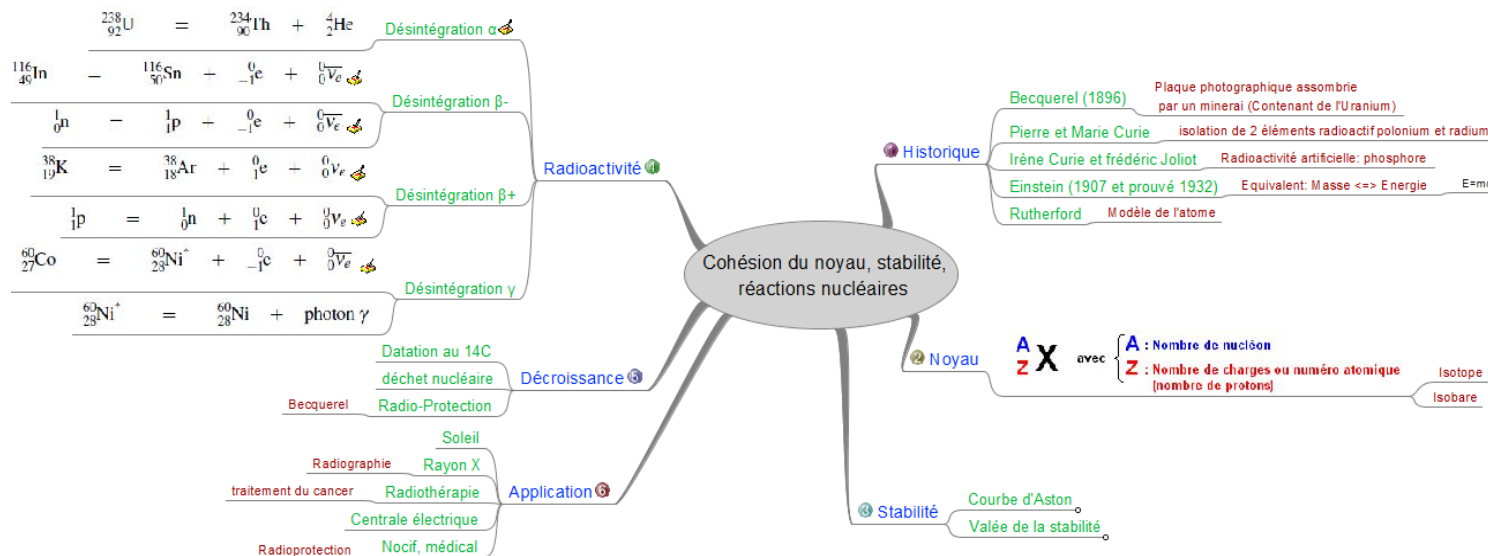


24e- Cohésion du noyau, stabilité, réaction nucléaires

Intro : Carte Mentale



Parler un peu de l'historique en commençant par Becquerel, les Curies. Dire qu'on s'aperçu rapidement qu'il fallait que la source de la radioactivité se situe dans les profondeurs de l'atome car la radioactivité n'était pas affecté par les traitements physique et chimique.

Rutherford et le modèle de l'atome (il a aussi travaillé sur les différents types de désintégration)

Rappeler les constituants du noyau et la notation symbolique ${}_Z^AX$

Définir isotope et isobare.

Stabilité : Montrer la courbe d'Aston et celle de la vallée de la stabilité.

Parler des différentes désintégrations qui ont pour but d'obtenir un noyau stable.

Post Bac Pas trouvé de livre ...

| Bibliographie

[85] Ondes, optique et physique moderne, cours de physique tome 3, D. Halliday

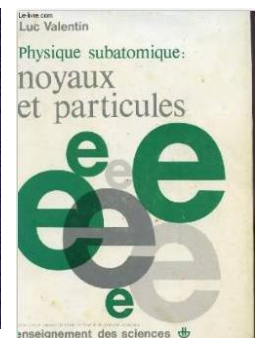
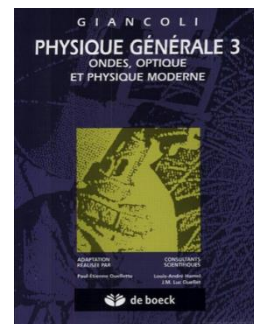
[141] Physique subatomique : noyaux et particules, L. Valentin : livre de référence, toute la leçon ou presque est dedans. (Il n'est pas dispo à l'agreg interne)

| Idées à faire passer

Le noyau est un état lié, et a donc une énergie de liaison qu'on peut exploiter par des transformations nucléaires

qui vont vers un noyau plus stable

Les modèles de noyaux se font surtout en interprétant des résultats expérimentaux



| Plan

2. Énergie de liaison

2.1. Résultats expérimentaux

Définir proprement le défaut de masse et l'énergie de liaison : signature de la plus grande stabilité du noyau par rapport à ses constituants séparés. Montrer et commenter la courbe d'Aston.

[à savoir] Interactions mises en jeu dans le noyau : nucléaire, électromagnétique, gravitationnelle. Donner des ODG, et comparer les portées.

2.2. Modèle de la goutte liquide

Tout bien expliquer et détailler. Justifier la forme de chaque terme.

2.3. Limites du modèle (ne pas trop en parler le garder pour les questions)

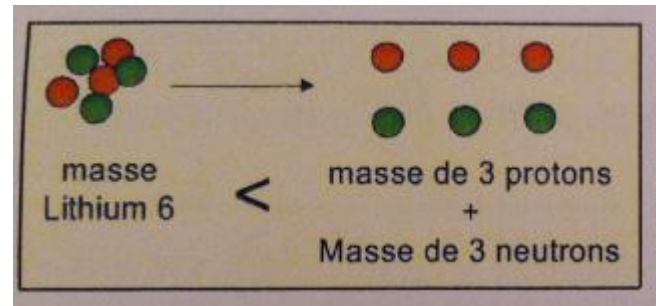
Comparaison aux résultats expérimentaux. Modèle en couches. Interpréter les nombres magiques.

1. **Défaut de masse - Energie de liaison.** (Fait à partir des notes de la formation radioactivité « Élément de physique nucléaire » et du livre [141] page 51 chapitre l'interaction forte)

Constat expérimentale : La somme des masses des nucléons au repos est supérieure à la masse du noyau regroupant tout les nucléons. Pourquoi ?

Einstein montre l'équivalence Masse-Energie en 1907 avec la théorie de la relativité restreinte

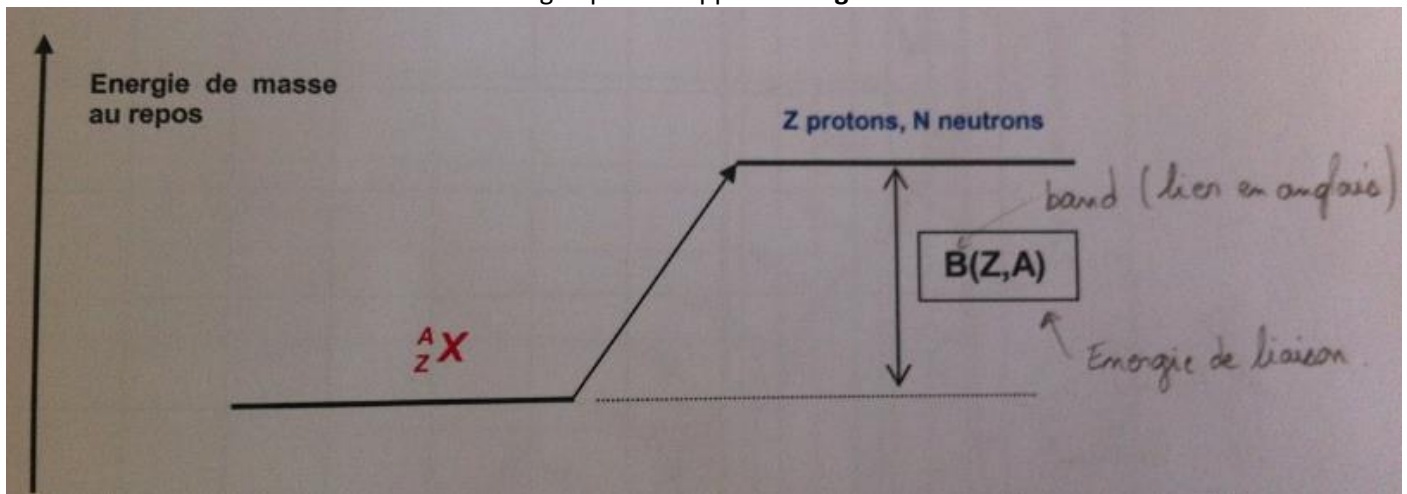
$$E = mc^2$$



Donc on peut dire que toute masse m est associée à une énergie aussi dire que $m = \frac{c^2}{E}$

Et donc sous certaine condition une masse peut se transformer en énergie.

Ce **défaut de masse** s'est transformé en énergie que l'on appelle **Energie de liaison**.



De façon très générale on peut montrer en physique qu'un système tend toujours à minimiser son énergie. (exemple bille oscillant dans une cuvette qui finira par se stabiliser au fond de cette cuvette). Dans notre cas la perte d'énergie peut se traduire par une diminution de la masse provoquée par une augmentation de l'énergie de liaison.

L'énergie de liaison représente la quantité d'énergie qu'il faut donner au noyau (donc $B(Z,A) > 0$) pour le briser en ses différents composants, protons et neutrons.

Attention toutefois de ne pas dire que le noyau possède une énergie de liaison (c'est faux) ; en fait c'est l'énergie qu'il a en « moins » par rapport à la masse totale de ses composants séparés.

Calcul de l'énergie de liaison noté $B(Z,A) =$

$$Z \times m_p c^2 + N \times m_n c^2 - m_{A_Z X} c^2$$

Après la 1^{ère} guerre mondiale Aston mesure, par spectrométrie de masse sur les noyau naturel, la quantité $B(Z,A)$. Ramené à la l'énergie de liaison moyenne par nucléon $\frac{B(Z,A)}{A}$ on obtient une courbe

Interactions mises en jeu dans le noyau (En parler rapidement sans faire de démo)

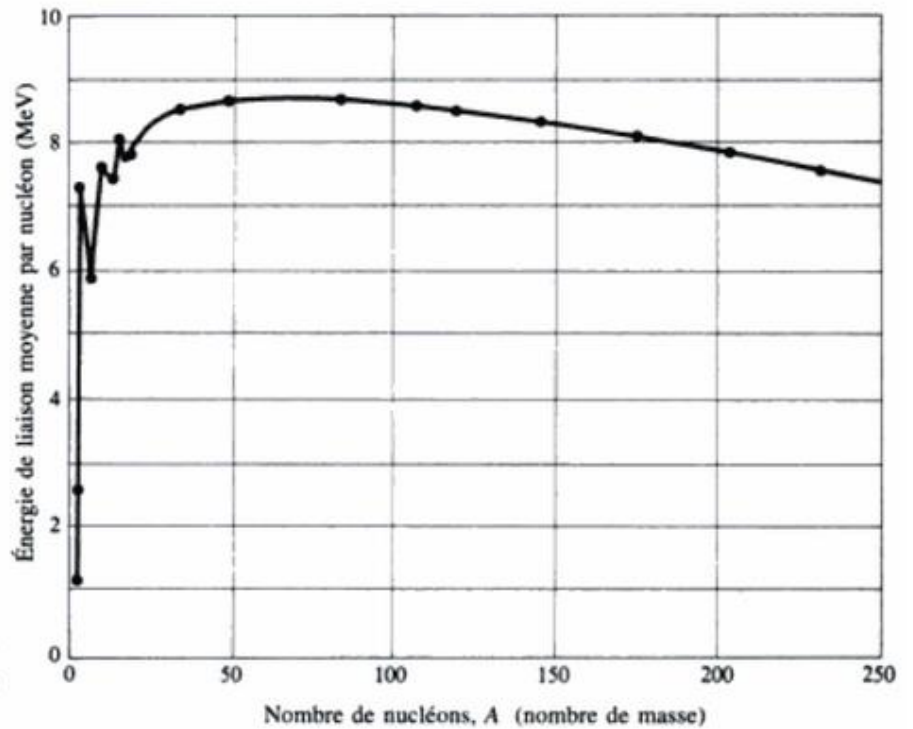


FIGURE 13.1 L'énergie de liaison moyenne par nucléon en fonction du nombre de masse A pour des noyaux stables.

Commentaire sur la courbe :

- Plus $\frac{B(Z,A)}{A}$ est élevé, plus le noyau est stable.
- Cette courbe fait apparaître un maximum pour $A \approx 60$ (Fer), qui correspond au noyau le plus lié donc le plus stable.

Interactions mises en jeu dans le noyau (En parler rapidement sans faire de démo (voir annexe))

- Interaction gravitationnelle (négligeable : $f_g = 18 \cdot 10^{-35} N$)
- Interaction électromagnétique (Dominante : $f_{EM} = 230 N$)

La répulsion coulombienne aurait tendance à faire éclater le noyau.

On en déduit qu'il existe une autre force l'interaction nucléaire forte. Mais qui a une faible portée (environ 5 fermis $1 \text{ fm} = 1 \times 10^{-15} \text{ m}$)

2. Modèle de la goutte liquide

Le modèle de la goutte liquide. Il permet avec une physique "avec les mains" de retrouver la masse des noyaux, et ensuite les énergies libérées dans les processus nucléaires, la courbe de stabilité, les paraboles de masses des isobares..... C'est le modèle de départ qui permet, en déformant la goutte, d'avoir une approche "macroscopique" d'un noyau qui fissionne.

Formule semi-empirique de Bethe-Weizsäcker

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

$$B = \underbrace{a_v A}_{\text{Terme liant}} - \underbrace{a_s A^{2/3}}_{\text{Termes déliants}} - \underbrace{a_c Z^2 A^{-1/3}}_{\text{Coulomb}} - \underbrace{a_a \frac{(N-Z)^2}{A}}_{\text{Asymétrie}} \pm \underbrace{a_p A^{-1/3}}_{\text{Termes de pairing}}$$

Terme liant :

volume a_v

Termes déliants :

Surface a_s ,

Coulomb a_c ,

Asymétrie a_a

Termes de pairing

+ pour N et Z pairs

- pour N et Z impairs

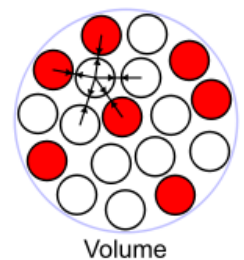
0 pour N pairs et Z impairs

0 pour N impairs et Z pairs

En gros ce modèle calcule l'énergie de liaison moyenne des nucléons dans un noyau. Il comporte plusieurs termes que l'on ajoute successivement, chaque terme ayant une explication physique particulière

1) Terme de volume.

Il considère qu'un nucléon dans le volume du noyau n'interagit, via l'interaction nucléaire forte attractive, qu'avec les nucléons qui sont en contact avec lui (leur proche voisin) (comme dans une goutte d'eau avec les forces de van Der Waals entre molécules). On peut en moyenne considérer une moyenne de 16 MeV d'énergie de liaison pour un nucléon dans le volume.



Volume

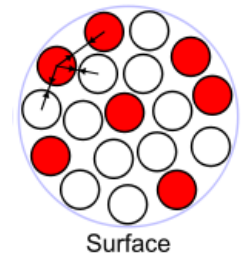
2) Terme de surface

Le second terme est le terme de surface. Le raisonnement est simple : on peut considérer qu'un nucléon en surface a moins de voisins. Donc moins de liaisons. Ce qui fait baisser la valeur moyenne pour l'ensemble des nucléons. On a là encore le même effet pour une goutte d'eau, avec le concept "de tension superficielle". C'est donc un terme qui est simplement proportionnel à la surface d'une sphère.

Le signe « - » vient du fait que c'est un effet anti-liant

$$V_{\text{noyau}} = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad \text{avec } R \text{ le rayon du noyau}$$

$$V_{\text{noyau}} = A \times V_{\text{nucléon}} = A \times \frac{4}{3} \pi r_0^3 \quad \text{avec } r_0 \text{ le rayon d'un nucléon}$$



Surface

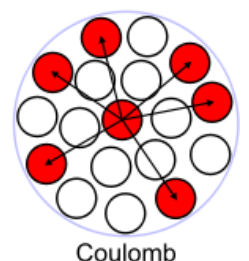
Par identification : le rayon du noyau est égale à $R = r_0 A^{1/3}$, on voit bien que si on ajoute des nucléons le rayon n'augmente qu'en $A^{1/3}$ ce qui n'est pas beaucoup. Le terme de surface joue surtout un rôle pour les noyaux légers. Puisque pour 4 nucléons, ils sont tous en surface.

Remarque sur la tension superficielle,

3) troisième terme : Terme de répulsion Coulombienne

Il n'a pas d'équivalent dans la goutte d'eau. En effet **tous** les protons du noyaux se repoussent 2 à 2 par effet coulombien. Qui dit répulsion dit effet anti-liant. La répulsion coulombienne fait donc baisser l'énergie de liaison moyenne (et donc augmente la masse des noyaux). Il se calcule assez simplement avec une approche classique utilisé en électrostatique pour calculer l'énergie de répulsion d'une sphère chargée.

Au bilan on retrouve bien la fameuse courbe d'Aston, avec une énergie moyenne de liaison par nucléon qui tourne entre 7,5 et 8,5 MeV, sauf pour les plus légers. Ainsi un nucléon dans un noyau a une masse effective moyenne de l'ordre de 930 MeV, alors qu'il a une masse de 938



Coulomb

MeV à l'état libre (énergie de masse au repos pour les puristes) et on retrouve bien nos 8Mev d'énergie de liaison/nucléons

Remarque :

- A ce stade là comme on sait qu'un système lié tend à minimiser son énergie totale, ce qui revient à augmenter son énergie de liaison. Cette tendance aurait pour effet à faire tendre Z vers zéros, c'est-à-dire transformer des protons en neutrons (ce qui est possible grâce à l'interaction faible β^+

${}_1^1\text{p} = {}_0^1\text{n} + {}_1^0\text{e} + {}_0^0\nu_e$) et on se retrouverai alors qu'avec des noyau de neutron ce qui serait désagréable le noyau ne serait plus neutre.

Mais on peut déjà remarquer que pour des noyaux lourd on a $N > Z$. $(N-Z)$ s'appel l'excès de neutron

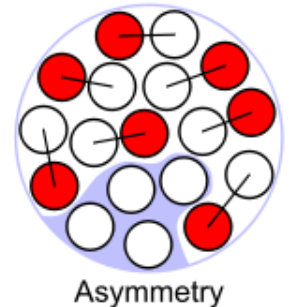
- Lorsque l'on fait le bilan dans un noyau lourd qui a fissionné, on constate alors que la répulsion coulombienne a baissée, parce que chaque proton voit moins de protons. Donc l'énergie de liaison globale augmente. On est gagnant dans la fission lorsque cette augmentation de l'énergie de liaison est plus grande que la baisse de l'énergie de liaison en raison de l'augmentation de la surface

Heureusement il y a d'autre facteur : les deux autres termes sont des termes du a des considérations quantiques.

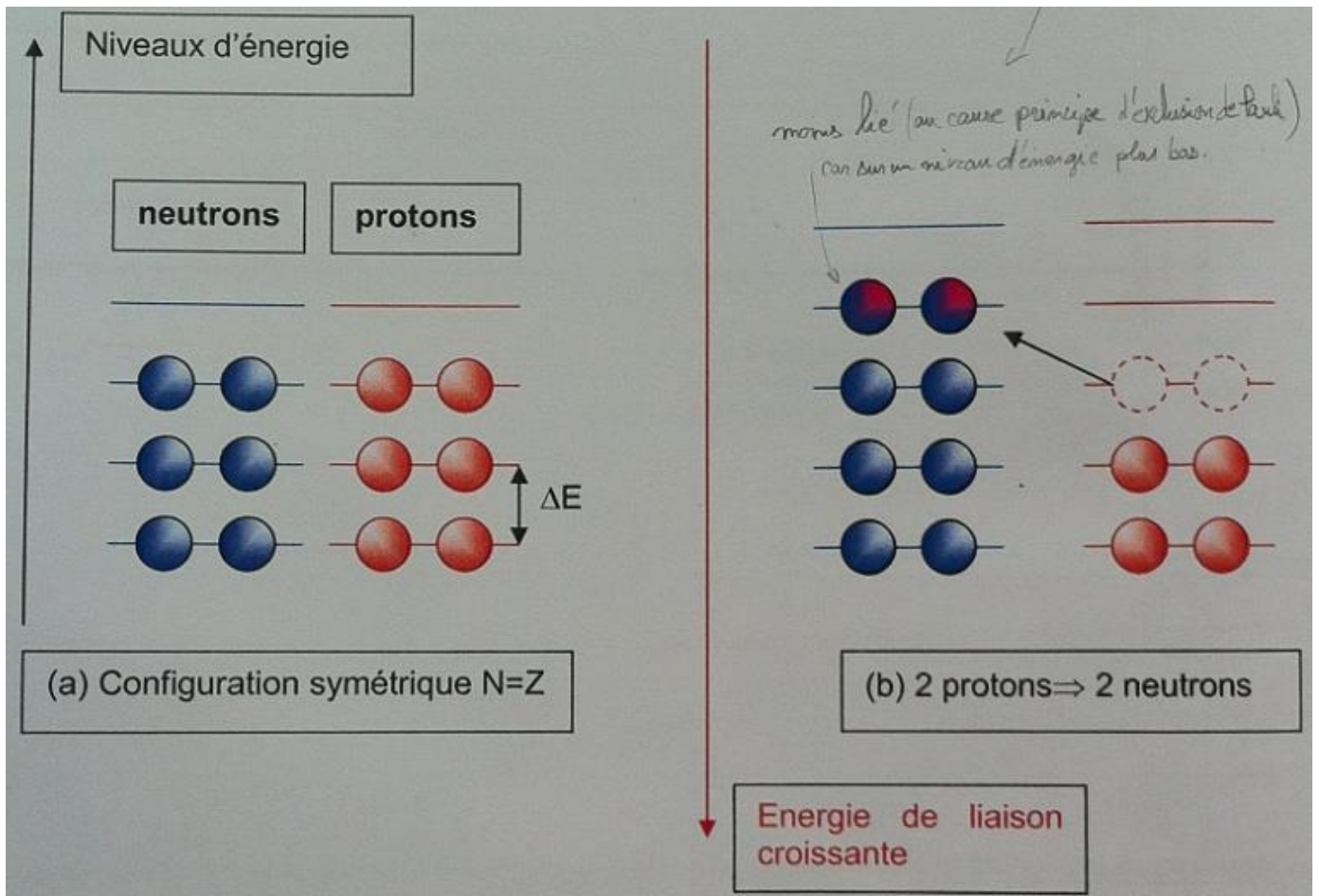
4) Quatrième terme : terme d'asymétrie

Le terme de symétrie, il est nul pour les noyaux ou il y a autant de proton que de neutron (l'axe de stabilité de base si $N=Z$ alors noyau stable) autrement il y a un excès de l'un ou de l'autre donc terme anti-liant donc négatif.

Explication : Comme les protons et les neutrons sont tout petits, ils sont régis comme l'électron à la mécanique quantique. Et cela se traduit par le fait que les protons et, séparément, les neutrons occupent des niveaux d'énergie discret (comme l'électron).



Si l'on part avec 2 nucléons par couches (2 protons + 2 neutrons, les couches sont au même niveau mais séparé). La tendance $p \rightarrow n$ pour diminuer la répulsion coulombienne a pour conséquence d'augmenter la population de neutrons mais ces derniers vont se placer à un niveau d'énergie plus haut ce qui a pour conséquence de diminuer l'énergie de liaison. Le phénomène $p \rightarrow n$ s'arrête lorsque l'équilibre est atteint entre gain en énergie de liaison via la diminution d'énergie coulombienne et la perte d'énergie de liaison via se terme d'asymétrie.



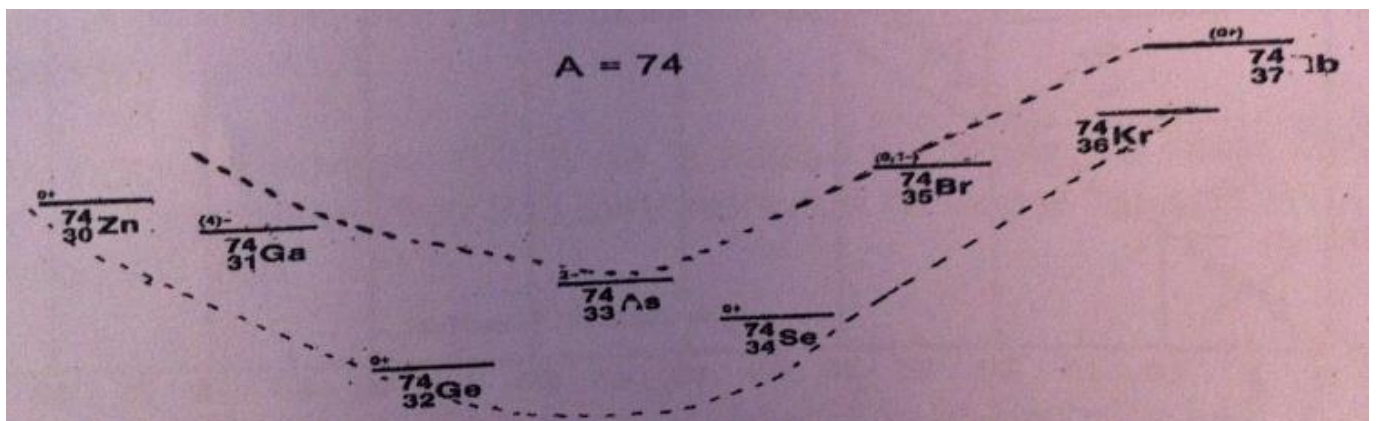
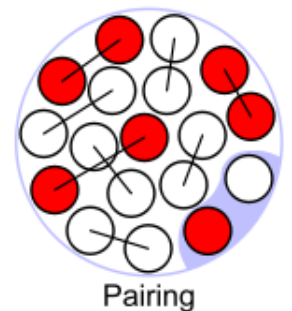
5) terme correctif de l'énergie d'appariement (compliqué alors ne pas trop en parler)

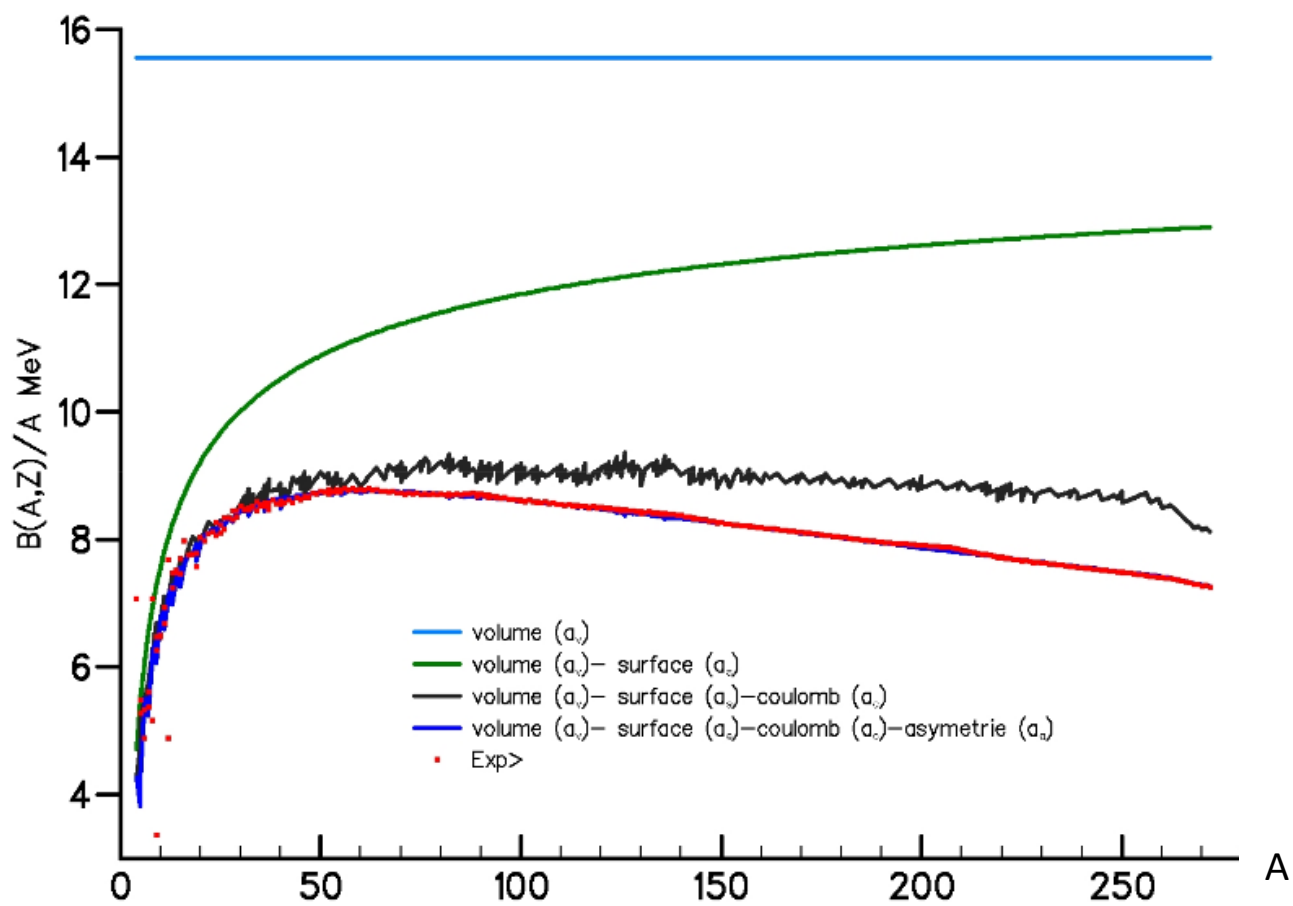
Pour finir les noyaux pair - pair sont plus liés que les impaires-impaires donc terme positif pour l'un et négatif pour l'autre (et nul dans le cas intermédiaire)

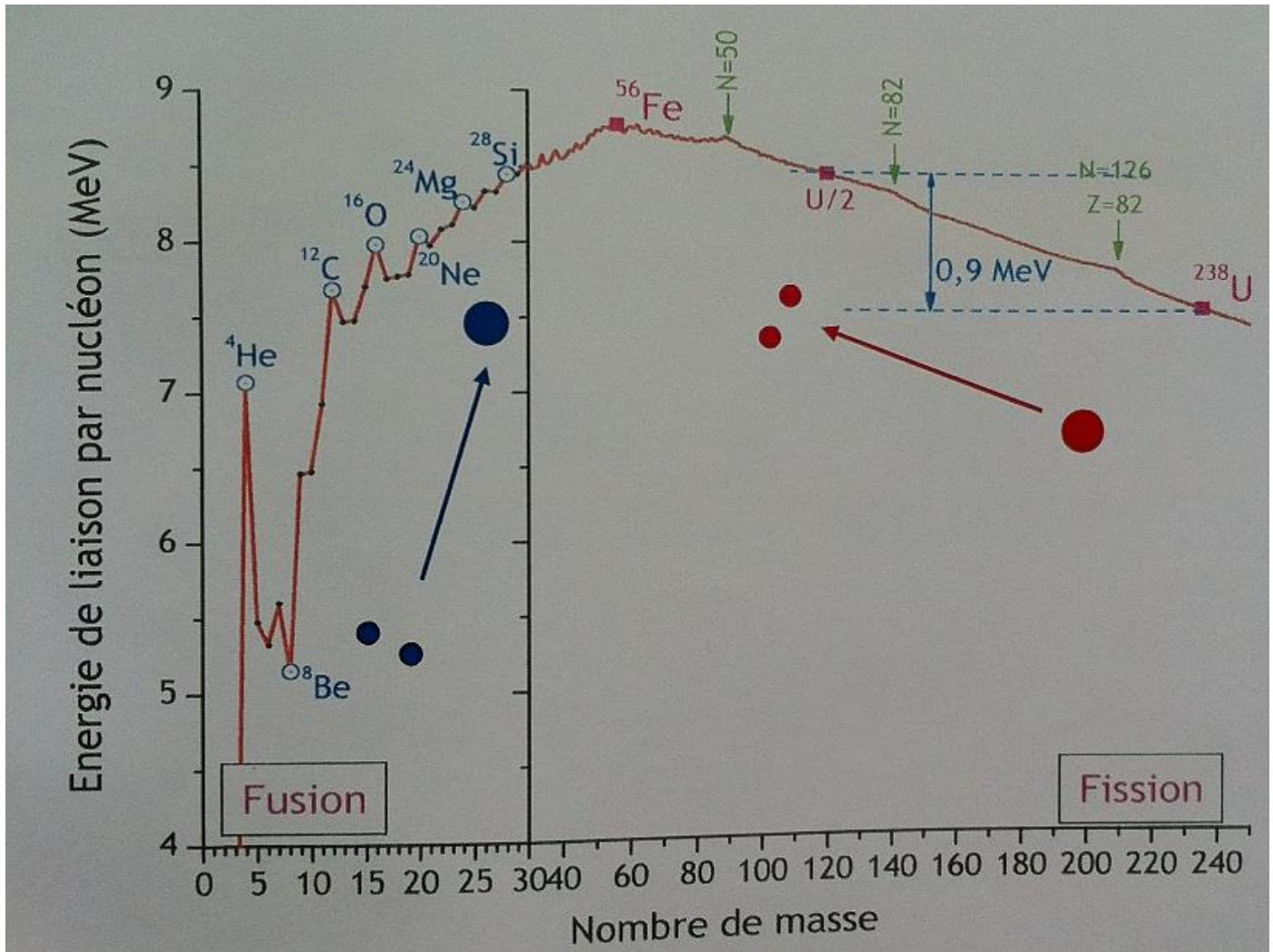
Le terme d'appariement permet ainsi d'expliquer pourquoi pour les noyaux à A paire il existe 2 paraboles des masses une au dessus de l'autre car pour que A soit paire il faut soit que: l'on est Z paire et N paire terme d'appariement positif donc parabole de masse en bas (élément moins lourd donc plus lié)

ou Z impaire et N impaire donc terme d'appariement négatif, donc parabole de masse au dessus (élément plus lourd donc moins lié)

Le jeu est donc souvent de demander aux élèves de définir à partir l'expression de Weisacker le Z de l'élément stable pour un A donné...







➤ **La fusion des noyaux légers** : ces réactions tendent à augmenter l'énergie de liaison globale grâce à la forte diminution de la surface totale

car on ↑ le nombre de liaison, on fait du volume et moins de surface.

➤ **La fission des noyaux lourds** : ces réactions tendent à augmenter l'énergie de liaison globale grâce à la forte diminution de l'énergie de répulsion coulombienne.

Par contre là on ↑ la surface (donc ça demande de l'énergie) $O \rightarrow \circ$ donc on fournit de l'énergie mais

Tous ces constats expérimentaux : courbe d'Aston, parabole de masse, ligne de stabilité et autres se retrouvent aisément à partir du modèle en goutte liquide du noyau

3. Limites du modèle (très rapidement)

Le défaut de ce modèle :

- On voit bien que ce modèle ne se superpose pas exactement à la réalité puisque l'effet de montagne (He et Be) n'est pas expliqué par ce modèle.
- il ne prend pas en compte l'état quantique des nucléons, c'est pourquoi il existe d'autres modèles : gaz de Fermi, particule indépendante, modèle en couche...

Pour aller plus loin, mais on ne va pas en parler mis à par en conclusion pour qu'on nous pose des questions.

Le modèle de la goutte liquide a été utilisé (Bohr et Wheeler, 1^{er} septembre 1939) pour tenter d'expliquer le phénomène de fission aussitôt que celui-ci a été mis en évidence. (voir annexe 3)

Du coup la transition est toute faite pour la partie péda puisqu'on va parler de fusion et de fission

Péda : 1^{ère} S : Comment expliquer la stabilité de certains noyaux ?

COMPRENDRE Lois et modèles <i>Quelles sont les causes physiques à l'œuvre dans l'Univers ? Quelles interactions expliquent à la fois les stabilités et les évolutions physiques et chimiques de la matière ? Quels modèles utilise-t-on pour les décrire ? Quelles énergies leur sont associées ?</i>	
Notions et contenus	Compétences attendues
Cohésion et transformations de la matière	
La matière à différentes échelles : du noyau à la galaxie.	Connaître les ordres de grandeur des dimensions des différentes structures des édifices organisés.
Particules élémentaires : électrons, neutrons, protons.	Connaître l'ordre de grandeur des valeurs des masses d'un nucléon et de l'électron.
Charge élémentaire e.	Savoir que toute charge électrique peut s'exprimer en fonction de la charge élémentaire e.
Interactions fondamentales : interactions forte et faible, électromagnétique, gravitationnelle.	Associer, à chaque édifice organisé, la ou les interactions fondamentales prédominantes.
Cohésion du noyau, stabilité.	Utiliser la représentation symbolique A_ZX ; définir l'isotopie et reconnaître des isotopes.
Radioactivité naturelle et artificielle. Activité.	Recueillir et exploiter des informations sur la découverte de la radioactivité naturelle et de la radioactivité artificielle.
Réactions de fission et de fusion.	Connaître la définition et des ordres de grandeur de l'activité exprimée en becquerel.
	Utiliser les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire.
Lois de conservation dans les réactions nucléaires.	Utiliser la relation $E_{\text{libérée}} = \Delta m c^2$.
Défaut de masse, énergie libérée.	Recueillir et exploiter des informations sur les réactions nucléaires (domaine médical, domaine énergétique, domaine astronomique, etc.).
Réactions nucléaires et aspects énergétiques associés.	
Ordre de grandeur des énergies mises en jeu.	
Solide ionique. Interaction électrostatique ; loi de Coulomb.	Interpréter la cohésion des solides ioniques et moléculaires.

Pré-requis :

- Les interactions fondamentale (on ne parle pas de l'interaction faible)
- La formulation A_ZX et reconnaître des isotopes
- Cohésion du noyau, stabilité
- Radioactivité naturelle et artificielle
- Avoir déjà équilibré des réactions nucléaire (Type β , α)

Objectifs :

- Utiliser les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire (fission et fusion)
- Utiliser la relation $E=mc^2$
- Recueillir et exploiter des informations sur les réactions nucléaires (domaine énergétique)

Déroulement de la séance (2H) :

1^{ère} partie situation déclenchante + résolution (20 min)

2^{ème} partie tache complexe

Démarrer en montrant une image de galaxie et d'étoile et demander aux élèves :
Pourquoi les étoiles brillent-elle ?

Débat avec les élèves avec l'idée de parler de réaction nucléaire.



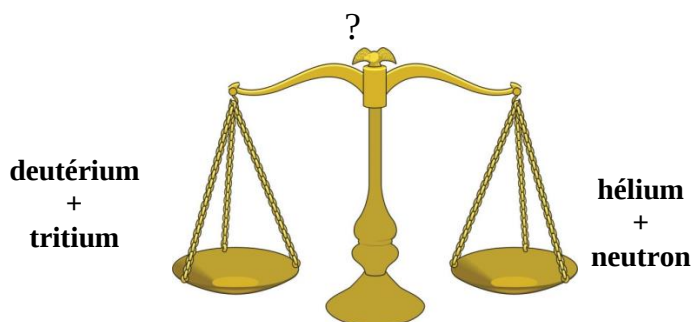
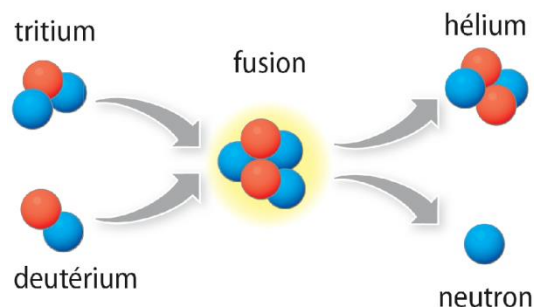
(Investigation-Documentaire) : Reproduire l'énergie du Soleil

I/ La fusion nucléaire

Situation déclenchante:

La fusion nucléaire est « l'union » de deux noyaux légers pour former un noyau plus lourd en libérant de l'énergie.

Par exemple, un noyau de deutérium (isotope de l'hydrogène de représentation symbolique ${}^2_1\text{H}$) et de tritium (isotope de l'hydrogène de représentation symbolique ${}^3_1\text{H}$) peuvent fusionner pour donner un noyau d'hélium, de représentation symbolique ${}^4_2\text{He}$, et un neutron ${}_0^1\text{n}$.



Investigation:

Cette balance (virtuelle !) sera-t-elle à l'équilibre ?

Hypothèse :

.....

.....

.....

Recherche de validation – Étude de document :

On donne les résultats de mesures suivants.

Masse du noyau de deutérium ${}^2_1\text{H}$: $m({}^2_1\text{H}) = 3,344 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Masse du noyau de tritium ${}^3_1\text{H}$: $m({}^3_1\text{H}) = 5,007 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Masse du noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$: $m({}^4_2\text{He}) = 6,645 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Masse du neutron ${}_0^1\text{n}$: $m({}_0^1\text{n}) = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

1) Utiliser les données ci-dessus pour valider ou invalider votre hypothèse ?

Dire au jury que dans cette partie on fait exprès de laisser les masses en kg pour ne pas compliquer la tâche. On introduit l'unité de masse atomique (u) après.

Pratique : Pour les calculs de masse utiliser Belin 1^{ère}

S page 162 et pour le dessin de la fusion utiliser le nathan. Pour la balance de Roberval il va falloir la dessiner au tableau.

Particule ou noyau	Masse (en u)
neutron	1,0087
proton	1,0073
deutérium	2,0141
tritium	3,0160
hélium 4	4,0026
carbone 14	14,0032
technétium 99	98,8823
uranium 235	234,9935

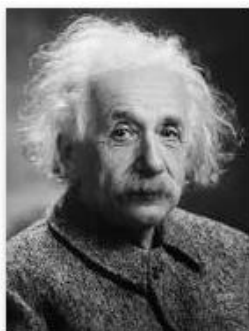
12 Masse de quelques particules et noyaux, exprimée en unité de masse atomique.

3.1 Équivalence

Toute particule, du fait de sa masse m , possède une énergie $E = mc^2$ où c est la célérité de la lumière.

L'unité de masse atomique $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

II/ Mais où cette masse a-t-elle bien pu passer ?



En physique, on dit qu'une transformation nucléaire s'accompagne d'un « défaut de masse ».

Einstein postule, en 1905, une équivalence (convertibilité) entre la masse et l'énergie.

Il relie la variation de masse $\Delta m = m_{\text{après}} - m_{\text{avant}}$ à une variation d'énergie :

$$E_{\text{libérée}} = |\Delta E| = |\Delta m| \cdot c^2$$

Où ΔE s'exprime en Joule (J), Δm en kilogramme (kg) et c est la célérité de la lumière dans le vide en m.s^{-1}

Répondre à la question de l'activité.

.....

.....

.....

III/ Résolution de problème

Situation : Vous êtes ingénieur nucléaire et le maire de votre ville vient vous voir car il souhaite installer une centrale nucléaire afin d'être indépendant énergétiquement. Seulement il ne sait pas quel type de centrales installer et il vous demande de lui rédiger un rapport détaillé afin de l'aider dans sa décision.

A l'aide des documents suivant rédiger un paragraphe argumenté, dans lequel vous détaillerez vos calculs, afin de répondre à la problématique. (Votre rapport doit-être le plus détaillé possible afin que le maire puisse le comprendre)

Dire au jury que l'on peut adapter les documents aux difficultés des élèves.

On fait une version difficile et une version facile afin de faire du différencier.

Doc. 1 La fission nucléaire

L'énergie nécessaire au fonctionnement des centrales nucléaires est apportée par la fission de noyaux d'uranium 235.

Les réacteurs EPR (*Evolutionary Power Reactor*), comme celui de Flamanville dans la Manche, devraient permettre d'économiser jusqu'à 15 % de combustible nucléaire tout en garantissant une puissance supérieure. La gestion et le traitement des déchets sont cependant actuellement le problème majeur de cette technique.



Doc. 2 La fusion nucléaire

Dans une réaction de fusion nucléaire, deux noyaux légers s'unissent pour donner un noyau plus lourd en libérant une énergie considérable. Ainsi, le projet mondial de réacteur expérimental ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), situé sur le site de Cadarache dans les Bouches-du-Rhône, devrait démontrer qu'il est possible d'utiliser la fusion du deutérium ${}^2_1\text{H}$ et du tritium ${}^3_1\text{H}$ pour produire de l'énergie sur Terre.

Doc. 3 Bilan d'énergie

Les réactions nucléaires de fission et de fusion s'accompagnent d'une perte de masse Δm et d'une libération d'énergie $\mathcal{E}_{\text{libérée}}$:

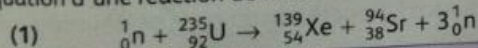
$$\mathcal{E}_{\text{libérée}} = |\Delta m| \times c^2 = |m_{\text{finale}} - m_{\text{initiale}}| \times c^2$$

Δm , m_{initiale} (masse avant réaction) et m_{finale} (masse après réaction) en kilogramme (kg)

$c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, vitesse de propagation de la lumière dans le vide.

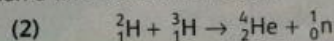
DONNÉES • 1 u (unité de masse atomique) = $1,660\,54 \times 10^{-27} \text{ kg}$

• Équation d'une réaction de fission :



Masse avant réaction	Masse après réaction
236,002 11 u	235,809 66 u

• Équation d'une réaction de fusion :



Masse avant réaction	Masse après réaction
5,029 05 u	5,010 17 u

Doc 4 : Remarques diverses et variées :

- L'hélium n'est pas radioactif
- Pour pouvoir comparer des énergies il faut comparer l'énergie libérée par nucléon.

Argument attendu pour la version facile :

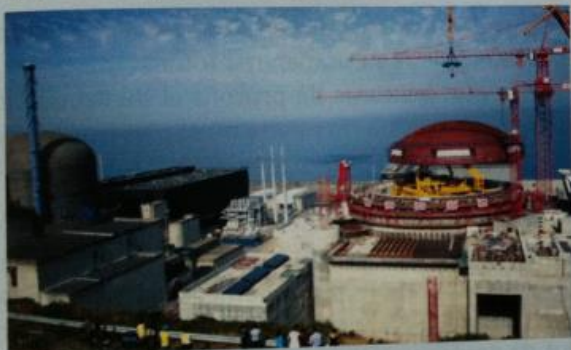
- Calcul du défaut de masse pour la fission et la fusion
- Calcul de l'énergie libérée lors de la fission et de la fusion
- Calcul de l'énergie libérée / nucléons
- Argument lié à la radioactivité des déchets nucléaire.
- Pour les plus doués parler de la répulsion coulombienne (difficile à vaincre dans le cas de la fusion)

Version difficile

Doc. 1 La fission nucléaire

L'énergie nécessaire au fonctionnement des centrales nucléaires est apportée par la fission de noyaux d'uranium 235.

Les réacteurs EPR (*Evolutionary Power Reactor*), comme celui de Flamanville dans la Manche, devraient permettre d'économiser jusqu'à 15 % de combustible nucléaire tout en garantissant une puissance supérieure. La gestion et le traitement des déchets sont cependant actuellement le problème majeur de cette technique.



Doc. 2 La fusion nucléaire

Dans une réaction de fusion nucléaire, deux noyaux légers s'unissent pour donner un noyau plus lourd en libérant une énergie considérable. Ainsi, le projet mondial de réacteur expérimental ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), situé sur le site de Cadarache dans les Bouches-du-Rhône, devrait démontrer qu'il est possible d'utiliser la fusion du deutérium ${}^2_1\text{H}$ et du tritium ${}^3_1\text{H}$ pour produire de l'énergie sur Terre.

Doc. 3 Bilan d'énergie

Les réactions nucléaires de fission et de fusion s'accompagnent d'une perte de masse Δm et d'une libération d'énergie $\mathcal{E}_{\text{libérée}}$:

$$\mathcal{E}_{\text{libérée}} = |\Delta m| \times c^2 = |m_{\text{finale}} - m_{\text{initiale}}| \times c^2$$

Δm , m_{initiale} (masse avant réaction) et m_{finale} (masse après réaction) en kilogramme (kg)

$c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, vitesse de propagation de la lumière dans le vide.

Faire un mixte avec le document A page 158 (Belin) (voir annexe)

Remplacer le doc 3 par le document B page 158 (Belin) (voir annexe)

Doc 4 : Remarques diverses et variées :

- L'hélium n'est pas radioactif
- Pour pouvoir comparer des énergies il faut comparer l'énergie libérée par nucléon.
- Produit de fission de l'uranium (Le Xenon et le Strontium)
- Unité de masse astronomique ($1 u = 1.666054 \times 10^{-27} \text{ kg}$)

Particule ou noyau	Masse en u
${}^1_0\text{n}$	1.00866
${}^2_1\text{H}$	2.01355
${}^3_1\text{H}$	3.01550
${}^4_2\text{He}$	4.00151
${}^{94}_{38}\text{Sr}$	93.89451
${}^{139}_{54}\text{Xe}$	138.88917
${}^{235}_{92}\text{U}$	234.99345

Argument attendu pour la version facile :

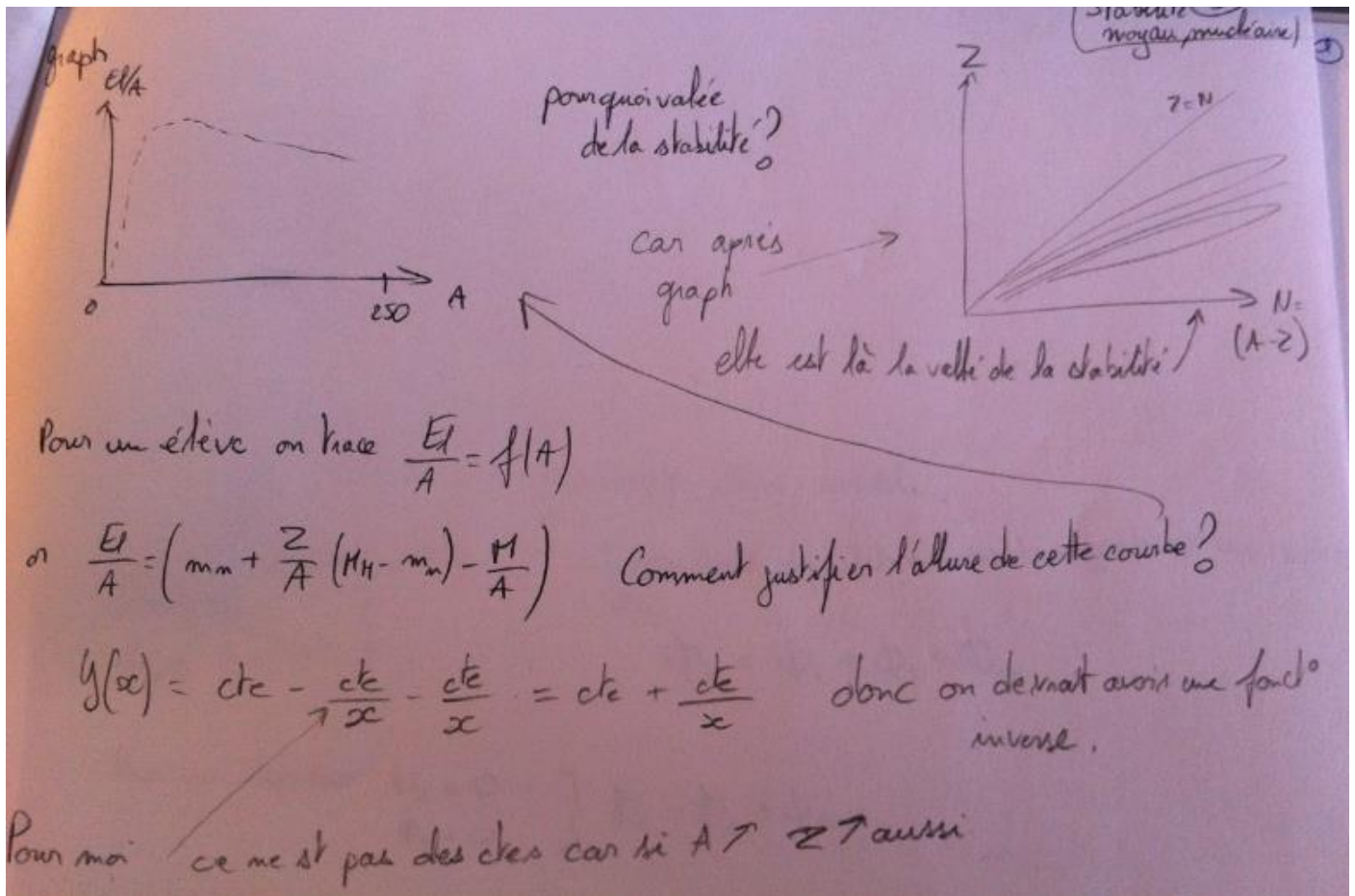
- Ecrire les réactions de fusion et de fission
- Calcul du défaut de masse pour la fission et la fusion
- Calcul de l'énergie libérée lors de la fission et de la fusion
- Calcul de l'énergie libérée / nucléons
- Argument lié à la radioactivité des déchets nucléaire.
- Pour les plus doués parler de la répulsion coulombienne (difficile à vaincre dans le cas de la fusion)

Question :

- 1) Dans le noyau, il semble que se sont les protons qui nous gêne, pourquoi pas faire que des noyau de neutron ? Car il faut que l'atome soit neutre et les neutrons ne sont pas chargé il faut donc des protons au même nombre que les électrons
- 2) Il y a de l'uranium 238 U qui est stable, pourquoi l'uranium 235U est instable ?

The number gives number of nucleons in a nucleus. uranium-235 has 235 nucleons and uranium-238 has 238 nucleons. The number of protons (which also give a charge to a nucleus) are same in the two, which is 92. The two have different number of neutrons. The former is slightly lighter than the latter. Nucleons like to pair up to zero spin to reduce energy. Therefore U-235 is slightly less bound than U-238 and therefore breaks up more easily than U-238.

3)



- 4) Un élève connaît $E = \frac{1}{2} m v^2$ et on lui dit $E = mc^2$, comment expliquer la compatibilité ? Le candidat se lance dans une démo compliquée, moi je ferai juste une analyse dimensionnelle pour se rendre compte que dans les 2 cas on a les dimensions d'une énergie ($J = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)
- 5) LE PFD est en classique, pourquoi on part de la transformée de Lorentz au début de la partie post bac ?

- 6) Quelles sont les postulats de la mécanique classique ? Référentiel Galiléen

En méca classique le temps est absolu alors qu'en relativité il est relatif

Annexe 1 :

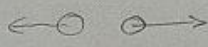
4 INTERACTION ENTRE DEUX NUCLEONS.

4.1 FORCES ET ENERGIES MISES EN JEU.

a) Interaction électromagnétique (EM).

Les interactions EM n-n et n-p sont nulles. L'interaction EM p-p vaut $F_{EM} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$

Pour $r = 1$ Fermi on obtient $F_{EM} = 230$ Newton, correspondant à une énergie potentielle de 1,43 MeV.

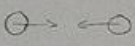
$$\left. \begin{array}{l} \Delta W = -dE_p = \vec{F}_{EM} \cdot d\vec{r} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \vec{r} \cdot d\vec{r} \\ E_p = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \cdot dr \Rightarrow \begin{array}{l} r \rightarrow \infty \\ E_p \rightarrow 0 \end{array} \end{array} \right\} E_p = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$


b) Interaction gravitationnelle.

Les interactions n-n, n-p et p-p sont pratiquement identiques et valent:

$$F_G = G \frac{m^2}{r^2} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{(1,67 \times 10^{-27})^2}{(10^{-15})^2} = 18 \times 10^{-35} \text{ Newton}$$

pour une énergie potentielle de 10^{-30} eV.

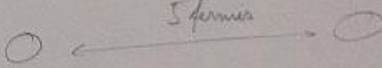
$$\left. \begin{array}{l} \Delta W = \vec{F}_G \cdot d\vec{r} = -G \frac{m^2}{r^2} (\vec{r} \cdot d\vec{r}) = -dE_p \\ \Rightarrow E_p = \int \frac{Gm^2}{r^2} \cdot dr = -\frac{Gm^2}{r} + cte \end{array} \right\} \begin{array}{l} r \rightarrow \infty \\ E_p \rightarrow 0 \end{array} \quad E_p = -\frac{Gm^2}{r}$$


c) Conclusion :

On constate que $F_{EM} \gg F_G$: la répulsion Coulombienne aurait donc tendance à faire éclater le noyau !

On en déduit qu'il existe une autre force qui assure la cohésion et la stabilité du noyau: c'est l'interaction nucléaire forte. (basse et indépendante de charge)

↳ 1000 x plus intense que interaction électromag

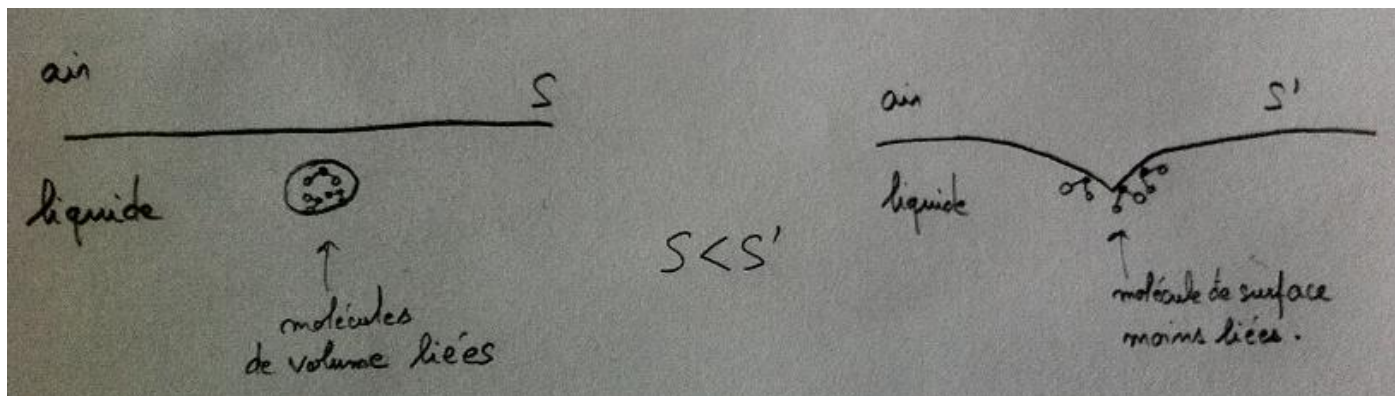
△ Elle disparaît à environs 5 fermis 

Interaction véhiculée par des bosons d'interaction (virtuelle donc non réelle) mais lorsqu'elle devient réel ça devient des pions qui sont instable et donc pas infini au contraire du photon.

Electromag les bosons d'interaction → le photon (réel → infini)
(le photon est stable il va à l'infini).

Annexe 2

Remarque sur la tension superficielle, car elle est souvent comprise à l'envers, avec l'histoire des petites bêtes qui courent dessus: la surface d'une goutte d'eau n'est pas comme un "film de plastique" qui s'oppose à la pénétration de ladite bête. Avec un tel film, cela reviendrait à considérer que les molécules en surface sont plus liées. Alors que c'est bien l'inverse. Les molécules en surface sont moins liées, et donc à un niveau d'énergie supérieur (dans le puits de potentiel attractif). Lorsque la bête marche dessus, elle déforme la surface, et donc l'augmente. Pour augmenter la surface, il faut faire passer des molécules du volume à la surface. Ces molécules en volumes étant plus liées, cela demande de l'énergie. Si le poids n'est pas suffisant, cette demande énergétique s'oppose à la pénétration dans l'eau. On parle de tension superficielle de l'eau (qui fait penser au film), mais en fait c'est un jeu d'échange entre surface et volume (une bulle de savon, par exemple, c'est bien un film).



C'est le même effet qui s'oppose à la déformation des noyaux par exemple, et qui empêche que tous les noyaux lourds fissionnent spontanément et instantanément. Certains y arrivent, mais ils trichent car ils le font par effet tunnel (ils profitent d'un moment où les interactions "oublient" un peu de se produire), et donc ça prend du temps.

A noter qu'un noyau lourd qui fissionne génère 2 noyaux qui ont en tout le même volume que le noyau initial, mais une surface plus grande, ce qui demande de l'énergie. Donc l'effet de surface s'oppose bien à la fission spontanée (ou pas)

Annexe 3

Energie libérée par la fission **symétrique** d'un noyau suivant la réaction : ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A/2}_{Z/2}Y + {}^{A/2}_{Z/2}Y$

Remarque : La fission symétrique est un cas particulier de la fission, car la plus part du temps la fission est asymétrique et donne lieu à 2 produits de fissions différents.

Soit Q_f le bilan de masse de cette réaction.

Calcul de Q_f :

$$Q_f = m_X c^2 - 2m_Y c^2 = [Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B(Z, A)] - 2 \left[\frac{Z}{2} m_p c^2 + \frac{N}{2} m_n c^2 - B\left(\frac{Z}{2}, \frac{A}{2}\right) \right]$$

$$\Rightarrow$$

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

En utilisant la formule de BETHE WEIZÄCKER, on obtient :

$$Q_{\text{fission}} = a_s \cdot A^{\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - 2^{\frac{1}{3}}\right) + a_c \cdot \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \cdot \left(1 - 2^{\frac{2}{3}}\right) \Rightarrow$$

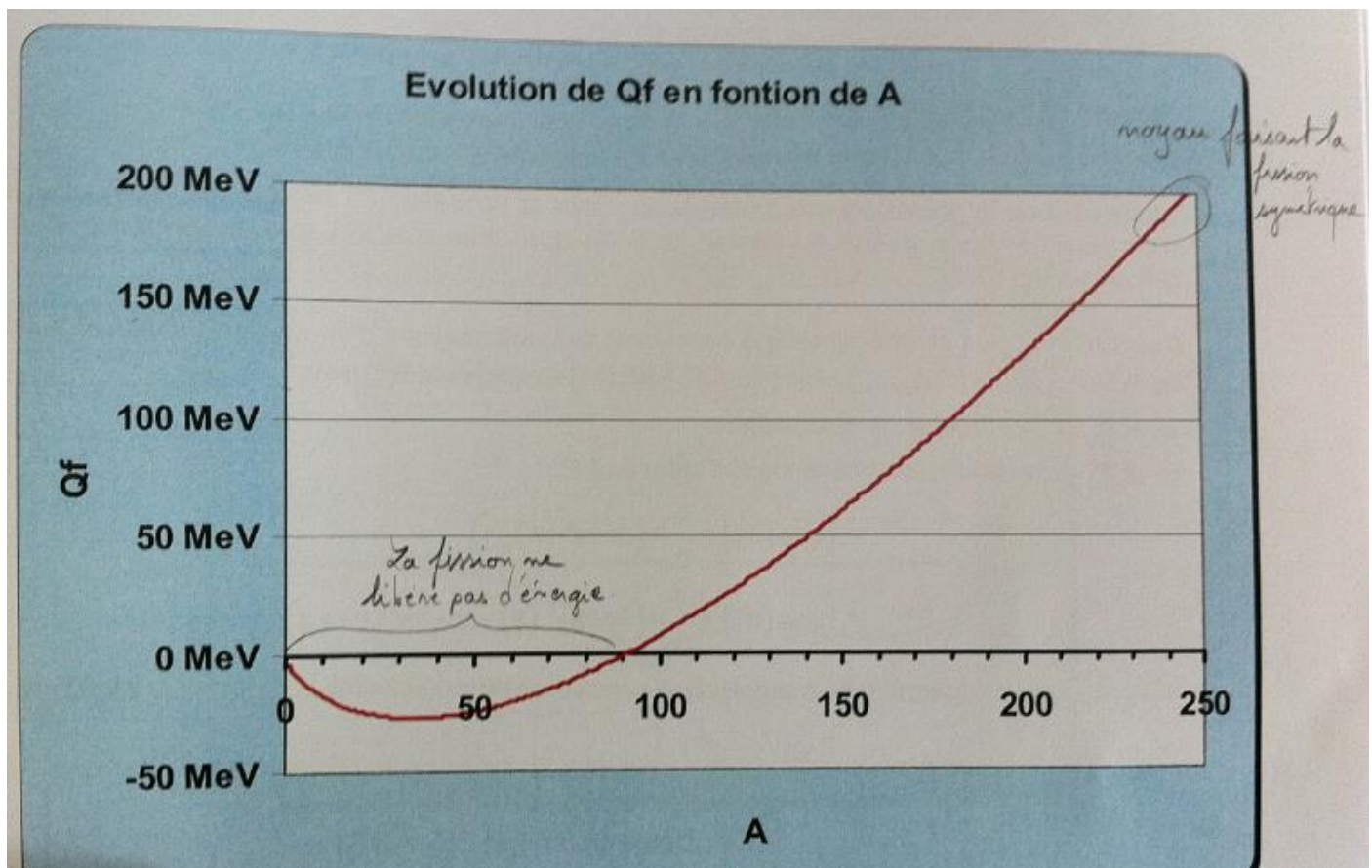
$$Q_f = -0,260 \cdot a_s \cdot A^{\frac{2}{3}} + 0,370 \cdot a_c \cdot \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}}$$

Le gain positif provient d'une diminution de la répulsion Coulombienne.
(1 sphère $\rightarrow$ 2 sphères)

avec $a_s = 17,27$ MeV et $a_c = 0,7$ MeV on obtient :

$$Q_f = -4,49 \cdot A^{\frac{2}{3}} + 0,26 \cdot \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}}$$

On peut alors tracer $Q_f = f(A)$

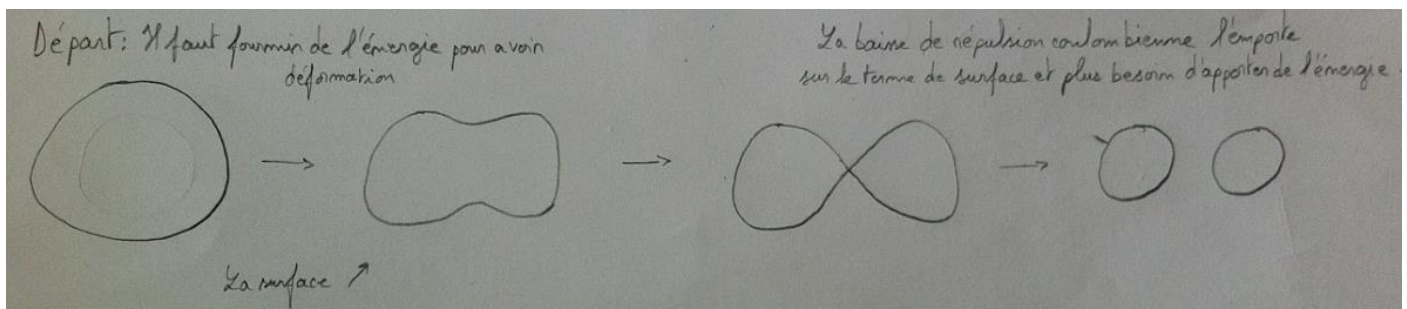


Remarque :

- Les noyaux de nombre de masse < 90 ne peuvent pas se désintégrer spontanément par un processus de fission car le phénomène est endoénergétique.
- Ces calculs montrent que l'énergie libérée par la fission d'un noyau lourd ($A = 240$) est de l'ordre de **200 MeV** alors qu'en chimie les réactions libèrent des énergies de **l'ordre de 10 eV**.

Cependant la condition $A > 90$ ne suffit pas à avoir une réaction de fission spontanée.

Il faut passer par une étape de déformation du noyau, et dans un premier temps cela nécessite un apport d'énergie (car on augmente la surface). Cette même énergie est (pour les noyaux très lourds) très vite compensée par le gain d'énergie du fait de la diminution de la répulsion coulombienne. Et lorsque c'est la répulsion coulombienne qui l'emporte.



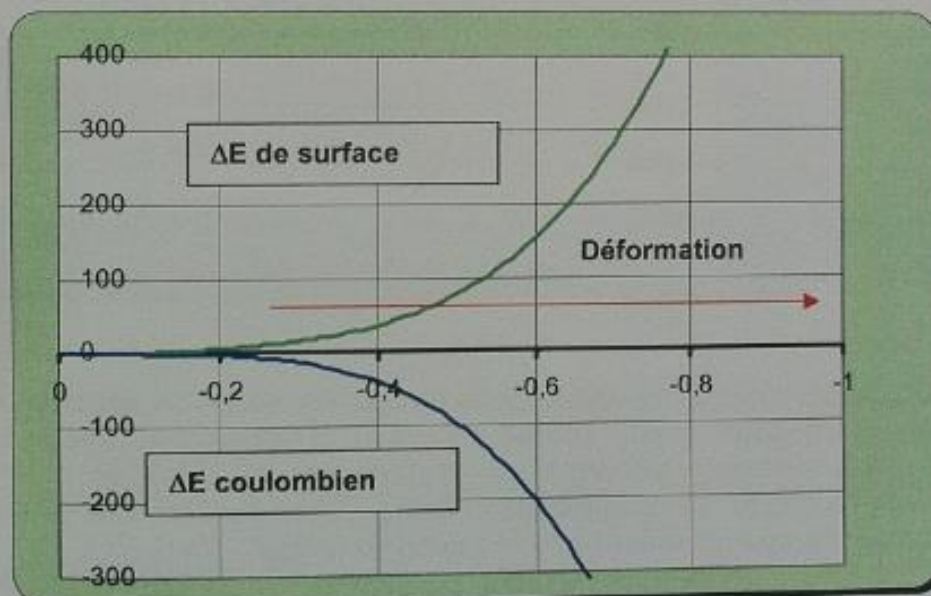
Pour les noyaux très lourds ($A > 330$) à la moindre déformation, l'énergie coulombienne diminue plus vite que ce que l'énergie de surface augmente. Le noyau sphérique est donc dans un équilibre instable, il va donc pouvoir évoluer spontanément et instantanément vers la fission.

En ne considérant que les trois premiers termes du modèle de la goutte liquide (volume, surface, énergie coulombienne) et en postulant que le noyau se déforme à volume constant, alors pour un état de déformation donné du noyau correspond une variation d'énergie ΔE déterminée.

Cette variation d'énergie est la somme de :

ΔE_s : **variation d'énergie de surface**. La surface ne pouvant qu'augmenter à partir d'une sphère, cette variation est toujours positive (i.e. nécessite un apport d'énergie).

ΔE_c : **variation d'énergie coulombienne**. Cette variation ne peut être que négative dans la mesure où elle correspond, à partir d'un état sphérique, à un éloignement moyen des charges (i.e. restitue de l'énergie).



3 La production d'énergie nucléaire

Les réactions nucléaires peuvent dégager de l'énergie. Deux voies sont privilégiées : la fission de noyaux lourds, et la fusion de noyaux légers.

A. La fission nucléaire

« On sait que l'absorption d'un neutron par un noyau d'uranium peut provoquer la rupture de ce dernier avec dégagement d'énergie et émission de nouveaux neutrons en nombre et en moyenne supérieur à l'unité. Parmi les neutrons ainsi émis, un certain nombre peuvent à leur

tour provoquer – sur des noyaux d'uranium – de nouvelles ruptures, et les ruptures de noyaux d'uranium pourront ainsi aller en croissant avec dégagement de quantités extrêmement considérables d'énergie. »

Frédéric Joliot et al., « Dispositif de production d'énergie », Brevet d'invention du 1^{er} mai 1939.



3 Ces barres de contrôle plongent dans le cœur d'un réacteur nucléaire. Leur rôle est d'absorber suffisamment de neutrons pour éviter que la réaction ne s'emballe.

► Exploiter

1. Le texte parle de « rupture » d'un noyau d'uranium. Proposer un autre terme et en donner une définition.
2. a. Écrire l'équation de la réaction subie par un noyau d'uranium 235 « absorbant un neutron », sachant qu'elle produit un noyau de baryum 144 ($^{144}_{56}\text{Ba}$), un noyau de krypton 90 ($^{90}_{36}\text{Kr}$) ainsi que des neutrons.
b. La fission d'un noyau d'uranium 235 dégage une énergie de 200 MeV environ. Calculer l'énergie libérée par 1 g d'uranium 235 (soit $2,562 \cdot 10^{21}$ noyaux).
c. Comparer cette énergie à celle libérée par la combustion d'une tonne de pétrole, soit 1 tep = $4,18 \cdot 10^{10}$ J.
3. a. Pourquoi une réaction où « les ruptures de noyaux d'uranium vont en croissant » est-elle possible ?
b. Comment appelle-t-on une telle réaction ? Expliquer comment la contrôler [doc. 3].

B. La fusion nucléaire

« Albert Einstein avait démontré, via sa formule $E = mc^2$, que la masse peut se transformer en énergie. En 1938, on comprit que la pression au centre du Soleil est si élevée que les noyaux d'hydrogène y sont tassés au point de vaincre la répulsion entre charge électrique du même signe et de fusionner. Les produits finaux de cette réaction sont un peu plus légers que les ingrédients initiaux : la masse manquante est transformée en énergie. Cette réaction exige toutefois des pressions et des températures qui n'existent qu'au cœur des étoiles. Une voie un peu plus facile met en jeu deux isotopes de l'hydrogène. Le combustible est abondant : on trouve du deutérium dans l'eau de mer. Enfin, la fusion ne crée aucun déchet nucléaire. »

D'après M. Moyer, « La fusion nucléaire : une filière d'avenir ? », Pour la Science, juin 2010.

► Exploiter

4. Quel est le principal obstacle à la fusion des noyaux d'hydrogène ?
5. a. Comment varie la masse lors d'une réaction de fusion ?
b. Quel en est l'effet du point de vue énergétique ?
6. Écrire l'équation de la réaction de fusion des noyaux de deutérium avec les noyaux de tritium.
7. En exploitant le doc. 12 p. 162, calculer lors de cette réaction :
a. la variation de masse en unité de masse atomique (notée u : $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) ;
b. l'énergie libérée en joule.

► Conclure l'activité

8. Comparer les deux voies permettant de l'énergie lors de réactions nucléaires.