

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 = 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 ${}^1_1\text{H}$ | Carbone ${}^{12}_6\text{C}$ | Oxygène ${}^{16}_8\text{O}$ |
|---|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 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 ${}^1_1\text{H}$ | Carbone ${}^{12}_6\text{C}$ | Oxygène ${}^{16}_8\text{O}$ |
|---|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 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 |
| 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 :

$$m_u = m_g \times N$$

Remarques :

- La masse en u s'exprime par le même nombre que la masse d'une mole d'atomes en $g \cdot \text{mol}^{-1}$
- 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 +++

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

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

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** ($\mathcal{M}(A, Z)$) est inférieure à la masse de la somme de ses constituants (=neutrons, électrons et protons)

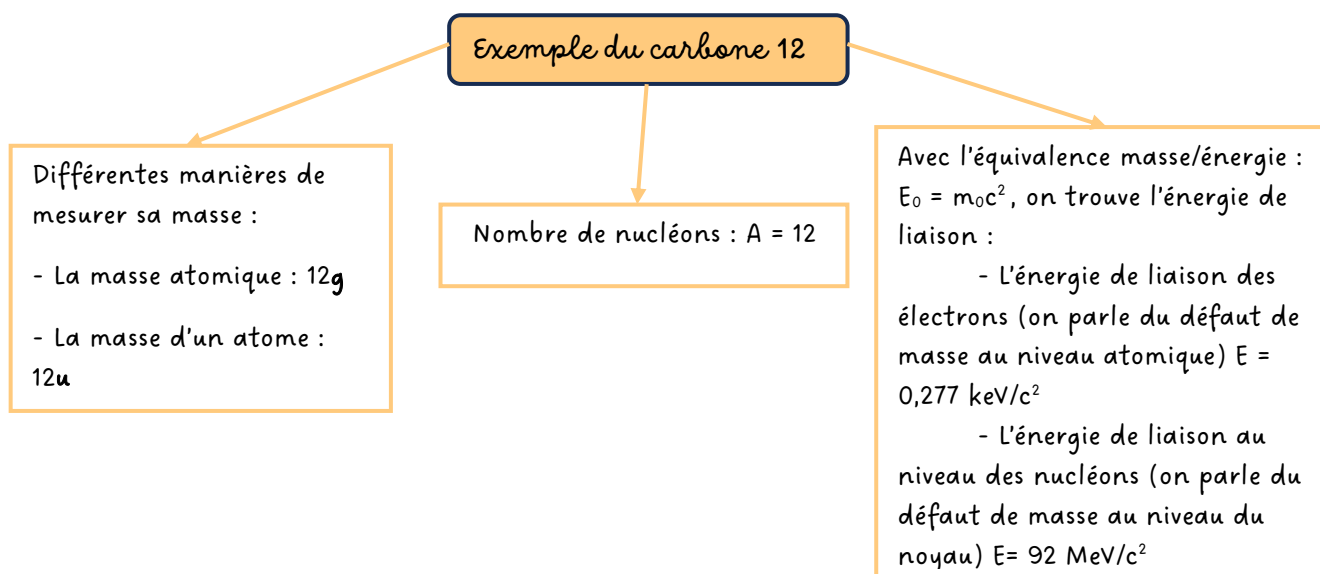
$$\mathcal{M}(A, Z) < M(A, Z) + Z m_e$$

$$\Delta \mathcal{M}(A, Z) = M(A, Z) + Z m_e - \mathcal{M}(A, Z) = E_{le}$$

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 défaut de masse correspond à l'énergie de liaison des molécules.

F. Conclusion

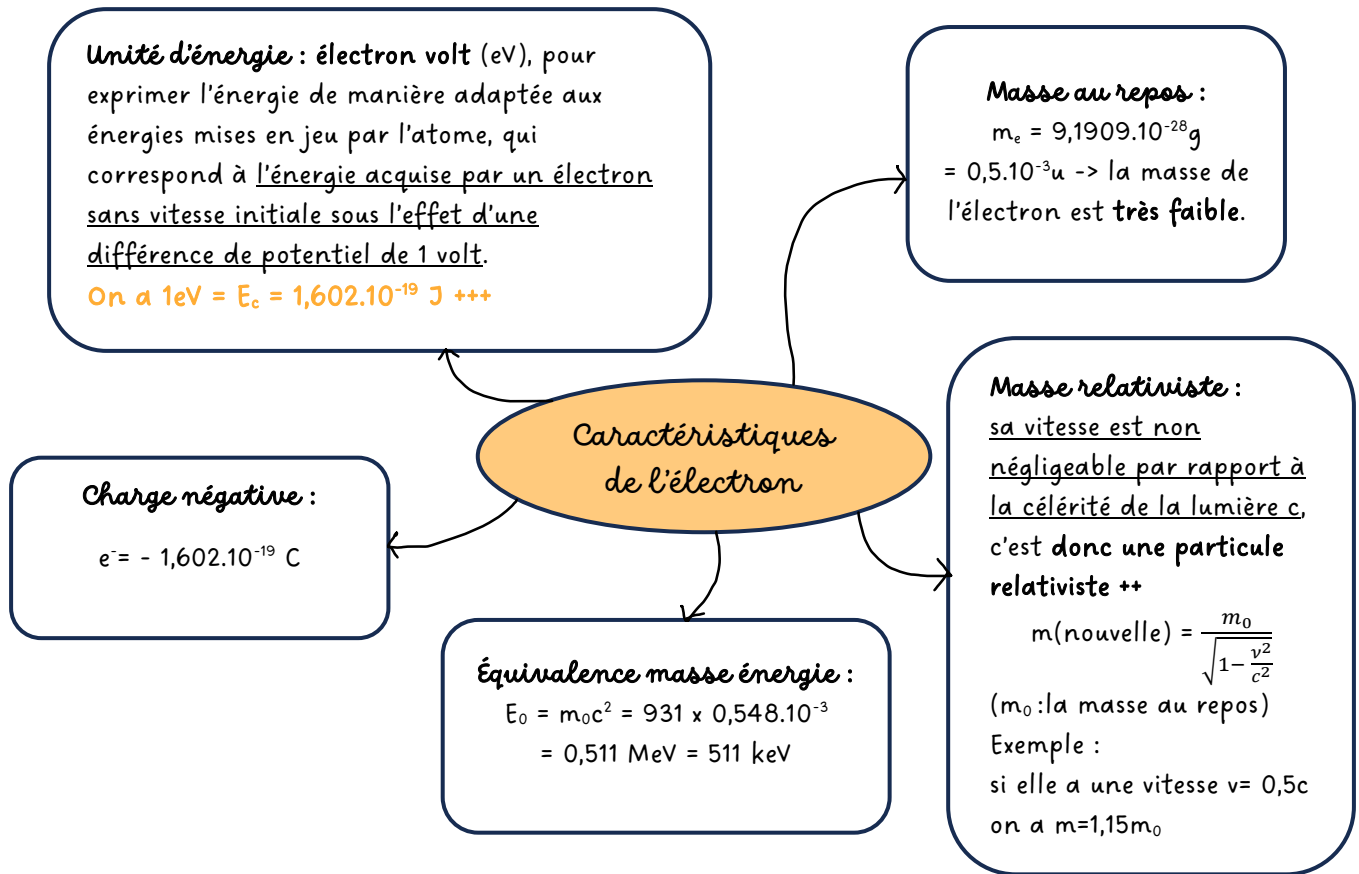


II. Particules et ondes

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 β^- .



Le proton et le neutron

| | Proton | Neutron |
|----------------|------------------------------|--|
| Masse au repos | $m_p = 1,007 \text{ u}$ | $m_n = 1,009 \text{ u}$ |
| Vitesse | Non relativiste | Non 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 ($m_p = 1,007 \text{ u}$) et on a $m_e = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ u}$
Donc la masse de l'atome d'hydrogène vaut : $m_H = 1 \times m_p + 1 \times m_e = 1,0075 \text{ u}$

Particules matérielles

| Particules | Propriétés | Masse de repos | Charge |
|---|---|--------------------------------------|---|
| Positron β^+ | Antiparticule de l'électron | $m = 0,5 \cdot 10^{-3}$ | $+ 1,602 \cdot 10^{-19}$ |
| Neutrino ν et antineutrino $\bar{\nu}$ | Explique les radioactivités β^+ et β^- | Quasi nulle | Nulle |
| Particules α | 4 nucléons : $2p + 2n$ Noyau de l'hélium : ${}^4_2\text{He}$ Notée : $\alpha, \alpha^{++}, {}^4_2\text{He}, \text{He}^{++}$ | $m = 4,0015 \text{ u} < 2m_p + 2m_n$ | $+ 3,204 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 2 \times e^+$ |

B. Ondes électromagnétiques

Représentation ondulatoire de la matière

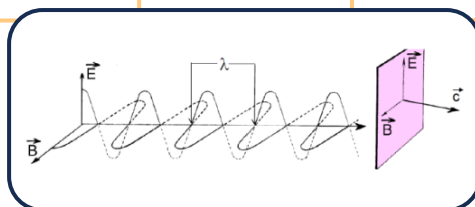
C'est une perturbation du champ électromagnétique qui se propage dans le vide à la vitesse de la lumière : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

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 :

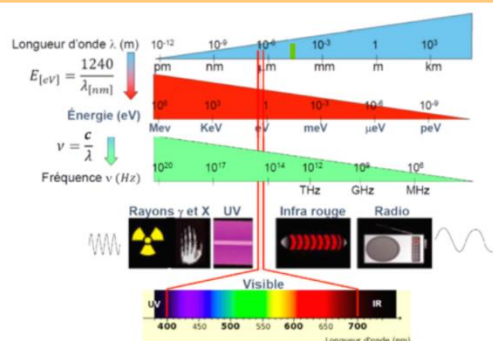
Leur **longueur d'onde, λ** , qui est la plus petite distance séparant deux points de même excitation.

Leur **fréquence, ν** , 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.

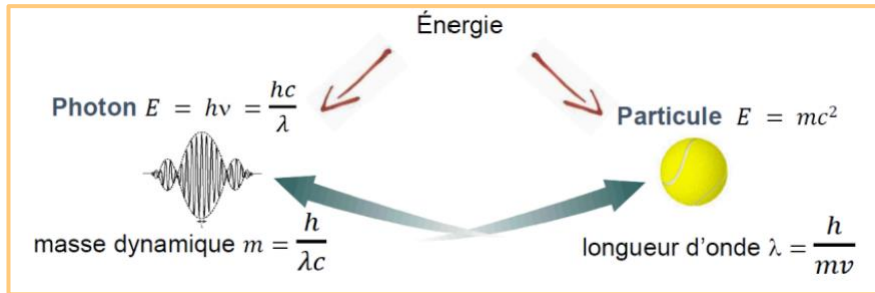
La relation d'Einstein vaut pour toutes les particules dont l'électron.

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 : $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-10}$ 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 : $\lambda = 4,2 \cdot 10^{-34}$, il n'y aura donc pas de manifestation ondulatoire à cette échelle car elle est en dehors de l'échelle du monde physique.

III. Éléments sur la structure électronique de l'atome

A. Le modèle de Rutherford (1911)

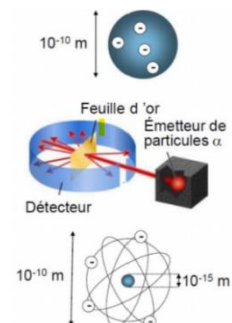
Jusqu'au début du XXème on considérait l'atome comme une sphère pleine positive sur laquelle étaient accrochées des charges négatives.

Rutherford a effectué une expérience qui consiste à émettre des particules α 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 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)

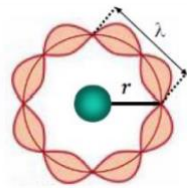
→ Et les **électrons chargés négativement** sont refoulés à la périphérie du vide périnucléaire (10^{-10} m)



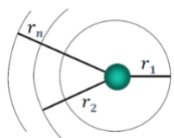
B. Principe du modèle de Bohr (1913)

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 l'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** :



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



Le **rayon r des orbites possible est donc quantifié** : il y a un nombre fini d'orbites de rayons :

$$r = n \frac{\lambda}{2\pi}$$

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 :

$$W_n = -13,6 \frac{1}{n^2} \text{ eV}$$

L'énergie de l'électron est négative, car on considère qu'il est dans un puit d'énergie.

-> **L'énergie de liaison E_L 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 E_L et W sont proches car E_L vaut la valeur absolue de l'énergie de l'électron, elle est donc positive :

$$E_L = |W|$$

-> W et E_L sont quantifiées de manière **discontinue** car elles dépendent de n .

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

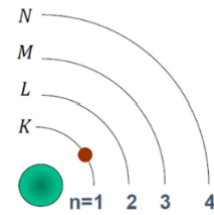
| | | | | |
|-------------------------|---------|---------|----------|------|
| n | 1 | 2 | 3 | 4 |
| r (10 ⁻¹⁰ m) | 0,5 | 2 | 4,5 | 8 |
| Orbite | K | L | M | N |
| W_n (eV) | -13,6 | -3,4 | -1,5 | -0,8 |
| | $W_K/4$ | $W_L/9$ | $W_M/16$ | |

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

On constate :

-> À l'état fondamental de H, l'électron occupe la couche de K car c'est la couche qui correspond à la W_n minimale (et donc E_I maximale).

-> Il peut passer sur une orbite supérieure par absorption d'un quantum d'énergie. Exemple : si on apporte $\Delta E = 10,2$ eV on a un passage de la couche K à la couche L.



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

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

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 :

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

(avec σ l'effet écran)

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

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

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

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 :

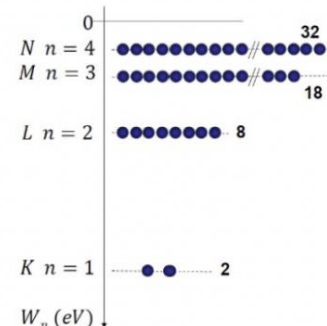
On a au maximum $2n^2$ électrons par couche :

→ 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**.

