Polarisation de la lumière

La polarisation de la lumière est la direction du champ électrique composant l'onde électromagnétique lumineuse.

1 Ondes polarisées rectilignement

Une onde lumineuse est polarisée rectilignement lorsque le champ électrique $\vec{E}$ garde une direction déterminée au cours de la propagation. Le plan formé par $\vec{E}$ et la direction de propagation est appelé plan de polarisation. La polarisation est dite rectiligne ou linéaire.

2 Ondes polarisées elliptiquement ou circulairement

Si l'onde lumineuse se propage suivant l'axe (Oz), le champ électrique évolue dans le plan (xy). On peut considérer l'évolution de ses composantes suivant l'axe des x et l'axe des y :

$$\vec{E} = a\cos(\omega t)\vec{e}_x + b\cos(\omega t - \phi)\vec{e}_y = E_x\vec{e}_x + E_y\vec{e}_y$$

L'extrémité du champ électrique décrit en général une ellipse, dont on peut établir l'équation :

$$\begin{aligned}
\cos(\omega t - \phi) &= \cos(\omega t)\cos\phi + \sin(\omega t)\sin\phi && (1)\\
\frac{E_y}{b} &= \frac{E_x}{a}\cos\phi + \sqrt{1 - \left(\frac{E_x}{a}\right)^2}\sin\phi && (2)\\
\left(\frac{E_y}{b} - \frac{E_x}{a}\cos\phi\right)^2 &= \left(1 - \left(\frac{E_x}{a}\right)^2\right)\sin^2\phi && (3)\\
\frac{E_x^2}{a^2} + \frac{E_y^2}{b^2} - 2\frac{E_xE_y}{ab}\cos\phi &= \sin^2\phi && (4)
\end{aligned}$$

On détermine le sens de parcours de l'ellipse en calculant dE_x/dt et dE_y/dt :

$$\frac{dE_x}{dt} = -a\omega\sin(\omega t) \quad \frac{dE_y}{dt} = -b\omega\sin(\omega t - \phi)$$

Pour $t = 0$, $dE_x/dt = 0$ et $dE_y/dt = b\omega\sin\phi$. Ainsi, lorsque $\sin\phi$ est positif, l'ellipse est décrite dans le sens trigonométrique. On dit alors que l'onde est polarisée elliptiquement *à gauche*, car pour un observateur vers lequel l'onde se propage, l'ellipse est décrite vers la gauche.
Lorsque $\sin\phi$ est négatif, l'ellipse est décrite dans le sens des aiguilles d'une montre. L'onde est polarisée elliptiquement à droite. Dans le cas où $\phi = \pi/2$ ou $3\pi/2$ et $a = b$, l'onde est polarisée circulairement, à gauche si $\phi = \pi/2$ et à droite si $\phi = 3\pi/2$. La courbe décrite par l'extrémité du champ électrique a pour équation

$$\frac{E_x^2}{a^2} + \frac{E_y^2}{a^2} = 1$$

qui est celle d'un cercle de rayon a.

Si $\phi = 0$ ou $\phi = \pi$, l'équation de l'ellipse devient

$$\left(\frac{E_x}{a} \mp \frac{E_y}{b}\right)^2 = 0$$

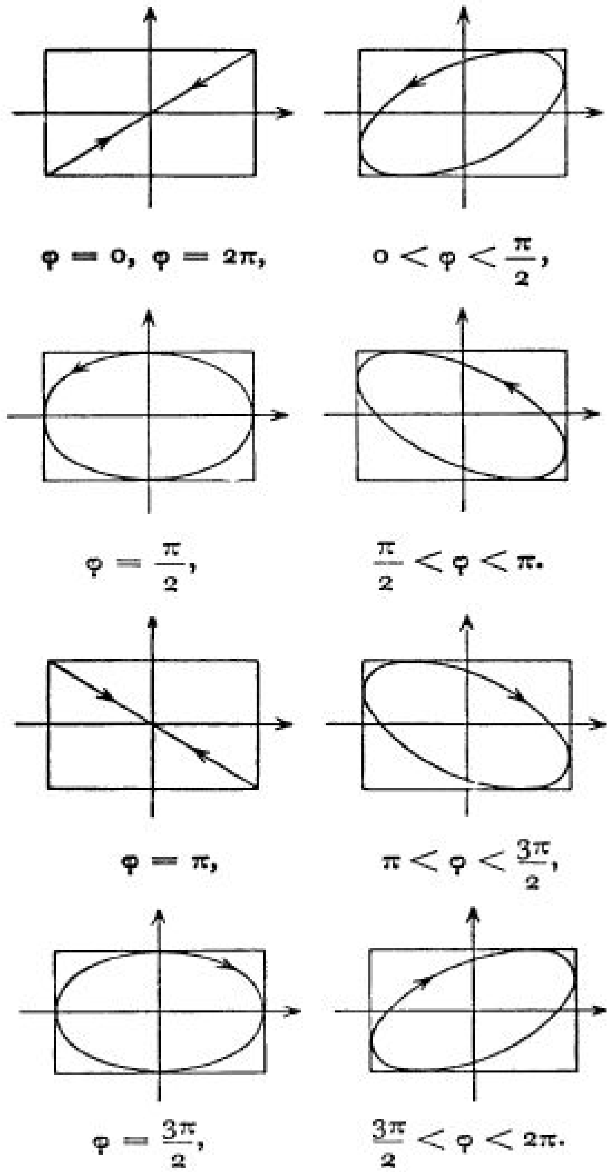

Figure 1: Polarisation elliptique : lorsque $\sin\phi$ est positif, l'ellipse est parcourue dans le sens trigo. On dit que la polarisation est à gauche. Lorsque $\sin\phi$ est négatif, le sens de parcours change et la polarisation est à droite. On remarque que lorsque $\sin\phi = 0$, la polarisation est rectiligne. Lorsque ϕ varie, l'inclinaison de l'ellipse varie aussi.

soit

$$E_y = \pm\frac{b}{a}E_x$$

qui est l'équation d'une droite. On retrouve alors le cas de la polarisation linéaire.

3 Caractérisation d'une onde polarisée

3.1 Paramètres géométriques

Il résulte de ce qui précède qu'une onde polarisée quelconque est caractérisée par trois paramètres indépendants : les amplitudes a et b et le retard de phase ϕ. Il est parfois commode de choisir d'autres triplets : par exemple les demi-axes A et B de l'ellipse et son angle d'inclinaison α par rapport à l'axe initial des x.

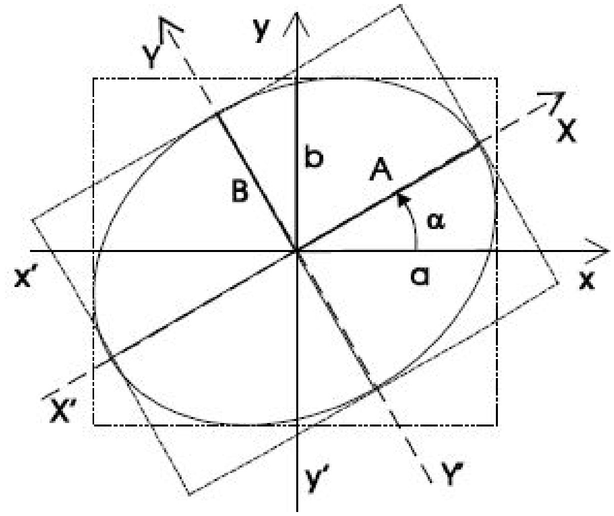

Figure 2: On peut aussi caractériser une polarisation par les demi-axes A et B et l'inclinaison α de l'ellipse par rapport à l'axe des x.

3.2 Relation entre (a, b, ϕ) et (A, B, α)

On admettra les trois égalités suivantes, qui ne sont pas à connaitre :

$$A^2 + B^2 = a^2 + b^2 \,(= \text{ intensité de l'onde}) \quad (5)$$

$$AB = \pm ab \sin\phi \quad (6)$$

$$\tan(2\alpha) = \frac{2ab\cos\phi}{a^2 - b^2} \quad (7)$$

On remarque que l'ellipse a ses axes selon x et y si $\phi = \pi/2$, ou bien que ses axes sont à 45° si $a = b$.

3.3 Représentation de Jones

On utilise la représentation complexe du champ électrique :

$$\underline{\vec{E}} = ae^{-i\omega t}\vec{e}_x + be^{i\phi}e^{-i\omega t}\vec{e}_y$$

et l'amplitude complexe

$$a\vec{e}_x + be^{i\phi}\vec{e}_y = \begin{pmatrix} a \\ be^{i\phi} \end{pmatrix}$$

pour représenter la polarisation par le vecteur normé suivant, appelé vecteur de Jones ou représentation de Jones :

$$\frac{1}{\sqrt{a^2+b^2}}\begin{pmatrix} a \\ be^{i\phi} \end{pmatrix}$$

Par exemple, $(1;0)$ représente la polarisation linéaire suivant x; $(0;1)$ celle suivant y et $\frac{1}{\sqrt{2}}(1;1)$ celle faisant un angle de 45° avec l'axe des x.
Lorsque la polarisation est circulaire ou elliptique, les coordonnées du vecteur sont des nombres complexes. Par exemple : $\frac{1}{\sqrt{5}}(2;-i)$ est une polarisation elliptique droite ($\phi = -\pi/2$) pour laquelle $a = 2b$.
$\frac{1}{\sqrt{2}}(1;i)$ est une polarisation circulaire gauche ($a = b$ et $\phi = \pi/2$).
La représentation de Jones est très pratique pour additionner deux ondes polarisées. Par exemple, la superposition de deux ondes circulaires droite et gauche donne une polarisation linéaire suivant l'axe des x!

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} + \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = \sqrt{2}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Nous utiliserons ce résultat pour expliquer le pouvoir rotatoire de certaines substances, qui font tourner une polarisation rectiligne qui s'y propage.

4 Production d'une lumière polarisée

4.1 Lumière naturelle

La lumière émise par le soleil ou par une source lumineuse classique est constituée d'un grand nombre d'ondes sinusoïdales émises par de nombreux atomes. Chacune de ces ondes possède sa propre polarisation. Cependant, chaque direction de polarisation est représentée par une onde et comme un détecteur reçoit beaucoup d'ondes en même temps, il ne voit pas de direction de polarisation privilégiée. Une telle lumière est dite non-polarisée ou naturelle.
Il faut savoir que la réfraction ou la réflexion de la lumière naturelle par un dioptre suffit à lui conférer une polarisation partielle : toutes les polarisations sont présentes, mais une certaine direction domine.
De même, la propagation dans un milieu diffusant, comme l'atmosphère pour la lumière du soleil, confère une polarisation partielle.

4.2 Polariseurs

On appelle polariseur un système capable de transformer de la lumière naturelle en une lumière polarisée rectilignement. Nous allons voir les plus fréquents.

4.2.1 Polaroïds

Les polaroïds sont constitués de longues molécules étirées toutes dans la même direction. Les électrons de ces molécules peuvent se déplacer le long des molécules sous l'effet d'un champ électrique dans cette direction. Ce champ électrique est alors absorbé, et seul subsiste le champ électrique dans la direction perpendiculaire aux molécules. On crée ainsi une direction de polarisation privilégiée.
Il faut savoir qu'un polaroïd ne laisse passer que de 60% à 80% de la lumière polarisée suivant la direction passante. Le reste est absorbé. Dans la direction d'absorbtion, seuls 0,0002% de la lumière parvient à passer.

4.2.2 Polarisation par biréfringence

Certains matériaux possèdent la particularité de former deux rayons lumineux à partir d'un seul : il y a double réfraction lorsque la lumière entre dans un tel matériau et on les appelle donc biréfringents. Chacun des deux rayons formés est polarisé linéairement, et les deux polarisation sont perpendiculaires. En déviant un des rayons vers le support du matériau, il n'y en a qu'un qui parvient à traverser, et il est polarisé linéairement.
Ces polariseurs sont très performants, mais coûteux.

4.3 Loi de Malus

On considère une onde polarisée rectilignement et d'amplitude A, issue d'un polariseur P, qui tombe sur un second polariseur A. Soit θ l'angle entre les directions passantes de P et A. L'onde issue de A est polarisée rectlignement, avec un angle θ par rapport à l'onde issue de P, et son amplitude est $A\cos\theta$, c'est à dire la projection sur la direction de A de l'onde issue de P.
L'intensité émergeant de A est $I = A^2\cos^2\theta$, ou bien, si il y a de l'absorption (cas des polaroïds) : $I = A^2T\cos^2\theta$ où T est le coefficient de transmission du polaroïd.
Lorsque $\theta = 0$ ou π, l'intensité est maximale : les directions de P et A coïncident. L'intensité est nulle lorsque $\theta = \pi/2$ ou $3\pi/2$. Les directions de P et A sont alors orthogonales. On dit

que P et A sont croisés.
Une onde polarisée linéairemenr peut être éteinte en faisant tourner un polariseur : il s'agit d'un critère d'analyse de la polarisation incidente, d'où le nom d'analyseur donné à A.
La proportionnalité entre l'intensité I transmise par A et $\cos^2\theta$ constitue la loi de Malus.

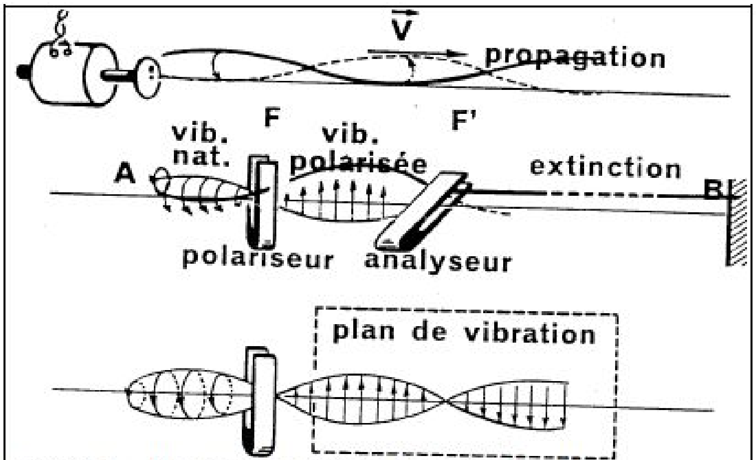

Figure 2 – Image mécanique de la polarisation.

5 Polarisation par réflexion

On considère une lumière naturelle incidente sur un dioptre. Dans cette lumière, toutes les directions de polarisation sont équivalentes et on peut choisir comme directions de base les directions de polarisation parallèle et perpendiculaire au plan d'incidence. Or on a vu dans le TP 07 que ces deux directions de polarisations n'étaient pas réfléchies avec la même intensité (sauf en incidence normale). Cela signifie que pour la lumière réfléchie, toutes les directions de polarisation ne sont plus équivalentes : celle perpendiculaire au plan d'incidence domine. La lumière réfléchie est partiellement polarisée.
Il y a même une incidence particulière i_B, dite incidence de Brewster, pour laquelle la lumière est totalement polarisée perpendiculairement au plan d'incidence car le coefficient de réflexion de la composante parallèle au plan d'incidence s'annule. Pour cette incidence, les rayons réfléchi et réfracté sont orthogonaux et $\tan i_B = n$ où n est l'indice du milieu sur lequel la lumière se réfléchit (voir exercices).