

## PHYSIQUE GENERALE DES RAYONNEMENTS

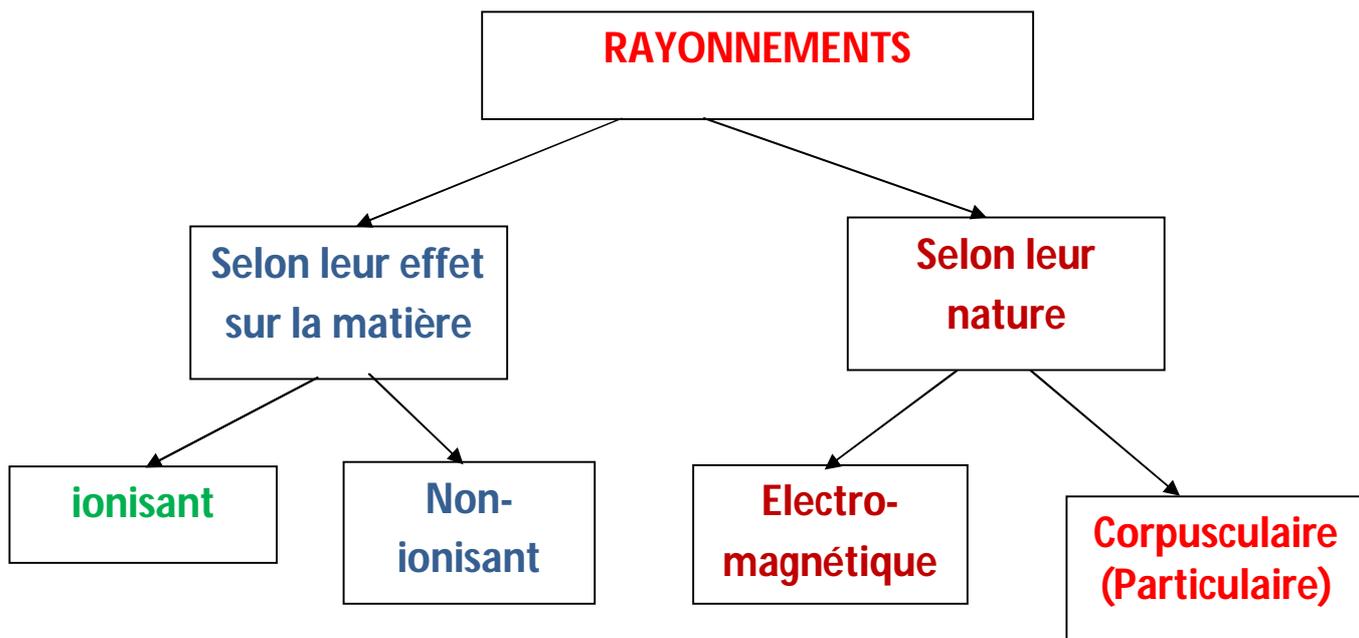
### I-1 Définition du rayonnement :

On appelle rayonnement ou radiation le processus d'émission ou de transmission d'énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques ou de particules.

Certains rayons sont capables de traverser la matière, donc les tissus biologiques. C'est ce qui permet de les utiliser pour obtenir des images diagnostiques (radiographie des os, scintigraphie, etc.). Certains rayons ont également la capacité de détruire les cellules ou de les empêcher de se multiplier ; c'est pourquoi on les utilise dans certains traitements (radiothérapie, laser...etc.).

### I-2 Classification des rayonnements :

- a- Selon leur effet sur la matière : ionisants, non ionisants.
- b- Selon leur nature : électromagnétique et corpusculaire.

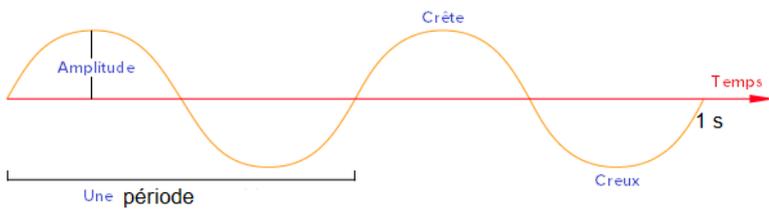
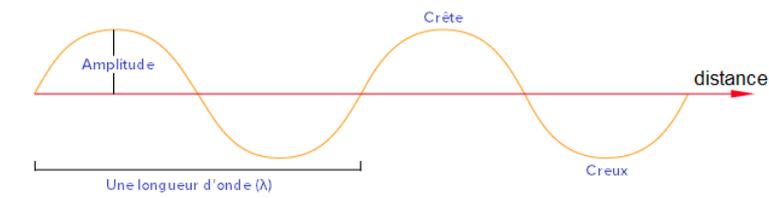


#### I-2-1) Rayonnements ionisants et non-ionisants :

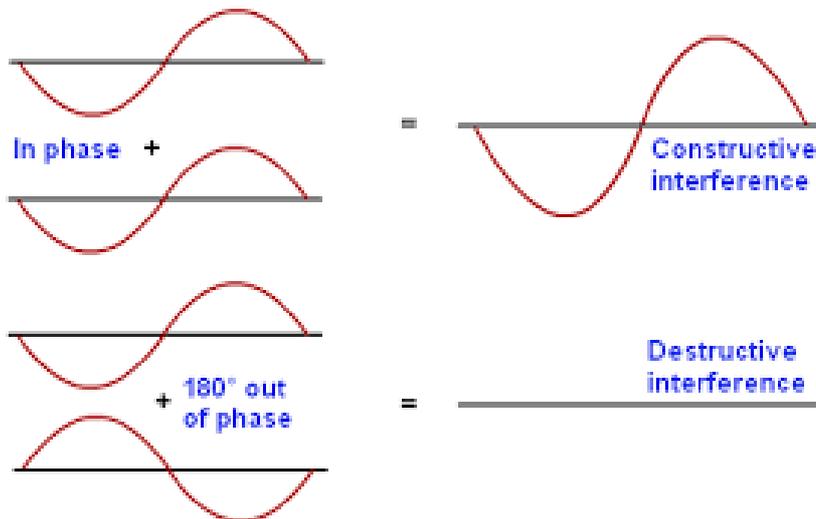
On dit qu'un rayonnement est ionisant s'il peut provoquer des ionisations dans le milieu qu'il traverse.

En biologie on dit qu'un rayonnement est ionisant s'il est susceptible de provoquer des ionisations dans les tissus biologiques dont le seuil énergétique d'ionisation est égal à 13,6 eV ce qui correspond à l'énergie d'ionisation de l'hydrogène. Donc si l'énergie du rayonnement est inférieure à 13,6 eV, il est non ionisant.

## Rappel sur les ondes :

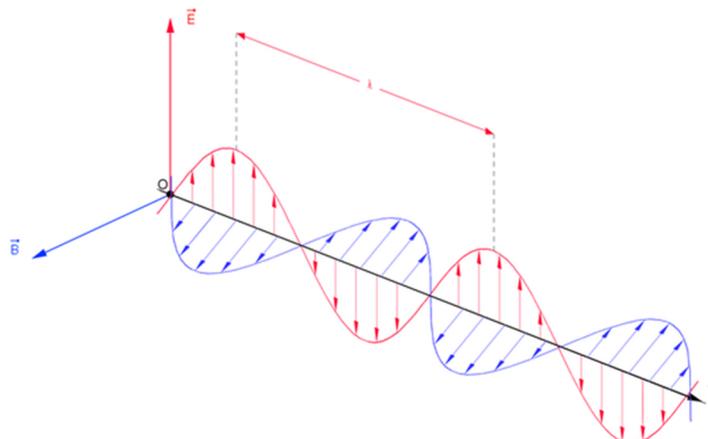


$$\nu = 2 \text{ s}^{-1}$$



## I-2-2) Le rayonnement électromagnétique (REM):

Le REM est composé d'un champ électrique et d'un champ magnétique oscillants avec la même fréquence, perpendiculaires l'un à l'autre ainsi qu'à la direction de leur propagation. L'onde qui en résulte transporte de l'énergie dans le vide ou dans un milieu matériel sans déplacement de matière.



## Exemples de REM :

Les REM apparaissent à l'observateur sous différentes formes, telles que RX, lumière visible, ondes radio,...etc.

## I-2-3) LE RAYONNEMENT CORPUSCULAIRE (PARTICULAIRE) RP :

Le RP est constitué de particules subatomiques se déplaçant à des vitesses très importantes. Ces particules possèdent une masse et éventuellement une charge électrique.

## Exemples de RP :

Electron, proton, neutron, particule  $\alpha$  ( $\text{He}^{++}$ ), positon ( $e^+$ ), ...etc. Ces différentes particules diffèrent entre elles par leurs masses, leurs charges et bien d'autres propriétés physiques.

## I-3) DUALITE ONDE CORPUSCULE :

En physique, la **dualité onde-corpuscule** est un principe selon lequel tous les objets de notre univers présentent simultanément des propriétés d'ondes et de particules. C'est pourquoi chaque objet physique doit être considéré comme particule et onde en même temps ; c.-à-d. à chaque REM on associe une particule de masse nulle appelée photon et à chaque particule on associe une onde dont la longueur est donnée par la relation de de Broglie.

Ce concept fait partie des fondements de la mécanique quantique.

## I-4) GRANDEURS CARACTERISANT LE REM :

### I-4-1) Vitesse :

Les REM se déplacent à une vitesse  $v$  qui dépend du milieu traversé.

Dans le vide cette vitesse est égale à la constante  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  que l'on appelle célérité de la lumière.

a- Dimension:  $[v] = L \cdot T^{-1}$

b- Unité : dans le système MKSA :  $\text{m/s}$

### I-4-2) Période, fréquence et longueur d'onde :

$$v = \frac{v}{\lambda} = \frac{1}{T}$$

Le symbole  $\nu$  représentant la fréquence est une lettre grecque prononcée nu.

a- Dimensions :

$$[T] = T, \quad [\nu] = T^{-1}, \quad [\lambda] = L$$

b- Unités dans le système MKSA :

- Période :  $s$
- fréquence :  $s^{-1} = \text{Hz}$
- longueur d'onde :  $m$

d'autres unités sont couramment utilisées pour la longueur d'onde à savoir : le nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) et l'Å ( $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ ).

### 1-4-3) Energie :

L'énergie d'un REM est un multiple de sa fréquence.

$$E = h \nu$$

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

Dimensions :

$$[E] = ML^2T^{-2}$$

Unité dans le système MKSA : Joule

L'eV et ses multiples est une autre unité utilisée pour mesurer E :

$$1 \text{ e.V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Par commodité on peut utiliser la relation suivante pour calculer E :

$$E = \frac{h \cdot c}{n \cdot \lambda_m}$$

Que l'on peut aussi écrire sous la forme :

$$E \text{ (eV)} = \frac{12400}{n \lambda_m \text{ (Å)}} \quad \text{ou} \quad E \text{ (KeV)} = \frac{12,4}{n \lambda_m \text{ (Å)}}$$

$n$  est l'indice de réfraction du milieu.

$\lambda_m$  est la longueur d'onde dans le milieu considéré.

### I-4-4) Quantité de mouvement :

$$P = \frac{h}{\lambda}$$

a- Dimension:

$$[P] = M \cdot L \cdot T^{-1}$$

b- Unité : dans le système MKSA :  $\text{Kg} \cdot \text{m/s}$

Une autre unité est utilisée pour mesurer P, il s'agit de l' eV/c et ses multiples.

### I-4-5 Relation entre P et E pour un REM dans le vide :

$$P = \frac{E}{c}$$

### I-4-6 Autres propriétés des REM :

- 1- Les REM peuvent se déplacer dans le vide.
- 2- Les REM ont une masse nulle.
- 3- La célérité de la lumière dans le vide est toujours égale à  $c$  quelque soit le référentiel utilisé pour la mesurer.

### I-5) LE SPECTRE D'UN RAYONNEMENT :

Le spectre d'un rayonnement est la représentation graphique de la contribution de chaque radiation constituant le rayonnement à l'intensité, (puissance, énergie, ...etc.) de ce rayonnement en fonction de l'énergie, fréquence ou longueur d'onde...etc. de chacune de ces radiations.

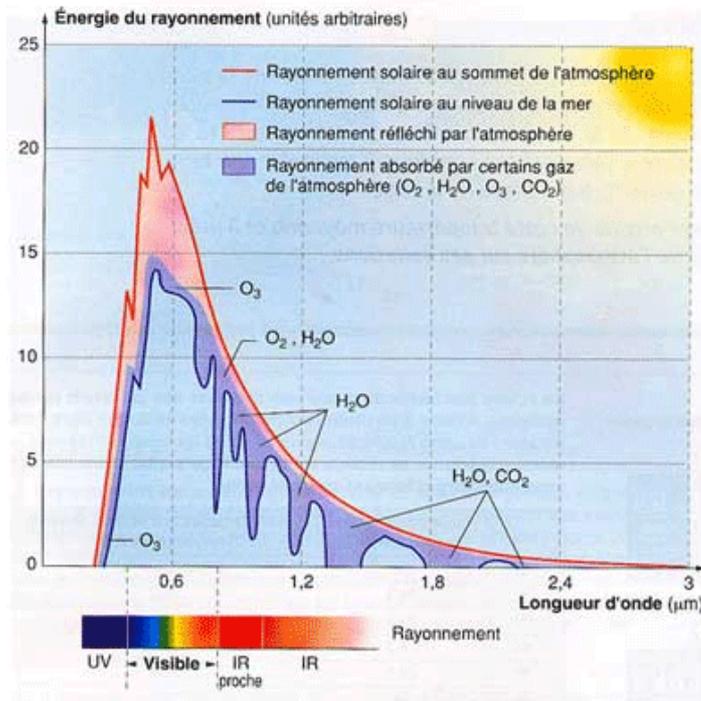


Fig. 1.2 Spectre du rayonnement solaire.

### I-5-1) LE SPECTRE CONTINU :

Lorsque le spectre étudié est constitué de radiations ayant des longueurs d'onde contenues dans un certain intervalle et où elles varient de façon continue, alors on obtiendra un spectre continu.

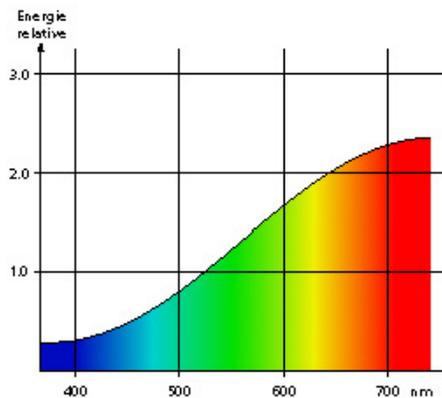


Fig. 1.3 Spectre continu de la lumière émise par une lampe halogène

### I-5-2) LE SPECTRE DE RAIES :

Si le rayonnement étudié ne contient qu'un nombre déterminé de radiations ayant des longueurs d'ondes discrètes alors le spectre obtenu sera discontinu et composé de pics étroits et séparés les uns des autres.

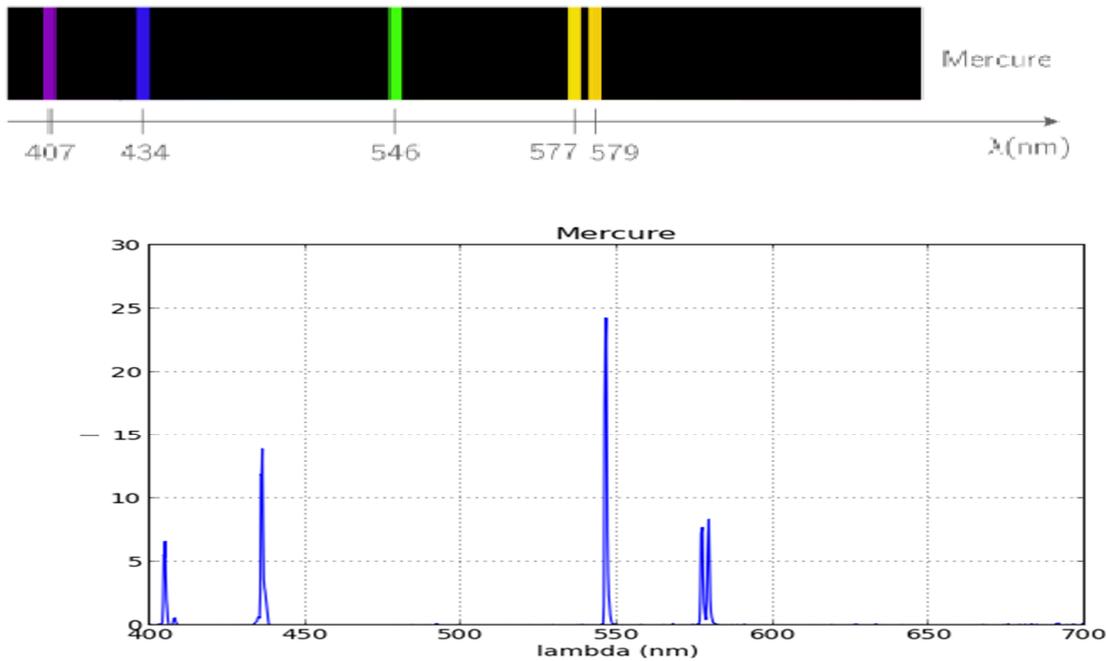
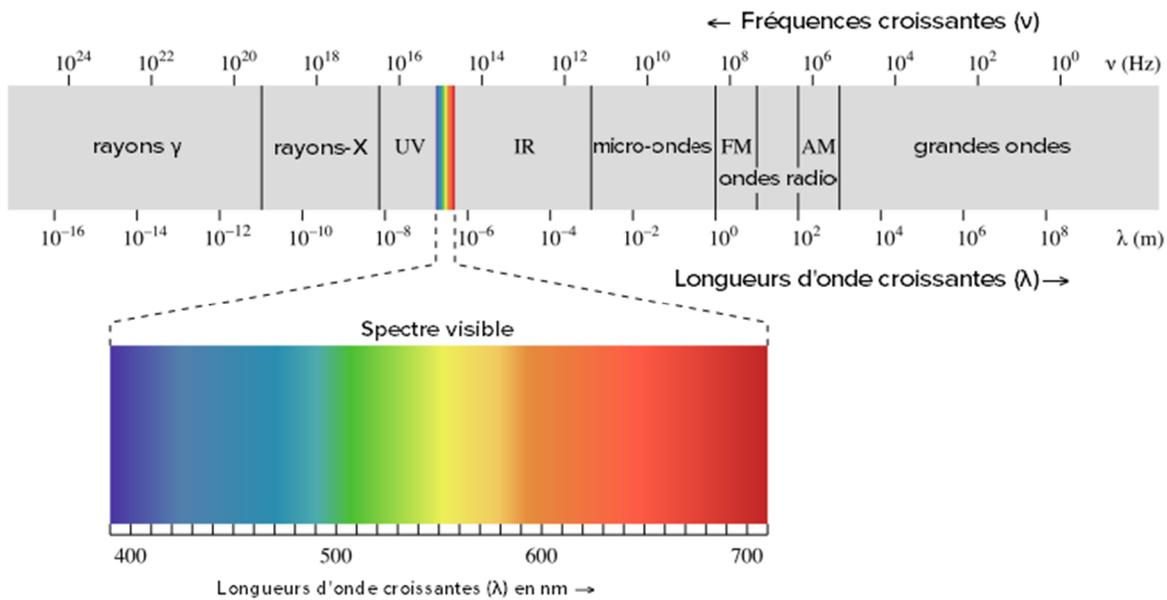


Fig. 1.4 Spectre de raies du mercure.

### I-5-3) LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE :

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou encore de leur énergie (figure ci-dessous).



**En partant des ondes les plus énergétiques, on distingue successivement :**

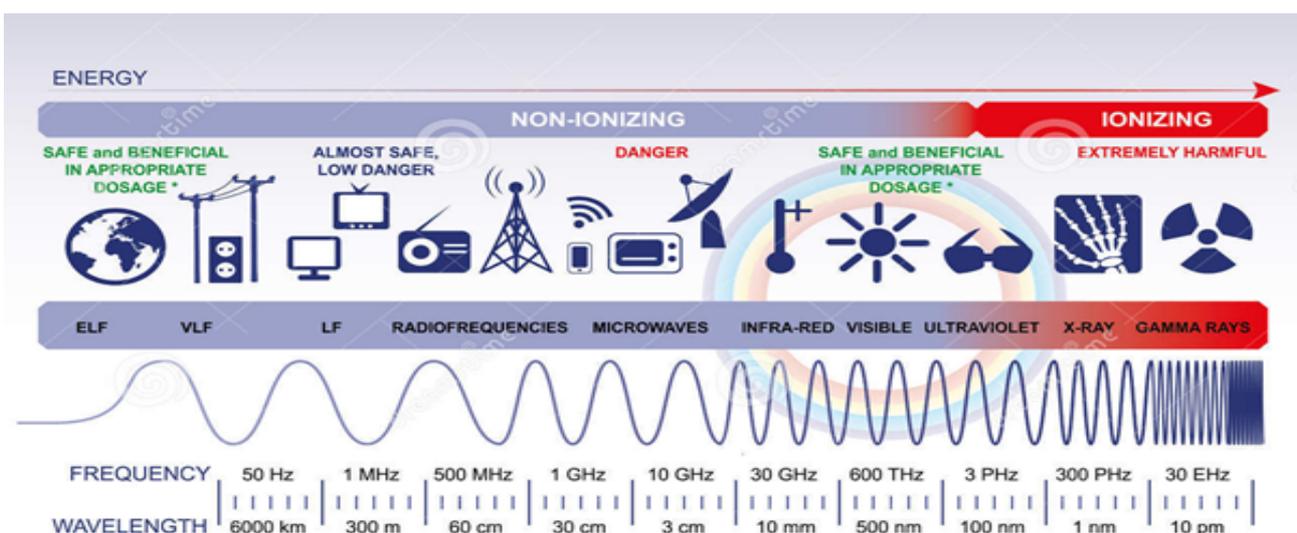
- **Les rayons gamma ( $\gamma$ ) [ $10^{-14}m - 10^{-12}m$ ] :** ils sont dus aux radiations émises par les éléments radioactifs.

Très énergétiques, ils traversent facilement la matière et sont très dangereux pour les cellules vivantes.

- **Les rayons X** [ $10^{-12}m - 10^{-8}m$ ]: rayonnements très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma, ils sont utilisés notamment en médecine pour les radiographies, dans l'industrie (contrôle des bagages dans le transport aérien), et dans la recherche pour l'étude de la matière
- **Les ultraviolets** [ $10^{-8}m - 3,8 \cdot 10^{-7}m$ ]: rayonnements qui restent assez énergétiques, ils sont nocifs pour la peau. Heureusement pour nous, une grande part des ultraviolets est stoppée par l'ozone atmosphérique qui sert de bouclier protecteur des cellules.
- **Le domaine visible** [ $380\text{ nm} - 780\text{ nm}$ ]: correspond à la partie du spectre électromagnétique perceptible par notre œil. C'est dans le domaine visible que le rayonnement solaire atteint son maximum ( $0,5\ \mu\text{m}$ )

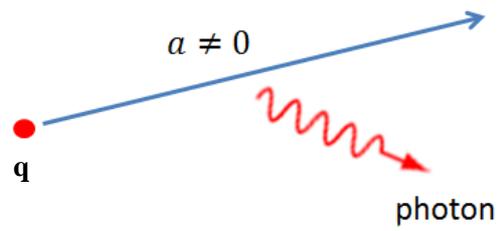
couleur	Longueur d'onde (nm)
Infrarouge	> 780
rouge	~ 625-740
orange	~ 590-625
jaune	~ 565-590
vert	~ 520-565
bleu	~ 446-520
violet	~ 380-446
ultraviolet	< 380

- **L'infrarouge** [ $780\text{ nm} - 1\text{ mm}$ ]: rayonnement émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu ( $-273^{\circ}\text{C}$ ).
- **Les micro-ondes ou hyperfréquences** [ $1\text{ mm} - 10\text{ cm}$ ]
- **Les ondes radio** [ $10\text{ cm} - \infty$ ]:

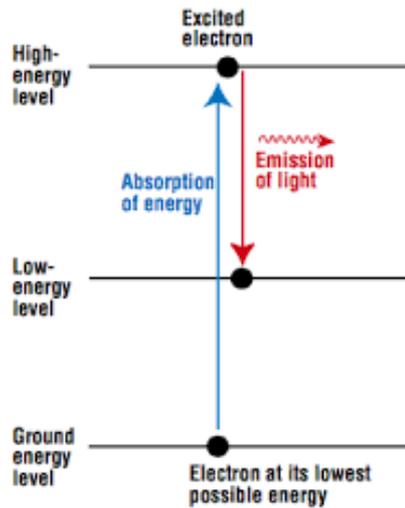


#### I-5-4) Origine et génération des ondes électromagnétiques:

- **Mouvements non uniformes de charges électriques.**



- **Luminescence :** Transitions électroniques (atomes ou molécules): visible, UV ou RX.



**Chimiluminescence**



**Bioluminescence** réaction enzymatique



**Électroluminescence**

- **Incandescence** : Corps chauffé: visible ou IR.



- **Transitions nucléaires**: rayons  $\gamma$ , X.

## I-6) GRANDEURS PHYSIQUES CARACTERISANT LE RP EN MECANIQUE CLASSIQUE:

Le RP est constitué de particules « donc de matière » qui possèdent une masse, une charge électrique, une vitesse, une quantité de mouvement, une énergie cinétique et selon le principe de dualité onde-corpuscule, on peut leur associer une onde. Toutes ces grandeurs physiques peuvent être calculées avec une bonne précision en utilisant la mécanique dite classique, ça veut dire celle dont Newton a posé les bases et ceci à condition que la vitesse de ces particules soit inférieure à 0,1 c.

### I-6-1) La quantité de mouvement :

$$\mathbf{P} = m \cdot \mathbf{v}$$

- La quantité de mouvement est additive ( $\vec{P} = \sum_i m_i \vec{v}_i$ )
- La quantité de mouvement est conservée ( $\vec{P} = \vec{P}'$ ,  $\sum_i m_i \vec{v}_i = \sum_i m'_i \vec{v}'_i$ )

(Exemple : pendule newton).

### I-6-2) L'énergie cinétique :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

Si la particule possède une charge électrique q et qu'elle se déplace sous l'effet d'une différence de potentiel (d.d.p) U, alors l'énergie cinétique de cette particule peut s'écrire :

$$E_c = q \cdot U$$

### I-6-3) Relations entre P et $E_c$ en mécanique classique :

$$E_c = \frac{P^2}{2m}$$

$$P = \sqrt{2mE_c} = \sqrt{2mqU}$$

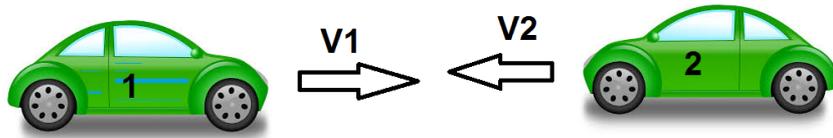
### I-6-4) Relation de de Broglie et longueur d'onde associée :

$$P = mv = \frac{h}{\lambda}$$

## I-6-5) LIMITES DE LA MECANIQUE CLASSIQUE :

### \*) Non additivité des vitesses :

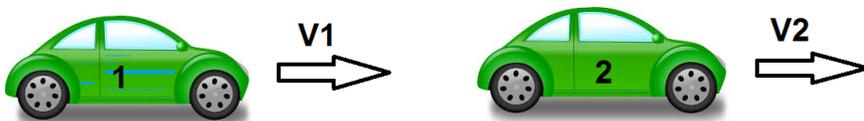
Supposons que l'on a deux voitures se déplaçant avec des vitesses différentes et dans des sens opposés.



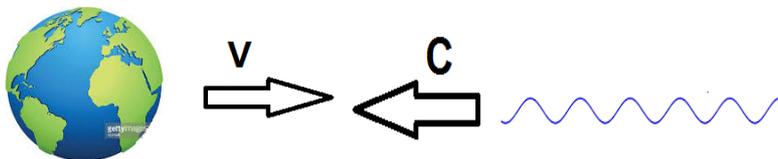
Dans ce cas la vitesse relative de la voiture (1) par rapport à la voiture (2) selon la mécanique classique de Newton et le principe d'additivité des vitesses est :  $V_{r(1/2)} = V_1 + V_2$

Si les deux voitures se déplacent dans le même sens alors :

$$V_{r(1/2)} = V_1 - V_2$$

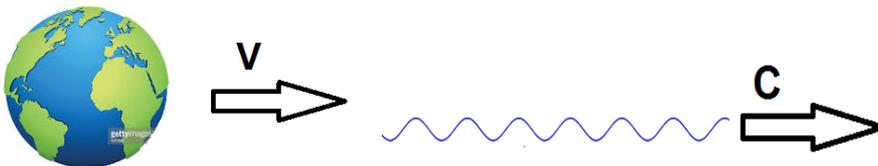


Tant que les vitesses sont faibles ce résultat est valable. Par contre si les on étudie des objets ayant des vitesses proches de la vitesse de la lumière, on va réaliser que le principe d'additivité des vitesses n'est plus valable. Par exemple la vitesse de la lumière est la même quelle que soit sa direction. Ce qui démontre que les lois de la mécanique de Newton (classique) ne sont valables que lorsque les vitesses des objets étudiés sont faibles par rapport à la vitesse de la lumière.



$$M. C: \quad V_r = C + V$$

$$M. R: \quad V_r = C$$



$$M. C: \quad V_r = C - V$$

$$M. R: \quad V_r = C$$

$$M. R: \quad V_r = \frac{V_1 + V_2}{1 + \frac{V_1 V_2}{c^2}}$$

$$\text{Application: } V_1 = V, \quad V_2 = C$$

$$V_r = \frac{V + C}{1 + \frac{V \cdot C}{c^2}} = C$$

$$V_1, V_2 \ll C \rightarrow \frac{V_1 \cdot V_2}{C^2} \cong 0 \rightarrow V_r = V_1 + V_2$$

### I-7) LA MECANIQUE RELATIVISTE :

La théorie de la mécanique relativiste a été développée par les physiciens pour expliquer le fait que la lumière possédait une vitesse constante quel que soit le référentiel galiléen utilisé pour la mesurer, ce qui était en totale contradiction avec les lois de la mécanique classique (additivité des vitesses).

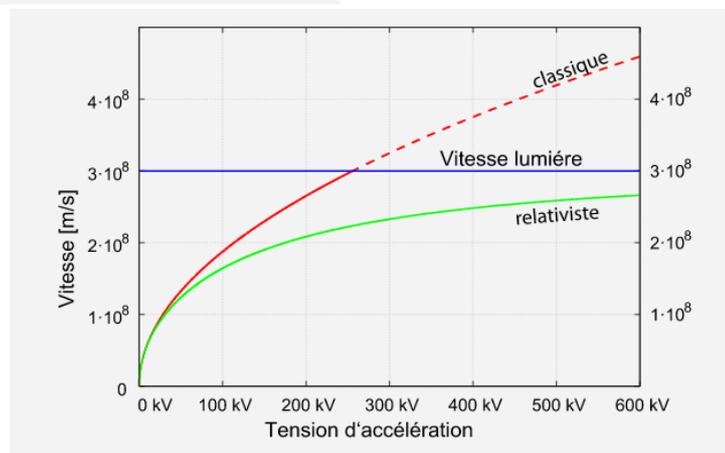
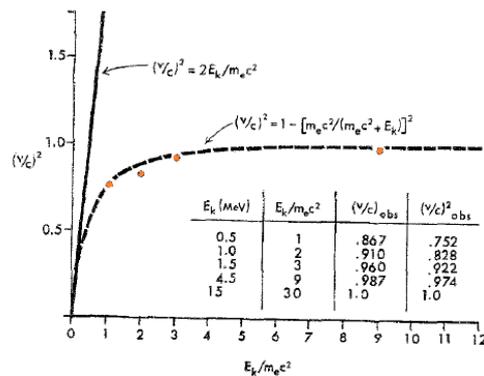
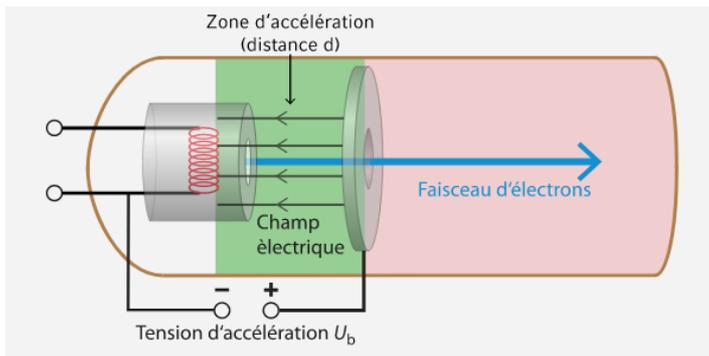
La mécanique relativiste est basée sur les deux postulats suivants (Einstein 1905) :

- 1- les lois de la physique sont les mêmes pour tous les observateurs se trouvant dans des référentiels Galiléens.
- 2- La vitesse de la lumière dans le vide possède la même valeur  $c$  dans toutes les directions et dans tous les référentiels Galiléens.  
La vitesse de la lumière  $c$  dans le vide est une vitesse limite qu'aucune entité transportant de l'énergie ne peut dépasser.

(validé par l'expérience de Bertozzi 1964).

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = eU \rightarrow (v/c)^2 = 2eU/mc^2$$

$$v = \sqrt{2eU/m}$$



D'après cette expérience on remarque que la mécanique classique donne des résultats avec une bonne précision pour des vitesses allant jusqu'à 0,1 c. A partir de cette limite, il est indispensable d'utiliser la mécanique relativiste.

### I-7-1) GRANDEURS PHYSIQUES CARACTERISANT LE RP EN MECANIQUE RELATIVISTE :

#### a) La masse :

En M.R on définit plusieurs types de masses, on en citera ici deux types :

- 1- La masse déjà connue en M.C et qui correspond à la quantité de matière contenue dans un corps et qui est constante dans tous les référentiels Galiléens, sera symbolisée par  $m_0$ . Cette masse est appelée la masse au repos.
- 2- La masse inertielle qui caractérise la résistance d'un corps au mouvement. Elle dépend du référentiel et est symbolisée par  $m$  :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m_0 \quad :$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{est appelé facteur de Lorentz.}$$

#### b) La quantité de mouvement :

$$P = m \cdot v = \gamma m_0 v$$

#### c) Relation de de Broglie et longueur d'onde associée :

$$P = mv = \frac{h}{\lambda}$$

#### d) L'énergie au repos :

Selon la MR tout corps au repos possède une énergie :

$$E_0 = m_0 c^2$$

#### e) L'énergie cinétique :

$$E_c = (\gamma - 1) \cdot m_0 c^2$$

#### f) L'énergie totale :

$$E = E_c + E_0 = \gamma m_0 c^2 = mc^2$$

#### g) Relations entre P, E et $E_c$ :

$$E^2 = (Pc)^2 + E_0^2 = (Pc)^2 + (m_0 c^2)^2$$

$$P = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - E_0^2} = \frac{1}{c} \sqrt{E_c (E_c + 2E_0)}$$

### I-7-2) Remarque :

$$1- \text{ Si } v \ll c \rightarrow \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \rightarrow E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

Ce résultat est obtenu en utilisant le développement limité suivant :

$$(1 + x)^\alpha = 1 + \frac{\alpha}{1!}x + \frac{\alpha(\alpha - 1)}{2!}x^2 + \dots$$

Donc d'après la relation (1), les lois de la mécanique classique ne sont qu'une approximation de celles de la mécanique relativiste lorsque :  $v \ll c$ .

- 2- On dit qu'une particule est relativiste si ( $v > 0,1c \rightarrow \gamma > 1,005$ ) sinon elle est classique.
- 3- La mécanique relativiste est valable  $\forall v$ , mais en pratique on préfère utiliser la mécanique classique lorsque  $v < 0,1c$ .

	TYPE DE RAYONNEMENT		
	REM (ex : photons, RX, Ondes radio, Lumière visible,...etc.)	RP (ex : électron, proton, neutron,...etc.)	
		Classique ( $v < 0,1c$ )	Relativiste ( $v > 0,1c$ )
masse	$m = 0$	$m = m_0$	$m = \gamma m_0$
Quantité de mouvement	$P = \frac{h}{\lambda}$	$P = m \cdot v$ $P = \frac{h}{\lambda}$	$P = m \cdot v = \gamma m_0 \cdot v$ $P = \frac{h}{\lambda}$
Energies	$E = h \cdot \nu = \frac{hc}{n\lambda}$ $E(eV) = \frac{12400}{n\lambda(A^\circ)}$	$E_c = \frac{1}{2}mv^2$ $E_c = qU$	$E_0 = m_0c^2$ $E_c = (\gamma - 1)E_0$ $E_c = qU$ $E = E_c + E_0 = \gamma m_0c^2 = mc^2$
Relations entre P et E	$E = \frac{P \cdot c}{n}$	$E_c = \frac{P^2}{2m}$	$E^2 = (Pc)^2 + E_0^2$
	$P = n \frac{E}{c}$	$P = \sqrt{2mE_c}$ $P = \sqrt{2mqU}$	$P = \frac{1}{c} \sqrt{(E^2 - E_0^2)}$ $P = \frac{1}{c} \sqrt{E_c(E_c + 2E_0)}$ $P = \frac{1}{c} \sqrt{qU(qU + 2E_0)}$

### I-7-3) Exemple :

- a) Un photon possède une énergie égale à 3100 eV. Calculer sa longueur d'onde dans le vide.
- b) Un électron relativiste possède une énergie totale égale à  $2 \cdot 10^{-13}$  joule. Calculer la longueur de l'onde qui lui est associée.

### Solution :

- a)  $E = 3100 \text{ eV}$

$$E(eV) = \frac{12400}{n\lambda(A^\circ)} = \frac{12400}{\lambda(A^\circ)} \rightarrow \lambda(A^\circ) = \frac{12400}{E(eV)} = \frac{12400}{3100} = 4 A^\circ$$

**b)**  $E = 2.10^{-13}J$

$$P = \frac{h}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{\frac{1}{c}\sqrt{(E^2 - E_0^2)}} = \frac{h}{\frac{1}{c}\sqrt{(E^2 - (m_0c^2)^2)}}$$

$$\lambda = \frac{6,62.10^{-34}}{\frac{1}{3.10^8}\sqrt{((2.10^{-13})^2 - (9,1.10^{-31}(3.10^8)^2)^2)}} = 1,09.10^{-12}m$$

### I-8) PRODUCTION DE CHALEUR PAR LES RAYONNEMENTS :

Lorsqu'un rayonnement tombe sur un corps ou traverse un milieu, il peut perdre la totalité ou une partie de son énergie sous forme de chaleur. Cette chaleur absorbée par le corps fait augmenter sa température de façon linéaire suivant la relation :

$$\Delta Q = m. c. \Delta\theta$$

$\Delta Q$  : chaleur absorbée par le corps, elle est égale à l'énergie perdue par le rayonnement sous forme de chaleur.

$m$  : masse du corps absorbant la chaleur.

$C$  : chaleur massique du corps. Parmi ses unités : cal.Kg<sup>-1</sup>C<sup>-1</sup>, J.Kg<sup>-1</sup>C<sup>-1</sup>. Des fois on utilise le Kelvin (K) à la place du °C.

$\Delta\theta$  : Variation de la température.

L'expression précédente peut s'écrire :

$$\Delta Q = C. \Delta\theta$$

$C = m.c$  : capacité calorifique du corps.

**NB** : 1 calorie = 4,18 joules.