

Notions de base

LA MATIÈRE NUCLÉAIRE

Atome et noyau

Un atome est formé d'un noyau dont le rayon est de quelques femtomètres ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$) et d'un cortège électronique dont les dimensions sont celles de l'angström ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).



$$1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m} \quad (\text{milli})$$

$$1 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} \quad (\text{micro})$$

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} \quad (\text{nano})$$

$$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m} \quad (\text{pico})$$

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} \quad (\text{femto})$$

$$1 \text{ am} = 10^{-18} \text{ m} \quad (\text{atto})$$

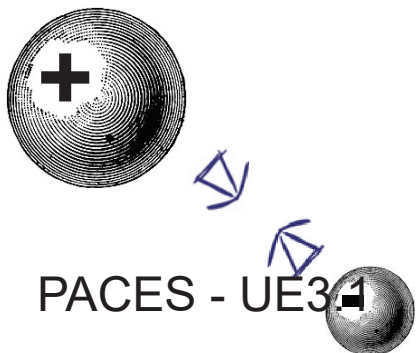
Atome et noyau

Le **noyau** est **chargé positivement**.

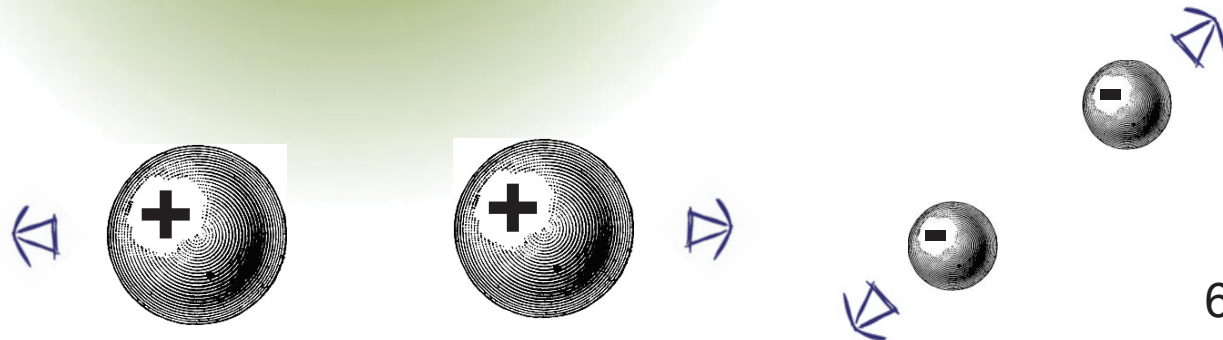
Le **cortège électronique** est constitué de **charges négatives** portées par les électrons.

L'**atome** est **électriquement neutre**. Il y a autant de charges positives dans le noyau que de charges négatives dans le cortège électronique.

Noyau et cortège électronique sont liés par **l'interaction électromagnétique**.



PACES - UE3/4



6

Noyau et cortège électronique

Les **électrons** sont des particules chargées négativement ($q=-e$) :

$$e = 1.602\,176\,462(63) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Le noyau est constitué de particules appelées **nucléons**. On distingue :

- ▶ Les **protons** : découverts en 1910 par Ernest Rutherford et portant une charge électrique positive ($q = +e$).
- ▶ Les **neutrons** : découverts en 1932 par James Chadwick sont électriquement neutres ($q = 0$).

Les masses des protons et des neutrons sont très voisines et 1 836 fois supérieures à la masse de l'électron.

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

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

$$m_n = 1.674 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

La stabilité du noyau

L'atome est essentiellement constitué de vide. Toute sa masse est concentrée dans son noyau (énorme densité massique).

$$\rho = \frac{A \cdot m_N}{(4\pi/3)r_{\text{nucléaire}}^3} \sim A \times 4 \cdot 10^{17} \text{ kg.m}^{-3}$$

La répulsion électrostatique entre les protons devrait aboutir à une destruction du noyau

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r_{\text{nucléaire}}^2} \sim 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-15})^2} \sim 230 \text{ N}$$

=> Il existe une force entre les nucléons, qui est attractive et de courte portée. C'est **l'interaction nucléaire forte** (~1000 fois plus intense que l'interaction électromagnétique).

L'interaction nucléaire forte

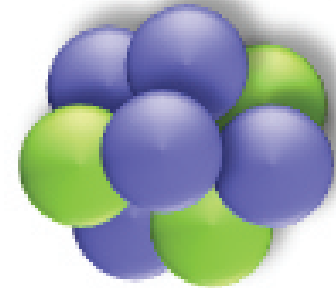
L'interaction nucléaire forte assure la cohésion du noyau.

Elle lie les protons et les neutrons entre eux.

Elle est attractive.

Sa portée est finie et aux dimensions de la matière nucléaire.

Les électrons ne subissent pas cette interaction.



Eléments, Isotopes, isobares, isotones ...

UN PEU DE TERMINOLOGIE

Les éléments chimiques

Ils sont caractérisés par :

Le numéro atomique (il correspond au nombre de protons contenus dans le noyau). Il est noté Z .

Le nombre total de charges électriques est conservé lors de transformations nucléaires (alors que le nombre de protons peut varier).

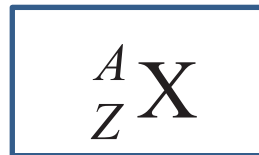
La valeur de Z détermine l'**élément chimique** (elle est responsable des propriétés chimiques). Chaque élément est affecté d'un symbole (ex : H pour l'hydrogène, O pour oxygène, C pour le carbone ...). Il détermine ainsi la place de l'élément dans une classification périodique basée sur les propriétés chimiques des éléments.

Le nombre de nucléons

Le nombre de nucléons, noté A , est le nombre de protons et neutrons contenus dans le noyau.

Le nombre de nucléons est conservé lors de transformations nucléaires (alors que le nombre de protons ou de neutrons peut varier).

Un nucléide est un type de noyau atomique caractérisé par le nombre de protons et de neutrons qu'il contient. On le note :



exemple : ${}_{17}^{35}\text{Cl}$

$Z = 17$ protons et $N = A - Z = 35 - 17 = 18$ neutrons

Les isotopes

Les nucléides d'un élément chimique particulier avec le même numéro atomique (Z) mais des nombres de neutrons différents s'appellent des **isotopes**.



Les éléments naturels sont, en majorité, constitués d'un mélange d'isotopes.

ex :	${}_1^1\text{H}$ (99,985%) hydrogène	${}_1^2\text{H}$ (0,015%) deutérium	${}_1^3\text{H}$ (traces) tritium
	${}_6^{12}\text{C}$ (98,89%)	${}_6^{13}\text{C}$ (1,11%)	${}_6^{14}\text{C}$ (traces)
	${}_{17}^{35}\text{Cl}$ (75,77%)	${}_{17}^{37}\text{Cl}$ (24,23%)	
	${}_{92}^{234}\text{U}$ (0,0056%)	${}_{92}^{235}\text{U}$ (0,720%)	${}_{92}^{238}\text{U}$ (99,2745%)

L'échelle des grandeurs physiques de la matière

MASSE, ÉNERGIE

Unités de masse

Les unités du système international (SI) sont très mal adaptées aux grandeurs atomiques. Par exemple, la masse de l'électron, 9.10^{-31} kg est très faible. Il en est de même de l'énergie.

L'**unité de masse atomique (u)**: par convention, l'unité de masse atomique est $1/12^e$ de la masse contenue dans un atome de carbone 12, non lié, au repos, et dans son état fondamental.

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} M(^{12}\text{C})$$

Une mole de ^{12}C a une masse de 12 g et contient N_A atomes.

$$12 \text{ g} \rightarrow N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ atomes}$$

$$\Rightarrow 1 \text{ atome de carbone-12} = \frac{12}{6,022 \cdot 10^{23}} \text{ g} \Rightarrow 1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Unités d'énergie

L'unité d'énergie utilisée pour le monde subatomique est l'électronvolt (eV).

C'est l'énergie cinétique d'un électron accéléré depuis une position au repos par une différence de potentiel de un Volt.

$$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ keV} &= 10^3 \text{ eV} \\ 1 \text{ MeV} &= 10^6 \text{ eV} \\ 1 \text{ GeV} &= 10^9 \text{ eV} \\ 1 \text{ TeV} &= 10^{12} \text{ eV} \end{aligned}$$

Equivalence masse-énergie relation d'Einstein

$$E = mc^2$$

« c » est la vitesse de la lumière dans le vide :

$$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

A partir de la relation d'Einstein, calculons l'équivalence en énergie d'une masse de 1 u.

$$m = 1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$E = mc^2 = \frac{1,66 \cdot 10^{-27}}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot (2,997\,925 \cdot 10^8)^2 \cong 931,5 \text{ MeV}$$

$$m = 1 \text{ u} \Leftrightarrow E = 931,5 \text{ MeV}$$

Unités

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Particule	masse kg	masse en u	masse (MeV.c ⁻²)
proton	1,672 65 10 ⁻²⁷	1,007 276	938,28
neutron	1,674 96 10 ⁻²⁷	1,008 665	939,57
électron	9,109 59 10 ⁻³¹	0,000 548	0,511

$$1 \text{ u} \equiv 931,5 \text{ MeV}$$

**Physique
Atomique**

**Physique nucléaire
des particules**

Les radionucléides

Les nucléides instables (radioactifs) sont des **radionucléides**.

Dans la nature, il y a à peu près 270 nucléides stables et 70 nucléides instables.

Les radionucléides naturels sont ceux dont la durée de vie moyenne (ou celle d'un précurseur) est au moins aussi longue que l'âge de la Terre ($4,6 \times 10^9$ années), autrement ils auraient déjà disparus depuis la formation du système solaire (et donc de la Terre).

Par exemple, ^{238}U , à une période radioactive de $4,5 \times 10^9$ années, et le radium ^{226}Ra qui n'a une période radioactive que de 1 609 années est naturellement présent en tant que descendant de l'uranium-238.

Plus de 1000 radionucléides ont été produits par des méthodes artificielles.

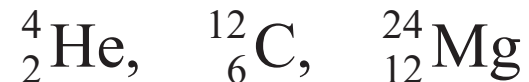
Stabilité des noyaux

Dans un noyau, il y a compétition entre :

- ▶ la répulsion coulombienne entre les protons (de longue portée).
- ▶ l'interaction forte (attractive) entre les nucléons (de courte portée).

Si le nombre de nucléons est faible (typiquement $Z < 20$), le noyau est de petite taille et malgré la courte portée de l'interaction nucléaire forte, chaque nucléon contribue à la cohésion totale du noyau.

C'est l'interaction forte qui prédomine. Elle favorise les noyaux pour lesquels $N = (A - Z) \approx Z$. Exemples :



Stabilité des noyaux (2)

Quand la taille du noyau augmente, chaque nucléon présent dans le noyau n'interagit plus qu'avec ses proches voisins. Ils ne contribuent plus à la cohésion globale du noyau.

Le nombre de protons et donc la charge positive croît ($Z \nearrow$). La répulsion coulombienne étant, quant à elle de grande portée, devient dominante.

Pour compenser ce déséquilibre, le nombre de neutrons $N = (A - Z)$ doit augmenter plus vite que le nombre de protons Z .

Exemple : ${}_{40}^{90}\text{Zr}$, ${}_{50}^{120}\text{Sm}$, ${}_{82}^{208}\text{Pb}$

Stabilité des noyaux

TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

Transformations radioactives

Certains nucléides se transforment spontanément au cours du temps. Cette transformation correspond à un changement de nature du noyau. Elles s'accompagnent de l'émission d'une ou plusieurs particules :



Ces transformations obéissent à des **lois de conservation** :

- ▶ de la charge électrique (Z).
- ▶ du nombre de nucléons (A).
- ▶ de l'énergie totale.
- ▶ de la quantité de mouvement.

Loi de décroissance radioactive

STABILITÉ

Loi de décroissance radioactive

La désintégration d'un noyau ne dépend pas des conditions physico-chimiques dans lesquelles le nucléide se trouve. La radioactivité est un phénomène :

- indépendant des conditions expérimentales (P, T ...),
- indépendant des combinaisons chimiques.

A tout instant, un radionucléide quelconque a autant de chances de se désintégrer qu'un autre radionucléide de la même espèce. La radioactivité est un phénomène :

- Stochastique,
- inéluctable.

Loi de décroissance radioactive

Détermination de la probabilité de désintégration d'un radionucléide dans une population N :

$$\begin{array}{ccc} t & & t + dt \\ N(t) \quad (N(t) < N_0) & \xrightarrow{\hspace{2cm}} & N(t) + dN(t) \quad (< N(t)) \end{array}$$

Le nombre de désintégrations, parmi un échantillon de N radionucléides, pendant le temps dt est égale à :

$$dN = N(t + dt) - N(t) < 0$$

Le taux de désintégrations est constant :

$$\frac{\text{Nombre de désintégrations}}{\text{Nombre total de radionucléides}} \Big/ dt = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \text{constante}$$

Loi de décroissance radioactive

Détermination de l'évolution d'une population de radionucléides en fonction du temps :

$$-\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \lambda$$

$$\int_0^t -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} dt = \int_0^t \lambda dt$$

$$\Rightarrow -\int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\left[\ln N \right]_{N_0}^{N(t)} = -(\ln N(t) - \ln N_0) = \lambda t$$

$$\Rightarrow \ln \frac{N(t)}{N_0} = -\lambda t$$

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