

Chapitre I. Structure de la matière et rayonnements électromagnétiques

I-A. La matière

On désigne par le terme de matière tout ce qui compose les corps qui nous entourent, tout ce qui a une **masse** et un **volume**.

Il existe différentes familles de matière, comme :

- la matière organique, qui constitue les êtres vivants (animaux ou végétaux) ou morts ;
- la matière azotée, qui est le résultat de transformations de l'azote, etc.

I-A-1. Un peu d'histoire

Pendant des siècles, l'idée généralement admise était que toute matière pouvait être formée à partir de quatre éléments fondamentaux : l'eau, l'air, la terre et le feu...

Néanmoins, les grecs anciens, et en particulier **Démocrite**, avaient déjà imaginé que **la matière** devait être **discrète** et non continue, c'est à dire qu'elle ne peut pas être divisée indéfiniment. Ils avaient ainsi postulé l'existence de **grains de matière indivisibles** qu'ils appelèrent **atomes** (*atomos* en grec signifie insécable).

Les notions modernes d'éléments et d'atomes sont apparues plus tard avec les débuts de **la chimie**. La notion **d'élément** telle qu'elle est connue actuellement a été définie en 1661 par **Robert Boyle**. Ensuite, John Dalton en 1808 et Avogadro en 1811 élaborèrent la notion **d'atome** et de **molécule** afin d'expliquer les réactions chimiques, mais ce schéma ne fut adopté officiellement qu'en 1860.

Il fallut attendre la fin du XIX^{ème} siècle pour que l'atome soit aussi étudié par **les physiciens** et pas seulement par les chimistes.

I-A-2. De quoi est faite la matière ?

Si on prend un morceau de fer et qu'on le divise en morceaux de plus en plus petits, il arrivera un moment où il ne sera plus possible de le diviser en morceaux de fer. **Ce plus petit morceau de fer possible est l'atome de fer**. Un atome de fer peut être divisé mais les morceaux qui restent après la division ne sont plus du fer (on obtient un noyau et des électrons)...

Si on prend de l'eau et qu'on la divise en parties de plus en plus petites, il arrivera aussi un moment où il ne sera plus possible de la diviser en parties d'eau. **La plus petite partie d'eau possible est la molécule d'eau**. La molécule d'eau peut être divisée mais les morceaux qui restent après la division ne sont plus de l'eau : ce sont un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène (la molécule d'eau est donc notée H₂O)...

Ainsi, il est possible de faire de l'eau avec de l'oxygène et de l'hydrogène, au cours d'une réaction chimique. Par contre, il n'est pas possible de faire du fer par une réaction chimique (mais il est possible d'extraire du fer d'une molécule qui en contient).

Une molécule est donc un assemblage **de plusieurs atomes**. Certains corps, tels que l'eau, sont des **corps composés**, leur plus petite partie est une molécule, d'autres, comme le fer, sont des **corps purs**,

leur plus petite partie est un atome. **La chimie** permet de faire des corps composés à partir de corps purs, mais pas de faire des corps purs à partir d'autres corps purs...

I-A- 3. Les états de la matière

Dans la vie de tous les jours, on s'intéresse au trois états de la matière : solide, liquide et gaz.

L'état sous lequel se trouve la matière dépend de deux paramètres : la température et la pression.

Ainsi, à la pression atmosphérique normale, l'eau est solide (glace) en dessous de 0°C, est liquide entre 0°C et 100°C et est de la vapeur d'eau (gaz) au dessus de 100°C.

A 0°C l'eau change d'état et passe de l'état solide à l'état liquide (ou l'inverse).

A 100°C l'eau change à nouveau d'état et passe de l'état liquide à l'état gazeux (ou l'inverse).

Quand la matière passe d'un état à un autre on dit tout simplement qu'il y a changement d'état.

I-A- 4. Définitions

- **Solide** : C'est un état de la matière qui possède une forme propre. Il possède une masse et une forme qui ne change pas. Il ne peut pas être invisible. Les particules sont très proches les unes des autres. Il y a une grande force d'attraction entre les particules, figure 1.

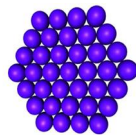


Figure 1. La structure du solide

- **Liquide** : C'est un état de la matière qui ne possède pas de forme propre. Il possède une masse et un volume défini. Les particules sont proches mais il y a de l'espace entre elles. La force d'attraction entre les particules est moindre que dans les solides, figure 2.

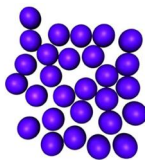


Figure 2. La structure du liquide

- **Gaz** : Il occupe toute la place disponible. Possède un volume et une masse non défini (les particules sont toujours en mouvement). Peut être invisible. Sa forme est non-définie car il prend la forme du contenant. Les particules sont très éloignées. La force d'attraction est très petite, figure 3.



Figure 3. La structure du gaz

On a vu que la matière est constituée d'atomes ou de molécules (assemblage d'atomes). Les atomes sont entre cent mille et un million de fois plus petits que le diamètre d'un cheveu (10^{-10} m) et constituent les briques élémentaires qui permettent de différencier un élément chimique d'un autre. Au total, il existe actuellement 118 éléments regroupés dans un tableau périodique des éléments, aussi appelé tableau de Mendeleïev.

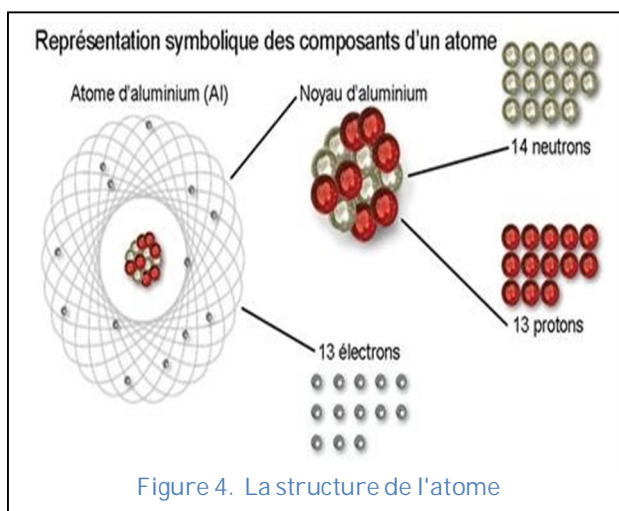
I-A- 5. Structure de l'atome

L'atome est le constituant de base de la matière. Dans le noyau de l'atome se trouvent les **protons** (chargés positivement) et les **neutrons** (non chargés), tandis que les **électrons** (chargés négativement) sont localisés autour du noyau.

Son nombre de protons ou numéro atomique est noté Z. L'atome étant neutre, il comporte autant d'électrons que de protons. Ainsi le **numéro atomique détermine les propriétés chimiques de l'atome**.

A chaque valeur de Z correspond un nom d'atome, un élément chimique. Ainsi l'hydrogène possède 1 proton, tandis que le carbone en possède 6.

Le nombre de neutrons au sein du noyau est désigné N. Le nombre de masse A est la somme de Z+N. Figure 4.



Par convention, on a adopté l'écriture suivante : A_ZX .

Exemple:

La représentation ${}^{16}_8O$ est celle du noyau d'un atome d'oxygène comportant 8 protons et $16 - 8 = 8$ neutrons.

I-A-6. Les unités de la physique atomique

I-A-6-a-Unité de masse

On définit l'unité de masse atomique (u.m.a) comme la $1/12^{\text{ième}}$ de la masse de l'atome de carbone 12. Comme une mole d'atome de carbone 12 a pour masse 12 g, on a donc

$1 \text{ u.m.a} = 1/12 \times 12 / N_A = 1/N_A = 1,66 \times 10^{-24} \text{ g}$
avec $N_A = 6,023 \times 10^{23} = \text{nombre d'Avogadro}$.

I-A-6-b- Unité d'énergie

On utilise fréquemment l'électron-volt (eV) qui correspond à l'énergie cinétique acquise par un électron soumis à une différence de potentiel de 1 volt. D'où
 $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

I-A-6-c- Equivalence masse-énergie

La relation d'Einstein $E=mc^2$ permet de convertir les unités de masse en unités d'énergie et réciproquement. Par exemple on peut calculer que :
1 u.m.a correspond à 931,5 MeV

I-A-7. Les particules élémentaires

<i>Particules</i>	<i>Proton</i>	<i>Neutron</i>	<i>Électron</i>
<i>Charge (coulomb)</i>	$1.6021892 \cdot 10^{-19}$	0	$-1.6021892 \cdot 10^{-19}$
<i>Masse (kg)</i>	$1.6726485 \cdot 10^{-27}$	$1.6749543 \cdot 10^{-27}$	$9.109534 \cdot 10^{-31}$
<i>Masse (u.m.a)</i>	1.007276	1.008665	0.000549

Tableau 1. Les particules élémentaires

Parmi les quelques deux mille noyaux atomiques distincts correspondant tous à l'écriture générale, ${}^A_Z X$ les distributions des neutrons et des protons permettent de définir des familles particulières de nucléides ; on distingue :

- **Les isotopes :**

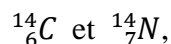
Ce sont de éléments qui ont même numéro atomique Z et donc même nom et même propriétés chimiques ; par contre, le nombre de masse A est différent d'où un nombre de neutrons différents. Il en résulte des propriétés physiques différentes des noyaux.

Par exemple:



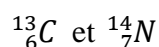
- **Les isobares :**

Ils présentent la curiosité mathématique d'avoir le même nombre de masse A avec de numéros atomiques Z différents ; ils n'ont aucune propriété commune ; par exemple :



- **Les isotones :**

Ils ont le même nombre de neutrons $N = A-Z$ sans que cela entraîne des propriétés spéciales ; par exemple :



- **Les isomères :**

Ce sont deux éléments absolument identiques ; seule une différence d'énergie permet de les distinguer, l'un se trouve à un niveau d'énergie métastable (m) supérieur à l'autre, par exemple :

Br avec Br^(m)

Famille de nucléides	Nucléon (A)	Protons (Z)	Neutron (A-Z)
Isotope :	différent	identique	différent
Isotone :	différent	différent	identique
Isobare :	identique	différent	différent

Remarque :

- La densité d'un noyau ne dépend pas de A.
- La distribution des protons et des neutrons est uniforme.
- Le noyau étant assimilé à une sphère de rayon R, on a la relation :

$$R = R_0 A^{1/3};$$

avec $R_0 = 1,4 \times 10^{-15} \text{ m} = 1,4 \text{ Fermi}$

A = nombre de masse du noyau de l'atome.

- Si A est sans unité ; A = nombre de nucléons du noyau
- Si A est en g ; A = masse d'une mole d'atomes
- Si A est en u.m.a ; A = masse d'un atome.

Connaissant A pour un atome quelconque, on peut donc en déduire le nombre de nucléons, la masse d'une mole et la masse d'un atome.

I-A-8. Le défaut de masse et énergie de cohésion (liaison) d'un noyau

La masse d'un atome est inférieure à la somme des masses des particules qui le constituent. Ce défaut de masse correspond à l'énergie de cohésion du noyau de l'atome. C'est aussi l'énergie qui a été consommée pour constituer le noyau à partir des particules séparées. A cette énergie correspond une perte de masse Δm , selon la relation d'Einstein :

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

$$\text{Avec } \Delta m = (Zm_p + (A-Z)m_n) - M(A,Z)_{\text{noyau}}$$

I-B. Rayonnements Electromagnétiques

I-B-1. Physique générale des radiations

On entend par rayonnement, ou radiation la propagation d'énergie à travers l'espace sous forme d'onde ou de particule.

I-B-1-1. Classification des rayonnements

On classe les rayonnements selon leurs natures ou selon leurs interactions avec la matière.

Elles peuvent être classés selon leurs natures soit en:

- Rayonnements Electromagnétiques (REM).
- Rayonnement particulaires (corpusculaires), (RP).

Ou elles sont classés selon leurs interactions avec la matière en :

- Rayonnements ionisants,
- Rayonnements non ionisants

I-B-2. Rayonnements électromagnétiques

Une onde électromagnétique correspond à la propagation d'un champ électrique E et d'un champ magnétique associé B perpendiculaires entre eux. Figure 5.

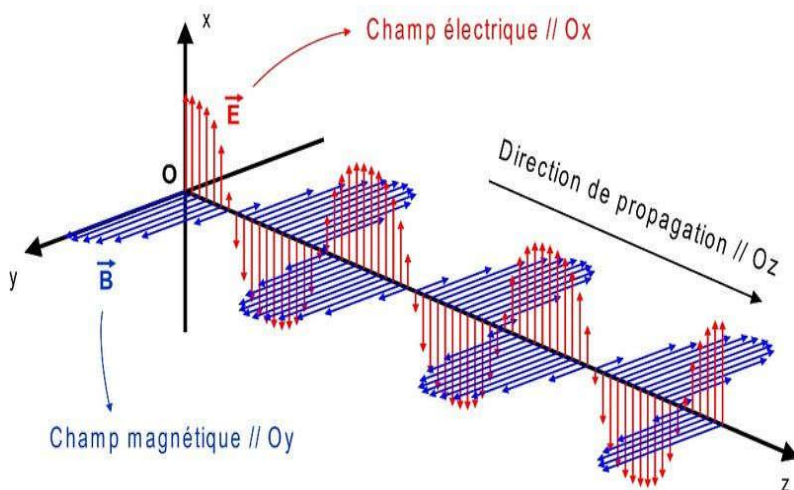


Figure 5. Propagation d'une onde électromagnétique

I-B-2-1. Spectre d'un rayonnement électromagnétique

La gamme des ondes électromagnétiques est très étendue, depuis les basses fréquences des ondes radio jusqu'au rayons cosmiques. L'ensemble de toutes ces ondes électromagnétiques constitue le spectre électromagnétique.

On peut ainsi répartir l'intensité d'un REM en fonction de la longueur d'onde, de la fréquence ou de l'énergie. Figure 6.

L'intensité d'un REM peut également être représentée graphiquement et les spectres obtenus sont appelés respectivement, spectre en longueur d'onde, spectre en fréquence et spectre en énergie.

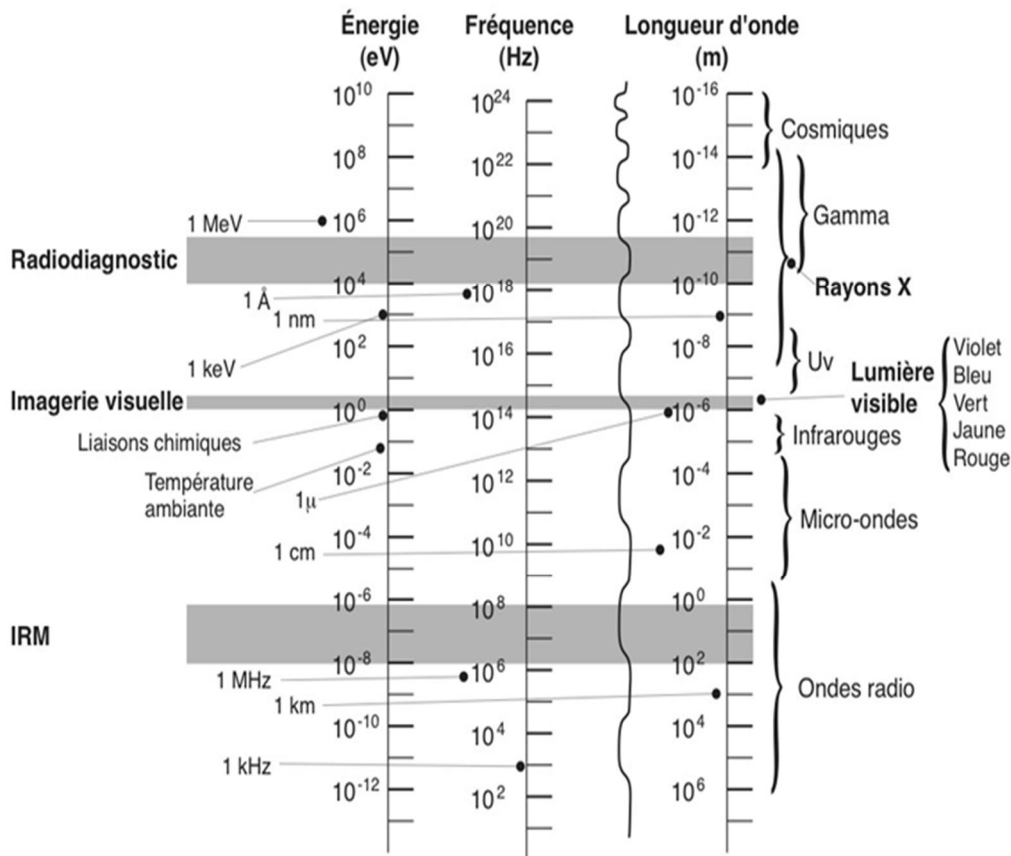


Figure 6. Le spectre électromagnétique

Remarques :

- ✓ Une onde électromagnétique monochromatique, c'est-à-dire présentant une seule fréquence est aussi appelée onde sinusoïdale. Elle se propage en créant une perturbation (ou déformation) dans l'espace. Le passage de cette perturbation peut être entièrement décrit par une fonction appelée « fonction d'onde » qui dépend de la position du point de l'espace considéré et du temps.
- ✓ Une onde électromagnétique permet le transport de l'énergie sans aucun support matériel (propagation dans le vide).
- ✓ L'onde électromagnétique est une onde plane (c'est-à-dire que sa propagation dans le vide se fait dans une direction perpendiculaire au plan défini par E et B).
- ✓ Dans le vide, la propagation de l'onde électromagnétique se fait à vitesse constante : c (Vitesse de la lumière).

I-B-2-2. Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques

La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide est une constante notée « c » et appelée « célérité de la lumière ». Elle est donnée par la relation :

$$V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c$$

ϵ_0 et μ_0 sont des constantes représentant respectivement la permittivité et la perméabilité dans le vide.

$$\varepsilon_0 = 8,84 \times 10^{-12} \text{ SI}$$

$$\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \text{ SI}$$

La célérité de la lumière est donc égale à :

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

I-B-2-3. Propagation d'une onde électromagnétique dans la matière

Les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans certains milieux matériels et pas d'autre, suivant leurs fréquences une matière peut se montrer:

- ✓ transparente (propagation possible)
- ✓ opaque (pas propagation, les ondes sont totalement absorbées, diffusées ou réfléchies)

Dans un milieu transparent la célérité est variable, elle dépend de la nature chimique du milieu mais aussi de paramètres physiques tels que la température, la pression, la densité...

Chaque milieu transparent est caractérisé par son indice de réfraction « n » qui dépend parfois de la fréquence, et qui permet d'exprimer la célérité dans le milieu: $c_{\text{milieu}} = c_{\text{vide}}/n$

I-B-2-3. Caractéristiques d'un rayonnement électromagnétique

Comme toutes les ondes périodiques elle est caractérisée par:

- sa période T (exprimée en seconde (s)) (peu utilisée)
- sa fréquence ν (exprimée en hertz (Hz))
- sa longueur d'onde λ (exprimée en mètre (m))
- son amplitude (préfère utiliser la notion d'intensité lumineuse I)
- sa célérité c (exprimée en $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$)
- son énergie notée E (exprimée en Joules (J)).

Ces grandeurs sont liées entre elles par les relations usuelles:

- La fréquence est l'inverse de la période: $\nu = 1 / T$
- La période est par conséquent l'inverse de la fréquence: $T = 1/\nu$
- La longueur d'onde est la distance sur laquelle se propage l'onde pendant la durée d'une période d'où la relation $\lambda = c \cdot T$ mais on peut également l'exprimer en fonction de la fréquence $\lambda = c/\nu$.

I-B-2-3-1. Période et fréquence d'une onde électromagnétique

On appelle période T la durée d'une vibration entière. La fréquence ν mesure le nombre de vibration par seconde.

$$T = \frac{1}{\nu}$$

Avec T en seconde et ν en s^{-1} ou Hz

I-B-2-3-2. Longueur d'onde:

La longueur d'onde représente la distance parcourue par l'onde électromagnétique pendant une période d'oscillation figure 7.

Dans le vide, la période est donnée par la relation : $\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu}$

λ en mètre et c en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

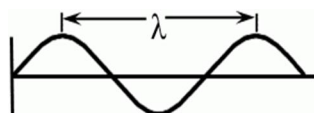


Figure 7. La longueur d'onde

I-B-2-3-3. Energie d'une onde électromagnétique

Comme toutes les ondes, les ondes électromagnétiques propagent de l'énergie, celle-ci dépend de la fréquence: plus la fréquence est élevée et plus l'énergie propagée est grande.

Etant donné que $\lambda = c/v$, plus la longueur d'onde est faible et plus l'énergie est élevée. Par conséquent les rayonnements les plus énergétiques du spectre électromagnétique sont les rayons gamma tandis que les moins énergétiques sont les ondes radio.

Au niveau du spectre visible on peut dire que les lumières violettes sont plus énergétiques que les lumières rouges.

L'onde électromagnétique permet le transport de l'énergie sous forme de paquets discrets (discontinus) appelés quanta.

Chaque quantum transporte une énergie E tel que : $E = h.v$

h est la constante de Planck : $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$

E en Joules (J).

A l'échelle atomique, il est d'usage d'exprimer, l'énergie en électron-volt (eV).

I-B-2-3-4. Emission et absorption d'une onde électromagnétique

L'émission ou l'absorption d'ondes électromagnétiques par la matière est possible lors de transition entre « niveaux d'énergie » différents:

Le passage vers un niveau d'énergie plus bas permet de libérer de l'énergie et donc d'émettre une onde électromagnétique.

Le passage vers un niveau d'énergie plus élevée nécessite un gain d'énergie et donc l'absorption d'une onde électromagnétique.

I-B-2-4. Aspect corpusculaire d'un rayonnement électromagnétique

Les ondes électromagnétiques peuvent dans certaines condition être considérées comme un flux de particules (de corpuscules) appelée photons. La notion de « photon » permet d'interpréter cette caractéristiques de la lumière et en particulier les échantent d'énergie qu'elle peut opérer avec la matière.

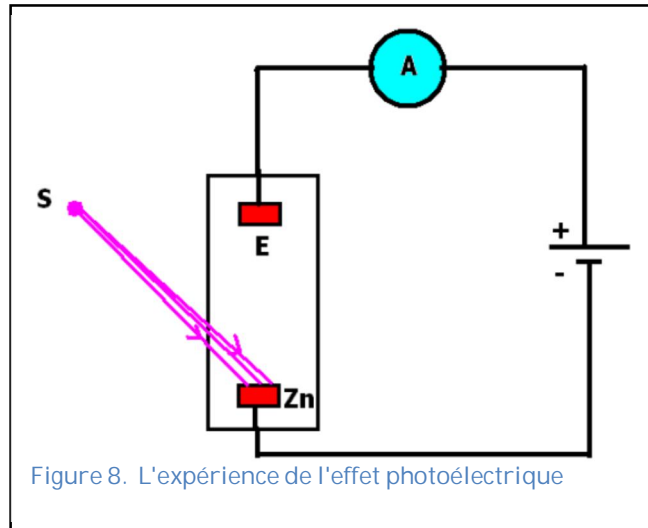
I-B-2-5. Une brèche dans la théorie ondulatoire : l'effet photoélectrique

A la fin du XIXème siècle, la communauté scientifique pensait le modèle ondulatoire était apte à décrire correctement la lumière dans toutes expériences possibles. Mais, des difficultés furent rencontrées, comme en 1887 par la découverte de l'**effet photoélectrique** par **Heinrich Hertz** (1857-1894).

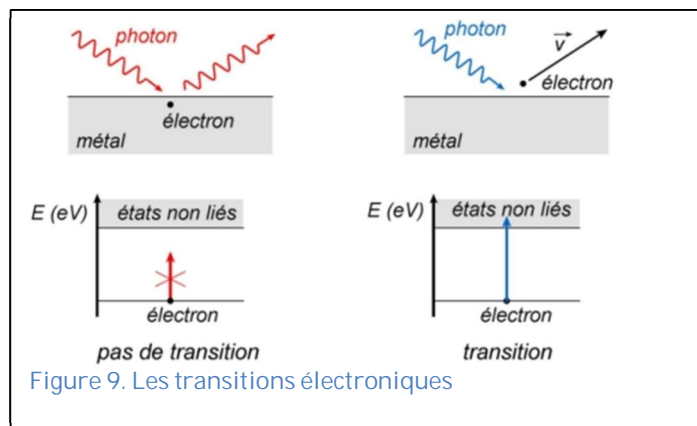
Cet effet fut mis en évidence par une expérience devenue célèbre, et qui consiste à éclairer une plaque de zinc (considérée comme cathode) portée à un potentiel négatif, par une source de lumière (UV, RX...) on constate un passage de courant (déviation de l'aiguille de l'ampèremètre), donc les électrons sont arrachées de la plaque et sont recueillis par l'anode E, (expérience réalisé par Hertz en 1887), figure 8. La production de ce courant ne peut pas être expliquée par l'interaction entre l'onde électromagnétique et la plaque de zinc.

Pour expliquer ce phénomène **Albert Einstein** (1879-1955) donna en 1905 une explication de l'**effet photoélectrique**. Pour cela, il revint au modèle corpusculaire, en indiquant que la lumière devait

apporter des **quants d'énergie suffisante**, des **photons**, afin d'arracher un électron au métal, et permettre ainsi à l'électroscope de se décharger. Le concept de photon avait été introduit en 1900 par Max Planck (1858-1947) dans son modèle du **rayonnement du corps noir**.



De part la quantification des niveaux d'énergies des électrons dans un atome, la libération de l'électron ne peut se faire qu'en « un coup », c'est-à-dire qu'avec **un seul photon apportant assez d'énergie**. Selon la relation $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$, cela concerne des photons de hautes fréquences ν / basses longueurs d'onde λ : des **photons UV** dans l'expérience. En conséquence, **un rayonnement privé de photons UV (effet de la lame de verre) n'est pas capable pas de créer un courant électrique**.



Entre l'énergie et la longueur d'onde il y a la relation suivante (de Duane et Hunt) :

$$E(\text{eV}) = \frac{12400}{\lambda (\text{\AA})}$$

Où $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ joules et $1 \text{\AA} = 10^{-10}$ m.

Ces photons entrent en collision avec les électrons du métal et lorsque leur énergie devient supérieure à l'énergie de liaison de l'électron W_0 , les électrons sont alors arrachés avec une énergie cinétique Figure 9. Cette condition donne l'équation de l'effet photoélectrique.

$$h\nu = W_0 + \frac{1}{2}mv^2$$

Cet **aspect qualitatif** du rayonnement électromagnétique (énergies des photons) **ne peut pas être décrit par le modèle ondulatoire.**

I-B-2-6. La solution de Louis de Broglie : dualité onde-particule

Le modèle ondulatoire permet de décrire correctement la lumière pour des expériences de diffraction et d'interférences, mais pas l'effet photoélectrique. C'est l'inverse pour le modèle corpusculaire. Alors, comment faire ? La solution fut trouvée par **Louis de Broglie** (1892-1987) en 1923, en expliquant que **les deux modèles ne sont pas forcément opposés, mais qu'ils devraient plutôt coexister.** Telle ou telle expérience met en valeur soit son aspect ondulatoire, soit son aspect corpusculaire, mais la lumière et par extension les ondes électromagnétiques ont un **double comportement onde/particule.** On parle de **dualité onde/particule** ou **dualité onde/corpuscule.**

La métaphore du cylindre vue dans la littérature permet d'illustrer de manière imagée ce comportement à priori surprenant. En effet, selon l'angle d'observation, un cylindre peut avoir l'allure d'un cercle ou d'un rectangle, **sans être finalement ni l'un, ni l'autre,** figure 10.

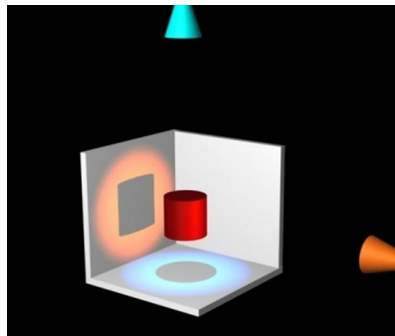


Figure 10. La métaphore du cylindre

I-B-2-7. Longueur d'onde de Louis De Broglie d'un objet quantique

Mais, pourquoi un traitement si particulier pour la lumière ? Louis de Broglie apporta aussi la solution : en fait, il n'y a pas que la lumière qui présente ce double comportement. Tout objet est à la fois une onde et une particule ! Bien entendu, pour un objet macroscopique, le caractère ondulatoire ne s'exprime pas. Mais, un objet comme **un électron peut se comporter comme une onde, car il peut subir les phénomènes de diffraction et d'interférences**

De manière générale, des objets dont la taille est typiquement celle de l'atome ou en dessous présenteront la **dualité onde/particule** et seront **décrits par la mécanique quantique.**

Le **caractère ondulatoire d'un objet quantique** de masse non nulle est traduit par sa **longueur d'onde λ de de Broglie.** Celle-ci est donnée par la relation : $\lambda = \frac{h}{p}$

λ est en mètre, $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ est la constante de Planck ;
 p (en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) est la **quantité de mouvement** de la particule de masse m (en kg).
 → En régime non relativiste ($v \ll c$), $p = m \cdot v$.

→ En régime relativiste (non exigible), $p = \frac{m \cdot v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$, c étant la célérité de la lumière.

Remarque : pour une particule de masse nulle, la relation s'écrit toujours $\lambda = \frac{h}{p}$, mais avec $p = \frac{E}{c}$ (non exigible), où E est son énergie (en J).

Puisque la matière vivante est très abondante en atome d'hydrogène dont l'énergie d'ionisation est de 13,6 eV, on classe les rayonnements selon leurs effets sur la matière en :

- Rayonnement dit ionisant si l'énergie du photon ou est supérieure ou égale à 13,6 eV.
- Un rayonnement dit non ionisant si l'énergie du photon est inférieure à 13,6 eV.

Tous les rayonnements particuliers sont ionisants (ceux de faible énergie n'ont aucun intérêt pratique). Les rayonnements X et gamma sont ionisants, par contre les rayonnements visibles, infrarouges et ultraviolets sont non ionisants.