

LP 34 - Phénomènes de polarisation optique

Lise Boutenègre, Raphael Rullan

Elément imposé – Mesure d'un excès énantiomérique, Milieux biréfringent (manipulation), loi de Biot

Introduction Pédagogique

Niveau : L2

Pré-requis

- Ondes électromagnétiques, champ électromagnétiques **L2**
- Propagation des ondes **L2**
- Relations de Snell-Descartes **Secondaire**
- Optique géométrique **L1**
- Loi de Malus **L1**
- Lumière polarisée rectilignement **L1**
- Trigonométrie

Difficultés

- Notion de polarisation particulièrement abstraite et difficile à voir
- Aspect vectoriel de la lumière : onde transversale complique la vision des choses, il faut bien dissocier direction de propagation et champ électrique. Notamment pour la réflexion.
- Traitement mathématique

Applications

- **TP** : Loi de Biot, polarisation d'une lumière, détermination de l'axe du polariseur avec le goniomètre
- **TD** : calcul d'intensité d'un rayon émergent. Application à des systèmes optiques réels.

Objectifs – Faire comprendre aux élèves le principe de polarisation, qu'ils puissent l'utiliser dans des cas simples et qu'ils comprennent les phénomènes de tous les jours avec une vision vectorielle.

Source – Sanz p.1051, Pérez (p.210, p.379, p.409), Hecht, Houar, leçon de Manon, leçon de Bénédicte

Introduction

La polarisation de la lumière est une manifestation du caractère vectoriel des ondes lumineuses. Elle permet d'expliquer la coloration de certaines lames minces cristallines comme le mica ainsi que l'image dédoublée d'un objet observée à travers un cristal de Spath.

C'est un phénomène très courant dans la nature, les abeilles s'en servent pour se déplacer, on le retrouve dans les lunettes de soleil polarisantes, les écrans à cristaux liquides ...

La polarisation par réflexion fut la première à être décrite et expliquée, en 1809 par Malus. Ce n'est pourtant pas la 1ère observation du phénomène, la première observation a été faite sur des Spathes d'Islande par Erasmus Bartholin (Danois). C'est le physicien anglais Young qui arrive à une observation particulièrement importante : la lumière est une onde transversale. Cette propriété là nous sera très utile par la suite. (Aspect historique, Hecht + Houart section polarisation)

1 Structure de la lumière

La lumière est une onde électromagnétique transversale. (On met une image). On peut écrire la lumière comme une OPPH, l'expression de celle-ci est sous la forme :

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

1 Définition et type de polarisations

Commençons l'exposé par quelques définitions

Définition – polarisation : orientation du vecteur champ électrique lorsqu'un observateur regarde l'onde se propager vers lui

Définition – Plan de polarisation : plan qui contient le champ électrique de l'onde électromagnétique

Définition – Axe de polarisation : droite parallèle à la direction du champ électrique

Maintenant nous allons pouvoir définir les différents types de polarisation. Il y en a trois types : rectiligne, elliptique, circulaire. (on va ici utiliser le code de Tim).

Tableau récapitulatif :

Remarque – On peut également selon le sens de rotation déterminer si c'est droite ou gauche. Droite c'est dans le sens horaire vu par Ça dépend de la forme $\pm \cosinus$. On discute de la valeur du cosinus en fonction du déphasage

pour la demo math : <https://www.youtube.com/watch?v=TDRG13mByOk>

2 La lumière naturelle

Considérons que cette expression est l'expression générale d'une onde.

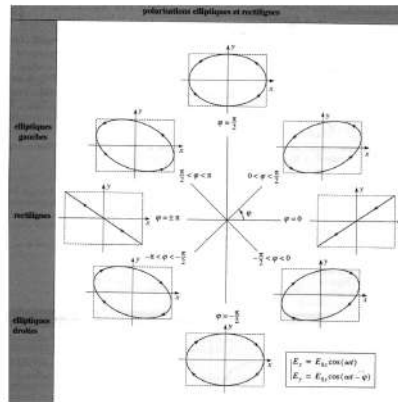


Figure 1 – http://olivier.granier.free.fr/cariboost_files/Tr-PC-pola-lumiere-1213.pdf

Type de polarisation	Description	Déphasage
Rectiligne	E oscille dans un plan fixe	$0[\pi]$
circulaire	norme de E ne change pas, orientation change selon mouvement de rotation, forme des cercles	$\frac{\pi}{2}[\pi]$
Elliptique	Le champ E dessine des ellipses	quelconque sauf les valeurs déjà décrites

Tableau 1 – Caption

polarisations circulaires	
circulaire gauche $\varphi = \frac{\pi}{2}$	circulaire droite $\varphi = -\frac{\pi}{2}$
notation réelle $E_x = E_0 \cos(\omega t)$ $E_y = E_0 \sin(\omega t)$	notation réelle $E_x = E_0 \cos(\omega t)$ $E_y = -E_0 \sin(\omega t)$
notation complexe $\underline{E}_x = E_0 e^{j\omega t}$ $\underline{E}_y = -j\underline{E}_x = -jE_0 e^{j\omega t}$	notation complexe $\underline{E}_x = E_0 e^{j\omega t}$ $\underline{E}_y = j\underline{E}_x = jE_0 e^{j\omega t}$

Figure 2 – Polarisation droite/gauche : http://olivier.granier.free.fr/cariboost_files/Tr-PC-pola-lumiere-1213.pdf

Définition – La lumière naturelle : (ou provenant d’une source ordinaire) est un mélange désordonné d’émission polychromatique d’un nombre d’atomes plus ou moins indépendants.

Toutes les ondes n’ont donc aucune corrélation. Le champ total est la somme de toutes les contributions. A tout instant il y a donc une polarisation mais l’état va varier rapidement (10^{-8} s) d’une façon très désordonnée. Nous disons donc que cette lumière est non polarisée ou naturelle.

Remarque – Bien souvent la lumière est partiellement polarisée : mélange de lumière polarisée et non polarisée, c’est le cas du ciel.

Par la suite, nous considérerons que la lumière naturelle est la superposition de deux ondes indépendantes, de même intensité et polarisées linéairement dans deux directions perpendiculaires.

3 Vers une lumière polarisée

Dépend ce que tu fais après. Mais à priori on explique le principe général. On met dans le sens de propagation de la lumière un dispositif optique qui va sélectionner l’orientation. Lien avec différentes propriétés : http://sepe.esep.pro/fr/pages_polarisation/decouvrir_polarisation_impression.html.

Définition – Polariseur : dispositif qui transforme la lumière naturelle en lumière polarisée.

Idéalement, si un faisceau de lumière d’intensité naturelle d’intensité I_0 tombe sur un polariseur linéaire en un faisceau de lumière polarisée linéairement d’intensité $0.5 I_0$ est transmis. On définit l’axe de transmission. Seule la composante parallèle à cet axe est transmise.

On compare ici les deux cas : le polaroïde et un cas simple d’un polariseur. Deux propriétés différentes, on explique les deux (Hecht p.1015-1016)

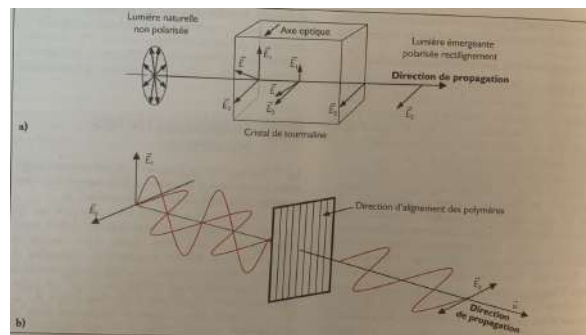


Figure 3 – Polariseur et polaroid (1938 E. H. Land

Pour des matériaux une des propriétés :

Définition – Dichroïsme : propriété qu’ont certains matériaux anisotropes d’absorber différemment une composante vectorielle du champ électrique

Seule la composante parallèle à l’axe optique peut être transmise. Exemple : tourmaline (borosilication d’aluminium - Perez). L’axe du polariseur est orthogonal à la direction d’étirement des macromolécules.

2 Milieux biréfringent

1 Présentation

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

Il y a des milieux biréfringents naturels, des minéraux comme le quartz, les feldspaths, les micas ou autre. Cela signifie que l'indice de réfraction dans une des directions n'est pas la même que celui dans les autres directions. A quoi est-ce que c'est dû ?

Les atomes ne sont pas disposés de façon isotrope dans l'espace, les forces sur leurs nuages électroniques sont différentes dans des directions différentes. Ainsi la réponse des oscillateurs atomiques dépend de la direction du champ électrique incident. On pourra alors définir un **axe lent** et un **axe rapide**. Ici nous allons prendre n_x tel que celui-ci soit l'axe lent soit : $n_x > n_y$. Une façon de voir les choses est qu'une des composantes de l'onde se verra parcourir une distance plus longue que l'autre dans une des directions du matériau. Les axes lents et rapides sont aussi nommés axes neutres du matériau.

Une façon de voir les choses est l'ajout d'un déphasage entre des composantes de l'onde par passage dans le matériau :

$$\Delta\phi = nxk_0e - nyk_0e = \frac{2\pi}{\lambda_0}(nx - ny)e \quad (2)$$

Ou encore une différence de marche :

$$\delta = (nx - ny)e \quad (3)$$

2 Les différentes lames

Comment contrôler la polarisation d'une lumière ? Nous avons vu une première façon. On peut également utiliser des lames particulières permettant de transformer une polarisation en une autre. Pour cela on va utiliser la différence de marche introduite juste avant.

2.1 Lame demi-onde

Définition – Lame demi-onde : lame taillée dans un matériau anisotrope de façon que le déphasage induit par le passage dans le matériau soit de π . La différence de marche est donc de $\frac{\lambda_0}{2}$ d'où l'appellation demi-onde. L'épaisseur maximale de la lame vérifie donc :

$$(nx - ny)e = \frac{\lambda_0}{2} \quad (4)$$

Remarque – Le déphasage étant défini modulo 2π , les épaisseurs de la lame sont :

$$(nx - ny)e_p = (2p + 1) \frac{\lambda_0}{2} \quad (5)$$

Une propriété de cette lame est qu'une lame demi-onde transforme une onde polarisée rectilignement en une onde polarisée selon une direction symétrique par rapport à ses lignes neutres. Si l'onde est polarisée selon une des lignes neutres de la lame alors la lame laisse la direction du champ inchangé.

D'un point de vue mathématique avant la lame :

$$\vec{E} = \begin{cases} E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \\ E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \\ 0 \end{cases} \quad (6)$$

Après la lame :

$$\vec{E} = \begin{cases} E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \\ E_0 \sin(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z + \pi) \\ 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\vec{E} = \begin{cases} E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \\ -E_0 \sin(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \\ 0 \end{cases} \quad (8)$$

2.2 Lames quart d'onde

Définition – lame quart d'onde : C'est une lame taillée dans un matériau anisotrope de façon que $\Delta\phi = \frac{\pi}{2}$. La différence de marche entre deux vibrations est donc de $\frac{\lambda_0}{4}$ d'où son appellation quart d'onde. L'épaisseur minimale vérifie

$$(nx - ny)e = \frac{\lambda_0}{4} \quad (9)$$

La propriété de cette onde que nous allons utiliser est qu'une telle lame transforme une onde polarisée rectilignement en une onde polarisée elliptiquement, les axes de l'ellipse étant les lignes neutres de la lame. Si $\alpha = \frac{\pi}{4}$, la vibration émergente est circulaire.

Avant la lame :

$$\vec{E} = \begin{cases} E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \\ E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \\ 0 \end{cases} \quad (10)$$

Après la lame :

$$\vec{E} = \begin{cases} E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \\ E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z + \frac{\pi}{2}) \\ 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\vec{E} = \begin{cases} E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \\ -E_0 \cos(\alpha) \sin(\omega t - k_0 z) \\ 0 \end{cases} \quad (12)$$

3 Application

Manip Houart p.280. C'est une expérience historique : expérience d'Arago. On met en exergue la polarisation chromatique rotatoire.

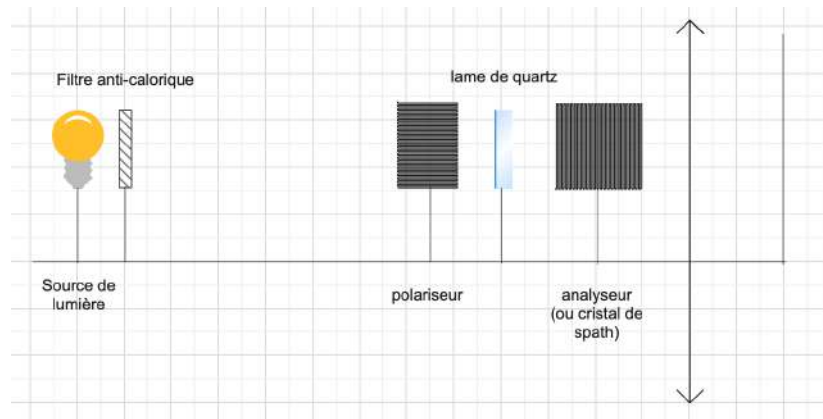


Figure 4 – Montage à effectuer

3 Annexe

1 Loi de Cauchy

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (13)$$

2 Angle de Brewster

Environ 56°.

4 Dépend beaucoup de l'élément imposé :

Idées : -Loi de Biot (voir Naia + Benedicte) - Perez. Fruchart p.185. -Milieux biréfringents (Manon + Sanz) -Angle de Brewster (Manon + Sanz) -lamme quart d'onde, demi onde (Sanz p.1051) <http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=320fileid=1049> (point de vue plus théorique) -détermination de l'axe d'un polariseur (sanz p.1051) -Peut être ajouter l'absorption par les structures physiques.

Questions

- Détailler l'exemple des lunettes de soleil quand la route est mouillée? *La lumière se réfléchit sur la route. Cette lumière subit une polarisation par réflexion et les lunettes "filtre" cette polarisation.*
- N'importe quelles lunettes de soleil permettent de faire ça? *Lunettes polarisées.*
- Si c'est la réflexion qui crée la polarisation, n'importe qu'elle réflexion crée une polarisation? *Question d'angle d'incidence et de matériaux. Angle de réflexion de Brewster à prendre en compte.*
- Quels types de matériaux présentent un angle de Brewster? A quelle classe de matériaux appartiennent les matériaux transparents?
- Approche historique, polarisation par réflexion vitreuse, indice par rapport aux matériaux présentant un angle de Brewster?

- Lumière définie comme une onde électromagnétique transverse que l'on peut décrire comme une OPPH, définition de transverse ? *Direction de perturbation perpendiculaire à la direction de propagation.*
- La lumière est polarisée au coucher du soleil, pourquoi ? *Rayons rasants passent différemment dans l'atmosphère ce qui entraîne une polarisation.*
- Comment on peut observer cette polarisation de la lumière du soleil couchant ? *Utiliser un polariseur*
- Pourquoi le champ électrique parallèle au polymère est absorbé ?
- Est ce que la tourmaline est un polymère ? *Non c'est un cristal mais les cristaux ont des directions de propagation particulières imposées par la croissance cristalline.*
- Axes lent et rapide liés à quoi ? *Liés à la matière*
- Pourquoi mettre en même temps le quartz et le spath ?
- Lame quart d'onde et lame demi onde ? *Référence à la différence de marche*
- Qu'est ce qu'un polariseur de Laurent ?

Réponse

- Réflexion vitreuse réflexion sur les isolants. L'angle de Brewster n'existe pas pour les métalliques.
- Dans le vide les ondes sont nécessairement transverse car les équations de Maxwell implique que (E,B et k) soient transverses. Dans les diélectriques B peut ne pas être transverse à k, c'est une des causes des propriétés biréfringentes des diélectriques.
- Pour la définition de la lumière on prend souvent en compte le visible, l'UV et l'IR.
- La structure cristalline peut être isotrope et expliquer les même phénomène.
- Caractère directionnel important c'est la direction des axes par rapport aux axes du matériau.

Remarques

L'élément imposé biréfringent paraît assez peu probable car au programme d'aucune prépa. Dans une leçon sans cet élément imposé passer beaucoup plus de temps sur la première partie et ne pas parler de lame quart d'onde et demi onde.

Sur un autre élément imposé plus probable ne pas traiter du tout la deuxième partie. Définir la première partie de manière plus pédestre. Structure de la lumière, onde transverse, angle du champ électrique correspond à la polarisation de la lumière.

Quand on écrit une formule chaque élément de la formule doit être relié à quelque chose qui a été expliqué préalablement à l'oral. Parler de polariseur. Faire la loi de Malus dans cette leçon.