II Les Ondes Lumineuses

Les ondes lumineuses appartiennent à la famille des ondes électromagnétiques décrites par deux champs vectoriels $\vec{E}$ et $\vec{B}$ qui vérifient les équations de Maxwell, dans le vide :

$$rot\vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad ; \; div\vec{B} = 0$$

$$div\vec{E} = 0 \qquad\qquad rot\,\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0$$

Les équations de propagation pour $\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont alors :

$\Delta\vec{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$ et $\Delta\vec{B} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$ avec $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ la vitesse de la lumière dans le vide.

II-1 Ondes planes progressives monochromatiques

On dit qu'une onde est plane si, à chaque instant le champ a la même valeur en tout point d'un plan perpendiculaire à une direction fixe définie par un vecteur unitaire $\vec{u}$.

Si la dépendance temporelle est sinusoïdale de pulsation *w*, on dit qu'on a une onde plane monochromatique.

On montre en mathématique que la solution la plus générale est de la forme :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(wt - \vec{k}.\vec{r} + \varphi_0)$$

La quantité $\vec{k} = \frac{w}{c}\vec{u} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{u}$ est appelée vecteur d'onde avec $\vec{u}$ le vecteur unitaire de la direction de propagation, *w* la pulsation et λ la longueur d'onde. φ_0 est la phase à l'origine.

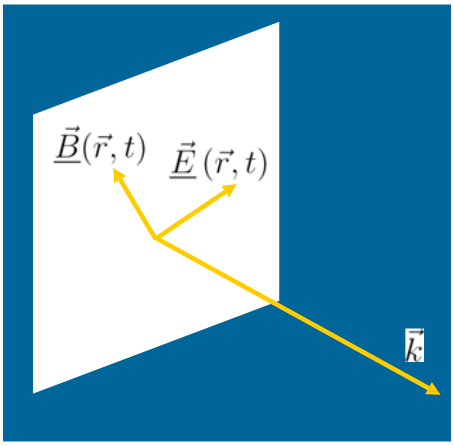
On appelle **phase** de l'onde monochromatique la quantité :

$$\varphi = wt - \vec{k}.\vec{r} + \varphi_0$$

L'ensemble de points possédant la même phase est appelé surface d'onde ou surface équiphase. Pour une onde plane les surfaces d'onde sont des plans orthogonaux à la direction de propagation.

Pour un champ qui se propage suivant la direction Oz, cela correspond à $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(wt - kz + \varphi_0)$.

Pour une onde plane monochromatique $\vec{E}$, $\vec{B}$ et $\vec{k}$ forment un trièdre direct et vérifie la relation $\dfrac{E}{B} = c$.



Notation complexe:

Il est possible d'ajouter une partie imaginaire au champ réel, on obtient alors un champ complexe :

$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp^{i(wt - \vec{k}.\vec{r} + \varphi_0)}$

Lien avec l'optique géométrique :

Les rayons lumineux (qui donnent la direction de transport de l'énergie) sont orthogonaux aux champs électriques.

Dans un milieu isotrope les rayons sont parallèles à la direction de propagation de l'onde.

Différence de phase entre 2 point A et B situés sur un même rayon lumineux

Pour une onde monochromatique de pulsation w et de longueur d'onde λ, $\varphi(A) = wt - \vec{k}.\vec{OA} + \varphi_0$

$\varphi(B) = wt - \vec{k}.\vec{OB} + \varphi_0$

la différence de phase est :

$$\phi_{A\to B} = -\vec{k}.\vec{AB} + \varphi_{\text{sup}} = -\frac{2\pi}{\lambda_0} L_{AB} + \varphi_{\text{sup}}$$

L_{AB} est le chemin optique entre A et B, et φ_{sup} est la différence de phase supplémentaire due à des réflexions ou passage par un point de convergence.

La phase d'une onde lumineuse **est continue** pour une réfraction ou une réflexion sur un dioptre où l'onde incidente se propage dans le milieu d'indice le plus élevé.

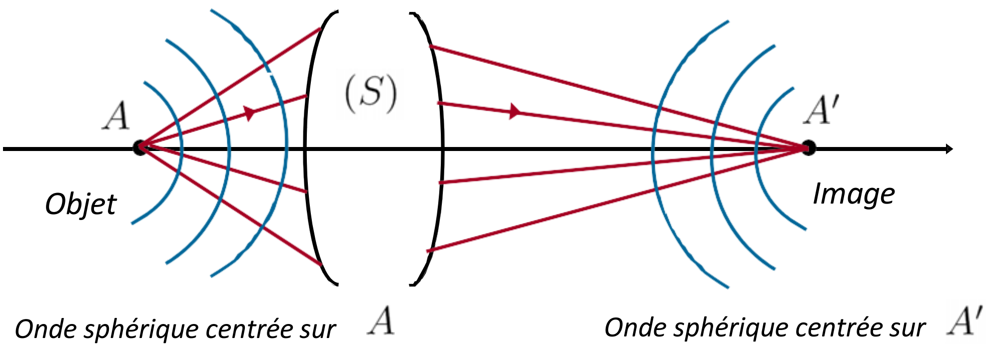
La phase subit **une discontinuité de π** pour une réflexion sur un milieu plus réfringent ou sur un métal et pour le passage par un milieu point de convergence.

Surface d'onde et théorème de Malus :

Une surface d'onde est une surface définie par l'ensemble des points séparés de la source par le même chemin optique.

Malus : Les surfaces d'onde sont orthogonales aux rayons lumineux.

Le chemin optique entre deux points conjugués (A, A') par un système optique stigmatique est indépendant du rayon lumineux qui les relie.



II-2 Source lumineuse, Détecteurs, Intensité lumineuse

Sources lumineuses

Les sources lumineuses émettent de la lumière par suite de la désexcitation des atomes préalablement excités par une perturbation extérieure.

Si E_1 et E_2 sont les énergies des deux niveaux atomiques, on a trois types de transitions:

- Désexcitation du niveau 2 vers le niveau 1 par **émission spontanée** d'un photon d'énergie $h\nu_0=E_2-E_1$: cette émission à la fréquence ν_0 de la transition 2-1 rayonne dans tout l'espace de façon isotrope en général.
- L'atome initialement dans le niveau 1 est excité vers le niveau 2 par **absorption** d'un photon d'énergie $h\nu$ où la fréquence ν du rayonnement excitateur est très voisine de la fréquence de résonnance ν_0 de la transition 2-1. Le processus est induit par le photon incident. A chaque processus le rayonnement incident perd un photon : il est atténué après avoir subi de nombreux processus.

- L'atome initialement dans le niveau 2 est désexcité vers le niveau 1 par **émission induite** (**ou stimulée**) d'un photon d'énergie $h\nu$ où la fréquence ν du rayonnement excitateur est très voisine de la fréquence de résonnance ν_0 de la transition 2-1. Ce processus qui est induit par le photon incident est exactement le processus inverse de l'absorption.

Il existe 2 types de sources :

Sources classiques : soleil, lampes à incandescences (filament chauffé) à néon, lampes spectrales (mercure, sodium, cadmium) … où les atomes émettent de façon désordonnés des trains d'ondes de durée moyenne τ_c (temps de cohérence) très grande devant la période de l'onde avec une phase aléatoire.

Sources cohérentes : les lasers qui émettent de la lumière par émission stimulée. Les principales propriétés de la lumière laser sont la monochromaticité, la cohérence, la directivité et l'intensité.

Pour les sources classiques τ_c est de l'ordre de 10^{-11}s et pour les lasers $\tau_c=10^{-7}$s. La quantité $L_c=c\,\tau_c$ représente la longueur de cohérence.

Détecteurs :

Les détecteurs électromagnétiques (photocellules, pellicules photo, œil, etc..) possèdent des temps de réponse très grands devant la période des ondes lumineuses dans le visible. Ils mesurent une grandeur proportionnelle à la moyenne temporelle du carré de la vibration lumineuse.

Exemples :

- Œil : 0,1s
- Photodiode : 10^{-6}s

Intensité d'une onde

L'intensité d'une onde est définie comme étant la puissance quelle transporte par unité de surface.

Cette définition est cohérente avec l'électromagnétisme. La moyenne temporelle du flux du vecteur de Poynting à travers l'unité de surface perpendiculaire en M à la direction de propagation représente la puissance moyenne surfacique rayonnée au point M à travers l'unité de surface.

$$\vec{P} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}$$

Le flux d'énergie électromagnétique (en watt) rayonnée à travers une surface

$$\phi_{em} = \int \vec{P}.d\vec{s} = \frac{S\vec{E}^2}{\mu_0 c}$$

Or, pour de la lumière, le champ électrique varie au cours du temps à une fréquence supérieure à 10^{14} Hz. Ces variations sont inaccessibles, compte tenu du temps de réponse limité des capteurs photométriques. C'est pourquoi la réponse des détecteurs est fonction du flux moyen

Ainsi, un détecteur est sensible au carré moyen du champ électrique. $I = k\langle E^2 \rangle$ ou k est un coefficient de proportionnalité. Dans la suite de ce cours on prendra : I= E E^*

Ne pas confondre l'intensité d'une onde lumineuse I avec l'intensité d'une source lumineuse (flux lumineux par unité d'angle solide).

II-3 Polarisation

La direction du champ électrique dans le plan d'onde est appelée direction de polarisation. Pour la lumière naturelle, cette direction varie de manière aléatoire, elle est non polarisée.

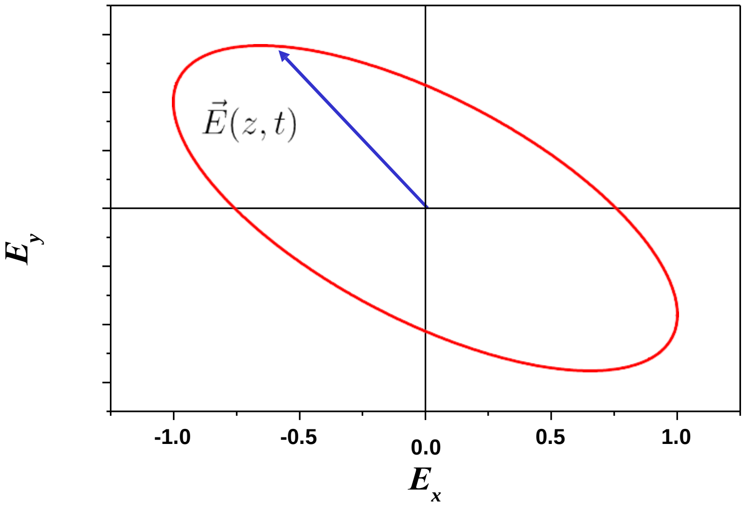
Considérons une onde électromagnétique caractérisée par son champ électrique $\vec{E}$:

$E_x = E_{0x}\cos(wt - kz)$ et $E_y = E_{0y}\cos(wt - kz - \varphi)$

En éliminant le temps entre E_x et E_y, on obtient :

$$\frac{E_x^2}{E_{ox}^2 \sin^2\phi} + \frac{E_y^2}{E_{oy}^2 \sin^2\phi} - \frac{2E_x E_y \cos\phi}{E_{ox}E_{oy}\sin^2\phi} = 1$$

L'extrémité de $\vec{E}$ décrit généralement une ellipse.



0< φ<π la polarisation est elliptique gauche

π < φ<2π la polarisation est elliptique droite

Si φ=0, π l'onde est dite polarisée rectilignement, la direction de $\vec{E}$ est constante.

φ=± π/2 et $E_{ox}=E_{oy}$ l'onde est polarisée circulairement.

Polariseur et analyseur

Il existe différentes méthodes de production d'une lumière polarisée :

Polarisation par dichroïsme : Un matériau dichroïque (certain cristaux ou des feuilles de polaroid) atténue la composante du champ dans une direction : la lumière ressort ainsi polarisée dans la direction perpendiculaire.

Polarisation par réflexion : la réflexion par la surface séparant deux milieux d'indice n_1 et n_2 permet de produire une lumière polarisée. Lorsque l'angle d'incidence a une valeur particulière appelée angle de Brewster ($\tan i_b = n_2/n_1$) seule la composante du champ électrique perpendiculaire au plan d'incidence est transmise.

Analyseur c'est un composant identique au précédent servant à analyser la polarisation. Ce dispositif se place souvent à la fin du montage.

II-4 Réfraction et réflexion d'une onde lumineuse

Considérons une onde plane monochromatique qui tombe sur un dioptre plan séparant deux milieux d'indice n_1 et n_2. Cette onde d'expression $\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \exp^{i(wt - \vec{k}_1.\vec{r} + \varphi_0)}$ se décompose en deux ondes même pulsation : l'une est l'onde réfléchie, l'autre l'onde transmise.

$$\vec{E}'_1 = \vec{E}'_{01} \exp^{i(wt - \vec{k}'_1.\vec{r} + \varphi_0)}$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \exp^{i(wt - \vec{k}_2.\vec{r} + \varphi_0)}$$

Pour qu'une relation entre les amplitudes de ces trois ondes puisse exister en tout point de la surface de séparation (relations de continuité à la surface) il est nécessaire que les termes de phase soient égaux :

$$\vec{k}_1.\vec{r} = \vec{k}'_1.\vec{r} = \vec{k}_2.\vec{r}$$

Si $\vec{N}$ est la normale au dioptre :

$$\vec{k}_1 - \vec{k}'_1 = b_1 \vec{N} \text{ et } \vec{k}_2 - \vec{k}_1 = b_2 \vec{N}$$

Avec $\vec{k}_1 = k_0 n_1 \vec{u}_1$, $\vec{k}_1' = k_0 n_1 \vec{u}_1'$ et $\vec{k}_2 = k_0 n_2 \vec{u}_2$

On retrouve la forme vectorielle des lois de Descartes.

$$\vec{u}'_1 - \vec{u}_1 = a_1 \vec{N} \text{ et } n_2 \vec{u}_2 - n_1 \vec{u}_1 = a_2 \vec{N}$$

En projetant dans le plan du dioptre on obtient les relations de la réfraction et de la réflexion de l'optique géométrique : $i'_1=-i_1$ et $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

Facteurs de réflexion et de transmission sous incidence normale

Lorsque l'incidence est normale ($i_1=0$) les angles réfléchi et réfracté sont aussi nuls ($k'_1=-k_1$, k_1 et k_2 sont de même sens)

$E_{01}+E'_{01}=E_{02}$ et $B_1-B'_{01}=B_{02}$

Et comme $E/B=v$ la deuxième relation s'écrit :

$$\frac{E_{01}}{v_1}-\frac{E'_{01}}{v_1}=\frac{E_{02}}{v_2}$$

On en déduit les facteurs de réflexion et de transmission en fonction des indices :

$$r=\frac{E'_{01}}{E_{01}}=\frac{n_1-n_2}{n_1+n_2} \qquad \text{et} \quad \tau=\frac{E_{02}}{E_{01}}=\frac{2n_1}{n_1+n_2}$$

Ainsi τ est toujours positif, r est positif si $n_1>n_2$ et négatif si $n_1<n_2$, ce qui traduit dans ce dernier cas par un déphasage de π de l'onde réfléchie par rapport à l'onde incidente.