

Physique de la matière

I. NOTION DE MASSE ET D'ÉNERGIE

A. La masse en mécanique classique

→ La **masse** est définie comme la **mesure de la quantité de matière** d'un corps. On la mesure en **kg** ou en **g** (en chimie), mais ces mesures ne sont pas adaptées pour les atomes isolés ou pour les particules élémentaires (physique). Il faut trouver une **unité de masse cohérente** avec la nomenclature des noyaux :



A : nombre de masse (nombre de nucléons)

Z : numéro atomique (nombre de protons)

B. La masse (molaire) atomique (g)

→ C'est la masse d'une mole d'atome, elle s'exprime en **gramme**. C'est donc la masse de N atomes ($N = \text{nombre d'Avogadro} = 6,02 \times 10^{23}$). ++

→ Le **nombre d'Avogadro** a été choisi pour qu'**une mole d'atome de carbone 12** ait une **masse de 12g**.

Le **nombre de masse A** est l'entier le plus proche de la masse atomique (en gramme).

Masse	Hydrogène 1_1H	Carbone ${}^{12}_6C$	Oxygène ${}^{16}_8O$
d'un atome en g	$0,167 \cdot 10^{-23}$	$2 \cdot 10^{-23}$	$2,657 \cdot 10^{-23}$
d'une mole d'atomes en g masse atomique	1,007	12	15,994
A nombre de masse (nombre de nucléons)	1	12	16

La masse molaire nous donne des chiffres manipulables mais elle concerne un nombre élevé d'atomes (cette unité est plus utilisée en chimie).

C. L'unité de masse atomique U

→ C'est une unité particulière car elle est hors SI mais elle est adaptée à l'**échelle des atomes** donc on l'utilise en physique.

→ Une **unité de masse atomique** correspond à **1/12 ème de la masse d'un atome de carbone 12.** ++

$$1u = \frac{12g}{N} \times \frac{1}{12} = \frac{1}{N} = \frac{1}{6,02 \times 10^{23}} = 0,166 \times 10^{-23}$$

Masse	Hydrogène 1_1H	Carbone ${}^{12}_6C$	Oxygène ${}^{16}_8O$
d'un atome en g	0,167.10 ⁻²³	2.10 ⁻²³	2,657.10 ⁻²³
d'une mole d'atomes en g (masse atomique)	1,007	12	15,994
d'un atome en unité de masse atomique	1,007	12	15,994
A nombre de masse (nombre de nucléons)	1	12	16

C'est une unité adaptée pour décrire les masses des particules élémentaires.

On a ainsi : $Mu = me \times N$

Remarques :

- ★ La **masse en u** s'exprime par le **même nombre** que la **masse d'une mole d'atomes** en *g/mol*. +++
- ★ La valeur numérique de A peut exprimer trois quantités selon son unité :
 - Le **nombre de nucléons** (sans unités)
 - La **valeur entière la plus proche** de la **masse d'une mole d'atome** (en g)
 - La **valeur entière la plus proche** de la **masse d'un atome** (en u)

D. Relation masse/énergie

→ En mécanique classique :

La masse est définie comme la **résistance aux accélérations** (utilisée pour calculer la force nécessaire pour qu'un corps acquiert une accélération).

→ En mécanique quantique :

Einstein décrit une **masse au repos** comme une **énergie** :

$$E_0 = m_0 c^2$$

(avec c la vitesse de la lumière)

→ Équivalence masse/énergie pour 1u :

$$1u = \frac{m_{\text{électron}} \cdot c^2}{1\text{eV en Joule}} = \frac{0,166 \times 10^{-26} \times (2,9979 \cdot 10^8)^2}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

E. Défaut de masse

Tout groupe cohérent de particules a un **défaut de masse** qui est lié à l'**énergie de liaison** de ses particules entre elles.

→ Au niveau du noyau (et de ses nucléons), en **MeV**

+++ La **masse du noyau constituée** est **inférieure** à la **somme de la masse de ses nucléons** +++

$$M(A, Z) < \sum m_i$$

$$\Delta M(a, Z) = \sum m_i - M(A, Z)$$

$$(\Delta M = \{(M \text{ proton} \times nb \text{ proton}) + (M \text{ neutron} \times nb \text{ neutron})\} - M \text{ noyau constitué})$$

Équivalence en énergie : $E = \Delta M c^2$ donc $E_L = 931,5 \times \Delta M$ en MeV

→ Au niveau de l'atome, en **keV**

+++ La **masse de l'atome constitué** ($M(A, Z)$) est **inférieure** à la **masse de la somme de ses constituants** (=neutrons, électrons et protons) +++

$$\begin{aligned} \mathcal{M}(A, Z) &< M(A, Z) + Z m_e \\ \Delta \mathcal{M}(A, Z) &= M(A, Z) + Z m_e - \mathcal{M}(A, Z) = E_{le} \end{aligned}$$

Le tutorat est gratuit, toute vente ou reproduction est interdit

→ Au niveau des molécules (et de leurs atomes), en **eV**

La masse d'une **molécule** donnée est **inférieure** à la **somme des masses des atomes** qui la composent. Ce **déficit de masse** correspond à **l'énergie de liaison des molécules**.

F. Conclusion

➤ Exemple du carbone 12 :

→ Nombre de nucléons : $A = 12$

➤ Différentes manières de mesurer sa masse :

→ La **masse atomique** : **12g** +++

→ La **masse d'un atome** : **12u** +++

➤ Avec l'équivalence masse/énergie : $E_0 = m_0 c^2$, on trouve **l'énergie de liaison** :

→ L'énergie de liaison des **électrons** (on parle du déficit de masse au niveau atomique)

$$E = 0,277 \text{ keV}/c^2$$

→ L'énergie de liaison au niveau des **nucléons** (on parle du déficit de masse au niveau du noyau)

$$E = 92 \text{ MeV}/c^2$$

Petit point sur ce qu'on peut vous demander en QCM :

- Le nombre de masse, A , sans unités, entier le plus proche de la masse atomique en g ou la masse d'un atome en u ($A =$ nombre de nucléons)
- La masse atomique = masse de N atomes soit le poids d'une mole en g
- La masse d'un seul atome en u (=masse molaire atomique)
- La masse d'un atome en g (divise la masse d'une mole par le nombre d'Avogadro)
- Le nombre de neutrons ($N = A - Z$)

III. PARTICULES ET ONDES

A. Particules matérielles

★ L'électron : = électron négatif ou négaton.

C'est la particule qui constitue le **rayonnement cathodique** d'un tube à **rayon X** et qui est émise lors des **transformations radioactives b-**.

→ Caractéristiques de l'électron :

* **Masse au repos**: $m_e = 9,109 \cdot 10^{-28} g = 0,5 \cdot 10^{-3} u$ la masse de l'électron est très faible.

* **Masse relativiste** : sa vitesse est non négligeable par rapport à la célérité de la lumière c , c'est donc une particule relativiste ++

$$m(\text{nouvelle}) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(m_0 = la masse au repos)

Exemple : si elle a une vitesse $v = 0,5c$ on a $m = 1,15m_0$:

→ **Équivalence masse énergie** : $E_0 = m_0 c^2 = 931 \times 0,548 \cdot 10^{-3} = 0,511 \text{ MeV} = 511 \text{ keV}$ en jeu par l'atome, qui correspond à **l'énergie acquise** par un **électron sans vitesse initiale** sous l'effet d'une différence de potentiel de 1 volt.

→ **Charge négative** : $e^- = -1,602 \cdot 10^{-19} C$

→ **Unité d'énergie : électron volt (eV)**, pour exprimer l'énergie de manière adaptée aux énergies mise en jeu par l'atome, qui correspond à l'énergie acquise par un électron **sans vitesse initiale** sous l'effet d'une **différence de potentiel de 1 volt**. +++

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

★ Le proton et le neutron :

	Proton	Neutron
Masse au repos	$m_p = 1,007 u$	$m_n = 1,009 u$
Vitesse	<u>Non</u> relativiste	<u>Non</u> relativiste
Charge	$E^+ = 1,602 \cdot 10^{-19}$	Nulle
Stabilité	Stable	Instable hors du noyau : se décompose immédiatement ++

★ L'atome d'hydrogène :

Son noyau est composé d'un seul proton ($m_p = 1,007 u$) et on a $m_e = 0,5 \cdot 10^{-3} u$
Donc la masse de l'atome d'hydrogène vaut :

$$m_H = 1 \times m_p + 1 \times m_e = 1,0075 u$$

★ Particules matérielles :

Particules	Propriétés	Masse au repos	Charge
Positon β^+	Antiparticule de l'électron	$m = 0,5 \cdot 10^{-3}$	$+ 1,602 \cdot 10^{-19} C$
Neutrino ν et antineutrino $\bar{\nu}$	Explique les radioactivités β^+ et β^-	Quasi nulle	Nulle
Particule α	4 nucléons : $2p + 2n$ Noyau de l'hélium : 4_2He Notée : $\alpha, \alpha^{++}, {}^4_2He, He^{++}$	$m = 4,0015 u < 2m_p + 2m_n$	$+ 3,204 \cdot 10^{-19} C$ $= 2 \times e^+$

B. Ondes électromagnétiques

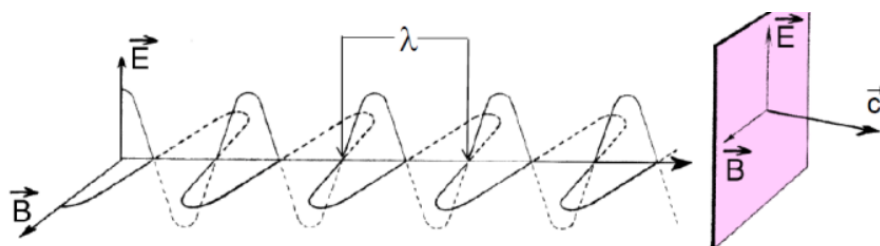
→ Représentation ondulatoire de la matière :

C'est une **perturbation du champ électromagnétique** qui se propage dans le vide à la **vitesse de la lumière** : $c = 3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$

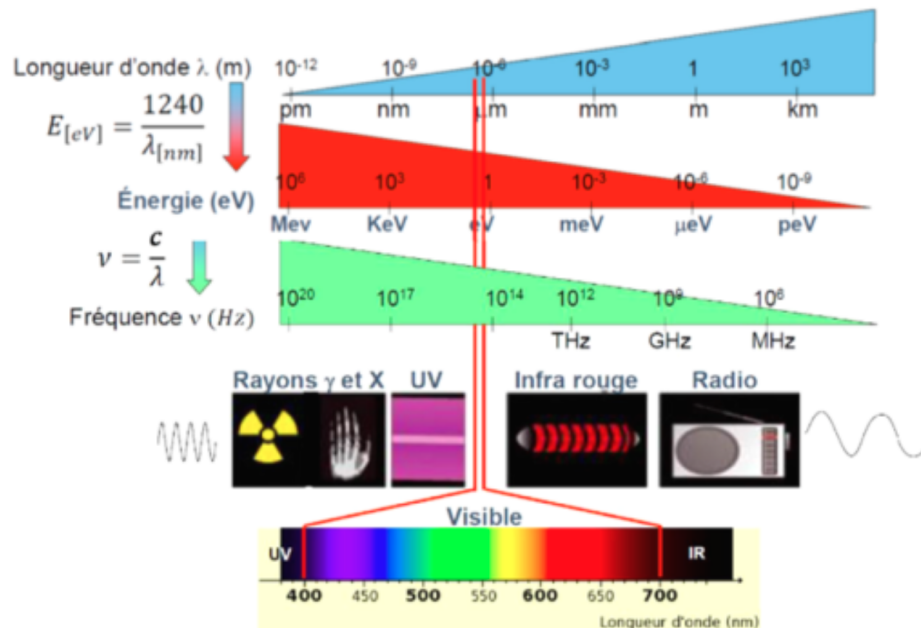
C'est la **propagation simultanée** d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui **vibrent en phase**, et qui sont **perpendiculaires** l'un par rapport à l'autre et par rapport à la direction de propagation.

On caractérise les ondes électromagnétiques par :

- Leur **longueur d'onde**, λ , qui est la plus petite distance séparant deux points de même excitation.
- Leur **fréquence**, n , que l'on exprime avec la formule : $\nu = \frac{c}{\lambda}$ en Hz ++



→ Spectre des ondes électromagnétiques :



On remarque que les ondes qui vont avoir une **faible longueur d'onde** vont avoir une **énergie** et une **fréquence élevée** (et inversement).

Le **domaine du visible** est très étroit, il s'étend de **400 à 700 nm**. +++

→ Représentation quantique :

Une onde EM ne cède ou n'acquiert de l'énergie que par des quantités discontinues, qui sont des multiples de $E = h\nu$ (avec h la constante de Planck $6,62 \cdot 10^{-34}$)

On a donc $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ en **J** (première manière de calculer les « paquets » d'énergie = quantum de Planck)

On peut aussi utiliser la **relation de Duane et Hunt** +++++ : Attention ! E et λ doivent être dans les bonnes unités :

E en eV et λ en nm.

$$E = \frac{1240}{\lambda}$$

C. Dualité onde/particule

En général, les particules ont une **masse** et donc **produisent des collisions**. On a aussi les ondes qui elles n'ont **pas de masse** et sont à l'origine du **phénomène de diffraction**.

★ Selon Einstein :

Les OEM peuvent être considérées comme ayant une **nature corpusculaire** : les **photons**.

Comme on a $E = mc^2$ pour une particule de masse m et $E = \frac{hc}{\lambda}$, on trouve :

$$E = mc^2 = \frac{hc}{\lambda} \rightarrow m = \frac{h}{\lambda c}$$

→ On peut considérer les ondes comme des **corpuscules** appelés photons. Ils ont une **masse théorique**, qui est **dynamique**.

★ Selon Broglie :

On peut associer à chaque particule une représentation ondulatoire. Comme on a $m = \frac{h}{\lambda c}$ pour un photon, on a donc pour une particule $m = \frac{h}{\lambda v}$ avec v la vitesse de la particule.

La relation d'Einstein vaut pour toutes les particules dont l'électron.

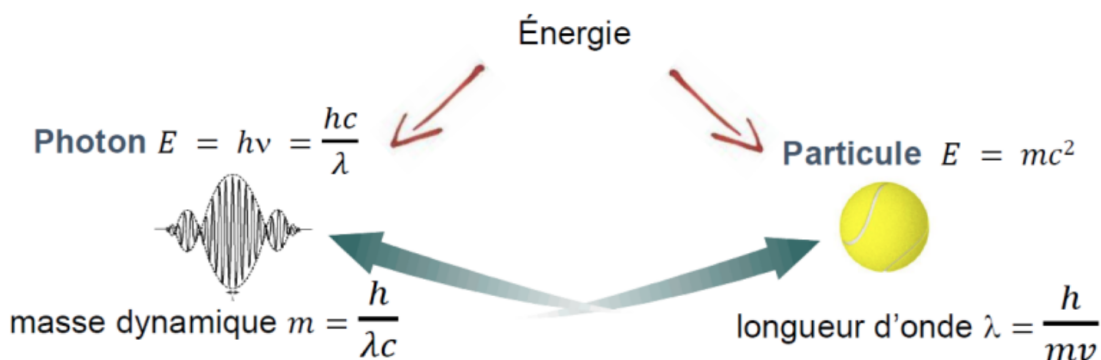
Ainsi, pour toute particule de **masse m** et de **vitesse v** on peut associer une onde $\lambda = \frac{h}{mv}$

→ D'après Einstein, on peut considérer une **onde λ** comme une **masse dynamique**.

→ D'après De Broglie, une particule de **masse m** en mouvement peut être caractérisée par une **longueur d'onde**.

D. Conclusion

L'énergie peut être transportée de différentes manières : soit par un **photon**, soit par une **particule**.



Cependant cette théorie a des limites en pratique car elle **dépend de l'échelle** :

→ Si on a un électron qui a une **différence de potentiel** de **100 V** sa longueur d'onde sera de l'ordre : $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ donc on est dans l'ordre de **grandeur du noyau**.

→ Si on a une **balle de tennis** à **100 km/h** ici la longueur d'onde sera de l'ordre de : $\lambda = 4,2 \cdot 10^{-34} \text{ m}$, il n'y aura donc pas de manifestation ondulatoire à cette échelle car elle est **en dehors de l'échelle du monde physique**.

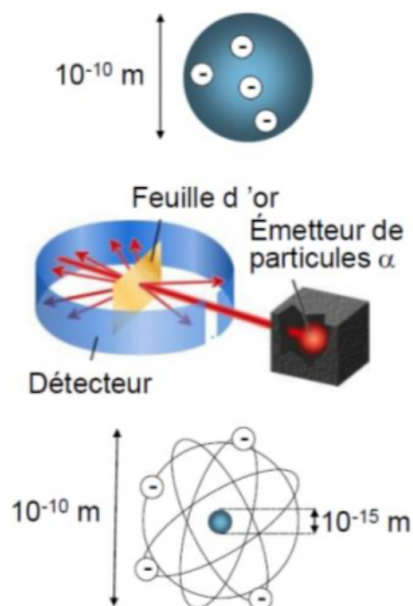
IV. ÉLÉMENTS SUR LA STRUCTURE ÉLECTRONIQUE DE L'ATOME

A. Le modèle de Rutherford (1911)

Jusqu'au **début du XXème** on considérait l'atome comme une **sphère pleine positive** sur laquelle étaient accrochées des **charges négatives**.

Rutherford a effectué une expérience qui consiste à **émittre des particules a** qui bombardent une cible (une **feuille d'or**), et ainsi détecter les **déviations** de ces particules.

Il a pu donc observer que la diffusion des particules à travers la feuille métallique était **incompatible** avec le



modèle sphérique car une majorité des particules a n'étaient **pas déviées**, il a donc conclu que la **matière est pleine de vide**.

La plupart des **particules alpha** ne sont **pas pleines** comme on le pensait.

Il décrit ainsi le modèle planétaire :

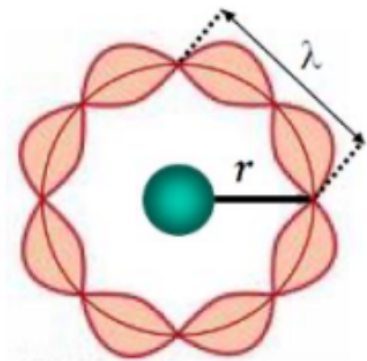
→ La masse serait **concentrée** au niveau du **noyau** qui lui-même est chargé **positivement** ($10^{-15}m$)

→ Et les électrons chargés **négativement** sont refoulés à la périphérie du **vide périnucléaire** ($10^{-10}m$)

B. Principe du modèle de Bohr (1913)

Le modèle de **Bohr** est une **conséquence directe** de la dualité onde-particule : il pense que **seules certaines orbites** sont possibles pour les électrons.

Si on considère un **atome d'hydrogène** composé d'un proton et d'un électron qui **gravite autour de lui**, pour que cet électron puisse **tourner autour du noyau**, il faut que le périmètre de cette orbite soit compatible avec la **nature ondulatoire** de l'électron.



La **circonférence de l'orbite** doit donc pouvoir loger un nombre entier de **longueur d'onde de l'électron** :

$$l = 2\pi r = n\lambda$$

Le rayon r des orbites possible est donc quantifié : il y a un **nombre fini d'orbites de rayons** $r = n \frac{\lambda}{2\pi}$

Avec n un nombre entier

L'intensité de la liaison des électrons dépend de **l'orbite** sur laquelle il va se positionner.

C. Modèle de Bohr : énergie de l'électron

Conséquences du modèle de Bohr sur l'énergie de l'électron

Pour l'atome H et l'orbite n, on a l'énergie de l'électron qui vaut : $W_n = -13,6 \frac{1}{n^2} eV$ +
L'énergie de l'électron est négative, car on considère qu'il est dans un puit d'énergie.

- ★ L'énergie de liaison EL de l'électron : c'est l'énergie qu'il faut apporter pour **arracher cet électron** à l'édifice atomique et l'**emporter loin de l'influence du noyau**.

Les valeurs entre EL et W sont **proches** car EL vaut la valeur absolue de l'énergie de l'électron, elle est donc positive :

$$E_L = |W|$$

→ W et EL sont quantifiées de manière **discontinue** car elles dépendent de n.

Pour l'atome 1_1H on a ce tableau selon les différentes valeurs de n : .

n	1	2	3	4	
r ($10^{-10} m$)	0,5	2	4,5	8	
Orbite	K	L	M	N	
$W_n (eV)$	-13,6	-3,4	-1,5	-0,8	
		$W_k/4$	$W_k/9$	$W_k/16$	

Dans le modèle de Bohr on note les orbites K, L, M...

À l'état fondamental de H, l'électron occupe la couche de K car c'est la couche qui correspond à la **Wn minimale** (et donc EI maximale).

Il peut passer sur une **orbite supérieure** par **absorption** d'un **quantum d'énergie**.

Exemple: si on apporte, $\Delta E = W_2 - W_1 = -3,4 + 13,6 = 10,2 eV$, on passe de la **couche K à la couche L**.

Mini récap :

Energie de l'électron : toujours **négative**

Energie de liaison : toujours **positive**, =énergie pour **arracher** un électron de l'édifice atomique. L'électron le **plus proche du noyau** a l'énergie la plus **faible** et l'énergie de liaison la plus **forte**.

D. Généralisation du modèle de Bohr (pour Z quelconque)

Si on extrapole la formule pour l'hydrogène on trouve : $W_n = -13,6 \frac{Z^2}{n^2} eV$

Mais dans un atome possédant plusieurs électrons, ces derniers vont se gêner entre eux et subir l'**influence du nuage électronique** : c'est l'**effet écran** σ
On doit donc en tenir compte dans le calcul de l'énergie :

$$W_n = -13,6 \frac{(Z - \sigma)^2}{n^2} eV$$

(avec σ l'effet écran)

Exemple : la couche M du tungstène ($Z = 74$)

→ La valeur théorique : $W_n = -13,6 \frac{(74)^2}{3^2} = -8275 eV$

→ La valeur réelle : $W_n = -13,6 \frac{(74 - 30,8)^2}{3^2} = -28220 eV$

E. Remplissage des couches électroniques dans le modèle de Bohr :

Pour savoir combien d'électrons peut contenir une couche on utilise les règles de remplissage :

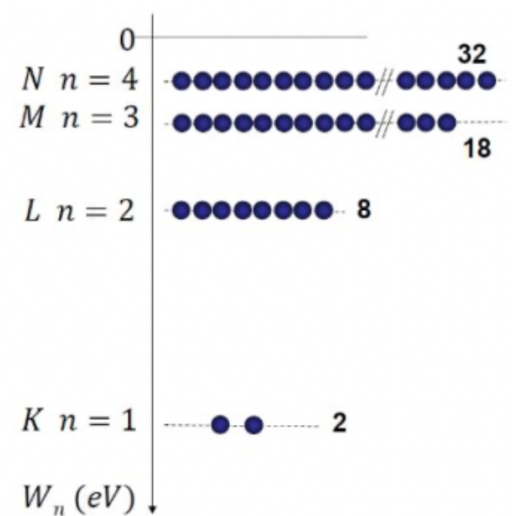
On a au **maximum $2n^2$ électrons par couche** :

→ Pour la couche K, on a au **maximum 2 électrons**

→ Pour la couche L (n=2) on a au **maximum 8 électrons**

→ Pour la couche M (n=3) on a au **maximum 18 électrons**

→ Pour la couche N (n=4) on a au **maximum 32 électrons**



F. Conclusion:

Tous les atomes sont construits selon le **même mode de remplissage** des couches électroniques avec la **règle du modèle de Bohr** : $2n^2$

Les énergies des électrons dépendent des **couches** sur lesquelles ils sont **positionnés** ainsi que du **Z de l'atome** :

	Hydrogène $Z = 1$	Calcium $Z = 20$	Tungstène $Z = 74$
W_k (eV)	- 13,6	- 4000	- 69500
W_{ext} (eV)	- 13,6	- 25,4	- 5,7

Les électrons de la couche K sont les **plus fortement liés** : W_k varie beaucoup selon les atomes.

Les électrons de la couche la plus externe sont les **moins fortement liés** (car il y a un effet écran plus important), W_{ext} varie peu selon les atomes (dépend peu du Z).

Lorsque les couches électroniques les plus basses sont complètes, l'atome est dans son **état fondamental**.

Si l'atome a acquis une certaine quantité d'énergie alors il est en **excès d'énergie**, il se trouve dans un état **excité**.