jeu dans les explosions d'étoiles massives en supernovas, qui mènent à la création d'éléments lourds, dans le cadre de la nucléosynthèse explosive.

Aux températures et densités du cœur des étoiles, le taux de réaction de fusion est peu élevé. **ODG:** au coeur du Soleil,  $T \sim 15 \text{ MK}$  et  $d \sim 160 \text{ g/cm}^3$ , le taux de libération d'énergie est seulement de  $276 \mu\text{W/cm}^3$  - environ le quart du débit de chaleur par unité de volume d'un humain au repos. Il est nécessaire, pour atteindre des taux raisonnables de production d'énergie dans des réacteurs à fusion nucléaire, de travailler à des températures dix à cent fois plus élevées que celles du cœur des étoiles, soit  $T \sim 0,1 - 1\text{ GK}$

**Confinement magnétique** La fusion par confinement magnétique (FCM) est une méthode de confinement utilisée pour porter une quantité de combustible aux conditions de température et de pression désirées pour la fusion nucléaire. Le combustible doit au préalable être converti en plasma, celui-ci se laisse ensuite influencer par les champs magnétiques. Dans ces configurations, les particules composant le plasma suivent une trajectoire dépendant de leurs propriétés magnétohydrodynamiques et des lignes d'un champ magnétique généré par le plasma lui-même ou par des

aimants. Un tokamak présente un champ toroidal et champ poloidal, ce qui une fois sommé donne un champ en hélice. Pour générer le champ poloidal, on considère que le plasma qui tourne dans le tore constitue une "spire" de courant, qui est le secondaire d'un transformateur dont on contrôle le primaire, constitué de bobines au centre du tore, qui crée un champ magnétique vertical oscillant, qui fait varier le flux qui passe à travers le "flux". On peut chauffer

- par chauffage ohmique Le courant très intense qui parcourt le plasma lui confère de la chaleur par effet Joule. Ce type de chauffage permet d'atteindre des températures de 2 à 3keV
- par injection d'un faisceau d'atomes neutres accélérés. Les atomes sont préalablement ionisés pour être accélérés par un champ électrique, puis neutralisés par rattachement de leurs électrons, sinon les ions seraient déviées par le champ de confinement et ne seraient pas en mesure d'accéder au centre du plasma. Enfin, ils sont injectés dans le plasma. Une fois au centre de ce dernier, les atomes neutres s'ionisent à nouveau et, du fait de leur excédent énergie cinétique par rapport à celle du tritium et du deutérium, cèdent une partie de leur énergie au milieu par des collisions. Ces atomes neutres sont eux-mêmes de tritium et de deutérium. Ils assurent donc ainsi également l'approvisionnement en combustible. Cela permet d'atteindre les 10 à 20 keV nécessaires pour la fusion
- Le chauffage par micro-ondes à haute fréquence. La propagation et l'absorption des ondes constituent un domaine en soi de la magnéto-hydrodynamique. Des ondes sont envoyée dans le plasma au moyen d'antennes placées au niveau de la paroi à l'intérieur de la chambre qui le contient. On peut ainsi injecter des puissances de l'ordre de 10 mégawatts, la puissance maximale installée sur le tokamak européen JET (Joint European Torus) est de 40 mégawatts.

**Confinement inertiel par laser** Dans cette voie, l'énergie est apportée par un faisceau de lumière laser ou bien par un faisceau de particules chargées (électrons ou ions) à une bille de combustible de qq mm de diamètre. L'ionisation et le chauffage rapide de la paroi externe de la cible conduit à une expansion du plasma, à une  $c \sim c/10^3$ . Par la 3e loi de Newton, l'expansion du plasma périphérique cause la convergence de la masse de la cible (effet fusée). Cela se traduit par une onde de choc centripète, qui va concentrer le combustible deutérium-tritium au centre de la cible, en divisant son diamètre par 10, donc son volume par  $10^3$ . **ODG:** Puissance laser 1 PétaWatt, la densité atteint  $10^{31}m^{-3}$ , la température  $10^7$  K. Ces conditions conduisent à un nombre très important de réactions de fusion, pendant environ 10 picosecondes. Le cœur brûle pendant un temps de l'ordre de  $10^{-11}$  s, sa cohésion étant maintenue par inertie, puis il explose sous l'effet de l'énergie thermonucléaire libérée. Un problème important, concerne l'uniformité de l'irradiation de la cible pour réaliser une implosion la plus sphérique possible. Plusieurs méthodes sont en compétition.

- L'attaque directe au moyen de plusieurs faisceaux se recouvrant les uns les autres.
- L'attaque indirecte qui consiste à envoyer les faisceaux laser à l'intérieur d'une cavité faite d'un matériau de numéro atomique élevé et à utiliser le rayonnement X thermique résultant de cette interaction. Ce rayonnement X irradie plus uniformément la bille placée au centre de la cavité. Avec de l'or, on a pu atteindre des taux de conversion du rayonnement laser en rayonnement X de 80%
- . Une autre approche consiste à substituer aux faisceaux laser des faisceaux d'électrons ou d'ions de 1MeV. Les dispositifs qui les produisent ont un très bon rendement énergétique. Cependant la focalisation des faisceaux pose des problèmes. La réalisation d'un accélérateur d'ions lourds (par exemple, l'uranium) de 10GeV, délivrant 1MJ en 10 ns est en cours d'étude.

↓ Le confinement coûte de l'énergie. Pour que la fusion soit rentable, il faut que l'énergie libérée par la réaction soit plus grande que celle utilisée pour la maintenir.

### 3.3 Critère de Lawson

↪ Basdevant p.239, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Crit%C3%A8re\\_de\\_Lawson](https://fr.wikipedia.org/wiki/Crit%C3%A8re_de_Lawson)

**Critère de Lawson** Dans une perspective d'exploitation commerciale, pour que la fusion puisse être énergétiquement rentable, il est nécessaire que l'énergie produite soit supérieure à l'énergie consommée pour l'entretien des réactions et par pertes thermiques vers le milieu extérieur. Le critère minimal pour dépasser ce point est appelé critère de Lawson. On définit le temps de confinement  $\tau$  comme la durée pendant laquelle le plasma après sa création conserve sa température  $T$  et sa cohésion (ses propriétés thermonucléaires). **ODG:** Soleil :  $\tau = 10^{17}$  s, ITER :  $\tau = 1$  s. Du point de vue énergétique : pour chauffer le plasma à  $T$  il faut lui fournir l'énergie par unité de volume  $W_{th} = 3nk_B T$  avec  $n$  la densité volumique de noyaux en  $m^{-3}$  (3/2 par ion et électron).

**Bonus : section efficace (différentielle)** Soit  $N$  le nombre de particules de la cible. Le nombre moyen  $dn$  de particules détectées par unité de temps dans l'angle solide  $d\Omega$  est proportionnel à  $N$  à  $d\Omega$  et au flux  $F$  (en nombre de particule par unité de temps et surface). On note  $d\sigma/d\Omega$  le coefficient de proportionnalité

$$dn = NF \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right) d\Omega$$

La quantité  $d\sigma/d\Omega$  a la dimension d'une aire (par stéradian). Elle est appelée section efficace différentielle de diffusion dans la direction  $\Omega$ . Le nombre moyen total  $n$  de particules diffusées par unité de temps dans toutes les directions est

$$n = NF\sigma$$

où  $\sigma$  est la section totale de diffusion

$$\sigma = \int \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right) d\Omega$$

Cette notion intervient dans des expériences de diffusion (quantiques aussi). 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.

**Bonus : résonances dans la sections efficace** On observe des résonances dans la section efficace qui proviennent des endroits où l'énergie des neutrons est égale ou proche à l'énergie qui correspond à un niveau d'excitation du noyau composé formé lors de l'absorption d'un neutron

**Taux de réaction** Le taux de réaction nucléaire par unité de seconde et unité de volume  $\gamma [s^{-1}m^{-3}]$  entre deutérium  $d$  et tritium  $t$  de densité  $n_d$  et  $n_t$  est :

$$\gamma = n_d n_t v \sigma \quad (3)$$

avec  $v$  la vitesse relative entre  $d$  et  $t$  et  $\sigma$  la section efficace de la réaction de fusion. **On fait un petit dessin.** Les fusion à plus de 3 réactifs ont des taux trop faibles pour être exploités. On supposant une répartition  $n_t = n_d = n/2$  dans le plasma on obtient que l'énergie nucléaire volumique  $W_f [J/m^3]$  générée pendant le temps  $\tau$  est

$$W_f = \langle \gamma \rangle \tau Q_f = \frac{n^2}{4} \langle \sigma v \rangle \tau Q_f \quad (4)$$

avec  $Q_f$  l'énergie libéré par une réaction de fusion. La section efficace dépendant de la vitesse  $v$  et la vitesse  $v$  étant distribué selon la statistique de Maxwell-Boltzmann, il est nécessaire de prendre la valeur moyenne de ce produit. L'énergie étant collectée avec une efficacité  $\eta$ , on obtient le critère de Lawson pour lequel un réacteur nucléaire produit plus d'énergie qu'il n'en consomme.

$$W_{th} < \eta W_f \quad (5)$$

**Pic de Gamow : Etude de  $\langle v\sigma(v) \rangle$**  Le produit  $\sigma(v)v$  suit une distribution de Maxwell à la température  $T$

$$\langle v\sigma \rangle \sim \int d^3v e^{-\frac{E}{kT}} v\sigma(v) \sim \int v^2 e^{-\frac{rv}{2k^2}} v\sigma(v) dv \quad (6)$$

Cette moyenne  $\langle v\sigma(v) \rangle$  est appelé taux de reaction par paires. Le produit  $v\sigma$  croit rapidement avec l'énergie (effet tunnel) ; dans la valeur moyenne, il est tempéré par la décroissance de la distribution de Maxwell. Le recouvrement est appelé pic de Gamow **Le graphe est en annexe.** L'étude de  $\langle v\sigma(v) \rangle$  montre que ce terme est maximal pour une température de  $T = 20keV/k_B \sim 250 \cdot 10^6 K$ .

**Critère de Lawson** D'où pour  $\eta = 1$

$$n\tau > 1.5 \times 10^{20} s/m^3 \quad (7)$$

Une proche alternative est de mettre le critère sous la forme  $n\tau > L$  et d'étudier  $L$  en  $s/m^3$  en fonction de la température, à minimiser. La graphe correspondant est sur wikipedia.

**ODG:** Dans le tableau.

- Dans le confinement gravitationnel, le temps de confinement est, on le verra, infini : la réaction nucléaire se poursuit tant qu'il y a du combustible.
- Dans le confinement magnétique, le temps de confinement est de l'ordre de la seconde, la densité de l'ordre de  $10^{20}m^{-3}$  pour le projet international ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) et la température de l'ordre de 10 à 20keV, qui se situerait au seuil de l'ignition.

- Dans le confinement inertiel par laser, le temps de confinement est beaucoup plus court  $\tau \simeq 10^{-11}$  s. En revanche, la densité est beaucoup plus élevée  $\simeq 10^{31} m^{-3}$ . La température est comparable, de l'ordre de 10keV

**Origine des pertes** Les pertes par rayonnement proviennent essentiellement de l'émission de raies des atomes incomplètement ionisés. Pour l'essentiel, ces atomes sont des impuretés d'oxygène, de carbone, de fer, de nickel. Les pertes provoquées par ce type de rayonnement représentent dans les appareils actuels de 10 à 50% du bilan énergétique. On en minimise les effets par un conditionnement préalable des parois de la chambre à vide et par un contrôle de la qualité des plasmas de bord, tous deux destinés à prévenir la production d'impuretés par les parois de la chambre. Le maintien de la concentration des impuretés à un niveau minimal est une condition nécessaire pour un bilan de fusion positif.

Les pertes d'énergie par bremsstrahlung des électrons sur les ions de deutérium et de tritium, constituent une limite supérieure physique pour que le système atteigne l'ignition. Elles requièrent, à densité donnée, une température du plasma suffisante.

**Sécurité** De nombreuses difficultés sont à relever en ce qui concerne la fiabilité et la sécurité pour un fonctionnement sur le long terme. Elles varient selon le type de réacteur. Elles concernent notamment :

- stabilité du plasma *Les mécanismes d'instabilité du plasma lui-même, sont un sujet d'étude complexe mais fondamental. Les instabilités les plus dangereuses sont les instabilités magnétohydrodynamiques, car elles concernent le plasma comme un tout.*
- le confinement magnétique qui doit être constant ;
- la gestion de températures et pression très élevées ;
- la gestion du tritium dans les filières en produisant et consommant ;
- les risques combinés de corrosion et radiolyse pour les solutions fonctionnant à température et/ou pression élevée
- le risque sismique et de tsunami.

**Limites expérimentales** L'objectif ici ne se limite pas à l'obtention des conditions d'ignition du mélange deutérium-tritium (on vise une puissance nucléaire de 1,5GW), il est de maintenir ces conditions en régime d'équilibre stationnaire pendant une durée de 1000 secondes.

## 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 on exploite surtout  $E=mc^2$  non ?. 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 et en datation (carbone 14)

**Ouverture :**

## Compléments/Questions

**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.

### 3.4 Radioactivité

L'ordre de grandeur de temps de vie de désintégration  $\beta$  c'est la seconde ou la minute.

Pour chaque valeur de  $A$ , il existe un ou deux isobares stables aux désintégrations  $\beta$  (qu'on peut trouver avec la formule de la goutte liquide  $B(A,Z)$  est une parabole à  $A$  fixé, selon la parité de  $A$ , il y a une ou deux paraboles).

**Radioactivité  $\alpha$**  Effet tunnel, dépendance exponentielle en  $Q$ , grande échelle d'ordre de grandeur. Approximation WKB.

**Freinage du rayonnement émis** Par ionisation ou Bremsstrahlung.

#### 3.4.1 Applications

##### Domaine civil

- Ionisation des produits alimentaires, pour éliminer les insectes et microorganismes.
- Radiomutagenèse. On expose les gènes de certaines plantes aux rayons  $\gamma$ , ce qui leur confère des propriétés nouvelles.

- Lutte (stérilisation) contre les insectes.

### Domaine industriel

- Gammagraphie, plus pénétrants que les rayons X (pour le corps).
- Traceurs radioactifs : iode pour la glande thyroïde, fer pour l'hémoglobine.
- Détecteurs d'incendie. On entretient l'ionisation de l'air, perturbée en présence de fumée.
- Batteries nucléaires. La chaleur produite est convertie en électricité.

### Autres

- Conservation du patrimoine artistique et culturel. Les rayons gamma détruisent insectes, moisissures et microorganismes. Ex : traitement de la momie de Ramses II.
- Datation. Carbone 14 : on mesure l'activité, avec l'hypothèse que le taux dans l'atmosphère était celui à la mort de l'organisme (qui a stoppé les échanges). Datation de la nucléosynthèse.
- Evolution du climat, paléoclimatologie.

### 3.4.2 Action des rayonnement sur la matière vivante

La particule  $\alpha$ , chargée  $+2e$  est absorbée rapidement : elle pénètre sur une épaisseur de quelques dizaines de microns. L'électron est aussi absorbé rapidement, jusqu'au mm. Les neutrons et photons sont plus pénétrants. Ils ionisent et excitent la matière. Pour les photons, le freinage par l'effet Compton domine.

## 3.5 Fission

**Matériaux fissile, fertiles** Basdevant p192.

**Origine de l'uranium** Synthétisé lors de supernovae

**Masse critique** Lors de la réaction de fission, 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 ».

**Réflecteur à neutrons** Un réflecteur de neutrons est un matériau qui réfléchit les neutrons. Cette notion relève plus de la réflexion diffuse que de la réflexion spéculaire, c'est-à-dire qu'il s'agit de matériaux qui réfléchissent les neutrons sans que l'angle de réflexion soit obligatoirement égal à l'angle d'incidence. On en fait entre autres en graphite, en béryllium, en acier et en carbure de tungstène. Un réflecteur de neutrons peut rendre critique une masse de matière fissile qui en son absence est sous-critique.

**Poisons à neutrons ou absorbeur de neutron** La capture de neutrons par des produits de fission de demi-vie courte dont le principal est le xénon 135 ou par des produits de fission de demi-vie plus longue ou stable comme le samarium 149 et le gadolinium 157

### 3.5.1 Applications

Piles thermonucléaires : dans les sondes spatiales et les simulateurs cardiaques.

## Questions

- Utilisation en cosmologie des éléments lourds, d'où viennent-ils ? (j'avais dit que la fusion ne se faisait pas pour ces éléments, j'ai donc argumenté sur l'énergie sans doute suffisante dans une étoile . . .).
- La désintégration alpha, en parler plus ? (j'ai parlé de la théorie de Gamov, l'effet tunnel, l'existence présumée de la particule alpha, la forme du potentiel)
- Dans le terme d'assymétrie, on a des puits, pourquoi les nucléons ne sont pas tous au fond ? (ce sont des fermions)
- Dans le terme d'assymétrie, j'ai dit que  $\Delta E$  était proportionnel à  $1/A$ , pourquoi simplement ? (j'ai dit que c'était un calcul quantique de largeur de puit que je ne saurais pas refaire simplement comme ca...)

- Les proportions relatives d'isotopes sur Terre, on retrouverait la même chose sur une autre planète ?
- La vallée de stabilité, qu'est-ce que c'est exactement ? Ca veut dire qu'on ne peut pas être ailleurs ?
- Pourquoi découpe-t-on le modèle de la goutte liquide en la somme d'une contribution de volume et d'une contribution de surface ? Comment calcule-t-on le terme proportionnel à  $Z(Z - 1)$  ? Pourquoi la courbe  $B/A$  en fonction de  $A$  n'est elle pas « bien lisse » ?
- Connaissez-vous déjà le noyau d'hélium dans l'expérience de Rutherford ? Quel est le rôle des électrons ? Pouvez-vous développer et donner une expression mathématique des forces nucléaires que vous avez présenté ? Ensuite ils ont décortiqué chaque terme de la formule de Weizsaecker que j'avais expliqué sur transparent. Retrouver la forme du terme électrostatique (avec la force de Coulomb). Expliquer le terme de surface (j'ai fait un lien avec la force de tension superficielle et son origine). Comment pouvait-on prévoir qu'on allait récupérer une énorme quantité d'énergie avec la fission ?
- 
- Comment ont pu se former initialement les gros noyaux (uranium, ...) ?
- Quelques questions supplémentaires sur les différents termes de la goutte liquide. Le modèle de la goutte liquide est-il encore utilisé ? Connaissez-vous d'autres modèles ?
- Points communs et différences entre force électrostatique et d'interaction forte ?
- Vous avez parlé de confinement (magnétique, inertiel), pouvez-vous en détailler un ?
- Comment fonctionnent les confinements magnétiques et inertiels ? Sur quelle force repose le confinement magnétique ?
- Dans quels centres de recherche l'une ou l'autre de ces méthodes est-elle employée ? Pourquoi faut-il un temps de confinement de 1 ou 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-Weizsaecker 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  $10^6$  K. Que représente-t-elle ?
- questions sur l'interaction forte, sur le médiateur de l'interaction forte, sur la radioactivité, sur le rayon critique avec ODG, sur les différents types de confinement du plasma, sur comment fabriquer une bombe nucléaire, sur pourquoi le proton et le neutron ont des masses différentes
- 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<sub>6</sub>, par centrifugation gazeuse du UF<sub>6</sub> 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' <sup>238</sup>U, <sup>239</sup>P, <sup>235</sup>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-Waiszecker permet-il d'expliquer ? D'où viennent les autres termes ? Que signifie que le noyau d'uranium est dans un état excité ? Peut-on faire une analogie avec l'excitation d'un atome et les niveaux électroniques ? Comment voir les niveaux d'énergie du noyau ? Vous avez supposé dans le calcul d'ODG pour l'énergie cinétique des neutrons thermiques une température de 10<sup>6</sup> K. Que représente-t-elle ?