

LP 33 – Phénomènes de polarisation optique

Manon LECONTE - ENS de Lyon

Dernière mise à jour : 19 mai 2020

Merci à Joachim Galiana, Estelle Meyer et Héléène Piot-Durand-Lecomte pour leur précieuse aide.

Mots-clé : polarisation, milieu biréfringent, lame quart d'onde, lame demi-onde, réflexion vitreuse, angle de Brewster.

Niveau : PC

Pré-requis :

- Polarisation rectiligne (polariseur, loi de Malus) [PCSI]
- Relations de Snell-Descartes [PCSI]
- Ondes électromagnétiques (structure, relation de passage) [PC]
- Définition de milieu diélectrique [PC]

Bibliographie :

- Sanz, *Physique tout-en-un PC* [Niveau : ★]
- Hecht, *Optique* [Niveau : ★★★]
- Sextant, *Optique expérimentale* [Niveau : ★★★]

Plan proposé

I - Les différents types de polarisation	3
A/ Structure du champ électrique	3
B/ Détermination de la polarisation d'une lumière	4
II - Milieux biréfringents	4
A/ Présentation	4
B/ Lames demi-onde et quart d'onde	4
III - Réflexion vitreuse	5
A/ Angle de Brewster	5
B/ Détermination de l'axe d'un polariseur	6

Liste de matériel

Détermination de la polarisation d'une lumière incidente

- un polariseur ;
- une lame quart d'onde ;
- une source de lumière ;
- un banc optique ;
- un écran.

Détermination de l'axe d'un polariseur par réflexion vitreuse

- un polariseur ;
- une lame de verre ;
- un goniomètre ;
- un écran.

Introduction pédagogique

Cette leçon est placée en PC dans le chapitre sur la propagation des ondes électromagnétiques. Elle se situe à la fin de la séquence, après des cours sur la structure des ondes électromagnétiques, les relations de passage et sur les aspects énergétiques de leur propagation.

On se focalise sur les ondes planes progressives harmoniques (OPPH).

Difficultés :

— détermination de l'angle de Brewster.

Exemples de TD : étude documentaire sur des applications de la polarisation optique (écrans LCD, verre polarisant ...).

Exemples de TP :

— détermination de la polarisation d'une lumière incidente ;

— obtenir une lumière polarisée à partir d'une lumière incidente naturelle ou déjà polarisée ;

— construire un polarimètre à l'aide de deux polariseurs et vérifier la loi de Biot ;

— déterminer l'axe d'un polariseur par réflexion vitreuse.

Introduction

Dans la vie de tous les jours, on rencontre des objets « polarisants ». Par exemple, les lunettes anti-reflets permettent de ne plus observer de reflets à la surface d'une flaque, d'un lac...



(a) Sans filtre anti-reflet



(b) Avec filtre anti-reflet

Figure 1 – Photographie d'une flaque d'eau (**Source** : Hecht (p. 1020)).

Pour comprendre ce qu'il se passe, il faut se rappeler de la nature de la lumière : il s'agit d'une onde électromagnétique. Elle correspond à la propagation dans l'espace d'un champ électrique et d'un champ magnétique couplés et orthogonaux entre-eux, tous les deux orthogonaux à la direction de propagation : l'onde est **transverse**.

Nous allons expliquer cette observation par l'étude de la polarisation de la lumière. En PCSI, on a décrit précisément le phénomène de polarisation rectiligne. Cependant, c'est un cas particulier des phénomènes de polarisation.

Objectifs – Savoir déterminer la polarisation d'une onde électromagnétique.
 Connaître l'influence de milieux biréfringents sur la polarisation.
 Déterminer l'axe d'un polariseur à l'aide de la réflexion vitreuse.

I - Les différents types de polarisation

A/ Structure du champ électrique

Il existe différents types de polarisation, correspondant à des cas particulier de structures du champ électrique.

L'expression générale du champ électrique d'une OPPH se propageant selon l'axe (Oz) est :

$$\vec{E} = E_{0,x} \cos(\omega t - kz) \vec{e}_x + E_{0,y} \cos(\omega t - kz + \psi) \vec{e}_y \quad (1)$$

Cette expression correspond à une **polarisation elliptique**. En effet, la composante du champ électrique selon l'axe (Oy) est proportionnelle à celle selon l'axe (Ox), à un déphasage ψ près.

Animation – Visualisation selon l'axe (Oz) d'une onde polarisée elliptiquement (**Source** : Wikipédia).

Si le déphasage entre les deux composantes est positif, l'ellipse est parcourue dans le sens horaire lorsque l'observateur regarde l'onde arriver vers lui. On parle de polarisation elliptique **droite**. S'il est négatif, on parle de polarisation **gauche**.

On remarque en outre deux cas particuliers pour une onde polarisée elliptiquement :
 — si $E_{x,0} = E_{y,0} = E_0$ et $\psi = \pm \frac{\pi}{2}$, l'onde est dite **polarisée circulairement**. Son sens de rotation est défini pareillement aux ondes polarisées elliptiquement.

Animation – Onde polarisée circulairement gauche

— si $\psi = 0$, on a :

$$\vec{E} = (E_{0,x} \vec{e}_x + E_{0,y} \vec{e}_y) \cos(\omega t - kz) \quad (2)$$

que l'on peut réécrire :

$$\vec{E} = E_0 (\cos \alpha \vec{e}_x + \sin \alpha \vec{e}_y) \cos(\omega t - kz) \quad (3)$$

On retrouve une onde **polarisée rectilignement** : le vecteur \vec{E} garde une direction fixe dans le plan transverse de l'onde.

Animation – Onde polarisée rectilignement

B/ Détermination de la polarisation d'une lumière

I Expérience – Détermination de la polarisation d'une lumière incidente.

Pour déterminer la polarisation d'une lumière, on peut suivre un algorithme assez simple :

On fait passer la lumière à travers un analyseur. Si on fait tourner son axe on finit par obtenir une extinction, la lumière est polarisée rectilignement.

Si son intensité lumineuse était indépendante de la direction de l'analyseur, on place une **lame quart d'onde** avant l'analyseur. Cette lame induit un déphasage de $\frac{\pi}{2}$ selon une direction. Alors, si la lumière était polarisée circulairement, elle est transformée en lumière polarisée rectilignement. On peut donc observer une extinction en faisant tourner l'axe de l'analyseur. Si ce n'est pas le cas, la lumière incidente est naturelle.

Enfin, si on observe une variation de l'intensité lumineuse sans extinction en sortie de l'analyseur sans lame quart d'onde, on peut penser que la lumière est polarisée elliptiquement. On place alors une lame quart d'onde avant l'analyseur : si on observe une extinction, l'hypothèse est juste ; sinon, la lumière incidente est naturelle.

II - Milieux biréfringents

A/ Présentation

Définition – Milieu biréfringent : milieu transparent anisotrope dont l'indice optique est différent suivant deux directions orthogonales.

Il existe des milieux biréfringents naturels comme le quartz, mais on peut également les créer à l'aide de contraintes mécaniques comme le ruban adhésif.

Une OPPH traversant un milieu biréfringent voit son état de polarisation changer car les composantes du champ électrique suivant l'**axe lent** (axe de plus grand indice optique) et l'**axe rapide** (axe de plus faible indice optique) ont des vitesses de phases différentes : $v_\phi = \frac{c}{n}$. Les axes lent et rapide sont également nommés **lignes neutres** du matériau.

B/ Lames demi-onde et quart d'onde

Définition – lame demi-onde : lame taillée dans un matériau biréfringent de façon à ce que $\Delta\phi = \pi$.

Alors, l'épaisseur de la lame vérifie :

$$e = \frac{\lambda}{2(n_x - n_y)} \quad (4)$$

avec λ la longueur d'onde associée à la lame. On en déduit qu'une telle lame ne peut être utilisée qu'avec des OPPH de longueur d'onde λ .

Une lame demi-onde permet d'inverser le sens de rotation des polarisations elliptiques ou circulaires.

Remarque – Récapitulatif dans le Sanz (p. 1 057).

Définition – Lame quart d'onde : lame taillée dans un matériau biréfringent de façon à ce que $\Delta\phi = \frac{\pi}{2}$.

Alors, l'épaisseur de la lame vérifie :

$$e = \frac{\lambda}{4(n_x - n_y)} \tag{5}$$

On a vu dans la partie I-B/ que les lames quart d'onde étaient utilisées pour transformer des polarisations elliptiques ou circulaires en polarisations rectilignes.

III - Réflexion vitreuse

Il existe un phénomène naturel permettant de polariser partiellement la lumière : la réflexion vitreuse.

Définition – Réflexion vitreuse : réflexion de la lumière entre deux milieux diélectriques (air, eau, verre, ...).

C'est ce que l'on observe dans l'exemple introductif de la flaque d'eau (figure 1).

A/ Angle de Brewster

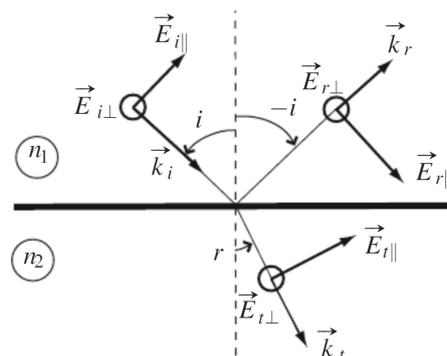


Figure 2 – Notation pour la résolution du problème (Source : Sanz (p. 1 052)).

On peut utiliser les relations de passage des composantes parallèle et perpendiculaire du champ électrique à l'interface entre l'air (milieu 1) et la flaque d'eau (milieu 2) pour obtenir les expressions des coefficients de transmission :

$$r_{//} = \frac{\tan(r - i)}{\tan(r + i)} ; r_{\perp} = \frac{\sin(r - i)}{\sin(r + i)} \tag{6}$$

Si l'on trace l'allure des coefficients de réflexion, on remarque que les coefficients de réflexion ont des valeurs différentes lorsque $i > 15^\circ$. Ceci explique une **polarisation partielle** de l'onde.

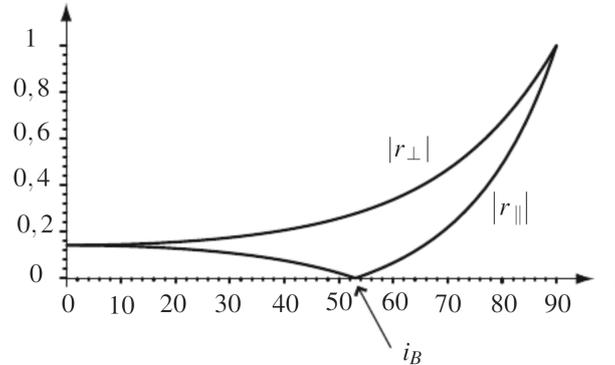


Figure 3 – Allure des coefficients de réflexion en fonction de i pour $n_2 > n_1$ (Source : Sanz (p. 1 053)).

On peut admettre que le coefficient de réflexion $r_{//}$ s'annule lorsque $r_B + i_B = \frac{\pi}{2}$. Alors, si on utilise la 2^{me} loi de Snell-Descartes, on a :

$$n_1 \sin i_B = n_2 \sin r_B = n_2 \sin \left(\frac{\pi}{2} - i_B \right) = n_2 \cos i_B \tag{7}$$

On en déduit l'expression de l'angle i_B annulant le coefficient de réflexion $r_{//}$, appelé **angle de Brewster** :

$$i_B = \arctan \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \tag{8}$$

B/ Détermination de l'axe d'un polariseur

On observe la réflexion d'une lumière incidente non polarisée sur une lame de verre à travers un polariseur. On se place à l'angle de Brewster, qui vaut environ 56° à l'interface entre l'air et le verre ($n_2 = 1,5$), par exemple en utilisant un goniomètre. On fait alors tourner l'axe du polariseur jusqu'à obtenir une extinction. Alors, l'axe du polariseur est orthogonal à l'angle du polariseur qui est repéré.

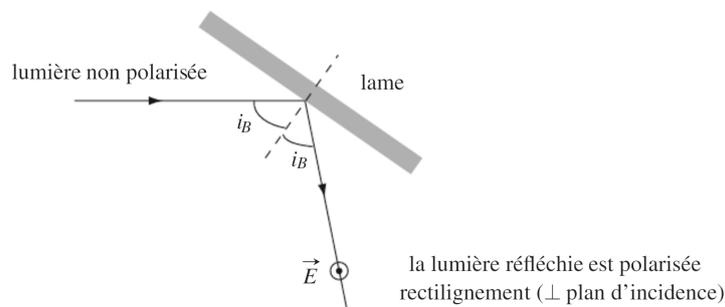


Figure 4 – Dispositif expérimental pour déterminer l'axe d'un polariseur (Source : Sanz (p. 1 054)).

Remarque – Il faut observer l'extinction suffisamment loin de la lame de verre pour pouvoir faire l'approximation que l'onde réfléchie est plane.

Conclusion

La lumière naturelle est non polarisée. Elle peut se polariser en traversant des polariseurs ou des milieux biréfringents, mais également par réflexion vitreuse.