Chapitre 1

LUMIERE - MILIEUX DE PROPAGATION

1.1 Onde électromagnétique

On appelle onde électromagnétique (OEM) le phénomène résultant de la propagation de deux grandeurs vibratoires : le champ électrique $\vec{E}$ et le champ magnétique $\vec{B}$.
On représente cette onde en tout point M de l'espace qu'elle atteint, à l'instant t, par le couple $(\vec{E}(\mathrm{M}, t)\,;\, \vec{B}(\mathrm{M}, t))$.

1.2 Onde lumineuse - Source de lumière

La lumière peut être considérée comme étant l'agent physique indispensable à la vision. Elle a un double aspect :

a- Un aspect ondulatoire : c'est une perturbation de l'espace associée à la présence d'un champ électromagnétique qui varie dans l'espace et dans le temps, la lumière fait donc partie des ondes électromagnétiques.

b- Un aspect corpusculaire : c'est un flux de particules nommées photons.

En optique géométrique, aucun aspect n'est considéré. En optique physique, c'est l'aspect ondulatoire qui est pris en compte.
La lumière est émise par une source dite :

- **Primaire**

  C'est un corps qui produit la lumière qu'il émet. Comme exemple, on peut citer le soleil ou une bougie allumée.

- **Secondaire**

  C'est un objet qui ne produit pas de lumière, mais qui renvoie la lumière qu'il reçoit. On dit que c'est un corps diffusant. C'est le cas de la lune éclairée par le soleil.

En optique, on distingue trois types de sources de lumière :

- **Lampe à décharge** ou **lampe spectrale** : la lumière est produite lorsqu'on excite un gaz ou une vapeur métallique, sous haute ou basse pression, par une décharge électrique. Les atomes du gaz ne restent pas indéfiniment dans les états excités, mais se désexcitent spontanément en émettant de la lumière à des fréquences caractéristiques du gaz contenu dans la lampe. On observe un spectre discontinu, dit spectre de raies (on obtient un spectre de bandes dans le cas de molécules).

  Comme exemple, on peut citer la lampe spectrale au mercure. Elle produit une lumière qui s'approche du bleu-vert. Lorsque cette lumière traverse un milieu dispersif, un réseau par exemple, on obtient un spectre discontinu constitué de raies colorées : doublet jaune à 0,5791 μm et 0,5770 μm, vert à 0,5461 μm, bleu à 0,4916 μm, indigo à 0,4358 μm et violet à 0,4047 μm.

- **Lampe à incandescence** : la lumière est émise lorsqu'un filament métallique est porté à une température élevée. Le spectre dans ce cas est continu, il est conforme au spectre d'émission d'un corps noir. C'est le cas de la lampe à incandescence classique qui produit une lumière blanche en portant à incandescence un filament en tungstène.

- **Laser** (Light amplification by stimulated emission of radiation) : c'est un milieu amplificateur de lumière placé dans une cavité optique (dite cavité résonante) et dont le rôle est de fournir une lumière cohérente et quasi-monochromatique par émission stimulée (ou émission induite). On peut citer le laser He-Ne (Fig. 1.1).

  C'est une source qui émet une lumière rouge à 0,6328 μm (puissance : 0,5 mW). Le milieu amplificateur est un mélange de gaz Hélium et Néon.

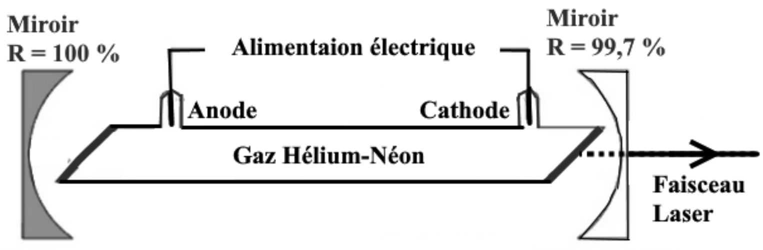

Fig. 1.1 – Schéma de principe d'un Laser Hélium-Néon

On l'utilise dans de nombreux laboratoires scientifiques, en particulier en travaux pratiques d'optique, en raison de sa cohérence, sa monochromacité et de sa faible ouverture (diamètre : 0,6 mm).

1.3 Milieu de propagation

L'onde lumineuse peut se propager dans les milieux suivants :

- Milieu homogène : c'est un milieu dont les propriétés physiques sont les mêmes en tout point de ce milieu.
- Milieu transparent : il laisse passer la lumière et au travers duquel les objets sont nettement visibles (eau pure, verre, . . .).
- Milieu translucide : il laisse passer la lumière et au travers duquel les objets ne sont pas nettement visibles (papier calque, verre dépoli, . . .).
- Milieu isotrope : les propriétés physiques de ce milieu ne dépendent pas des directions de propagation de la lumière.

Un MHTI est un milieu homogène, transparent et isotrope.

1.4 Equations de Maxwell

Ce sont quatre équations, aux dérivées partielles, du premier ordre, qui expriment des relations entre les variations spatiales et temporelles des champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$. Elles s'écrivent dans le vide parfait (en l'absence de toute charge et de tout courant) :

$$\boxed{div\vec{E} = 0} \tag{1.1}$$

$$\boxed{div\vec{B} = 0} \tag{1.2}$$

$$\boxed{\overrightarrow{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}} \tag{1.3}$$

$$\boxed{\overrightarrow{rot}\vec{B} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}} \tag{1.4}$$

c est la célérité de la lumière ; c = 2,99792458 x 10^8 m/s.

1.5 Equation de propagation d'une OEM

Pour établir l'équation vérifiée par le champ $\vec{E}$ seul, on élimine $\vec{B}$ en calculant : $\overrightarrow{rot}\overrightarrow{rot}\vec{E} = div(\overrightarrow{grad}\vec{E}) - \Delta\vec{E}$. On obtient l'équation de propagation du champ électrique :

$$\boxed{\Delta\vec{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0} \tag{1.5}$$

Δ étant le Laplacien.
De la même façon, le calcul de $\overrightarrow{rot}\overrightarrow{rot}\vec{B}$ conduit à l'équation de propagation du champ magnétique :

$$\Delta\vec{B} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \tag{1.6}$$

Si, à l'instant t et au point M(x, y, z) d'un trièdre direct (O, $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$), $s(M,t)$ désigne l'une des composantes du champ électromagnétique, on montre que :

$$\Delta s(M,t) - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 s(M,t)}{\partial t^2} = 0 \tag{1.7}$$

On remarque que $\vec{E}$, $\vec{B}$ et $s(M,t)$ vérifient la même équation dite équation de propagation des ondes électromagnétiques ou tout simplement : équation d'onde.

1.6 Surface d'onde

On appelle surface d'onde Σ_t l'ensemble des points de l'espace représentant le même état physique à un instant t donné, le champ électromagnétique étant le même sur cette surface.

1.7 Onde Plane Progressive (OPP)

Une onde électromagnétique est qualifiée de plane lorsque ses surfaces d'onde sont à tout instant t des plans. C'est le cas lorsque les coordonnées spatiales du champ électromagnétique ne dépendent que d'un seul paramètre, z par exemple : l'onde se propage alors selon l'axe des z. Appliquée à une onde plane se propageant selon cet axe, l'équation de propagation devient :

$$\frac{\partial^2 s(z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 s(z,t)}{\partial t^2} = 0 \tag{1.8}$$

Cherchons la solution générale de cette équation différentielle. On pose :

$$\alpha = z - ct; \;\; \beta = z + ct \tag{1.9}$$

Exprimons les dérivées partielles en fonction des nouvelles variables en écrivant :

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial \alpha}\frac{\partial \alpha}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial \beta}\frac{\partial \beta}{\partial z}$$

et

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \alpha}\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \beta}\frac{\partial \beta}{\partial t}$$

L'équation différentielle devient :

$$\frac{\partial^2 s(\alpha,\beta)}{\partial \alpha \partial \beta} = 0 \tag{1.10}$$

La solution générale s'obtient aisément en intégrant successivement par rapport aux nouvelles variables :

$$\boxed{s(z,t) = f(z-ct) + g(z+ct)} \tag{1.11}$$

f et g étant deux fonctions arbitraires.

La fonction $f(z-ct)$ représente une onde plane dite progressive, c'est-à-dire se propageant sans déformation dans un sens donné qui est dans notre cas le sens des z croissants.

La fonction $g(z+ct)$ correspond à une onde plane progressive dans le sens des z décroissants. La solution générale de l'équation d'onde à une dimension est donc une superposition de deux ondes planes progressives en sens inverses.

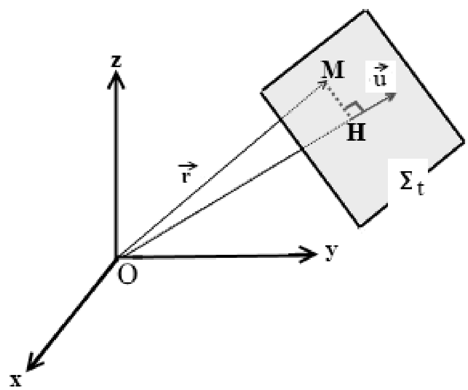

Fig. 1.2 – Surface d'onde plane

Si la direction de propagation est définie par le vecteur $\vec{u}$ (Fig. 1.2) et si la vitesse de propagation est v, la solution générale s'écrit :

$$s(M,t) = f(\vec{r}.\vec{u} - vt) + g(\vec{r}.\vec{u} + vt) \tag{1.12}$$

$\vec{r} = \overrightarrow{OM}$.

Σ_t est définie par l'équation :

$$\overline{OH} = \vec{r}.\vec{u} = Cste. \tag{1.13}$$

1.8 Onde Sphérique Progressive (OSP)

Dans ce cas, l'ensemble des points de l'espace représentant le même état physique, à l'instant t, se trouve sur une surface sphérique de rayon r (Fig. 1.3).

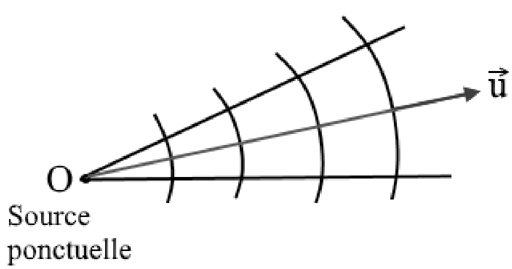

Fig. 1.3 – Surface d'onde sphérique

Les solutions de l'équation d'onde sont de la forme :

$$\boxed{s(M,t) = \frac{1}{r}[f(r - vt) + g(r + vt)]} \tag{1.14}$$

Le résultat est une combinaison de deux ondes sphériques : la première représente une onde sphérique qui diverge à partir de l'origine O, la seconde représente une onde sphérique qui converge vers O.

1.9 Structure d'une onde plane progressive

Les équations de Maxwell, qui imposent des relations linéaires entre le champ électrique et le champ magnétique, montrent que pour une onde plane progressive se propageant dans le vide dans la direction du vecteur unitaire $\vec{u}$ et à tout instant t :

- les champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont contenus dans le plan d'onde et constamment perpendiculaires : $\vec{E}.\vec{B} = 0$;
- leurs modules sont constamment proportionnels : $E = cB$; $\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont donc en phase ;
- le trièdre ($\vec{E}$, $\vec{B}$, $\vec{u}$) est direct (Fig. 1.4).

On dit alors que l'onde lumineuse est une onde transversale.

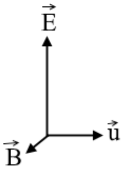

Fig. 1.4 – Trièdre ($\vec{E}$, $\vec{B}$, $\vec{u}$) direct

1.10 Onde Plane Progressive Monochromatique (OPPM)

Définition

C'est une onde (dite aussi harmonique) caractérisée par une pulsation unique ou une fréquence unique. Un cas particulier d'une OPPM se propageant à la vitesse v dans la direction du vecteur unitaire $\vec{u}$ (Fig. 1.5) est une onde sinusoïdale de la forme :

$$s(z,t) = E_0 cos(K(vt - z) - \varphi_S) \tag{1.15}$$

$s(z,t)$: l'amplitude instantanée de l'onde ;
E_0 : l'amplitude de l'onde ;
K : une constante introduite pour que l'argument du cosinus soit sans unité ;
φ_S : le retard de phase constant dû à la source de lumière.

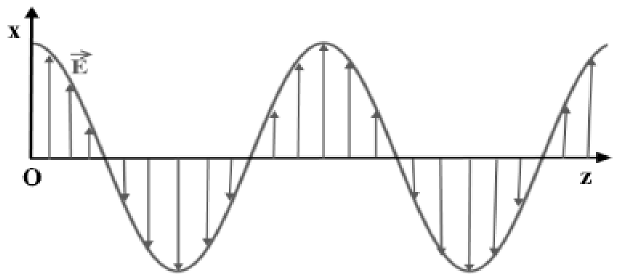

Fig. 1.5 – Propagation d'une OPPM

En prenant l'origine des phases à l'origine des coordonnées, la fonction d'onde s'écrit en faisant une analogie avec une onde mécanique :

$$\boxed{s(z,t) = E_0 cosK(vt - z) = E_0 cos(\omega t - \varphi)} \tag{1.16}$$

$\omega t - \varphi$: la phase de l'onde à l'instant t ;
ω : la pulsation de l'onde ;
φ : la phase ou déphasage à $t = 0$; ou c'est la différence entre la valeur de la phase en un point atteint par la lumière et sa valeur à la source de lumière au même instant.
Pour simplifier les calculs, il est souvent plus commode d'utiliser la notation complexe : on représente $s(M,t)$ par la fonction :

$$z(M,t) = E_0 e^{j(\omega t - \varphi)} = E_0 e^{-j\varphi} e^{j\omega t}$$

$A = E_0 e^{-j\varphi}$ est l'amplitude complexe de l'onde.