

LP42 - FUSION, FISSION

26 juin 2020

Aurélien Goerlinger & Yohann Faure

Commentaires du jury

- 2017 : Un exposé purement descriptif des réactions de fusion et de fission nucléaires est insuffisant
- 2014 : Cette leçon peut être abordée de manières diverses, mais on peut raisonnablement s'attendre à ce que les candidats aient quelques notions sur la structure et la cohésion nucléaire, les formes de radioactivité et les interactions mises en jeu, les réacteurs nucléaires, le confinement magnétique.
- 2013 : [À propos du nouveau titre] Le nouvel intitulé de cette leçon doit inviter les candidats à réfléchir à la physique sous-jacente aux phénomènes de fusion et fission nucléaires.
Jusqu'en 2013, le titre était : Le noyau : stabilité, énergie. Applications.
- 2012 : Le modèle de la goutte ne peut être simplement énoncé. Le candidat qui ferait le choix d'en parler doit commenter la physique inhérente à chaque terme du modèle. Cette leçon ne peut se réduire à un catalogue d'informations diverses et variées, mais les candidats doivent dégager du temps pour les applications.
- 2009, 2010 : L'énergie est un point central et les applications ne doivent pas être traitées trop rapidement en fin de leçon.
- 2008 : Les applications doivent être envisagées. Parmi elles, figure l'énergie nucléaire, qu'il paraît difficile de ne pas aborder.

Niveau : L3

Bibliographie

- ♣ *Physique-Chimie 1ereS*, **Prevost, Nathan, collection Sirius** → Pour l'intro
- ♣ *Manuel de Radioactivité*, **Foos** → Pour la goutte liquide
- ♣ *Energie Nucléaire*, **Basdevant, Rich, Spiro** → Pour compléter, et les calculs de MQ
- ♣ *Physique Nucléaire*, **Le Sech, Ngô** → Alternative
- ♣ *Énergie Nucléaire*, **Charles** → Des chiffres et détails techniques.

Prérequis

- Tension de surface
- Effet tunnel
- Classification périodique
- $E = mc^2$
- Mécanique
- Radioactivité

Expériences



Table des matières

1	Retour sur la radioactivité	3
1.1	Vocabulaire	3
1.2	Émission bêta	4
	1.2.1 Bêta -	4
	1.2.2 Bêta +	4
1.3	Émission Alpha	5
1.4	Loi de vitesse	5
2	Structure du noyau	6
2.1	Composition du noyau	6
2.2	Énergie de liaison, défaut de masse	6
2.3	Modèle de la goutte liquide (Bohr, 1935)	8
3	Les mécanismes de la fission	10
3.1	Énergie et produit de fission	11
3.2	Mécanisme de la fission	12
3.3	Centrale nucléaire à fission	13
4	Les mécanismes de la fusion	14
4.1	Principe et énergie de fusion	14
4.2	Difficultés	15
4.3	Critère de Lawson (1957)	15
4.4	La nucléosynthèse stellaire	16

Introduction

Accroche : Aujourd'hui, nous allons fabriquer un réacteur nucléaire.

Cette année la Chine a annoncé la création d'un réacteur nucléaire expérimental nommé Tokamak, permettant d'atteindre des températures extrêmes similaires à celles à la surface du soleil (15 000 000°C au centre, 8000 en surface pour rappel), dans le but d'étudier la fusion en laboratoire.

J'ai dit le mot *nucléaire*, mais qu'est-ce que celui-ci signifie ? Une réaction nucléaire est une réaction qui se passe non pas au niveau de des électrons d'un atome, comme une réaction chimique, mais au niveau de son noyau. Ces réactions se font généralement toujours dans le sens de la stabilité, c'est à dire que la réaction va former des produits plus stables que les réactifs.

On a déjà vu la radioactivité, qui explique certaines transformations nucléaires, mais ce que l'on va voir aujourd'hui est plus profond.

But : voir les concepts, comprendre les applications

1 Retour sur la radioactivité

1.1 Vocabulaire

Transformation isobarique

Une transformation isobarique correspond à la transmutation d'un noyau avec la conservation du nombre de masse A . La transformation isobarique est le cas le plus courant de radioactivité bêta et gamma. Les seules transmutations non isobariques s'effectuent par groupe de 4 nucléons ; c'est le rayonnement alpha. Un noyau ne peut perdre des nucléons que par groupe de quatre en émettant une particule alpha donc un noyau d'hélium.

Nucléide

Un nucléide est un type d'atome (ou de noyau atomique) caractérisé par le nombre de protons et de neutrons qu'il contient ainsi que par l'état d'énergie nucléaire dans lequel il se trouve.

Dans la graphie abrégée d'un nucléide, on place le nombre de nucléons en haut à gauche du symbole de l'élément chimique, et le numéro atomique (nombre de protons) en bas à gauche, par exemple : ${}^{12}_6\text{C}$

Relations entre nucléides

- **Isotope** : Les nucléides d'un élément chimique particulier avec le même numéro atomique mais des nombres de neutrons différents s'appellent isotopes de cet élément. Exemple : ${}^{12}_6\text{C}$ et ${}^{14}_6\text{C}$ sont deux isotopes du carbone. L'ensemble des isotopes forment un élément chimique.
- **Isobare** : Des nucléides de nombre de masse égal mais de numéro atomique différent, autrement dit même nombre de nucléons mais de nombre de protons différents, s'appellent des isobares. Exemple : ${}^{17}_7\text{N}$ et ${}^{17}_8\text{O}$ sont isobares.
- **Isomères** : Les isomères nucléaires présentent la différence entre un isotope et un nucléide. Ils ont le même nombre de protons et de neutrons mais des énergies nucléaires différentes, et ont une demi-vie significativement longue (par exemple les deux états de ${}^{99}\text{Tc}$).
- **Isotones** : Même nombre de neutrons. Exemple : ${}^{13}_6\text{C}$ et ${}^{14}_7\text{N}$ sont isotones.

1.2 Émission bêta

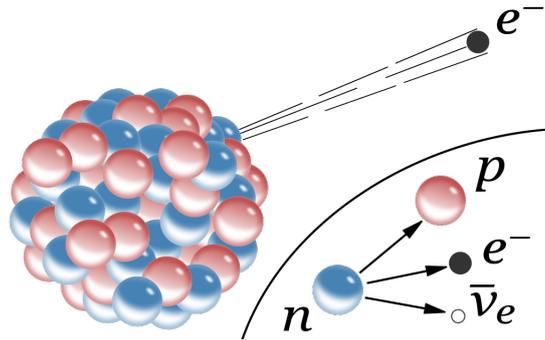
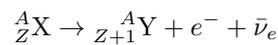


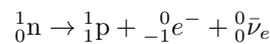
FIGURE 1 – Schématisation d'une émission β^- .

1.2.1 Bêta -

La radioactivité bêta moins affecte les nucléides X présentant un excès de neutrons. Elle se manifeste lors de réactions isobariques par la transformation dans le noyau d'un neutron en proton, le phénomène s'accompagnant de l'émission d'un électron (ou particule bêta moins) et d'un antineutrino électronique $\bar{\nu}_e$:



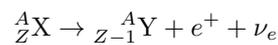
À l'intérieur du noyau, un neutron se transforme (la radioactivité β^- concerne en effet les noyaux trop riches en neutrons) :



Cette transformation est **Isobarique**.

1.2.2 Bêta +

La radioactivité bêta plus ne concerne que les nucléides présentant un excès de protons. Elle se manifeste par la transformation dans le noyau d'un proton en neutron, le phénomène s'accompagnant de l'émission d'un positron (encore appelé particule bêta plus = anti-électron) et d'un neutrino électronique ν_e :



L'émission d'un rayonnement β^+ par un noyau n'est possible que si l'énergie disponible est supérieure à 1.022 MeV. En effet le bilan énergétique, qui est la différence entre l'énergie initiale et l'énergie finale donne

$$Q_{\beta^+} = (m(X) - m(Y) - m_e - m_\nu)c^2$$

où $m_\nu c^2$ est négligeable, puisque de l'ordre de quelques eV.

$$Q_{\beta^+} = \mu(X)c^2 - Zm_e c^2 - (\mu(Y)c^2 - (Z-1)m_e c^2) - m_e c^2$$

avec $\mu(X)c^2$ et $\mu(Y)c^2$ les énergies des atomes X et Y.

$$Q_{\beta^+} = (\mu(X) - \mu(Y) - 2m_e)c^2$$

La réaction n'est donc possible que si $Q_{\beta+} > 0$ c'est-à-dire que si $(\mu(X) - \mu(Y))c^2 > 2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$.

Cette transformation est **Isobarique**.

1.3 Émission Alpha

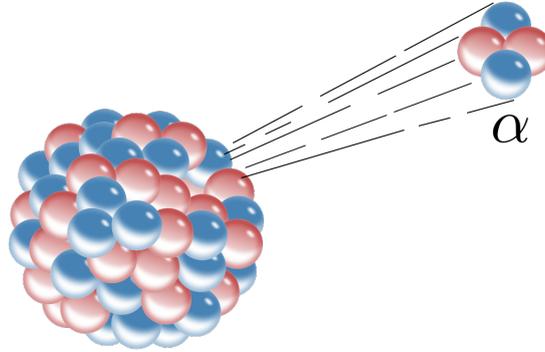
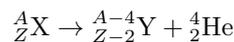


FIGURE 2 – Schéma d'une émission α .

On parle de radioactivité alpha pour désigner l'émission d'un noyau d'hélium :



Ces hélium, encore appelés particules alpha, ont une charge $2e$, et une masse de 4,001 505 8 unités de masse atomique.

1.4 Loi de vitesse

Un radioisotope quelconque a autant de chances de se désintégrer à un moment donné qu'un autre radioisotope de la même espèce, et la désintégration ne dépend pas des conditions physico-chimiques dans lesquelles le nucléide se trouve. En d'autres termes, la loi de désintégration radioactive est une loi statistique.

Soit $N(t)$ le nombre de radionucléides d'une espèce donnée présents dans un échantillon à un instant t quelconque. Comme la probabilité de désintégration d'un quelconque de ces radionucléides ne dépend pas de la présence des autres espèces de radionucléides ni du milieu environnant, le nombre total de désintégrations dN pendant un intervalle de temps dt est proportionnel au nombre N de radionucléides de même espèce présents et à la durée dt de cet intervalle :

$$dN = -\lambda N dt$$

Le signe moins vient de ce que N diminue au cours du temps, la constante λ (caractéristique du radionucléide étudié) étant positive. En intégrant l'équation différentielle précédente, on trouve la loi de décroissance exponentielle du nombre $N(t)$ de radionucléides présents dans le corps à un instant t quelconque, en appelant N_0 le nombre des radionucléides présents à l'instant $t = 0$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

La demi-vie $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la moitié d'un échantillon radioactif est désintégrée, le nombre de noyaux fils atteignant la moitié du nombre de noyaux pères. On montre que :

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

2 Structure du noyau



2.1 Composition du noyau

Le noyau est composé de nucléons, les neutrons et les protons. Eux même sont composés de particules quantiques fondamentales, mais on ne parlera pas de cela aujourd'hui. Les deux ont une masse très proche de 1.6×10^{-27} kg. Le proton possède de plus une charge $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C. De fait de cette charge, il y a répulsion entre les protons, ce qui déstabilise l'édifice.

OdG : le rayon du noyau est de l'ordre du femtometre, soit 10^5 fois plus petit que l'atome lui-même, par conséquent la répulsion électrostatique à ce niveau vaut $F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \simeq 230$ N. C'est monstrueux par rapport à la masse de l'édifice. L'attraction gravitationnelle en comparaison ne fait que 2×10^{-34} N. Elle ne suffit donc pas à compenser la répulsion électrostatique. Pourtant je suis la preuve vivante que les noyaux sont stables¹. Il existe donc une ou plusieurs interaction(s) qui stabilisent le noyau.

La force qui stabilise le noyau sera nommée **interaction forte**. Elle est l'une des trois interactions du modèle standard, avec l'électromagnétisme et l'interaction faible².

Cette interaction affecte les quarks et particules constituées de quarks, donc pas les leptons. Elle est portée (et affecte) par les gluons. Sa portée est de l'ordre de la taille du noyau (10^{-15} m), et c'est la plus forte des interactions fondamentales à cette échelle.

2.2 Énergie de liaison, défaut de masse

L'énergie de liaison, c'est ce qui maintient en place les nucléons dans le noyau, ou plutôt c'est l'énergie à fournir pour les séparer.

On considère la réaction fictive ${}^A_Z\text{X} \rightarrow Z {}^1_1\text{p} + (A - Z) {}^1_0\text{n}$, avec tous les composants immobiles. Faisons sur celle-ci un bilan de masse. On considère tous les composés au repos, donc $E = mc^2$. En notant $B(A, Z)$ l'énergie de liaison, on a

$$m_X c^2 + B(A, Z) = Z m_p c^2 + (A - Z) m_n c^2$$

Ainsi on peut écrire directement l'énergie de liaison comme $B(A, Z) = (Z m_p + (A - Z) m_n - m_X) c^2 = \Delta m c^2$.

Δm est le défaut de masse de la réaction. Dans le cas d'un noyau stable, l'énergie de liaison est positive, et le défaut de masse aussi, c'est à dire que l'atome est plus léger que ses constituants séparés.

1. Des noyaux qui étudient d'autres noyaux, l'humanité est bien étrange.
2. Et non la gravité n'est pas là, on cherche toujours le graviton et l'unification.

Exemple de calcul

✎ Prix Nobel de Chimie 1934, le deutérium ${}^2_1\text{H}$ est un isotope naturel de l'hydrogène. On a, avec $u = \frac{m_{12\text{C}}}{12}$

$$\begin{cases} m_p = 1.0072765u \\ m_n = 1.0086649u \\ m_{{}^2_1\text{H}} = 2.013553u \end{cases} \quad (1)$$

Alors on fait le calcul et on trouve $B(2, 1) = 2.224 \text{ MeV}$.

Pour ${}^{238}\text{U}$ on trouve 1801,2 MeV, et 500 MeV pour ${}^{56}\text{Fe}$.

Cette énergie, comparée aux quelques eV des électrons qui gravitent autour du noyau, est colossale. C'est pourquoi on négligera toujours les électrons dans nos calculs.

Élément chimique	Énergie de liaison B (MeV)	Énergie de liaison par nucléon B/A (MeV)
Deutérium ${}^2_1\text{D}$	2,224	1,112
Oxygène ${}^{16}_8\text{O}$	127,62	7,98
Fer ${}^{56}_{26}\text{Fe}$	499,6	8,79
Uranium ${}^{238}_{92}\text{U}$	1783,2	7,59

B augmente toujours avec A , il est donc difficile³ de comparer la stabilité de deux noyaux distincts. On utilise alors usuellement l'énergie de liaison par nucléon pour faire cela.

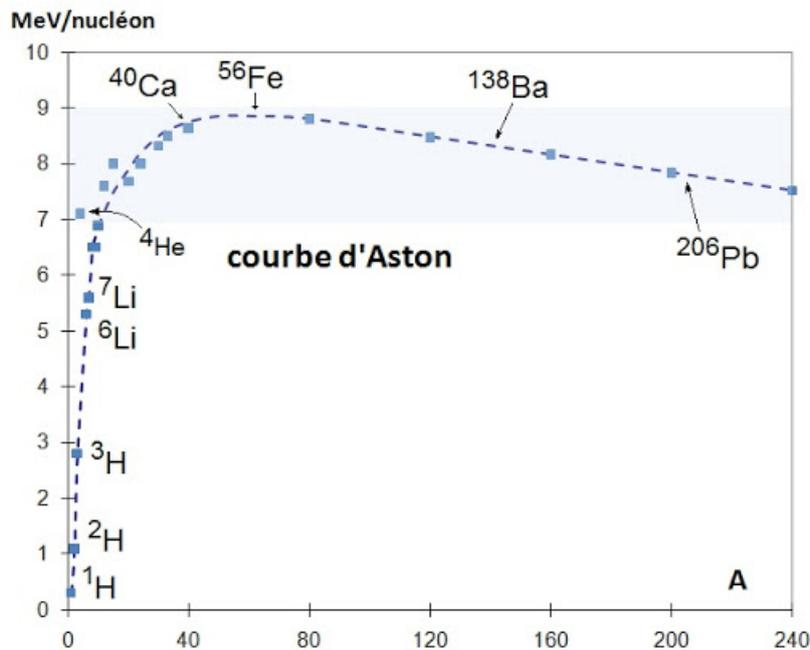


FIGURE 3 – La courbe d'Aston représente l'évolution de l'énergie de liaison par nucléons, en fonction du nombre de ces derniers.

3. et stupide.

La remarque à faire sur cette courbe, c'est que les atomes de droite vont avoir tendance à se séparer en petits bouts pour redescendre au plus stable : le Fer 56. Inversement, les atomes de gauche peuvent fusionner pour se rapprocher du Fer, mais on en parlera plus tard.

Il existe des anomalies pour $Z, N \in \{2, 8, 20, 28, 50, 82, 126\}$, où la stabilité semble anormalement haute (pour ${}^4\text{He}$, il y a $Z = 2$ et $N = 2$, d'où une très grande stabilité relative!). Ces nombres sont appelés nombres magiques et leur origine est quantique (comparable à la stabilité des atomes lorsqu'une couche électronique est remplie)⁴.

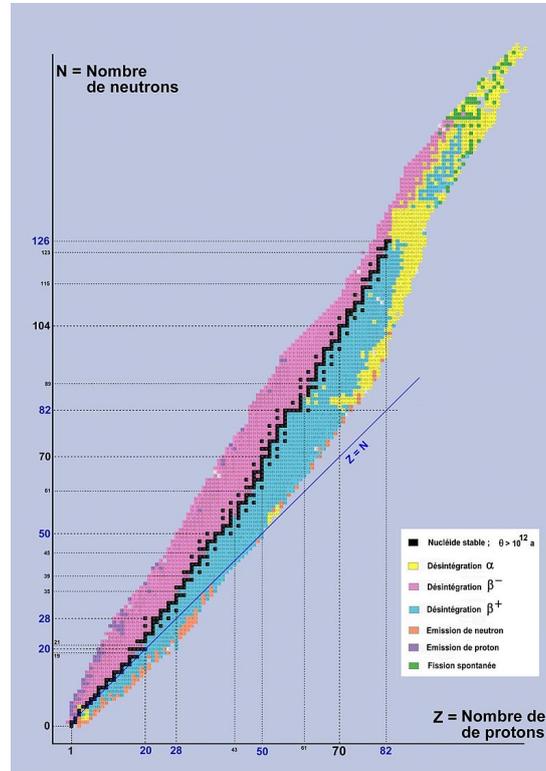


FIGURE 4 – Une représentation des atomes stables dans une *vallée de stabilité*.

Comment peut-on expliquer de manière théorique et prédictive cette courbe ?

2.3 Modèle de la goutte liquide (Bohr, 1935)

➤ Foos p92 puis Basdevant p66 et Le Sech p27

Pour calculer cette énergie, on simplifie le problème en faisant certaines hypothèses :

- Le noyau est une goutte liquide, incompressible, sphérique.
- La force nucléaire est à courte portée et est indépendante de la nature du nucléon
- La densité volumique de charge et la densité de nucléons sont homogènes dans tout le noyau

On a alors les résultats suivants :

- **Interaction forte :** C'est une interaction à faible portée donc seule l'interaction avec les proches voisins compte, plus on augmente le nombre de nucléons plus cette énergie augmente. C'est une énergie volumique, on peut dire que c'est l'équivalent des forces de VdW ou hydrogène dans un liquide. On l'écrit donc $E_v = a_v R^3$.
- Par analogie avec les liquides, on sait que ce terme volumique se traduit en surface par un défaut d'interaction et donc un terme de tension superficielle : créer une surface coûte de l'énergie. On a un terme $E_s = -a_s R^2$

4. Voir ➤ Le Sech, Ngô, p.23

- On a un liquide chargé, il faut donc prendre en compte la répulsion électrostatique. Un proton subit la répulsion de $(Z - 1)$ autres, à une distance de l'ordre de R en moyenne, soit une énergie de répulsion $\frac{e(Z - 1)}{4\pi\epsilon_0 R}$ et il y a Z protons donc $E_c = -a_c \frac{Z^2}{R}$ en considérant $Z(Z - 1) = Z^2$.
- On a considéré un goutte sphérique donc $A = \int_0^R \rho 2\pi r^2 dr \propto R^3$

La formule semi-empirique de masse est donc finalement :

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

Détaillons chacun des termes :

- $a_v A$: terme de **volume** car $A \propto V$. Il provient de l'interaction nucléaire forte. Il est de l'ordre de grandeur de l'énergie de liaison d'un nucléon entouré de quelques voisins (40 MeV)
- $-a_s A^{2/3}$: terme de **surface**, analogue à une tension de surface. Il provient aussi de l'interaction forte, ou plutôt de son manque. C'est une correction du premier terme pour prendre les effets de surface en compte. Il tend à minimiser la surface du noyau.
- $-a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$: terme **coulombien**, il traduit l'interaction électrostatique entre les protons.
- $-a_a \frac{(N - Z)^2}{A}$: terme d'asymétrie. Il favorise les noyaux symétriques ($Z=N$), cela peut se comprendre par le fait qu'il faille apporter de l'énergie à un noyau symétrique pour en obtenir un asymétrique (♣ Foos p94) ou que quantiquement, c'est une question de recouvrement entre protons et neutrons avec le principe d'exclusion de Pauli (♣ Charles p.23). *Plus un noyau est gros, moins lever laisser l'asymétrie coûte cher.* C'est un terme quantique ajouté par Weisacker.
- Le dernier terme est un terme d'**appariement**. L'énergie du noyau est plus faible lorsque les nucléons sont appariés par couples de spin total nul.

$$\delta(A) = \begin{cases} -\frac{a_p}{A^{1/3}} & \text{pour un couple } (N, Z) \text{ impair/impair} \\ +\frac{a_p}{A^{1/3}} & \text{pour un couple pair/pair} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

Coefficient	Valeur (MeV)
a_V	15,75
a_S	17,8
a_C	0,711
a_A	23,7
$a_P (N \text{ pair} + Z \text{ pair})$	$\frac{11,18}{A^{1/2}}$
$a_P (N \text{ pair} + Z \text{ impair ou } N \text{ impair} + Z \text{ pair})$	0
$a_P (N \text{ impair} + Z \text{ impair})$	$-\frac{11,18}{A^{1/2}}$

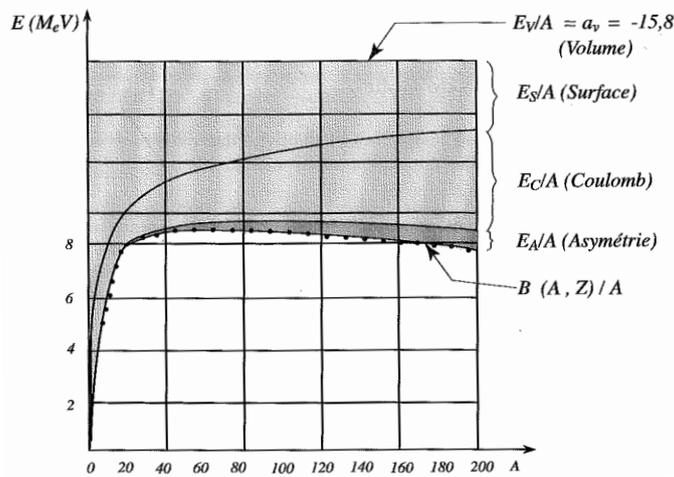


FIGURE 5 – Les coefficients et contributions de chaque partie du modèle.

Défauts du modèle

La formule est semi-empirique car les dépendances en (A,Z) sont obtenues par modèle physique et on obtient les coefficients en faisant une régression sur la courbe d'Ashton.

OdG : (Ashton Basdevant p67).

On utilise de plus pas moins de 5 paramètres, et avec 8 on peut dessiner un éléphant très réaliste.

Ce modèle ne donne aucune explication aux nombres magiques, il nous faudra expliquer cela par le modèle en couches.

Ce modèle donne bien la forme de la courbe, et on obtient bien que le noyau le plus stable est celui du fer. Cependant, il faut être conscient.e des limites du modèle qui ne prédit pas par exemple les nombres magiques pour lesquels il faut faire un modèle quantifié de couches "nucléoniques". Cependant, on voit que l'on peut arriver au fer par deux chemins : la fusion et la fission et récupérer de l'énergie. Nous allons regarder tout d'abord celui qui est utilisé dans nos centrales : la fission.



3 Les mécanismes de la fission

Ashton Basdevant p. 185

La fission est la brisure spontanée ou provoquée d'un noyau en plusieurs noyaux fils plus stables d'un point de vue énergétique et étant composés d'un nombre plus faible de nucléons.



où on note Q_{fission} l'énergie libérée sous forme d'énergie cinétique des produits lors de la réaction. Puisque cette réaction fait intervenir des noyaux lourds comportant beaucoup de nucléons, elle a lieu pour les atomes à droite du fer sur la courbe d'Aston. Elle apparaît donc chez les atomes pour lesquels $A > 100$ et elle prédomine chez ceux pour lesquels $A > 270$.

3.1 Énergie et produit de fission

Tâchons en premier lieu d'évaluer cette énergie. Supposons que l'on ait une fission symétrique, à savoir



Prenons $A = 240$ (on n'est pas loin de l'uranium). L'énergie de fission vaut alors :

$$Q_{\text{fission}} = 2 \times B\left(\frac{A}{2}, Z_1\right) - B(A, Z) \quad (6)$$

La modèle d'Aston donne $\frac{B}{A} = 7.6$ MeV quand $A = 240$ et $\frac{B}{A} = 8.5$ MeV pour $A = 120$. On a donc

$$Q_{\text{fission}} = 2 \times 120 \times 8.5 - 240 \times 7.6 = 216 \text{ MeV}$$

En réalité, un certain nombre de neutrons sont produits lors de la réaction car l'excès de neutrons croît avec A . Notons ν le nombre de neutrons. En sachant que l'énergie de liaison d'un neutron est nulle, on a

$$Q_{\text{fission}} = 220 \text{ MeV} - \nu \times 8.5 \text{ MeV}$$

Pour $\nu = 2.5$, on obtient $Q_{\text{fission}} = 200 \text{ MeV}$ ⁵.

Application

Prenons 1 gramme de ${}^{235}\text{U}$. L'énergie libérée par la fission de ce gramme vaut alors

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \text{nombre de noyaux d'uranium 235 dans } 1 \text{ g} \times 200 \text{ MeV} \\ &= \frac{m}{M} \mathcal{N}_A \times 200 \text{ MeV} \\ &= 81 \text{ GJ} \end{aligned}$$

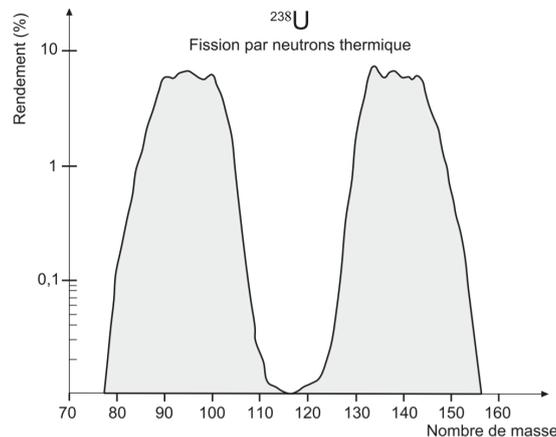
Sachant que la combustion d'1 kg de pétrole libère 42 MJ, on peut donc dire que

$$\boxed{1 \text{ g de } {}^{235}\text{U} \iff 2 \text{ tonnes de pétrole}}$$

Jusque là, on a traité le cas des réactions symétriques mais en réalité la réaction est asymétrique dans le cas général :



Les fragments tendent à se rapprocher des noyaux correspondant aux nombres magiques.



5. OdG à retenir.

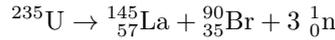
Découverte de la fission (🔗 Ngô p71)

La découverte de la fission nucléaire en 1939 fut accidentelle. Hahn et Strassmann tentaient de créer des noyaux plus lourds que l'uranium en le bombardant de neutrons et observaient à l'inverse l'apparition d'éléments plus légers. Le phénomène fut expliqué la même année par Meitner et Frisch avec le modèle de la goutte liquide.

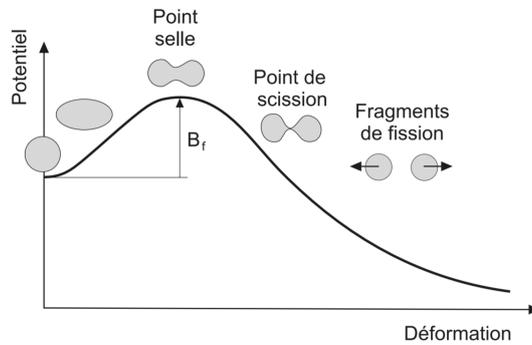
3.2 Mécanisme de la fission

🔗 Basdevant p190

Reprenons la réaction



Pour modéliser cette réaction, on part du noyau père ${}^{235}\text{U}$ qui est de forme sphérique. Au cours de la réaction, la *goutte* se déforme pour donner une ellipsoïde, cette déformation augmentant l'énergie de tension superficielle et diminuant l'énergie de répulsion coulombienne. Quand on trace l'énergie potentielle en fonction du rayon de la goutte que varie entre r_0 et l'infini, on obtient :



On voit que l'énergie potentielle passe par un maximum : il faut donc franchir une barrière énergétique pour que la réaction ait lieu. On appelle cette barrière la **barrière de fission** et elle vaut environ 7 MeV.

Maintenant, essayons de voir comment varie l'énergie du système avec la déformation. Pour cela, prenons un ellipsoïde de demi-grand axe selon une direction a et de demi-petit axe selon les 2 autres directions b . On introduit la paramètre de déformation ϵ en écrivant :

$$\begin{cases} a = R(1 + \epsilon) \\ b = \frac{R}{\sqrt{1 + \epsilon}} \end{cases} \quad (8)$$

Remarquons que le volume est conservé : $V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi ab^2$. Au premier ordre, on a

$$\begin{aligned} E_c &= a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{1}{5}\epsilon^2\right) \\ E_s &= a_s A^{2/3} \left(1 + \frac{2}{5}\epsilon^2\right) \end{aligned} \quad (9)$$

La changement total d'énergie vaut donc

$$\Delta E = \frac{\epsilon^2}{5} \left(2a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}\right) \quad (10)$$

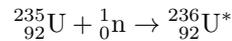
Pour que la déformation soit possible et que le noyau soit instable vis-à-vis de la fission, il faut que $\Delta E < 0$ donc il faut que

$$\frac{Z^2}{A} \geq \frac{2a_c}{a_s} \simeq 49$$

On appelle $\frac{Z^2}{A}$ le **paramètre de fissibilité** et on considère que la fission est spontanée si $\frac{Z^2}{A} \geq 50$.

On observe donc 2 types de fission :

- **la fission spontanée** : la barrière énergétique est franchie par effet tunnel, mais les masses en jeu sont relativement élevées et font que la probabilité de franchissement est faible ($\propto e^{-\sqrt{m}}$), ce qui implique une demi-vie très longue de l'ordre de 10^{16} années voire plus.
- **la fission induite** : de l'énergie est fournie au noyau par interaction avec un neutron. Par exemple,



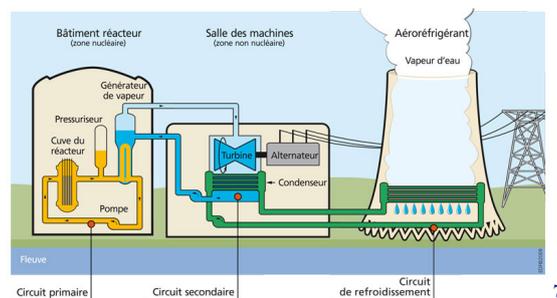
Notons ici que ${}_{92}^{235}\text{U}$ est le seul isotope d'uranium fissible présent à l'état naturel. En le neutronant, on en fait un noyau instable qui va faire une fission quasi immédiate.

3.3 Centrale nucléaire à fission

Les centrales nucléaires ont représenté en 2016 71.6% de la production électrique annuelle en France⁶ et sont donc un moyen de production d'énergie majeur.

Le premier réacteur à fission nucléaire fut construit aux USA en 1942 par Fermi. Il s'agit d'une machine thermique dont la source de chaleur provient des réactions nucléaires. Dans l'industrie, on utilise de l'uranium 235 enrichi parce qu'il résiste à la chaleur (il fond à 2800°C) et parce qu'il est capable d'absorber un neutron dont la vitesse, liée à l'agitation thermique du milieu, est de l'ordre de 2 km/s. L'uranium 235 est d'ailleurs le noyau le plus lourd que l'on puisse trouver à l'état naturel.

Le principe de la réaction de fission est celui d'une réaction en chaîne : on envoie un neutron à 20000 km/s sur un noyau d'uranium 235 qui va alors l'absorber et devenir un noyau d'uranium 236. Ce noyau va alors se fissionner et libérer en moyenne 2.4 neutrons qui seront à leur tour absorbés par des noyaux d'uranium 235 et ainsi de suite... Les neutrons cèdent de l'énergie au milieu par frottements et cette énergie est utilisée comme source chaude dans la machine thermique.



Cependant, tous les neutrons ne restent pas forcément dans le milieu et tous les neutrons ne sont pas forcément absorbés par des noyaux qui fissionnent. Ainsi, suivant le nombre de neutrons qui vont effectivement contribuer à maintenir la réaction de fission, la réaction peut s'arrêter, rester stationnaire ou bien s'emballer. On appelle alors **coefficient de multiplication neutronique** le coefficient

$$k = \frac{\text{nombre de neutrons effectifs à l'étape } n + 1}{\text{nombre de neutrons effectifs à l'étape } n}$$

On a alors :

- si $k > 1$: on est en régime sur-critique et mieux vaut ne pas rester dans le coin ;
- si $k = 1$: on est en régime critique, qui est le régime dans lequel sont maintenues les centrales ;
- si $k < 1$: on est en régime sous-critique, la centrale est à l'arrêt.

6. <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-nucleaire-en-chiffres>

7. https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France/Pages/1-reacteurs-nucleaires-France-Fonctionnement.aspx

Pour ralentir les neutrons afin de leur permettre de réaliser la réaction de fission, on utilise de l'eau. Cependant, l'eau est portée à plus de 300°C donc elle est maintenue à 150 bar pour rester liquide.

La réaction de fission nucléaire n'est pas sans problèmes :

- les produits sont radioactifs et non recyclables (en 2006, la France a produit 54 kg de déchets pour 450 TWh de puissance électrique générée).
- le réchauffement de l'eau peut poser un problème pour l'écosystème autour de la centrale (pour cela, on contrôle la puissance, cf \clubsuit Ngô p206).
- le poison neutronique est également un problème environnemental.

4 Les mécanismes de la fusion

4.1 Principe et énergie de fusion

La fusion est le procédé inverse de la fission mais pour des atomes légers puisqu'elle consiste à fusionner (Captain Obvious, le retour) deux noyaux légers pour former un noyau plus lourd et plus stable tout en libérant de l'énergie. Elle a lieu pour les atomes à gauche du fer sur la courbe d'Aston. On peut donner comme exemple :



où ${}^2_1\text{d}$ est un isotope de l'hydrogène appelée deutérium tandis que ${}^3_1\text{t}$ est un autre isotope de l'hydrogène appelé tritium. Pour le dernier exemple, l'énergie libérée est de 17.5 MeV, ce qui correspond à 3.5 MeV/nucléon. Pour comparaison, l'énergie libérée par la fission est de 0.8 MeV/nucléon. **L'énergie libérée par nucléon est donc plus importante par la fusion et que par la fission.** Ce la se traduit par une pente plus élevée sur la courbe d'Aston pour la fusion que pour la fission.

Application

Pour 1 g de mélange $\{{}^2_1\text{d} + {}^3_1\text{t}\}$, l'énergie libérée par fusion est :

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \frac{m}{M_d + M_t} \mathcal{N}_A \times 17.5 \text{ MeV} \\ &= 340 \text{ GJ} \end{aligned}$$

Sachant que la combustion d'1 kg de pétrole libère 42 MJ, on peut donc dire que

$$\boxed{1 \text{ g de mélange } \{{}^2_1\text{d} + {}^3_1\text{t}\} \iff 8 \text{ tonnes de pétrole}}$$

L'intérêt de la fusion est multiple :

- on ne produit pas de déchets radioactifs (en réalité c'est plus compliqué ça).
- on peut utiliser le deutérium stocké dans l'eau de mer (1 g de deutérium pour 300 L d'eau de mer), ce qui représente un approvisionnement pour 1 milliard d'années.
- contrairement à la fission, une réaction de fusion nucléaire ne peut pas s'emballer.

4.2 Difficultés

Sur le papier, la fusion c'est génial et on se demande pourquoi on utilise encore la fission pour produire de l'énergie. Seulement voilà, c'est pas si simple que ça de faire fusionner deux atomes car il faut vaincre la répulsion coulombienne et les rapprocher suffisamment jusqu'à une distance inférieure à 10 fm pour que l'interaction forte attractive puisse finalement surpasser cette répulsion. Il s'agit donc de passer une barrière de potentiel par effet Tunnel donc la probabilité de transmission vaut

$$T \simeq \exp\left(-2 \int \frac{\sqrt{2m(V-E)}}{\hbar} dx\right)$$

Plus les noyaux sont chargés, plus la barrière est haute et donc plus T diminue. À l'inverse, plus l'énergie des noyaux est élevée, plus T augmente. Par exemple, pour un mélange $\{^2_1\text{d} + ^3_1\text{t}\}$, on a

$$\begin{cases} E = 1 \text{ keV} \Rightarrow T = 10^{-13} \\ E = 10 \text{ keV} \Rightarrow T = 10^{-3} \end{cases}$$

Pour atteindre cette énergie, il faut chauffer. Sachant que $T = \frac{E}{k_B}$, on trouve une température $T = 115 \times 10^6 \text{ K}$ pour $E = 10 \text{ keV}$. Autant dire qu'à cette température, on est chaud patate et que la matière est sous forme de plasma. Sachant que le taux de réaction (le nombre de réactions par seconde) et donc l'énergie dégagée sont proportionnels à la densité du mélange $\{^2_1\text{d} + ^3_1\text{t}\}$, il faut donc **confiner le plasma**. Sur Terre, on espère le faire avec des champs magnétiques et des lasers tandis que dans les étoiles c'est la gravitation qui s'en charge.

4.3 Critère de Lawson (1957)

✎ Basdevant p239

Face à toutes ces difficultés, Lawson proposa en 1957 un critère de rentabilité de la fusion nucléaire en se basant sur l'idée suivante : l'énergie produite doit être au moins égale à l'énergie fournie à l'installation où se déroulent les réactions, *i.e.* il faut dépasser un point qui s'appelle le "break-even".

Pour savoir à quelle condition on dépasse le "break-even", on définit le temps de confinement τ la durée pendant laquelle le plasma après sa création garde sa température T et sa cohésion. Pour chauffer le plasma à la température T , il faut lui fournir l'énergie volumique $3n_i k_B T$ où n_i est la densité volumique des noyaux. On note v la vitesse microscopique des noyaux et σ la section efficace des collisions entre noyaux. Notons η le rendement de conversion de l'énergie nucléaire en énergie électrique. Le réacteur est intéressant si et seulement si $E_{\text{produite}} > E_{\text{perte}}$. Or on a

$$\begin{cases} E_{\text{perte}} = 3n_i k_B T \\ E_{\text{produite}} = \eta \left(\frac{n_i}{2}\right)^2 \langle \sigma v \rangle \tau Q_{\text{fusion}} \end{cases}$$

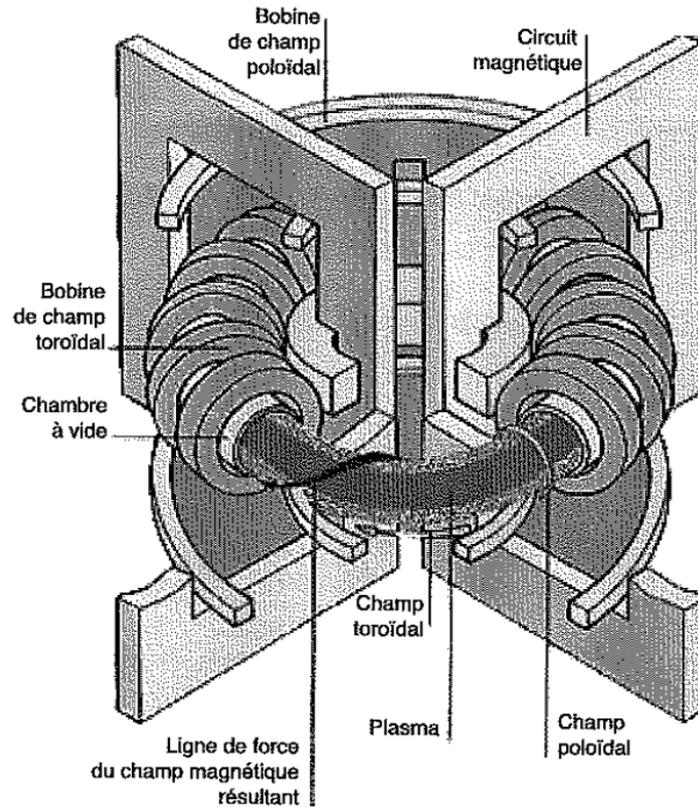
Le **critère de Lawson** impose donc

$$\eta \times n_i \times \tau \geq \frac{12k_B T}{\langle \sigma v \rangle Q_{\text{fusion}}} \simeq 1.5 \times 10^{20} \text{ s m}^{-3} \quad (11)$$

Ce critère implique que pour qu'une réaction de fusion nucléaire soit rentable, il faut

- bien confiner (n_i élevé)
- confiner longtemps (τ élevé)
- convertir efficacement (η élevé)

Le projet ITER opte pour un confinement magnétique et utilise un réacteur de type Tokamak.



On peut aussi confiner de façon inertielle avec des lasers. Dans tous les cas, c'est très gourmand en énergie. Le confinement du plasma est cependant essentiel pour ne pas qu'il entre en contact avec le métal composant le réacteur et donc ne pas qu'il endommage le matériel utilisé (n'importe quel métal fond à cette température).

Ordres de grandeur

Type de réacteur	Confinement	n (en m^{-3})	τ (en s)	$n\tau$ (en $s m^{-3}$)	T (en K)
ITER	Magnétique	10^{20}	1	10^{20}	1.7×10^8
Avec lasers	Inertiel	10^{31}	10^{-11}	10^{20}	10^8
Étoile	Gravitationnel	7×10^{30}	10^{17}	7×10^{47}	2×10^7

4.4 La nucléosynthèse stellaire

↗ Basdevant p. 255

↗ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Nucléosynthèse>

Au sein d'une étoile la pression est suffisante pour que les atomes légers fusionnent naturellement. Les réactions se font en série, dans un ordre assez précis, qui forme la **séquence principale**.

Ainsi lorsqu'elle commence à briller, une étoile est en fait en train de s'effondrer sur elle même sous son propre poids au point de réaliser la réaction de fusion de l'hydrogène. Cette réaction génère de l'énergie sous forme de photons, qui vont effectuer une pression de radiation qui contrebalance la force gravitationnelle ⁸ :



8. https://youtu.be/COQNm_u04

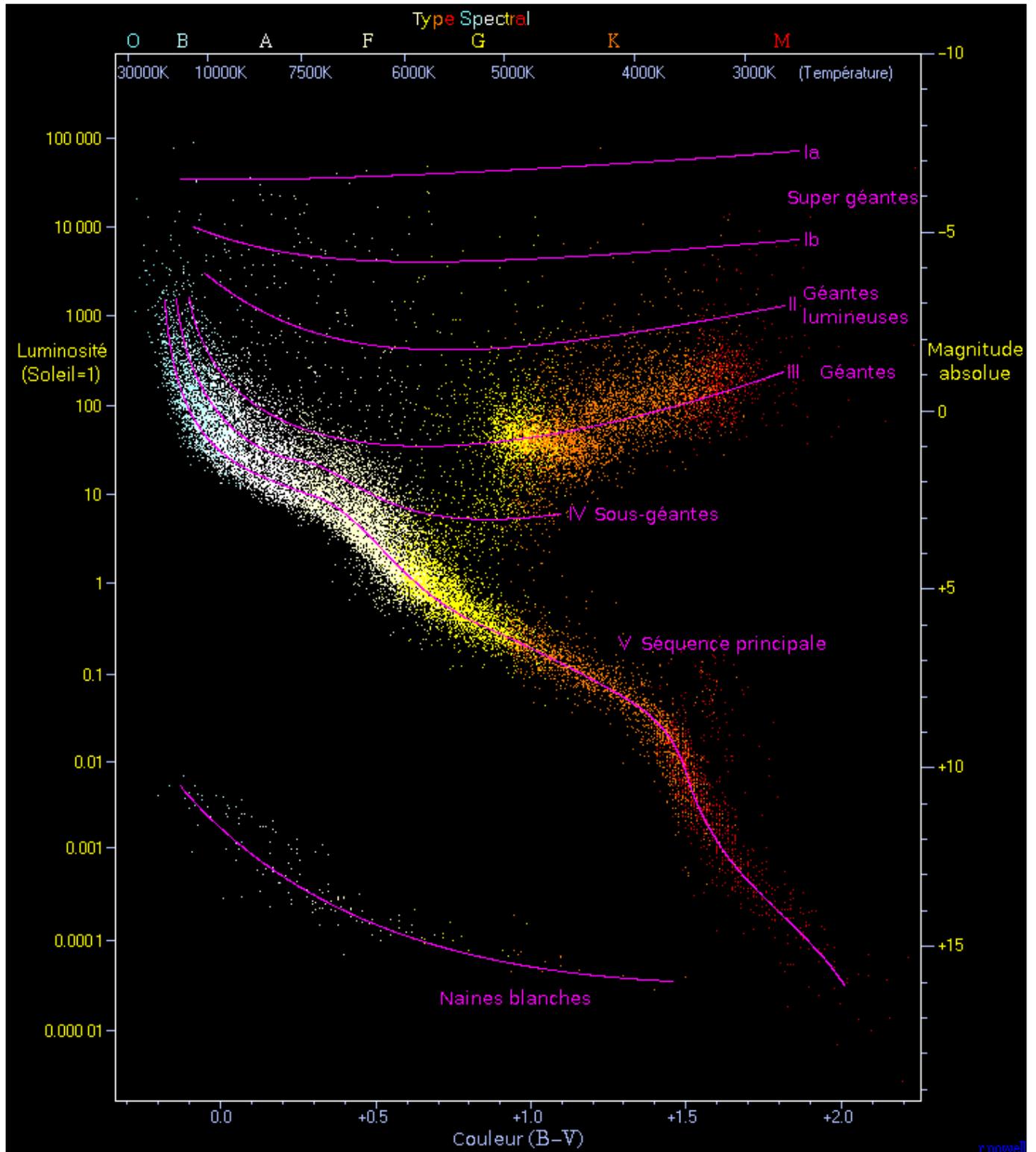


FIGURE 6 – Un diagramme Hertzsprung-Russell montre la relation entre les différentes caractéristiques d'une étoile. La majeure partie de celles-ci relève de branches bien distinctes, selon leur stade d'évolution. Au fil des différentes phases, les étoiles peuvent passer d'une branche à une autre.

OdG

Faisons un petit calcul d'**OdG** : Supposons le soleil à l'équilibre. Sa luminosité est de $L = 4 \times 10^{26} \text{ W} = 2.5 \times 10^{45} \text{ eV}$. Quel quantité d'hydrogène consomme-t-il ?

Un kg de proton libère une énergie de $1.42 \times 10^8 \text{ J/kg}$. Il faut $r = \frac{L}{1.42 \times 10^8} \text{ kg/s}$, soit une consommation de $2.8 \times 10^{18} \text{ kg/s}$ par seconde. La masse solaire est de 10^{30} kg , donc en le considérant purement fait d'hydrogène, il aurait une durée de vie restante de 12000 ans.

C'est absurde parce qu'on sait de source sûre que le soleil est beaucoup plus vieux que cet OdG.

En fait il y a d'autres réactions, notamment lorsque les protons sont tous consommés, c'est l'Helium qui commence à fusionner. C'est le stade de Géante rouge. Il nous reste 5,4 milliards d'années avant ce stade.

Lorsque l'étoile poursuit son cycle de vie, elle va générer des atomes de plus en plus lourds, jusqu'à arriver au Fer qui ne peut plus fusionner, du fait qu'il est très stable.

En fonction de la taille de l'étoile, on a alors effondrement et potentiellement supernova, qui lors de l'explosion va générer tous les noyaux lourds qu'on trouve à l'état naturel.

Pour plus de détails :

↗ https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_carbone-azote-oxygène

↗ https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaîne_proton-proton

↗ https://fr.wikipedia.org/wiki/Réaction_triple_alpha