Production, analyse et utilisation de la polarisation des ondes électromagnétiques

Niveau : L2
Prérequis : Optique géométrique, Optique ondulatoire, Équations de Maxwell dans le vide et dans un milieu matériel, solutions on ondes planes progressives monochromatiques, notation complexe, angle de Brewster, coefficients de Fresnel
Bibliographie : Physique tout-en un PC/PC* *Dunod*, Classical Electrodynamics *Jackson*, Sextant, `http://www.seigne.free.fr/Cours/Polarisation.pdf`,`http://ressources.agreg.phys.ens.fr/static/TP/serie2/PolarisationI.pdf`

Table des matières

Introduction : modèles scalaires et vectoriels de la lumière

Expérience loi de Malus

1 Polarisation d'une onde électromagnétique

1.1 Définition

— Lumière = onde electromagnétique plane progressive monochromatique. On se limite à ce cas car la modélisation par paquets d'OPPM est très pertinente. On se limite à la propagation selon les

z croissants :

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos(\omega t - kz - \varphi)$$

En complexes :

$$\underline{\vec{E}}(z,t) = \underline{E_0} e^{i(\omega t - kz)}$$

L'onde est **transverse** (Maxwell-Gauss) donc on peut définir un plan d'onde $(\vec{E_x}, \vec{E_y})$ Avec

$$\vec{E}(z,t) = \begin{cases} E_x = E_{0x}\cos(\omega t - kz - \varphi_x) \\ E_y = E_{0y}\cos(\omega t - kz - \varphi_y) \end{cases}$$

$$= \begin{cases} E_x = E_{0x}\cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_{0y}\cos(\omega t - kz - \varphi) \end{cases}$$

L'étude de la polarisation de cette OPPM est celle du mouvement du vecteur champ électrique dans ce plan d'onde au cours du temps.

Remarque

Les équations de Maxwell permettent d'écrire le champ magnétique :

$$\vec{B}(z,t) = \vec{n} \times \frac{\vec{E}}{c}$$

Donc on le déduit de $\vec{E}$

1.2 Etats de polarisation

1.2.1 Cas TRÈS général : lumière non-polarisée

Dans ce cas, la phase φ change de manière aléatoire au cours du temps : les composantes x et y sont incohérentes. **La plupart des sources de lumière émettent une lumière non polarisée** .

1.2.2 Cas général : polarisation elliptique

Si au contraire, φ est constant, le champ $\vec{E}$ adopte certaines directions de polarisation précises et on va pouvoir décrire des états de polarisation précis. Dans le cas le plus général, on a une polarisation elliptique.

1.2.3 Deux états particuliers : polarisations linéaire et circulaire

Polarisation circulaire :

$$E_{0x} = E_{0y}$$

et

$$\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$$

Polarisation linéaire :

$$\varphi = 0[\pi]$$

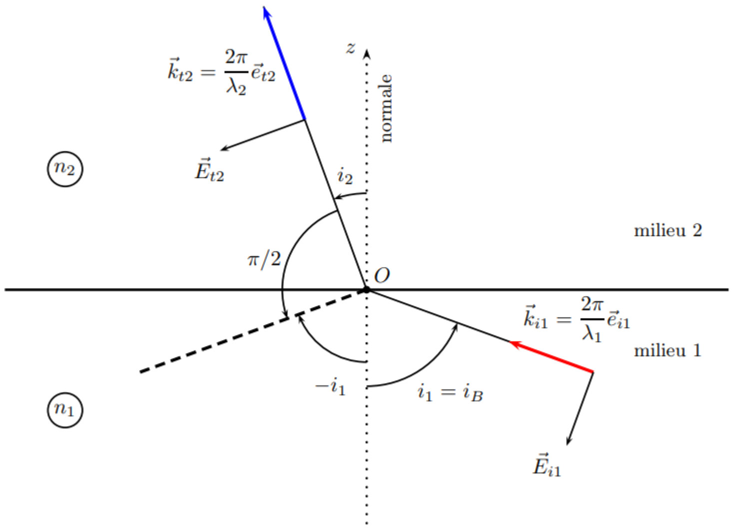
Dans ce cas, la direction du champ électrique ne change pas au cours du temps.

2 Obtention de lumière polarisée

2.1 Polariseur par absorption

Il s'agit de filtres à polarisation linéaire : composés de polymères que l'on étire dans une certaine direction et sur lesquels on fixe un composé absorbant et de l'iode (important nuage électronique) . Alors toute la lumière polarisée parallèlement à cette grille est absorbée (le matériau est conducteur dans cette direction mais isolant perpendiculairement.)

2.2 Polarisation par réflexion vitreuse



A l'interface entre deux milieux diéléctriques, on a les coefficients de Fresnel en reflexion et transmission en décomposant les champ incidents et réfractés selon $\vec{E}_i = \vec{E}_{i\parallel} + \vec{E}_{i\perp}$:

$$r_\parallel = \frac{n_1 \cos i_2 - n_2 \cos i_1}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_1}$$

$$t_\parallel = \frac{2n_1 \cos i_1}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_1}$$

$$r_\perp = \frac{n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2}$$

$$t_\perp = \frac{2n_1 \cos i_1}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2}$$

Angle de Brewster $= i_B$ tel que (Rayon réfracté, rayon réfléchi)$= \frac{\pi}{2}$ donc

$$\tan i_B = \frac{n_2}{n_1}$$

$i_B = 57°$ dans le cas air-verre. Alors,

$$r_\parallel = \frac{n_1 \sin i_B - n_2 \cos i_B}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_B}$$

$$r_\parallel = (n_1 \cos i_B)\frac{\tan i_B - \frac{n_2}{n_1}}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_B} = 0$$

Donc il n'y a pas de lumière réfléchie qui soit polarisée parallèlement au plan d'incidence !

La lumière réflechie est polarisée rectilignement perpendiculairement au plan d'incidence mais par exemple pour air-verre, $n = 1,5$ et $r_\perp = 15\%$ donc faible rendement.

La solution est d'accumuler les lames de verre pour appauvrir de plus en plus la lumière transmise en lumière polarisée perpendiculairement au plan d'incidence.

2.3 Propriétés de biréfringence

Certains matériaux possèdent des propriétés d'anisotropie (spath d'islande) : le champ électrique ne se propage pas de la même façon selon la direction.

On va s'intéresser au milieux uniaxes pour lesquels on peut définir un axe optique z et donc les deux autres axes l et r(lignes neutres perpendiculaires). A ces deux axes vont être associés deux indices optiques différents

$$n_l = \frac{c}{v_l}$$

$$\underset{r}{n} = \frac{c}{v_r}$$

avec

$$n_l > n_r$$

.

La lumière se propage plus rapidement selon l'axe rapide d'indice n_r donc le milieu va induire une différence de phase entre les composantes de l'onde polarisées selon ces deux axes.

A l'entrée :

$$\vec{E} = \left| \begin{array}{l} E_{0x}\cos(\omega t) \\ E_{0y}\cos(\omega t - \varphi) \end{array} \right.$$

A la sortie d'une lame d'épaisseur e :

$$\vec{E} = \left| \begin{array}{l} E_{0x}\cos(\omega t - k_r e) \\ E_{0y}\cos(\omega t - \varphi - k_l e) \end{array} \right.$$

Où $k_l = n_l \frac{\omega}{c}$

En changeant l'origine des temps :

$$\vec{E} = \left| \begin{array}{l} E_{0x}\cos(\omega t) \\ E_{0y}\cos(\omega t - \varphi - \Phi_{lame}) \end{array} \right.$$

Où

$$\Phi_{lame} = \frac{\omega}{c}\Delta n e = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta n e$$

Donc le déphasage dépend de la longueur d'onde et de l'épaisseur de la lame.

On utilise principalement

— des lames demi-onde telles que $\Phi_{lame} = \pi$

— des lames quart d'onde telles que $\Phi_{lame} = \frac{\pi}{2}$

Lames $\lambda/2$ ($\Phi_{\mathbf{lame}} = \pi$)

Rectiligne $\longrightarrow$ Rectiligne symétrique
Circulaire $\longrightarrow$ Circulaire de sens inverse
Elliptique $\longrightarrow$ Elliptique de sens inverse

Lames $\lambda/4$ ($\Phi_{\mathbf{lame}} = \frac{\pi}{2}$)

Rectiligne d'orientation $\alpha \longrightarrow$ Elliptique. Circulaire si $\alpha = \pm\frac{\pi}{4}$, rectiligne si $\alpha = 0, \pm\frac{\pi}{2}$
Circulaire $\longrightarrow$ Rectiligne
Elliptique $\longrightarrow$ Rectiligne si $\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$ (axes de l'ellipse $\parallel$ lignes neutres), elliptique ou circulaire sinon.

3 Analyse de polarisation

4 Applications

4.1 Lunettes de soleil polarisées

Grâce à la polarisation par réflexion sur le sol, beaucoup de lumière polarisée horizontalement nous arrive dans les yeux. Les lunettes permettent de filtrer celle-ci.

$$\vec{E}_i = E_0 \left| \begin{array}{l} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{array} \right.$$

$0 < \alpha < 90°$

Et à la sortie de la lame:

$$\vec{E}_t = E_0 \left| \begin{array}{l} \cos\alpha \\ \sin\alpha . e^{-i\Phi} \end{array} \right.$$

Soit pour une lame demi onde:

$$\vec{E}_t = E_0 \left| \begin{array}{l} \cos\alpha \\ -\sin\alpha \end{array} \right.$$

Et pour une lame quart d ònde:

$$\vec{E}_t = E_0 \left| \begin{array}{l} \cos\alpha \\ \sin\alpha . e^{-i\frac{\pi}{2}} \end{array} \right.$$

$$\vec{E}_i = E_0 \left| \begin{array}{l} 1 \\ \pm i \end{array} \right.$$

Et à la sortie de la lame:

$$\vec{E}_t = E_0 \left| \begin{array}{l} 1 \\ \pm i . e^{-i\Phi} \end{array} \right.$$

Soit pour une lame demi onde:

$$\vec{E}_t = E_0 \left| \begin{array}{l} 1 \\ \mp i \end{array} \right.$$

Et pour une lame quart d ònde:

$$\vec{E}_t = E_0 \left| \begin{array}{l} 1 \\ \mp 1 \end{array} \right.$$

$$\vec{E}_i = \left| \begin{array}{l} E_{0x} \\ E_{0y} e^{-i\varphi} \end{array} \right.$$

Et à la sortie de la lame:

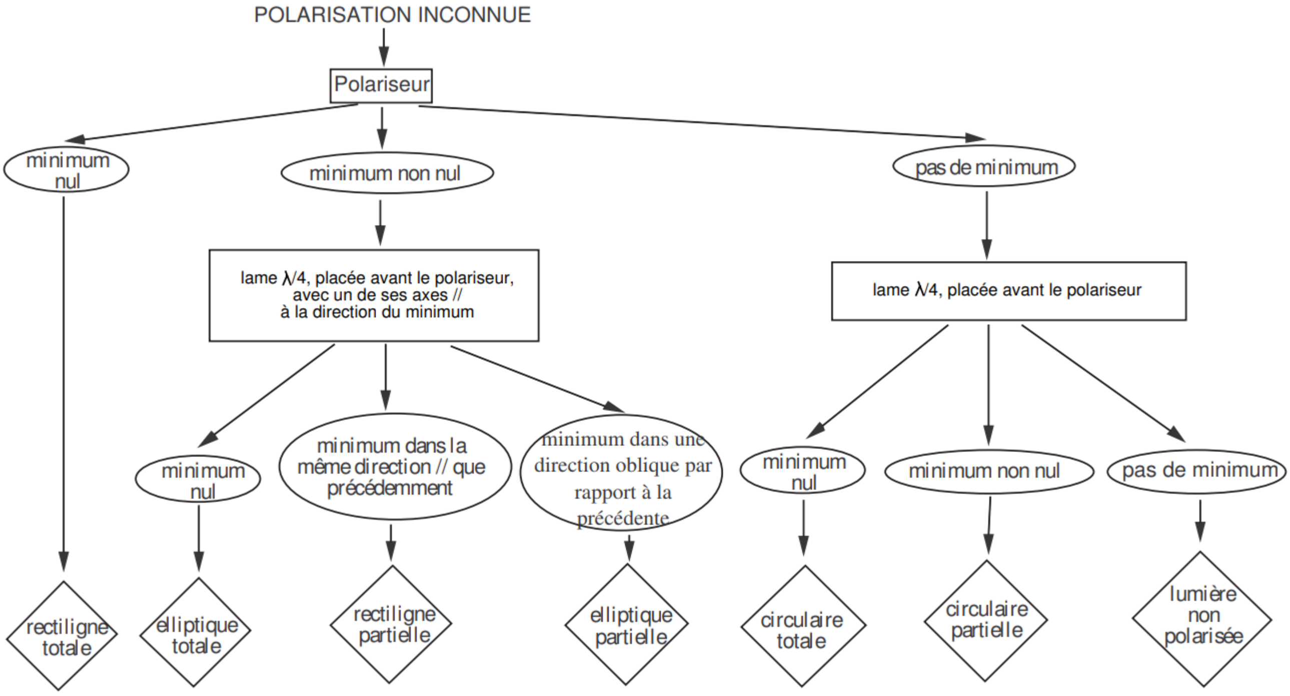
$$\vec{E}_i = \left| \begin{array}{l} E_{0x} \\ E_{0y} e^{-i(\varphi+\Phi)} \end{array} \right.$$

Soit pour une lame demi onde:

$$\vec{E}_i = \left| \begin{array}{l} E_{0x} \\ E_{0y} e^{-i(\varphi+\pi)} \end{array} \right.$$

Et pour une lame quart d ònde:

$$\vec{E}_i = \left| \begin{array}{l} E_{0x} \\ E_{0y} e^{-i\left(\varphi+\frac{\pi}{2}\right)} \end{array} \right.$$



4.2 Lunettes 3D

Deux caméras filment en polarisation rectilignes, de directions orthogonales (en plaçant des filtres polariseurs devant).

Lors de la diffusion, on mêle les deux images donc on obtient une polarisation circulaire (les deux images sot déphasées de pi/2) avec un écran argenté pour conserver la polarisation et limiter l'atténuation de la lumière.

Les lunettes 3D sont en fait des filtres composés d'un polariseur et d'une lame quart d'onde. Les polariseurs servent à redistribuer à chaque oeil l'image déphasée de pi/2 qu'il est censé recevoir et la lame quart d'onde sert à retransformer cela en circulaire pour limiter l'inconfort dû à la rotation possible de la direction de visionnage du spectateur.

4.3 Pouvoir rotatoire des espèces chimiques chirales

5 Conclusion

La polarisation est donc une propriété des ondes électromagnétiques intrinsèquement liée à leur nature vectorielle. Elle est donc une grande source d'information sur le rayonnement électromagnétique mesuré et sur les milieux qu'il traverse ! D'où analyse de composé chimique selon leur pouvoir rotatoire, de rayonnement provenant de l'espace...