

3.6 - Faisceaux LASERS : Propriétés de polarisation.

3.6 - 1 La polarisation de l'onde ém

3.6.1.1 Les différents états de polarisation d'un rayonnement ém.

La polarisation d'un rayonnement ém est liée à l'orientation du champ électrique qui lui est associé. Cette orientation peut varier dans l'espace et dans le temps de façon aléatoire; on parle alors de rayonnement non polarisé. Très souvent dans la pratique, les projections du champ électrique suivant deux axes donnés varient de façon prévisible; le rayonnement présente alors une polarisation elliptique dont deux cas particuliers sont la polarisation linéaire et la polarisation circulaire.

Polarisation aléatoire (ou lumière non polarisée)

Les sources thermiques émettent un rayonnement dont le champ électrique n'a pas d'orientation privilégiée. Cet état peut cependant être modifié au passage à travers une interface ou par propagation à travers un matériau diffusant ou à réfringence anisotrope.

Polarisation elliptique.

On parle de polarisation elliptique lorsque l'extrémité du champ électrique, projeté sur un plan perpendiculaire à la direction de propagation, décrit une ellipse (Fig. ci-après). Cette situation est observée lorsque les deux composantes du champ sur deux axes transverses vibrent avec un décalage de phase différent de 0 et de $\pi/2$.

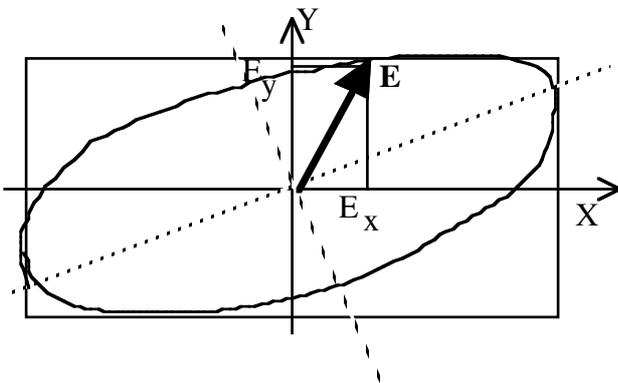


Fig. 3.6-1 : Polarisation elliptique, le cas le plus fréquent.

L'extrémité du champ électrique en projection décrit une ellipse. Les deux composantes du champ électrique E sur les axes X et Y ont des amplitudes différentes et vibrent avec un décalage de phase compris entre 0 et $\pi/2$, mais différent de ces deux valeurs. Les polarisations linéaires et circulaires sont des cas particuliers de la polarisation elliptique.

Polarisation circulaire.

Lorsque les deux composantes du champ électrique mentionnées ci-dessus ont la même amplitude et sont déphasées de $\pi/2$, l'extrémité du champ en projection décrit un cercle; le rayonnement présente alors une polarisation circulaire.

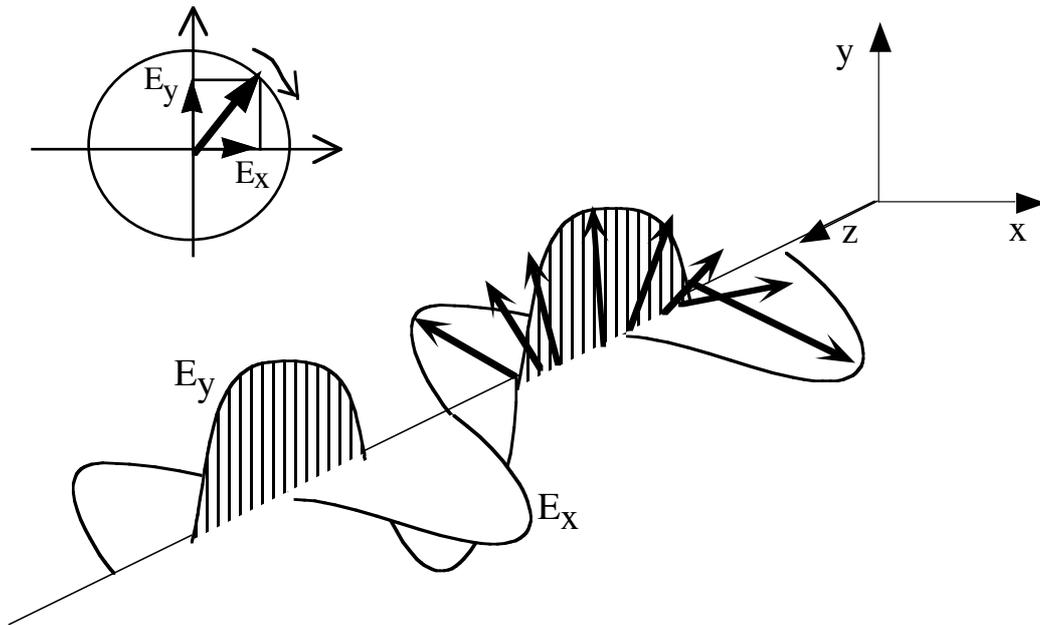


Fig. 3.6-2 : Polarisation circulaire droite.

L'extrémité du champ électrique décrit une hélice, qui projetée sur un plan perpendiculaire à la direction de propagation donne un cercle, d'où le nom de cet état de polarisation. Une onde de polarisation circulaire peut être décrite comme la superposition de deux ondes de même amplitude, à polarisation rectiligne et décalées de 90° .

Polarisation linéaire.

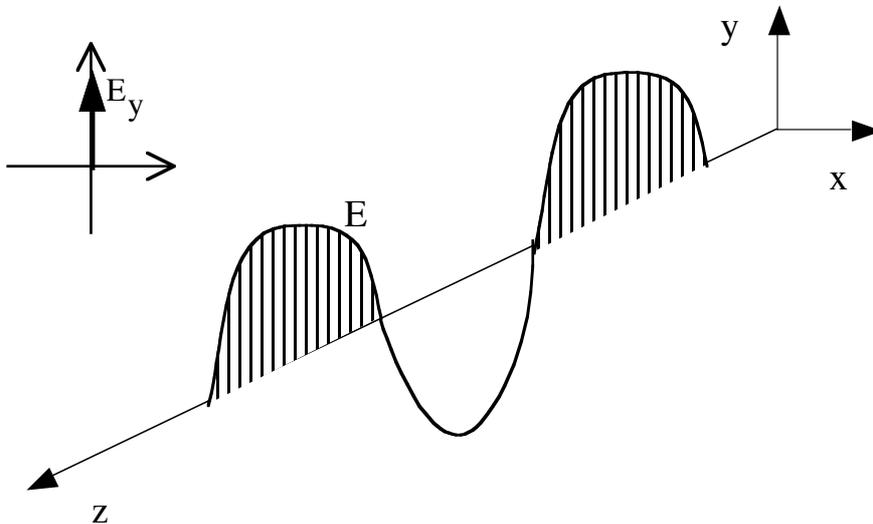


Fig. 3.6-3 : Polarisation rectiligne.

Le champ électrique E reste parallèle à une direction fixe (ici l'axe Y) au cours de la propagation de rayonnement.

3.6.1.2 Modification de l'état de polarisation

Polarisation par absorption

Certains matériaux transparents présentent la propriété d'atténuer fortement le champ électrique d'un rayonnement orienté suivant une direction particulière. Il en résulte qu'à la sortie d'un tel matériau, un

rayonnement non polarisé à l'entrée a pris une polarisation rectiligne. Les feuilles 'Polaroid' fonctionnent suivant ce principe.

Polarisation par réflexion

Dans un système optique où les incidences sont perpendiculaires aux surfaces, les effets de polarisation sont négligeables, voire inexistant. Lorsque les angles d'incidence sont importants, les effets de la réflexion sur l'état de polarisation du rayonnement ne peuvent plus être négligés. Nous avons rappelé précédemment que le coefficient de réflexion d'une surface dépend de l'orientation du champ électrique de l'onde. C'est seulement dans des conditions très particulières, qu'aucune altération de l'état de polarisation d'une onde n'est observée lors d'une réflexion ou à la traversée d'un dioptre.

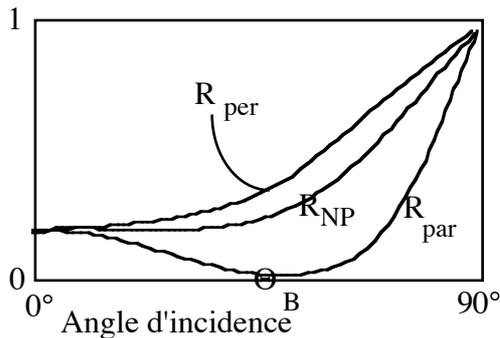


Fig. 3.6-4 : Polarisation par réflexion.

Coefficient de réflexion à l'interface entre deux diélectriques pour une onde polarisée perpendiculairement au plan d'incidence (R_{per}), pour une onde polarisée dans le plan d'incidence (R_{par}) et pour une onde à polarisation aléatoire ou non polarisée (R_{NP}). A l'angle de Brewster θ_B , l'onde réfléchie a une polarisation rectiligne, car le pouvoir réfléchissant de l'interface pour l'une des deux composantes du champ est nulle.

Polarisation par réfraction. Lames à retard.

Il existe des matériaux pour lesquels l'indice de réfraction dépend de l'orientation du champ électrique (matériaux biréfringents). L'utilisation de ces matériaux permet de réaliser des polariseurs comme le prisme de Nicol (figure ci-dessous).

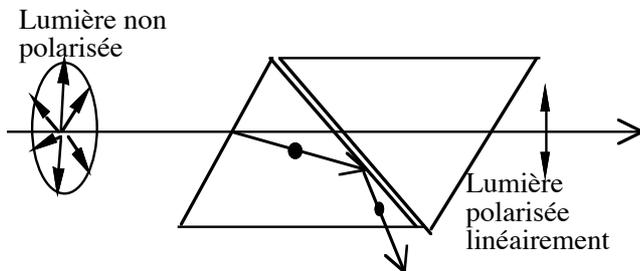


Fig. 3.6-5 : Prisme de Nicol.

A l'intérieur du prisme en calcite, l'onde incidente se décompose en deux ondes polarisées S et P. L'onde S subit une réflexion totale interne à l'interface entre les deux parties du prisme. L'onde P est transmise.

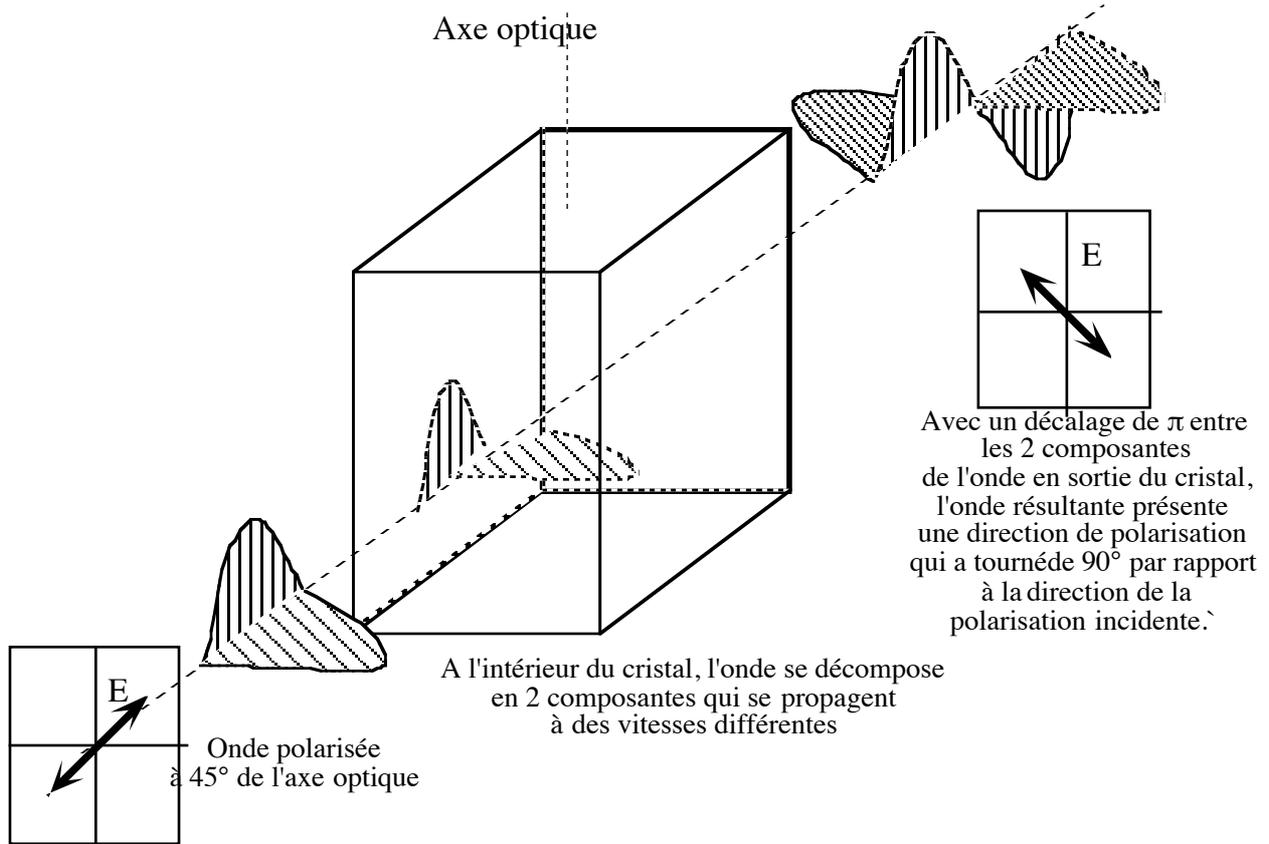


Fig. 3.6-6 : Modification de l'état de polarisation d'une onde par une lame demi-onde.

La lame demi-onde est constituée d'un cristal présentant une direction particulière appelée axe optique. Dans ce matériau biréfringent, une onde optique polarisée suivant l'axe optique, ou onde 'extraordinaire' se propage à une vitesse différente de celle d'une onde polarisée suivant les autres directions, ou onde 'ordinaire'. Dans la lame demi-onde il y a décomposition de l'onde en une onde 'e' et une onde 'o' (ordinaire). Par un choix approprié de l'épaisseur de la lame, il est possible de décaler les deux ondes de 180° . Leur recombinaison à la sortie de la lame donne naissance à une onde de polarisation rectiligne, avec un champ électrique perpendiculaire à la direction du champ à l'entrée.

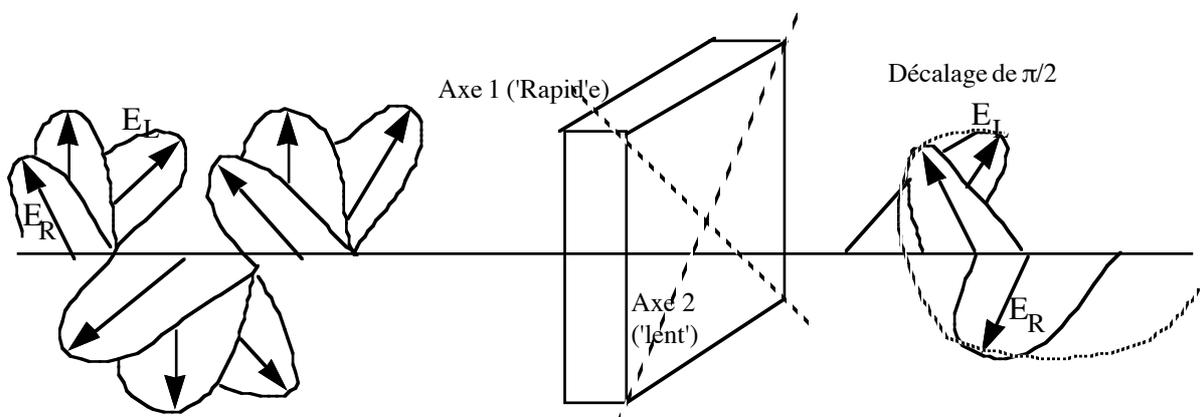


Fig. 3.6-7 : Modification de l'état de polarisation d'une onde par une lame quart-d'onde.

La lame quart d'onde est un matériau biréfringent caractérisé par un axe 'rapide » et un axe 'lent'. L'onde incidente, de polarisation rectiligne, peut être considérée comme la superposition de deux ondes polarisée suivant les deux axes du cristal. Ces deux ondes apparaissent effectivement à l'intérieur du cristal et se propagent à des vitesses différentes. La lame quart-d'onde a une épaisseur choisie pour qu'à une longueur d'onde donnée, les deux composantes du champ soient décalées de $\pi/2$ en sortie. Le résultat de la superposition de ces deux ondes déphasées est une onde polarisée circulairement.

3.6 - 2 Polarisation du faisceau laser

Dans une cavité laser simple constituée de deux miroirs sphériques placés de chaque côté du milieu actif, les rayons lumineux sont réfléchis sous une incidence proche de la normale. Dans ce cas l'orientation du champ électrique (la polarisation) a peu d'influence sur le pourcentage d'énergie réfléchi. Le faisceau produit dans ce cas présente une polarisation aléatoire si le matériau actif ne présente pas d'anisotropie. L'anisotropie (biréfringence) de certains matériaux solides comme le cristal de YAG peut néanmoins être à l'origine d'une polarisation partielle même avec une cavité droite.

Il peut s'avérer utile de contrôler la polarisation du faisceau produit. Cela ne peut se faire qu'en essayant de privilégier une direction particulière pour le champ électrique, ce qui correspond à la polarisation dite linéaire. Certains dispositifs intra cavité comme les *Q-switch* peuvent aussi être basés sur un contrôle de la polarisation.

3.6 - 3 Contrôle de la polarisation à l'intérieur de la cavité du laser

3.6.3.1 Angle de Brewster ou de polarisation

Si on introduit, à l'intérieur de la cavité d'un laser, une surface inclinée sur laquelle le faisceau est partiellement réfléchi et partiellement transmis, un choix judicieux de l'angle d'incidence permet de privilégier une composante particulière de l'onde. En effet le coefficient de réflexion à une interface diélectrique ne varie pas de la même façon pour la composante de l'onde dont le champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence (onde S) et celle dont le champ est dans le plan d'incidence (Onde P). Les courbes de variation sont rappelées ci-après.

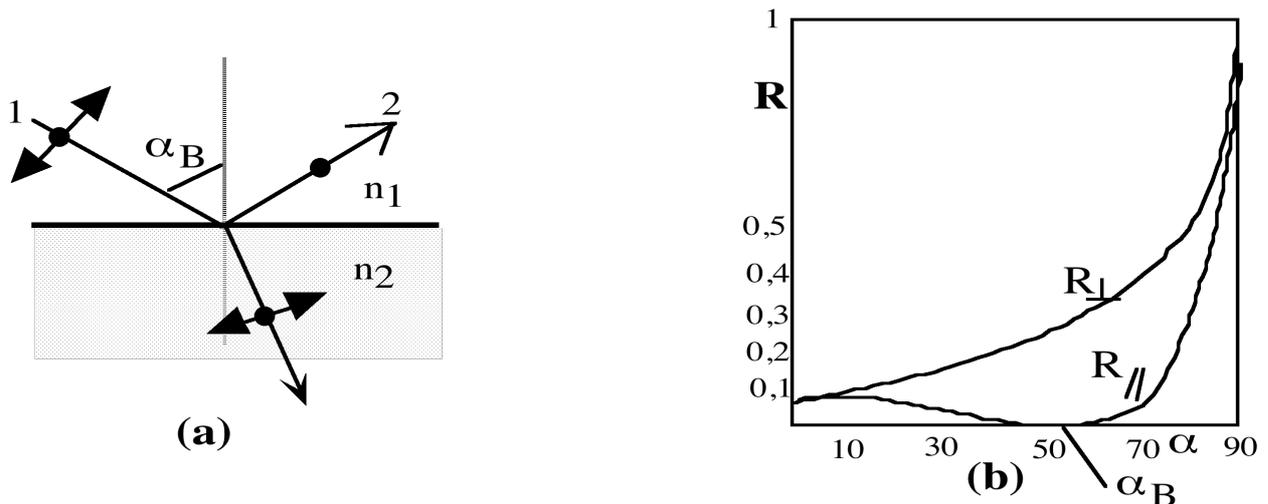


Fig. 3.6-8 : Influence de la polarisation sur le pouvoir réfléchissant d'une interface entre deux milieux d'indices différents.

(a) Considérons un faisceau incident (1) non polarisé. Pour une valeur particulière α_B de l'angle d'incidence définie par la relation (4-1), la lumière réfléchie (2) est présente une polarisation rectiligne, suivant la direction perpendiculaire au plan d'incidence. L'angle α_B est appelé angle de Brewster ou de polarisation.

(b) La courbe notée 1 indique la variation du coefficient de réflexion R de la surface en fonction de l'angle d'incidence pour la composante de polarisation parallèle au plan d'incidence. La courbe notée 2 donne R en fonction de α pour la composante de polarisation normale au plan d'incidence. R s'annule lorsque l'angle d'incidence est égal à l'angle de Brewster.

Un angle d'incidence est particulièrement intéressant, c'est celui qui est donné par la relation suivante :

$$(3.6.1) \quad \alpha_B = \arctg\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \text{ où } n_1 \text{ et } n_2 \text{ sont les indices de réfraction des milieux traversés.}$$

Dans ce cas particulier, la partie de l'onde dont le champ électrique est parallèle au plan d'incidence passe à travers l'interface sans perte, alors que l'autre composante est partiellement réfléchie. Comme dans la cavité l'onde fait en permanence des aller-retour entre les deux miroirs, un équilibre s'établit dans lequel la composante ne subissant pas de perte domine nettement sur l'autre. Le faisceau produit est polarisé.

3.6.3.2 Fenêtre de Brewster dans les cavités.

La polarisation linéaire est l'état de polarisation le plus facile à maîtriser; il est donc souhaitable pour beaucoup d'applications de disposer d'un faisceau à polarisation rectiligne. Dans un laser la polarisation linéaire est obtenue par l'introduction dans la cavité de surfaces à l'angle de polarisation, dites 'fenêtres de Brewster'.

Dans les lasers à gaz, les fenêtres de Brewster sont formées par les extrémités du tube.

Dans les lasers solides, ce sont les extrémités du barreau qui jouent ce rôle ; on peut également obtenir la polarisation linéaire en introduisant dans la cavité un empilement de lames de verre orientées à l'angle de Brewster.

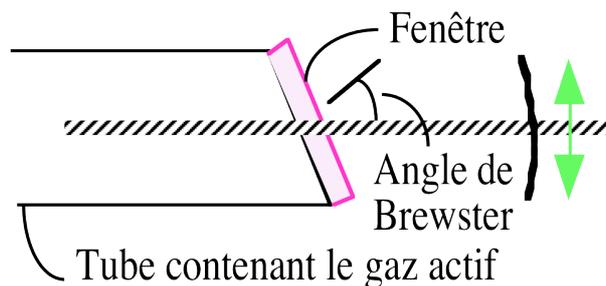


Fig. 3.6-9 : Dans un laser à gaz, la polarisation linéaire est obtenue en orientant les extrémités du tube contenant le gaz actif à l'angle de Brewster. La direction de polarisation est indiquée par la double flèche verticale.

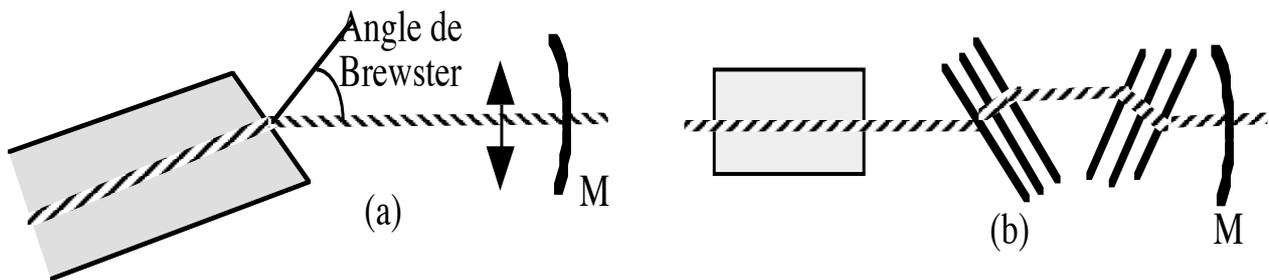


Fig. 3.6-10 : Composants de polarisation dans un laser solide.

La polarisation rectiligne est obtenue soit (a) en coupant les extrémités du barreau solide à l'angle de Brewster, soit (b) en introduisant dans la cavité, un empilement de lames de verre à l'angle de Brewster. Le dessin ne montre qu'une partie de la cavité; M est le miroir de sortie.

3.6.3.3 Quand faut-il tenir compte de la polarisation ?

Les effets liés à la polarisation de la lumière sont très fréquents. On les met en œuvre dans certains dispositifs comme les modulateurs de lumière. Il faut également en tenir compte dans les applications courantes.

Photographie. Tous les photographes connaissent l'utilité d'un filtre dit 'polarisant' dont le rôle est d'éliminer certaines réflexions; en effet la lumière naturelle ou artificielle non polarisée, réfléchiée par une surface vitreuse prend une polarisation rectiligne si l'incidence est proche de l'incidence de Brewster.

Interférométrie. Les franges claires et obscures observées dans un interféromètre sont le résultat de l'addition vectorielle de deux ou plusieurs ondes. Le contraste des franges est maximum lorsque les champs électriques des différentes ondes sont parallèles, ce qui signifie que ces ondes ont une polarisation rectiligne.

Usinage par faisceau laser

Les utilisateurs de lasers industriels de grande puissance ont parfois la surprise de constater que l'aspect de la découpe d'une tôle par un faisceau laser dépend de la direction de déplacement du faisceau par rapport à la pièce. Cet inconvénient peut être éliminé par un contrôle précis de l'état de polarisation du faisceau, une polarisation circulaire donnant en général un résultat plus régulier, indépendant de la direction.