

CHAPITRE I

L'ATOME

"Un monde plus profond que l'astre,
c'est l'atome"
Victor-Hugo, *La Légende des Siècles*

1. LE NOYAU

L'atome¹ est constitué d'un noyau de charge positive autour duquel gravite un certain nombre d'électrons qui le rendent neutre sur le plan électrique. La dimension du noyau est très petite comparée à celle de l'atome neutre. Un atome est environ 100 mille fois plus étendu que son noyau (cf. fig.I.1).

1.1 Les particules élémentaires

Le noyau est formé de particules appelées **nucléons**, particules qui peuvent être électriquement neutres (les **neutrons**) ou bien chargées positivement (les **protons**). Ces particules sont elles-mêmes composées d'éléments plus petits appelés **quarks**, notés u pour *Up*, d pour *Down*, c pour *Charm*, etc.

De façon plus générale, les particules composées de quarks sont appelées **hadrons**. Parmi les hadrons on trouve les **baryons** dont les deux plus célèbres sont le proton ($p = 2 u + d$) et le neutron ($n = u + 2 d$). Il semble que toute la matière soit formée d'une douzaine de *briques* élémentaires répertoriées au tableau ci-dessous.

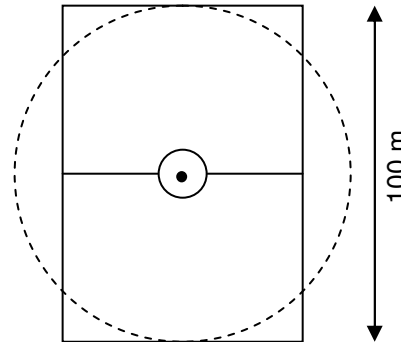
fermions							
quarks				leptons			
nom	symbole	charge	masse	nom	symbole	charge	masse
Up	u	2/3	100	électron	e ⁻	-1	0,511
Down	d	-1/3	100	neutrino	ν _e	0	≈ 0
Charm	c	2/3	1 500	muon	μ	-1	105,6
Strange	s	-1/3	200	neutrino	ν _μ	0	± 0
Top	t	2/3	1,7.10 ⁵	tau	τ	-1	1 784
Bottom	b	-1/3	≈ 5 000	neutrino	ν _τ	0	< 164
charge : fraction de la charge de l'électron				masse : en MeV			

Tableau I.1 - Les particules élémentaires constitutives de la matière.

¹ Au début du XX^e siècle, certains savants, et non des moindres, restaient sceptiques quant à l'existence des atomes. C'était par exemple le cas de l'autrichien Ernest Mach et du chimiste allemand Wilhelm Ostwald qui n'y croyaient pas... n'en ayant jamais vus !

Dans ce qui suit, les seules particules considérées seront les neutrons, les protons et les électrons.

Figure I.1 – Le noyau d'un atome d'hydrogène grossi au format d'un terrain de football (100 m de long) aurait la dimension d'une bille, l'électron gravitant à une cinquantaine de mètres de celle-ci.



On appelle **nombre de masse A** le nombre de nucléons et **nombre atomique Z** le nombre de protons, égal au nombre d'électrons gravitant autour du noyau de l'atome neutre. On en déduit le nombre de neutrons $N = A - Z$.

Le noyau d'un élément chimique X sera noté : ${}^A_Z X$

1.2 Les isotopes

Un élément chimique est caractérisé par son nombre d'électrons : deux éléments ayant un nombre différent d'électrons porteront des noms chimiques différents. En effet, les propriétés chimiques sont plus particulièrement relatives au nombre d'électrons de la couche périphérique de l'atome neutre, électrons qui interviennent lors des réactions chimiques habituelles. Ceci explique la classification périodique des éléments.

Des noyaux ayant même nombre atomique Z, appelés **isotopes**, sont indissociables chimiquement². Ceci pose problème lorsque l'on veut extraire l'un des isotopes d'un corps naturel. C'est le cas par exemple de l'uranium lors de son enrichissement en isotope 235.

De nombreux éléments naturels sont la combinaison de plusieurs isotopes.

Exemples:

- L'**hydrogène** naturel est constitué de deux isotopes :
l'hydrogène ${}^1_1\text{H} = 99,985 \%$ et le **deutérium** $\text{D} \equiv {}^2_1\text{H} = 0,015 \%$.
Le **tritium** $\text{T} \equiv {}^3_1\text{H}$ quant à lui est artificiel.
- L'**oxygène** naturel est formé de trois isotopes :
 ${}^{16}_8\text{O} = 99,76 \%$, ${}^{17}_8\text{O} = 0,04 \%$, ${}^{18}_8\text{O} = 0,20 \%$.
- L'**uranium** naturel a lui aussi trois isotopes :
 ${}^{238}_{92}\text{U} = 99,275 \%$, ${}^{235}_{92}\text{U} = 0,719 \%$, ${}^{234}_{92}\text{U} = 0,006 \%$.

² On constate cependant des différences dans la cinétique de certaines réactions chimiques réalisées avec des isotopes.

1.3 Isotones, isobares et isomères

On appelle :

- **isotones** des noyaux de même nombre de neutrons N , comme, par exemple, ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ et ${}_{95}^{240}\text{Am}$.
- **isobares** des noyaux de même nombre de masse A , comme : ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ et ${}_{95}^{240}\text{Am}$
- **isomères** des noyaux de mêmes nombres A et Z mais se trouvant dans des états d'énergie différents. Un noyau *excité* revient à son état *fondamental* en émettant un ou plusieurs photons (rayonnement γ ou X).
Lorsque ce retour est rapide on notera X^* le noyau excité et lorsque ce retour est lent on parlera de **noyau métastable** que l'on notera X^m
Exemple : technétium 99 noté ${}_{43}^{99}\text{Tc}^m$ ou encore ${}_{43}^{99m}\text{Tc}$.

1.4 Vallée de stabilité

La matière terrestre est formée de 92 éléments simples répertoriés par la classification périodique qui va du noyau le plus léger (l'hydrogène ${}^1_1\text{H}$) au noyau le plus lourd (l'uranium ${}_{92}^{238}\text{U}$).

En réalité, il n'en subsiste que 89, le technétium Tc, le prométhéum Pm et le francium Fr, ayant disparus par radioactivité naturelle.

Les autres éléments plus lourds, les **transuraniens**, ont été créés artificiellement par l'homme et sont instables.

On trouve ainsi dans la nature 332 noyaux différents dont 50 sont instables (c.à.d. radioactifs naturels). La figure 1.2 montre la répartition, dans un diagramme (N,Z) , des noyaux stables existants ou ayant été créés, caractérisant ce que l'on nomme la **vallée de stabilité**.

On montre (cf. application I.4) que les noyaux stables se trouvent sur une courbe théorique d'équation :

$$Z = \frac{A}{2 + 0,0148 A^{2/3}} \quad (\text{I-1})$$

représentée à la figure I.2.

Pour les noyaux de faible nombre atomique, on peut remarquer que $N \approx Z$.

Pour les noyaux plus lourds il y a un accroissement de neutrons. Le nombre N de ceux-ci est d'autant plus grand que le nombre atomique Z est élevé. Il semble que les neutrons servent de diluant face aux forces de répulsion coulombienne qui apparaissent entre les protons de même charge électrique positive.

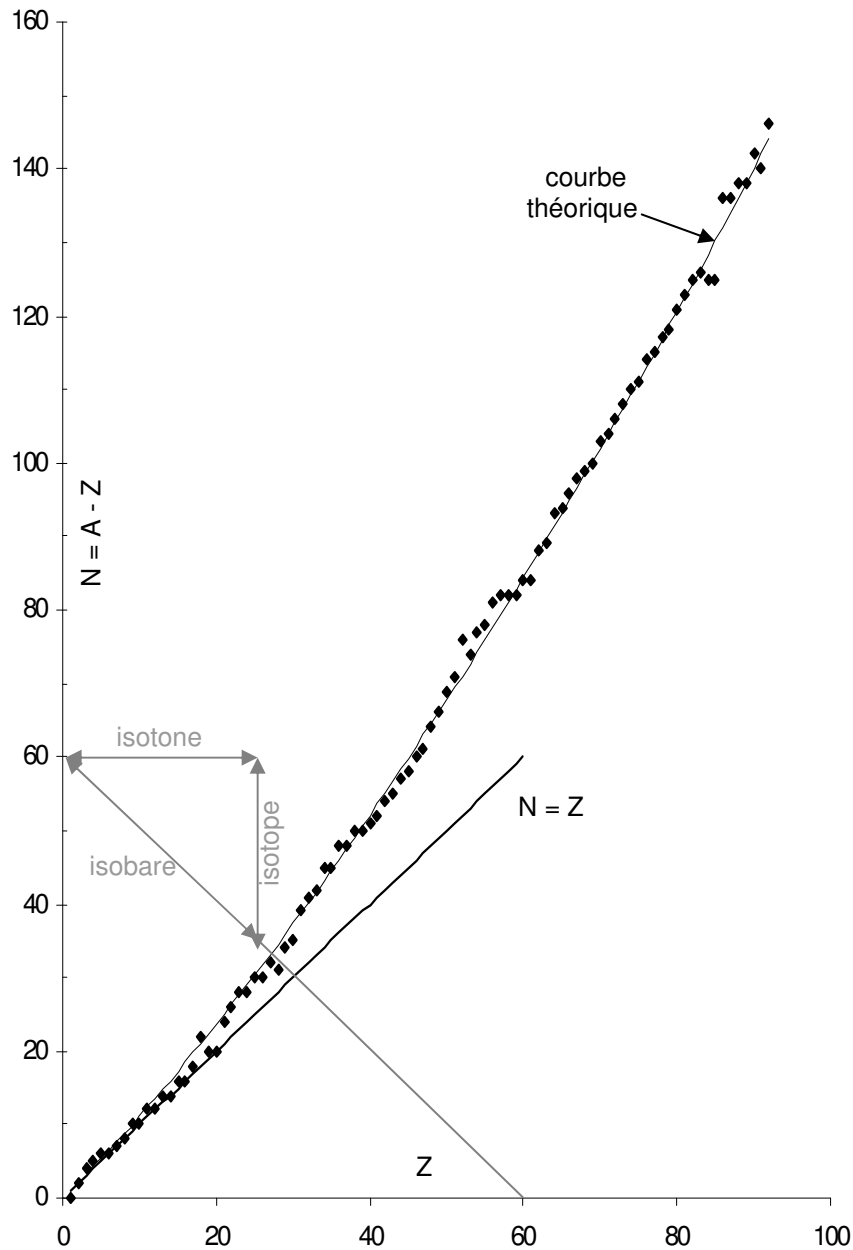


Figure I.2 – Situation dans le diagramme (N,Z) des noyaux naturels stables et de la courbe théorique caractérisant la vallée de stabilité.

1.5 Relation entre masse et énergie

La masse des particules est donnée en **unité de masse unifiée (u)**. Par définition, 1 u équivaut à 1/12 de la masse d'un atome de carbone 12.

$$1 \text{ u} = 1,660 \, 54 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (\text{I- 2})$$

Remarque : l'atome-gramme de carbone 12 = 12 grammes.
Le nombre d'Avogadro $N_A = 1/u$ (en g) = $6,02 \cdot 10^{23}$.

On peut donner la masse en terme d'énergie puisque l'on a la célèbre relation d'Einstein reliant la masse M à l'énergie E :

$$E = M \cdot c^2 \quad (\text{I- 3})$$

où c est la vitesse de la lumière.

Cette relation permet d'exprimer la masse d'une particule en terme d'énergie.

En physique nucléaire, on utilise fréquemment l'**électron-volt (eV)** comme unité d'énergie plutôt que le joule. On a :

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (\text{I- 4})$$

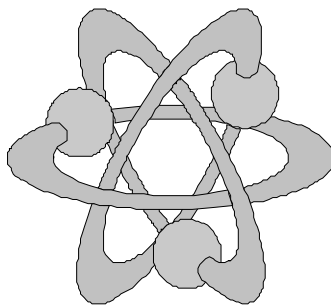
On peut donc exprimer la masse en **MeV** (méga-électron-volt), comme au tableau I.1, avec

$$1 \text{ MeV} \equiv 1,78 \cdot 10^{-30} \text{ kg}. \quad (\text{I- 5})$$

Le tableau ci-dessous permet de relier une masse en kg à une énergie exprimée dans l'une des unités habituellement rencontrées en énergie nucléaire.

→	kg	u	eV	MeV	J	kWh
kg	1	$6,02 \cdot 10^{26}$	$5,61 \cdot 10^{35}$	$5,61 \cdot 10^{29}$	$8,988 \cdot 10^{16}$	$2,4965 \cdot 10^{10}$
u	$1,66 \cdot 10^{-27}$	1	$9,32 \cdot 10^8$	931,6	$1,4924 \cdot 10^{-10}$	$4,1456 \cdot 10^{-17}$
eV	$1,78 \cdot 10^{-36}$	$1,07 \cdot 10^{-9}$	1	10^{-6}	$1,602 \cdot 10^{-19}$	$4,45 \cdot 10^{-26}$
MeV	$1,78 \cdot 10^{-30}$	$1,0734 \cdot 10^{-3}$	10^6	1	$1,602 \cdot 10^{-13}$	$4,45 \cdot 10^{-20}$
J	$1,1126 \cdot 10^{-17}$	$6,7 \cdot 10^9$	$6,24 \cdot 10^{18}$	$6,24 \cdot 10^{12}$	1	$2,78 \cdot 10^{-7}$
kWh	$4,01 \cdot 10^{-11}$	$2,41 \cdot 10^{16}$	$2,25 \cdot 10^{25}$	$2,25 \cdot 10^{19}$	$3,6 \cdot 10^6$	1

Tableau I.2 – Table de conversion des unités d'énergie.



2. MODÈLES DU NOYAU

Les lois qui régissent la structure des noyaux sont complexes et non encore entièrement élucidées. Mais pour tenter d'expliquer certains phénomènes étudiés expérimentalement, les physiciens ont conçu des modèles du noyau rendant compte partiellement de la réalité.

2.1 Modèle en couches

Les nucléons sont supposés regroupés en couches à la manière des électrons dans l'atome. En effet on constate que les noyaux dont le nombre Z ou N est un multiple de 2, 8, 20, 28, 50, 82 et 126 (appelés **nombre magiques**) sont particulièrement stables. C'est le cas par exemple du noyau d'hélium 4 ($Z = 2$, $N=2$) ou du noyau de néon 20 ($Z=10$, $N=10$). Ce modèle rend compte assez bien des propriétés des noyaux légers.

2.2 Modèle de la goutte

Les nucléons sont assimilés aux molécules que l'on rencontre dans une goutte de liquide. Il s'en suit que :

- la densité du noyau est uniforme et indépendante de A ,
- le noyau est une sphère très dense³ de rayon $R = R_0 A^{1/3}$ (avec $R_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$ m, rayon du noyau d'hydrogène 1, c.-à-d. d'un proton),
- l'énergie qui lie un nucléon dans le noyau est la même pour tous les nucléons sauf ceux de surface,
- la cohésion du noyau est due à une force dite **forte** dont le rayon d'action est extrêmement faible (de l'ordre de R_0) mais dont l'intensité l'emporte largement sur les autres forces telle que la force de répulsion électrostatique entre protons. À l'image des liaisons chimiques par échange d'électrons, cette force s'exerce par l'intermédiaire d'un vecteur appelé **gluon**. Quant à la **force faible**, elle a été introduite pour rendre compte du phénomène de la radioactivité.

force	distance d'influence	vecteur (ou boson)
gravitationnelle	∞	(graviton) ⁴
électromagnétique	∞	photon
forte	$< 10^{-15}$ m	gluon
faible	$< 10^{-18}$ m	(boson de Higgs) ⁵

Tableau I.3 – Les quatre forces fondamentales agissant dans la nature.

Ce modèle satisfait aux propriétés des noyaux lourds comme par exemple le fait que le nombre de neutrons n'est plus égal au nombre atomique Z lorsque le nombre de masse A s'accroît, l'excès de neutrons servant alors de *diluant* à l'énergie de répulsion coulombienne entre protons⁶.

³ Sa masse volumique vaut environ $2 \cdot 10^{17}$ kg/m³.

⁴ Non encore décelé.

⁵ Non encore décelé.

⁶ Elle explique par exemple la transformation spontanée d'un neutron isolé en un proton, avec émission d'un électron et d'un neutrino.

3. ÉNERGIE DE LIAISON

3.1 Définition

On constate expérimentalement que la masse $m(X)$ d'un atome A_ZX est toujours inférieure à la somme des masses de ses éléments constitutifs (protons de masse m_p , neutrons de masse m_n , électrons de masse m_e) pris isolément. La différence Δm , appelée **défaut de masse**, s'écrit :

$$\Delta m = Z (m_p + m_e) + (A-Z) m_n - m(X) > 0$$

avec :

$$m_p = 1,672\,623 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1,674\,928 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

La célèbre relation d'Einstein liant la masse et l'énergie s'écrit dans notre cas :

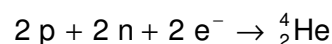
$$E_L = \Delta m \cdot c^2 \quad (\text{I- 6})$$

avec :

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

où E_L , appelée **énergie de liaison**, représente la quantité d'énergie qui serait nécessaire pour rompre la cohésion de l'atome et le transformer en particules indépendantes.

Soit, par exemple, la formation d'un atome d'hélium 4 à partir de 2 neutrons, de 2 protons et de 2 électrons :



On constate que la masse de l'atome d'hélium résultant, notée $m(\text{He})$, est inférieure à la somme des particules ayant servi à le former. L'énergie libérée E correspond à cette disparition de masse Δm , égale à l'énergie de liaison de l'atome d'hélium :

$$E = \Delta m \cdot c^2 = [2 (m_p + m_n + m_e) - m(\text{He})] \cdot c^2 = E_L(\text{He}). \quad (\text{I- 7})$$



Application I.1 : énergie de liaison d'une mole d'hélium

La masse atomique d'un atome d'hélium, dont le noyau est appelé particule α , vaut :
 $m(\text{He}) = 4,003\,87 \text{ u}$.

L'énergie de liaison d'un atome d'hélium s'écrit (cf. équation (I-7)) :

$$E_L(1 \text{ atome}) =$$

$$[2 \times (1,672\,623 \cdot 10^{-27} + 1,674\,928 \cdot 10^{-27} + 9,109 \cdot 10^{-31}) - 4,003\,87 \times 1,66 \cdot 10^{-27}] \cdot (299\,792\,458)^2$$

$$= 4,375 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 27,34 \text{ MeV}.$$

L'énergie de liaison d'une mole se calcule en multipliant ce dernier résultat par le nombre d'Avogadro N_A :

$$E_L(1 \text{ mole}) = E_L(1 \text{ atome}) \cdot N_A = 4,375 \cdot 10^{-12} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 2,6 \cdot 10^{12} \text{ J} = 731\,597 \text{ kWh}.$$

Considérons à présent la fission d'un noyau d'uranium suivant la réaction :



Le principe de conservation fournit les égalités suivantes :

- pour le nombre de masse⁷ : $235 + 1 = a + b + v$
- pour le nombre atomique : $92 = \alpha + \beta$

L'énergie de liaison de l'élément X s'écrit :

$$E_L(X) = [\alpha (m_p+m_e) + (a-\alpha) m_n - m(X)] c^2$$

et pour les atomes Y et U on a :

$$E_L(Y) = [\beta (m_p+m_e) + (b-\beta) m_n - m(Y)] c^2$$

$$E_L(U) = [92 (m_p+m_e) + (235-92) m_n - m(U)] c^2.$$

Calculons à présent la quantité suivante :

$$\begin{aligned} E_L(X) + E_L(Y) - E_L(U) &= \\ &= [\alpha (m_p+m_e) + (a-\alpha) m_n - m(X) + \beta (m_p+m_e) + (b-\beta) m_n - m(Y) - 92 (m_p+m_e) - 143 m_n + m(U)] c^2 = \\ &= [(\alpha + \beta - 92) (m_p+m_e) + (a - \alpha + b - \beta - 143) m_n - m(X) - m(Y) + m(U)] c^2 \end{aligned}$$

En utilisant les deux relations données par les lois de conservation (masse et charge) vues plus haut, on trouve :

$$E_L(X) + E_L(Y) - E_L(U) = [(1 - v) m_n - m(X) - m(Y) + m(U)] c^2. \quad \text{(I- 9)}$$

Revenons à l'équation (I-8). Écrivons le défaut de masse Δm qu'entraîne la réaction nucléaire étudiée. Il est égal à la différence entre la somme des masses des éléments de départ et la somme des masses de ceux d'arrivée :

$$\Delta m = [m(U) + m_n] - [m(X) + m(Y) + v m_n] = (1 - v) m_n - m(X) - m(Y) + m(U)$$

En comparant cette dernière égalité avec l'équation (I-9), on voit que :

$$E = \Delta m \cdot c^2 = E_L(X) + E_L(Y) - E_L(U) \quad \text{(I- 10)}$$

L'énergie nucléaire E, provenant du défaut de masse Δm , est égale à la différence entre la somme des énergies de liaison des éléments produits et celle des énergies de liaison des éléments de départ.

Ce résultat est très général et peut être appliqué à toute réaction nucléaire qu'elle soit de fission ou bien de fusion. On en déduit que de l'énergie sera libérée lors d'une réaction nucléaire si les produits de départ ont des énergies de liaison plus faibles que les produits résultant de la réaction.

3.2 Énergie de liaison par nucléon

Pour comparer les atomes entre eux sur le plan de la stabilité du noyau, on utilise l'énergie de liaison par nucléon qui correspond à l'énergie de liaison de l'élément divisée par le nombre de nucléons composant le noyau. Plus grande sera cette quantité, plus grande sera la stabilité du noyau et donc plus grande sera l'énergie libérée pour le former. On pourra donc récupérer de l'énergie lors d'une réaction nucléaire si le résultat de la réaction envisagée donne un ou plusieurs produits dont l'énergie de liaison par nucléon est supérieure à celle de départ.

⁷ Le nombre de nucléons reste inchangé. Mais la masse de chacun d'entre eux est plus faible, dans le noyau composé, comparée à celle qu'il possède quand il est isolé.