Chapitre I : Aspect ondulatoire de la lumière

I- Introduction :

La lumière possède un double aspect ; un aspect ondulatoire et un aspect corpusculaire :

Dans la théorie électromagnétique, la lumière apparaît comme un phénomène ondulatoire périodique pouvant se propager dans le vide avec une vitesse finie, et dont la nature électromagnétique a été établie par les travaux de James Maxwell. En tant qu'onde électromagnétique (onde transversale composée d'une onde de champ électrique et d'une onde de champ magnétique) de fréquence très élevée, la lumière voit sa propagation perturbée, aussi bien par la présence d'obstacles matériels (provoquant des réflexions, des diffractions, des interférences, des réfractions) que par celle de champs électriques ou magnétiques (polarisation rotatoire). Sa vitesse de propagation, dont l'étude cinématique est à l'origine de la théorie de la relativité restreinte, égale à $c = 299\,792\,458$ m/s, est une constante universelle dont la valeur n'est pas modifiée par un changement de référentiel ; elle constitue la vitesse maximale de transmission des informations entre deux systèmes quelconques. Mais la théorie électromagnétique (macroscopique), qui décrit correctement les phénomènes de propagation, est insuffisante pour expliquer les interactions de la lumière avec la matière.

Dans la théorie quantique, la lumière apparaît comme un flux discontinu de photons (particules élémentaires de masse au repos nulle), dont l'énergie est liée à la fréquence de l'onde par la relation $E = h.\nu$ (h est constante de Planck et ν la fréquence) ; ce point de vue permet d'expliquer les observations relatives à l'émission et à l'absorption de lumière par la matière.

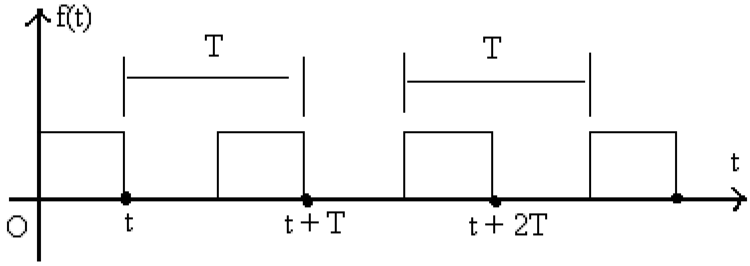
D'une façon générale, l'émission de lumière correspond à la libération de quanta d'énergie (sous forme de photons) par les électrons des atomes retournant à un niveau énergétique inférieur, après avoir été portés à un niveau supérieur par une action excitatrice fournissant l'énergie nécessaire ; suivant la nature de l'excitation, on observe les divers phénomènes d'incandescence ou de luminescence (thermoluminescence, électroluminescence, chimiluminescence, photoluminescence).

II- Ondes électromagnétiques

Dans ce paragraphe, on va étudier l'onde lumineuse (électromagnétique) que l'on rencontrera tout le long des différents chapitres qui vont suivre.

II-1. Définitions :

II-1-a Une vibration est une grandeur physique représentée par une fonction périodique f vérifiant la relation :



$f(t) = f(t + nT) \quad n \in IN$

T est appelé période de la vibration.

$\frac{1}{T} = \nu$ est sa fréquence.

II-2-b L'onde est une énergie qui se propage et qui crée des vibrations. On peut aussi dire que la propagation d'une perturbation sans entraînement de matière représente une onde.

Exemples : ébranlement d'une corde, perturbation de la surface d'un liquide (jet d'une pierre dans l'eau)…

II-2 Nature ondulatoire de la lumière

La nature ondulatoire du rayonnement électromagnétique est représentée par la combinaison d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$ satisfaisant aux équations de Maxwell qui s'écrivent dans un milieu homogène isotrope et en absence de charges et de courants :

$$div\vec{E}(M,t)=0$$

$$div\vec{B}(M,t)=0$$

$$\overrightarrow{rot}\vec{E}(M,t)=-\frac{\partial\vec{B}(M,t)}{\partial t}$$

$$\overrightarrow{rot}\vec{B}(M,t)=\frac{1}{c^2}\frac{\partial\vec{E}(M,t)}{\partial t}$$

Où : c est la vitesse de la lumière dans le vide ; t le temps et M un point du milieu.

Les équations de propagation des champs électrique et magnétique sont données par les deux relations suivantes :

$$\Delta\vec{E}-\frac{1}{C^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}=\vec{0} \quad \text{et} \quad \Delta\vec{B}-\frac{1}{C^2}\frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2}=\vec{0}$$

Dans un repère orthonormé (O,x,y,z) la vibration émise par la source S au point O pris comme origine est donnée par :

$$\vec{E}(o)=\vec{E_o}\cos\omega t=\vec{E_o}\cos\frac{2\pi}{T}t$$

$$\vec{B}(o)=\vec{B_o}\cos\omega t=\vec{B_o}\cos\frac{2\pi}{T}t$$

En un point M de coordonnées (x,y,z) quelconque de l'espace la vibration est à l'instant t ce qu'elle était au point origine O au temps :

t- r/C (r = OM) on a alors

$$\vec{E}(M)=\vec{E_o}\cos\frac{2\pi}{T}(t-\frac{r}{C})=\vec{E_o}\cos 2\pi(\frac{t}{T}-\frac{r}{CT})=\vec{E_o}\cos 2\pi(\frac{t}{T}-\frac{r}{\lambda})=\vec{E_o}\cos(\omega t-\varphi)$$

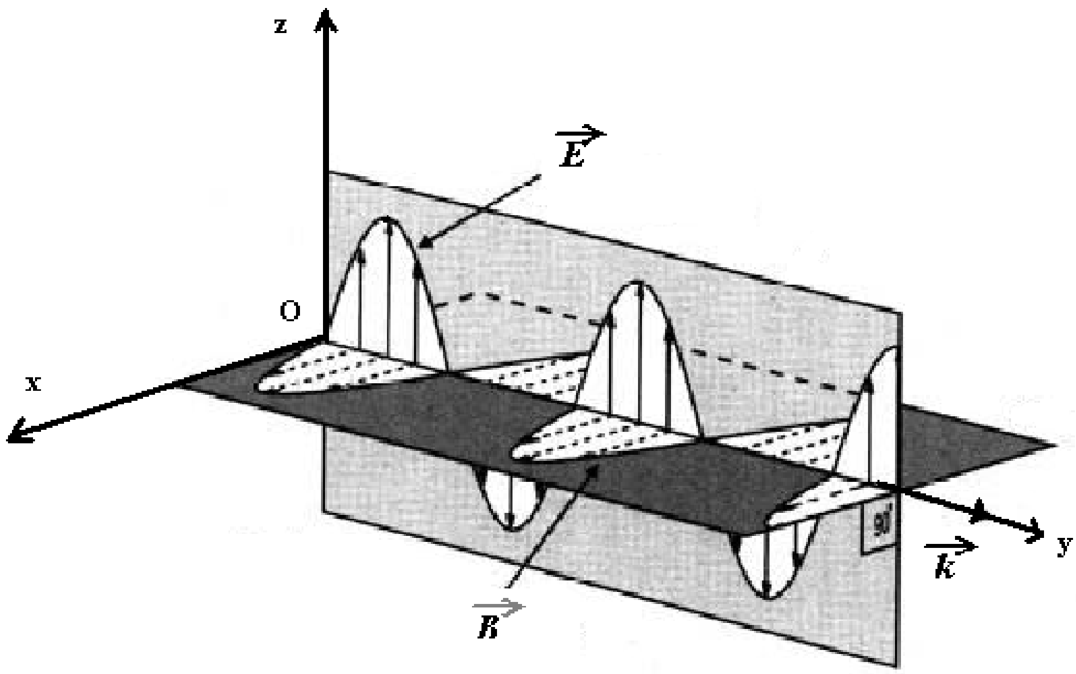
$\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}.r$ est la phase de la vibration en M ou encore la différence de phase entre la vibration en M et la vibration en O.

$\omega=2\pi/T$ la pulsation

T est la période temporelle et λ la période spatiale ou longueur d'onde.

$k=\frac{2\pi}{\lambda}$ le module du vecteur d'onde.

Les champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ progressent de la même façon et sont perpendiculaires entre eux.



II-3. Les surfaces d'onde :

Une surface d'onde (ou front d'onde) est l'ensemble des points où le champ électromagnétique présente le même état vibratoire, c'est-à-dire, possédant les mêmes vecteurs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ au même instant t.

On aura : A(M) = A cos(ωt - φ(M)) et A(M') = A cos(ωt - φ(M'))

φ (M) = φ (M') = constante quels que soient les point M et M' de la surface.

La nature d'une onde électromagnétique est déterminée par la forme de ses surfaces d'onde. Dans le cas d'une onde plane les surfaces d'onde sont des plans perpendiculaires à la direction de propagation.

Le long d'un rayon lumineux monochromatique se propagent les vibrations champ électrique E et champ magnétique B.

La propagation de la lumière dans un milieu homogène et isotrope est uniforme et la vitesse v ne dépend pas de la direction.

Les vibrations lumineuses se propagent aussi bien dans le vide que dans les milieux transparents avec la seule différence :

- la vitesse de la lumière dans le vide est **C = 300 000 km/s** et elle est la même pour toutes les radiations (toutes les longueurs d'ondes ou toutes les couleurs).
- La vitesse de la lumière dans un milieu transparent est V< C et elle dépend non seulement du milieu mais aussi de la radiation monochromatique (de la longueur d'onde).
- Dans le vide, une radiation monochromatique est caractérisée par la longueur d'onde λ_0 et par sa période T telle que :

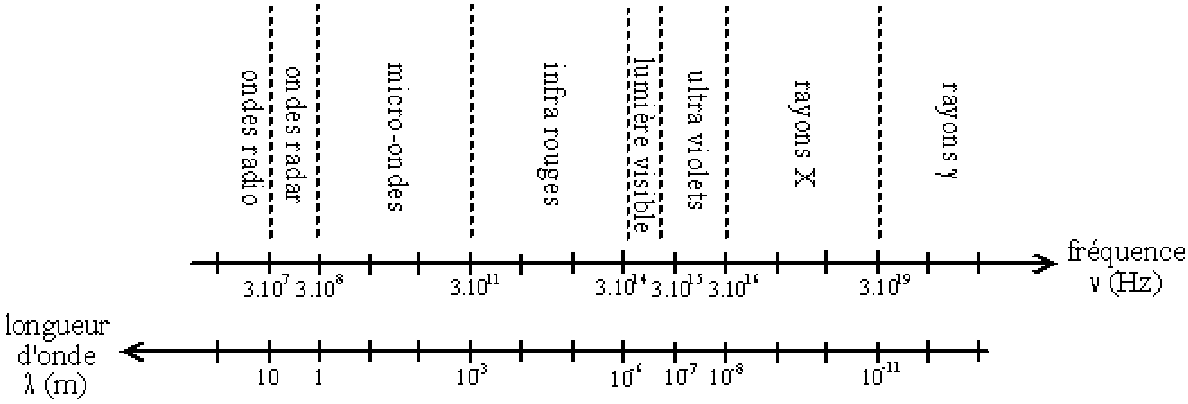
$$\lambda_0 = C \times T$$

Dans un milieu transparent, $\lambda = V \times T$

$\lambda_0 / \lambda = C/V = n$, $\lambda_0 = \lambda \, . \, n$; n est l'indice de réfraction du milieu considéré.

II-4. Spectre visible.

Dans le spectre électromagnétique, les longueurs d'ondes de la lumière blanche s'étalent de 400 à 800 nm (1 nm = 10^{-9} m).



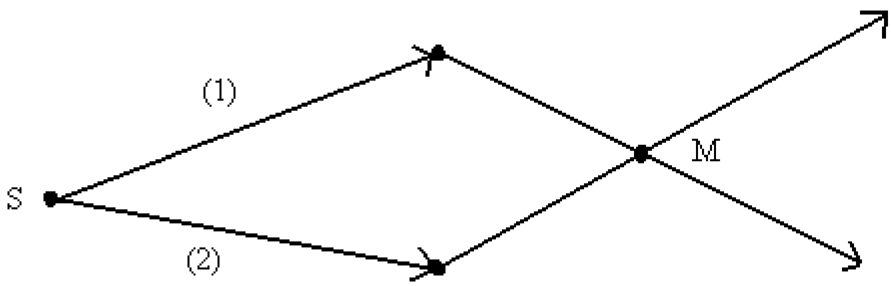
Remarque :

On convient de définir l'intensité du rayonnement monochromatique I comme étant le carrée de l'amplitude E_0 du champ électrique :

$$\mathbf{I = E_0^2}$$

III- Addition de deux vibrations lumineuses parallèles.

Soit une source lumineuse S ponctuelle et monochromatique. Cette source envoie par des chemins différents deux rayons (1) et (2) qui traversent des milieux quelconques. Soit M un point de l'espace où se superposent les deux ondes émises.



Lorsque deux ondes lumineuses (ou plusieurs) atteignent un point, leur champ électrique et magnétique s'ajoutent vectoriellement en ce point. On dit qu'il y a interférence entre les diverses ondes ou on dit que ces ondes interférent.

Dans la suite, on se limitera au cas où **<u>les deux rayons sont peu inclinés</u>** l'un par rapport à l'autre de manière à **<u>considérer comme parallèles les vibrations</u> à composer**.

III-1. Vibration résultante :

III-1.a Méthode trigonométrique ou algébrique.

La vibration résultante est de la forme :

$$E = E_0 \cos(\omega t - \varphi)$$

Elle a la même direction, et période que les vibrations E_1 et E_2 à composer.

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t - \varphi_1) \qquad E_2 = E_{02} \cos(\omega t - \varphi_2)$$

$$E_0 \cos(\omega t - \varphi) = E_{01} \cos(\omega t - \varphi_1) + E_{02} \cos(\omega t - \varphi_2)$$

$$E_0 \cos\omega t.\cos\varphi + E_0 \sin\omega t.\sin\varphi = E_{01} \cos\omega t.\cos\varphi_1 + E_{01} \sin\omega t.\sin\varphi_1 + E_{02} \cos\omega t.\cos\varphi_2 + E_{02} \sin\omega t.\sin\varphi_2.$$

Ou bien.

$$E_0 \cos\omega t.\cos\varphi + E_0 \sin\omega t.\sin\varphi = (E_{01} \cos\varphi_1 + E_{02} \cos\varphi_2) \cos\omega t + (E_{01} \sin\varphi_1 + E_{02} \sin\varphi_2) \sin\omega t.$$

Par identification on obtient alors:

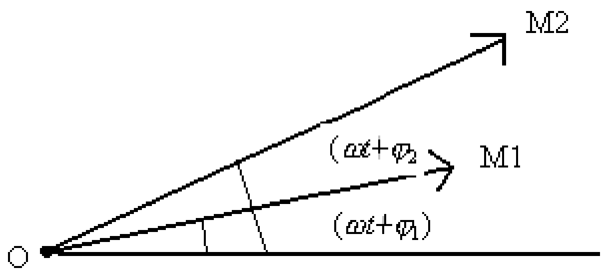
$$E_0 \cos\varphi = E_{01} \cos\varphi_1 + E_{02} \cos\varphi_2$$

$$E_0 \sin\varphi = E_{01} \sin\varphi_1 + E_{02} \sin\varphi_2$$

$$\boxed{E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2 E_{01} E_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

III.1.b Méthode de Fresnel

La vibration $E=E_0\cos(\omega t-\varphi)$ peut-être considérée comme étant la longueur de la projection sur un axe fixe, d'un vecteur $\overrightarrow{OM}$ de longueur E_0 tournant à la vitesse angulaire ω.



$\overrightarrow{E_0}=\overrightarrow{E_{01}}+\overrightarrow{E_{02}}$

$I_1=E_{01}^2$ et $I_2=E_{02}^2$

$$\boxed{I=E_0^2=E_{01}^2+E_{02}^2+2\overrightarrow{E_{01}}\,\overrightarrow{E_{02}}=I_1+I_2+2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2}\cos(\varphi_1-\varphi_2)}$$

III.1.c. Méthode des nombres complexes.

La vibration $E=E_0\cos(\omega t-\varphi)$ est représentée par le vecteur tournant $\overrightarrow{OM}$. A cette vibration correspond l'affixe du vecteur tournant :

Z = $E_0\cos(\omega t-\varphi)$ + $jE_0\sin(\omega t-\varphi)$

$= E_0 e^{j\omega t}e^{-j\varphi}$

$E_0 e^{j\omega t}e^{-j\varphi} = E_{01}e^{j\omega t}e^{-j\varphi_1} + E_{02}e^{j\omega t}e^{-j\varphi_2}$

$E_0 e^{-j\varphi} = E_{01}e^{-j\varphi_1} + E_{02}e^{-j\varphi_2}$

$E_0\cos\varphi - jE_0\sin\varphi = E_{01}\cos\varphi_1 - jE_{01}\sin\varphi_1 + E_{02}\cos\varphi_2 - jE_{02}\sin\varphi_2$

$E_0\cos\varphi = E_{01}\cos\varphi_1 + E_{02}\cos\varphi_2$

$E_0\sin\varphi = E_{01}\sin\varphi_1 + E_{02}\sin\varphi_2$

$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}(\cos\varphi_1\cos\varphi_2 + \sin\varphi_1\sin\varphi_2)$

$$\boxed{E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2}\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

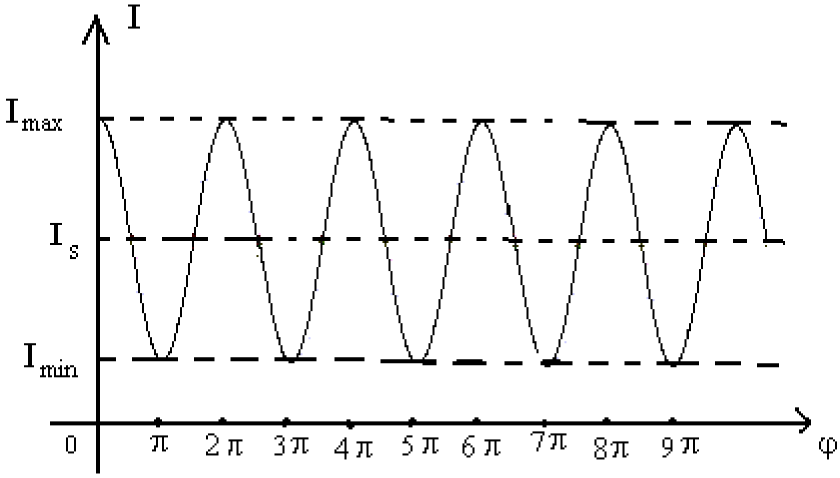
$I' = 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2}\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ est le terme d'interférence

- Si $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi$; les vibrations sont en phase et l'intensité I est maximale :

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2} = (E_{01} + E_{02})^2$$

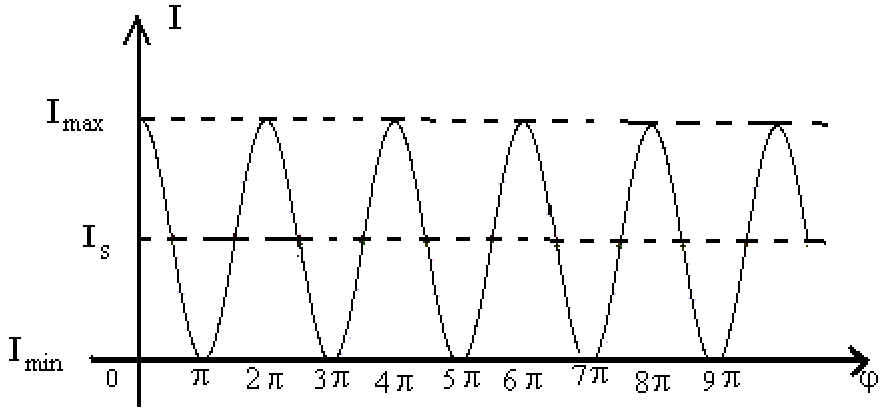
- Si $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = (2n+1)\pi$; les vibrations sont en opposition de phase et l'intensité I est minimale: $I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2} = (E_{01} - E_{02})^2$

- Si $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = (2n+1)\pi/2$ le terme d'interférence est nul: $I = I_1 + I_2 = (E_{01})^2 + (E_{02})^2$



Remarque : Si $\boldsymbol{I_1 = I_2 = I_0}$ on obtient :

- $\boldsymbol{I_{max} = 4\, I_0}$
- $\boldsymbol{I_s = 2\, I_0}$
- $\boldsymbol{I_{min} = 0}$


I
I
max
I
s
I
min
0
π
2π
3π
4π
5π
6π
7π
8π
9π
φ