

Proposition de bibliographie :

- [1] Sextant, *Optique expérimentale*, Collection Enseignement des Sciences, Hermann (1997).  
 [2] G. Bruhat, A. Kastler, *Optique*, 6e. ed.(2006)

**1 Polarisation de la lumière : éléments de théorie****1.1 Qu'appelle-t-on la polarisation d'une onde lumineuse ?**

Quand on traite de la polarisation de la lumière, il faut tenir compte de la nature vectorielle de l'onde électromagnétique. Considérons une onde plane monochromatique, de pulsation  $\omega$  se propageant dans le vide. Cette onde est définie par la donnée du vecteur d'onde  $k$  et des champs électrique  $\vec{E}$  et magnétique  $\vec{B}$ , solutions des équations de Maxwell. Ces équations impliquent que les champs oscillants  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  et  $\vec{B}(\vec{r}, t)$  sont transverses, et que le rapport de leurs amplitudes est une constante, avec pour valeur dans le vide  $E/B = c$ , vitesse de la lumière. L'espace est muni d'un repère orthonormé  $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$ . Supposons que l'onde se propage suivant  $u_z$ . Le champ  $\vec{E}(z, t)$ , qui caractérise entièrement l'onde plane monochromatique, est de la forme

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 e^{i(kz - \omega t)} \quad (1.1)$$

où  $\vec{E}_0$ , complexe et indépendant du temps, a pour expression générale

$$\vec{E}_0 = E_{0,x} \vec{u}_x + E_{0,y} e^{i\Delta\varphi} \vec{u}_y \quad (1.2)$$

En écriture réelle dans la base  $(\vec{u}_x, \vec{u}_y)$ , le champ se réécrit donc

$$\vec{E}(z, t) = \begin{pmatrix} E_{0,x} \cos(kz - \omega t) \\ E_{0,y} \cos(kz - \omega t + \Delta\varphi) \end{pmatrix}. \quad (1.3)$$

L'extrémité du vecteur  $\vec{E}(z, t)$  décrit donc, dans un plan de côte  $z$  donnée, une ellipse, parcourue environ 1014 fois par seconde. La nature particulière de cette ellipse – segment de droite, cercle ou ellipse quelconque – définit l'état de polarisation de l'onde.

L'onde plane strictement monochromatique étant une idéalisation, il convient de préciser dans quelle mesure la notion d'état de polarisation est préservée dans le cas, plus réaliste, d'un faisceau parallèle de lumière quasimonochromatique, de pulsation moyenne  $\omega_0$  et de largeur spectrale  $\Delta\omega$ . Le champ électrique d'une telle onde s'écrit

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_0(t) e^{i(kz - \omega t)} \quad (1.4)$$

où  $\vec{E}_0(t)$ , complexe, varie lentement dans le temps, c'est-à-dire sur une échelle caractéristique très grande devant  $1/\omega$ , et de manière aléatoire : le module, la phase et la direction du champ sont des grandeurs aléatoires. La moyenne temporelle  $|\vec{E}|^2$  est proportionnelle au flux lumineux supposé constant. L'extrémité du champ  $\vec{E}$  en un point d'abscisse  $z$  évolue alors de façon aléatoire dans le plan  $Oxy$ . L'état de polarisation de l'onde n'est donc défini a priori que pendant une durée inférieure à  $1/\Delta\omega$ , en général plus courte que le temps de réponse des photodétecteurs.

Pour une telle onde, on ne peut donc parler d'état de polarisation que si cet état est stationnaire. La plupart des sources usuelles émettent une lumière qui ne vérifie pas cette condition, on parle alors de lumière naturelle ou non polarisée. Cependant, on sait transformer (polariser) la lumière naturelle de telle façon que son état de polarisation soit parfaitement défini sur des échelles de temps observables. Les différents états de polarisation totale ainsi obtenus sont décrits dans le paragraphe suivant.

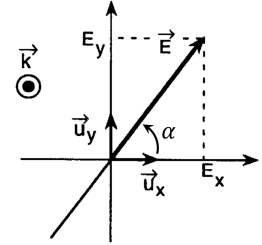
## 1.2 Différents types de polarisation

### ► Polarisation rectiligne : $\Delta\varphi = 0$

L'état de polarisation rectiligne correspond à un champ de la forme :

$$\vec{E}(z, t) = E_0 \underbrace{\begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix}}_{\vec{u}} e^{i(kz - \omega t)} \quad (1.5)$$

où  $\vec{u}$ , réel, présente une direction constante, inclinée d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'axe  $Ox$ . L'extrémité du champ en un point d'abscisse  $z$  décrit alors un segment de droite, porté par  $\vec{u}$  (fig. 1). La direction de  $\vec{u}$  est appelée *direction de polarisation*, et le plan contenant  $\vec{k}$  et  $\vec{E}$  *plan de polarisation*.



**Fig. 1** – Polarisation rectiligne. L'extrémité du champ électrique en un point donné de l'espace oscille suivant un segment de droite.

### ► Polarisation circulaire : $\Delta\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$ et $E_{0,x} = E_{0,y}$

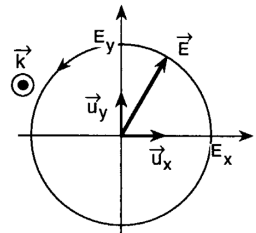
L'état de polarisation circulaire correspond à un champ de la forme :

$$\vec{E}(z, t) = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix} e^{i(kz - \omega t)} \quad (1.6)$$

L'extrémité du champ en un point d'abscisse  $z$  décrit alors un cercle (fig. 2). En effet, le champ réel s'écrit

$$\vec{E}(z, t) = E_0 \begin{pmatrix} \cos(kz - \omega t) \\ \pm \sin(kz - \omega t) \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Si le cercle est décrit dans le sens direct (resp. indirect) défini par  $\vec{k}$ , la polarisation est dite circulaire gauche (resp. droite). Ces états sont tous deux superpositions de deux états de polarisation rectilignes, dans deux directions orthogonales, en quadrature de phase.



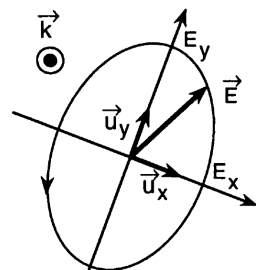
**Fig. 2** – Polarisation circulaire (gauche). L'extrémité du champ en un point donné de l'espace décrit un cercle, ici dans le sens direct,  $\vec{k}$  pointant vers le lecteur.

### ► Polarisation elliptique : $\Delta\varphi = \text{cste}$

L'état de polarisation elliptique correspond à un champ de la forme

$$\vec{E}(z, t) = \begin{pmatrix} E_{0,x} \\ E_{0,y} e^{i\Delta\varphi} \end{pmatrix} e^{i(kz - \omega t)} \quad (1.8)$$

avec  $\Delta\varphi$  prenant une valeur constante quelconque entre  $-\pi$  et  $\pi$ , et où  $E_{0,x}$  et  $E_{0,y}$  sont des constantes réelles positives. Cet état de polarisation est le plus général parmi les états de polarisation totale : les états de polarisation rectiligne et circulaire en sont des cas particuliers. L'extrémité du champ  $\vec{E}$  en un point d'abscisse  $z$  décrit alors dans le temps une ellipse. On peut toujours se ramener, par une rotation des vecteurs de base  $\vec{u}_x$  et  $\vec{u}_y$ , au cas  $\Delta\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$ , avec le grand axe de l'ellipse dirigé selon  $\vec{u}_y$  (fig. 3). On caractérise alors la polarisation par son degré d'ellipticité  $E_x/E_y$ . On distingue, comme précédemment, polarisation elliptique droite et gauche.



**Fig. 3** – Polarisation elliptique (gauche). L'extrémité du champ en un point donné de l'espace décrit une ellipse, ici dans le sens direct,  $\vec{k}$  pointant vers le lecteur.

## ► Polarisation partielle

Les processus physiques permettant de polariser la lumière naturelle ne sont pas totalement efficaces. Aussi, le résultat est-il, en général, une onde partiellement polarisée, c'est-à-dire dont le champ électrique est de la forme :

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_p(z, t) + \vec{E}_n(z, t) \quad (1.9)$$

où  $\vec{E}_p$  s'exprime en toute généralité comme un champ de polarisation elliptique et où  $\vec{E}_n$  est un champ de lumière naturelle. On définit le taux de polarisation de l'onde par le rapport  $\langle |E_p|^2 \rangle / \langle |E_n|^2 \rangle$  entre 0 et 1.

### 1.3 Production de lumière polarisée

Pour obtenir une onde polarisée dans un état donné, on peut utiliser un polariseur, c'est-à-dire un dispositif susceptible d'agir soit sur la lumière non polarisée, soit sur de la lumière dans un état de polarisation différent. Les polariseurs les plus utilisés sont les polariseurs rectilignes qui permettent de transformer la lumière incidente en lumière polarisée rectilignement. Le plus courant d'entre eux est le polaroïd, qui fonctionne par absorption sélective de la lumière selon son état de polarisation : c'est le principe du *dichroïsme*.

Un polaroïd se compose d'une feuille en matière plastique de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur, formée de longues chaînes de polymères étirées majoritairement dans une direction. En outre, des molécules de colorant absorbant dans un large domaine spectral sont attachées sur ces chaînes. Les liaisons chimiques colorant-chaîne sont toutes orientées de la même façon. De cette manière, l'absorption de la feuille dépend très fortement de la direction de polarisation. On appelle *axe de polarisation*, ou *direction passante* du polariseur la direction du champ électrique correspondant à l'absorption minimale. Les caractéristiques d'un polaroïd sont les coefficients de transmission en configurations croisée ( $H_{90}$ ) et parallèle ( $H_0$ ) représentées figure (fig. 4). Un polariseur idéal correspond à  $H_0 = 1/2$  et  $H_{90} = 0$ , quelle que soit la longueur d'onde.

| Remarque : les polaroïds adaptés au visible sont souvent très mauvais dans l'infrarouge.

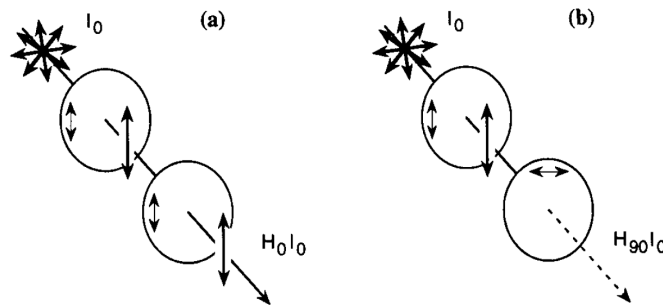


Fig. 4 – Polariseurs en configuration (a) parallèle et (b) croisée.

### 1.4 Loi de Malus

On suppose que les axes de polarisation de deux polaroïds  $P_1$  et  $P_2$  ont été déterminés. On monte  $P_1$  sur un support gradué permettant de repérer l'axe passant et on l'éclaire avec une lumière non polarisée. On place un polariseur  $P_2$  à la suite de  $P_1$ . On mesure l'intensité transmise (à l'aide d'une photodiode par exemple) en fonction de l'angle  $\theta$  entre les axes passants respectifs de  $P_1$  et  $P_2$ .

Le champ électrique  $\vec{E}_2$  transmis par  $P_2$  est, au coefficient d'absorption près, la projection sur l'axe de polarisation de  $P_2$  du champ  $\vec{E}_1$  transmis par  $P_1$  :  $E_2 = E_1 \cos \theta$ . L'intensité transmise vaut donc (loi de Malus) :

$$I(\theta) = I_{\max} \cos^2 \theta. \quad (1.10)$$

Cette propriété est très utilisée pour contrôler aisément l'intensité lumineuse dans un montage optique.

## 2 Biréfringence et lames à retard

### 2.1 Propagation de la lumière dans un milieu biréfringent

Un milieu biréfringent est un milieu dont les propriétés diélectriques sont anisotropes. Une onde plane monochromatique se propageant dans un milieu diélectrique est décrite par son vecteur d'onde  $\vec{k}$  et par  $\vec{E}$  et  $\vec{D}$ , respectivement champ et induction électrique. La polarisabilité d'un milieu anisotrope dépend de la direction du champ électrique  $\vec{E}$ , si bien que généralement, l'induction électrique  $\vec{D}$  n'est pas parallèle à  $\vec{E}$ . Les composantes des deux vecteurs dans une base orthonormée sont liées par

$$\vec{D} = [\varepsilon]\vec{E} \quad (2.1)$$

où  $[\varepsilon]$  est la matrice des permittivités diélectriques. On peut trouver une base orthonormée dans laquelle la matrice  $[\varepsilon]$  est diagonale (c'est la base orthonormée des axes principaux du matériau), on notera les coefficients diagonaux  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  et  $\varepsilon_z$ .

On classe habituellement les matériaux selon la typologie suivante :

- **matériaux de symétrie cubique** :  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z$ . Du point de vue optique, ces matériaux se comportent comme un milieu isotrope.
- **milieux uniaxes** :  $\varepsilon_x = \varepsilon_y \neq \varepsilon_z$ . C'est le cas du quartz par exemple. La direction propre associée à  $\varepsilon_z$  est appelée *axe optique*. La direction de l'axe optique est celle de l'axe cristallin de plus haute symétrie.
- **milieux biaxes** : les trois coefficients  $\varepsilon_i$  sont différents. C'est le cas des micas par exemple.

Dans la suite, on va étudier une lame de quartz "parallèle" (souvent noté //), c'est-à-dire dont l'axe optique est parallèle aux faces de la lame. À cause du phénomène de biréfringence, si on attaque une lame de quartz parallèle en incidence normale, la vitesse de propagation n'est pas la même pour une onde polarisée parallèlement à l'axe optique (indice  $n_e$ ) et pour une onde polarisée perpendiculairement à l'axe optique (indice  $n_o$ ).  $n_e$  et  $n_o$  sont respectivement appelés *indice extraordinaire* et *indice ordinaire*.

### 2.2 Action d'une lame mince sur un faisceau polarisé rectilignement

On étudie une lame de quartz parallèle, c'est-à-dire dont l'axe optique est parallèle aux faces de la lame. Cette lame est attaquée en incidence normale.

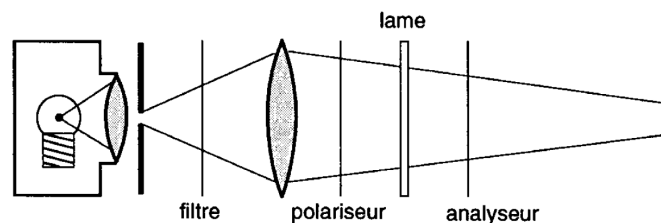


Fig. 5 – Etude de l'effet d'une lame mince biréfringente sur un faisceau polarisé.

#### ► Lignes neutres d'une lame mince

Considérons le montage décrit sur la figure 5. La lame est placée entre deux polariseurs croisés. Quand on fait tourner la lame dans son plan, on obtient l'extinction pour deux directions perpendiculaires de la lame. Celles-ci sont appelées *lignes neutres*, puisqu'une onde polarisée rectilignement suivant l'une de ces lignes peut traverser la lame sans que son état de polarisation soit modifié.

| Remarque : La direction des lignes neutres est indépendante de la longueur d'onde.

Ligne neutre et axe optique sont en général deux choses différentes. Un axe optique est lié au cristal, tandis que les lignes neutres dépendent de la direction de propagation de l'onde. On retiendra que pour une lame mince de quartz parallèle attaquée sous incidence normale, il existe toujours deux lignes neutres  $L_1$  et  $L_2$ , perpendiculaires l'une à l'autre, auxquelles on peut associer deux indices différents  $n_1$  et  $n_2$ . Pour différencier les deux lignes neutres, on utilise souvent les dénominations d'*axe lent* et d'*axe rapide*. L'axe lent correspond à la ligne neutre pour laquelle l'indice est le plus grand, c'est-à-dire pour laquelle la vitesse de phase est la plus petite.

► **Retard induit par une lame mince**

Quelle est la structure de l'onde transmise lorsque l'onde incidente est polarisée suivant une direction quelconque ? On projette l'onde incidente sur  $L_1$  et  $L_2$  :

$$\vec{E}_i = E (\cos \theta \vec{u}_1 + \sin \theta \vec{u}_2) e^{-i\omega t} \tag{2.2}$$

où l'on a omis la dépendance spatiale selon  $z$  pour alléger l'écriture. Lors de la traversée de la lame, la composante polarisée suivant  $L_1$  voit un indice  $n_1$ , celle suivant  $L_2$  un indice  $n_2$ , si bien que l'expression de l'onde transmise est

$$\vec{E}_t = E (\cos \theta \vec{u}_1 + \sin \theta e^{i\Delta\varphi} \vec{u}_2) e^{-i\omega t} \tag{2.3}$$

avec  $\Delta\varphi = 2\pi(n_2 - n_1)e/\lambda$ . L'onde transmise est donc elliptique dans le cas général. L'effet de la lame est tout entier contenu dans le déphasage relatif  $\Delta\varphi$  qu'elle introduit entre les deux composantes suivant  $L_1$  et  $L_2$  de l'onde incidente.

► **Quelques cas particuliers**

Une lame cristalline est donc susceptible de changer l'état de polarisation d'une onde monochromatique. On décrit maintenant deux cas particuliers très largement utilisés. On considère toujours le montage décrit dans la figure 5, mais il faut impérativement se placer en éclairage monochromatique. On note  $\lambda$  la longueur d'onde utilisée.

▷ **Lame demi-onde (ou lame  $\lambda/2$ )** : on appelle ainsi une lame qui introduit un déphasage  $\Delta\varphi = \pi[2\pi]$  entre deux ondes polarisées rectilignement suivant les deux lignes neutres. L'onde transmise s'écrit alors

$$\vec{E}_t = E (\cos \theta \vec{u}_1 - \sin \theta \vec{u}_2) e^{-i\omega t} \tag{2.4}$$

L'onde transmise est donc polarisée rectilignement suivant une direction symétrique de la polarisation incidente par rapport à l'une quelconque des lignes neutres (fig. 6 gauche).

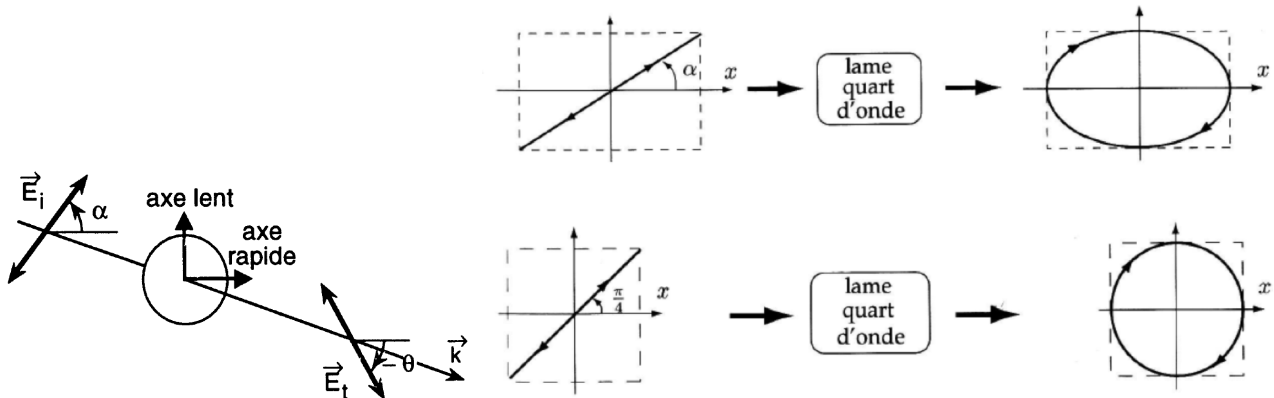
▷ **Lame quart d'onde (ou lame  $\lambda/4$ )** : c'est une lame qui introduit un déphasage  $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}[\pi]$  entre deux ondes polarisées rectilignement suivant les lignes neutres. L'onde transmise s'écrit alors

$$\vec{E}_t = E (\cos \theta \vec{u}_1 + \sin \theta e^{\pm i\pi/2} \vec{u}_2) e^{-i\omega t} \tag{2.5}$$

soit en notation réelle :

$$\vec{E}_t = E (\cos \theta \cos(\omega t) \vec{u}_1 \pm \sin \theta \sin(\omega t) \vec{u}_2) \tag{2.6}$$

Il s'agit d'une ellipse dont les axes principaux sont suivant les lignes neutres de la lame quart d'onde (fig. 6 en haut à droite). Le trièdre  $(\vec{u}_1; \vec{u}_2; \vec{k})$  étant supposé direct, l'onde est elliptique gauche si  $0 < \theta < \pi$  et droite si  $-\pi < \theta < 0$ . On utilise généralement une telle lame dans l'une des configurations particulières  $\theta = +\frac{\pi}{4}$  ou  $\theta = -\frac{\pi}{4}$  pour lesquelles l'onde transmise est circulaire, respectivement gauche et droite (fig. 6 en bas à droite). Réciproquement, si l'onde incidente est circulaire, l'onde transmise est polarisée  $45^\circ$  des lignes neutres.



**Fig. 6** – Action d'une lame demi-onde (gauche) et quart-d'onde (droite) sur une onde polarisée rectilignement.

### 3 Analyse d'une lumière polarisée

On présente maintenant une procédure permettant de caractériser les propriétés de polarisation d'une onde, sans rien en connaître a priori. On donne ensuite un exemple détaillé (avec des mesures quantitatives possibles) : l'analyse d'une vibration elliptique, ainsi qu'une technique expérimentale utilisant un polariseur tournant. On se placera en éclairage monochromatique.

#### 3.1 Recherche qualitative du type de polarisation

L'analyse des vibrations lumineuses nécessite la détermination de divers facteurs :

- lumière naturelle ou polarisée totalement ou partiellement
- lumière polarisée rectiligne, circulaire, elliptique

Pour faire l'analyse, on utilisera un polaroïd, qu'on appellera analyseur. Plusieurs cas sont alors possibles, et la procédure à suivre est entièrement schématisée sur la figure 8.

#### 3.2 Analyse quantitative d'une onde polarisée elliptiquement

La lame quart d'onde est orientée de sorte que ses lignes neutres coïncident avec les axes de l'ellipse de l'onde à analyser (voir figure 7). Si on projette sur les lignes neutres le champ arrivant sur la lame, on a

$$\vec{E}_i = \left( E_1 \vec{u}_1 + E_2 e^{i\pi/2} \vec{u}_2 \right) e^{-i\omega t} \quad (3.1)$$

Pour fixer les idées, on a supposé que l'onde était elliptique gauche. Comme précédemment, l'indice 2 désigne l'axe lent. On a donc  $0 < E_1 < E_2$ . Après traversée de la lame, le champ s'écrit :

$$E_t = \left( E_1 \vec{u}_1 + E_2 e^{i\pi} \right) e^{-i\omega t} \quad (3.2)$$

L'onde transmise est donc rectiligne et dans la direction qui fait un angle

$$\beta = \arctan(E_1/E_2) \quad (3.3)$$

avec  $\vec{u}_2$ . Pour obtenir l'extinction, il faut tourner l'analyseur du même angle. Le degré d'ellipticité  $E_1/E_2$  est donc égal à  $\tan \beta$ , et le sens de la vibration elliptique est identique à celui dont on a tourné l'analyseur pour rétablir l'extinction.

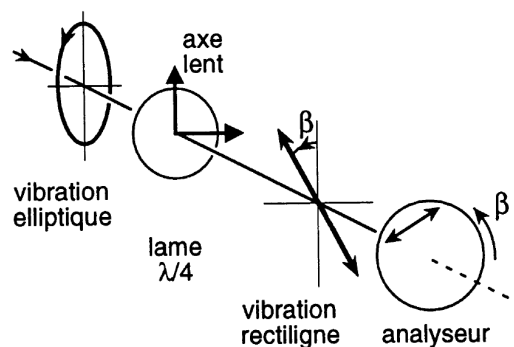
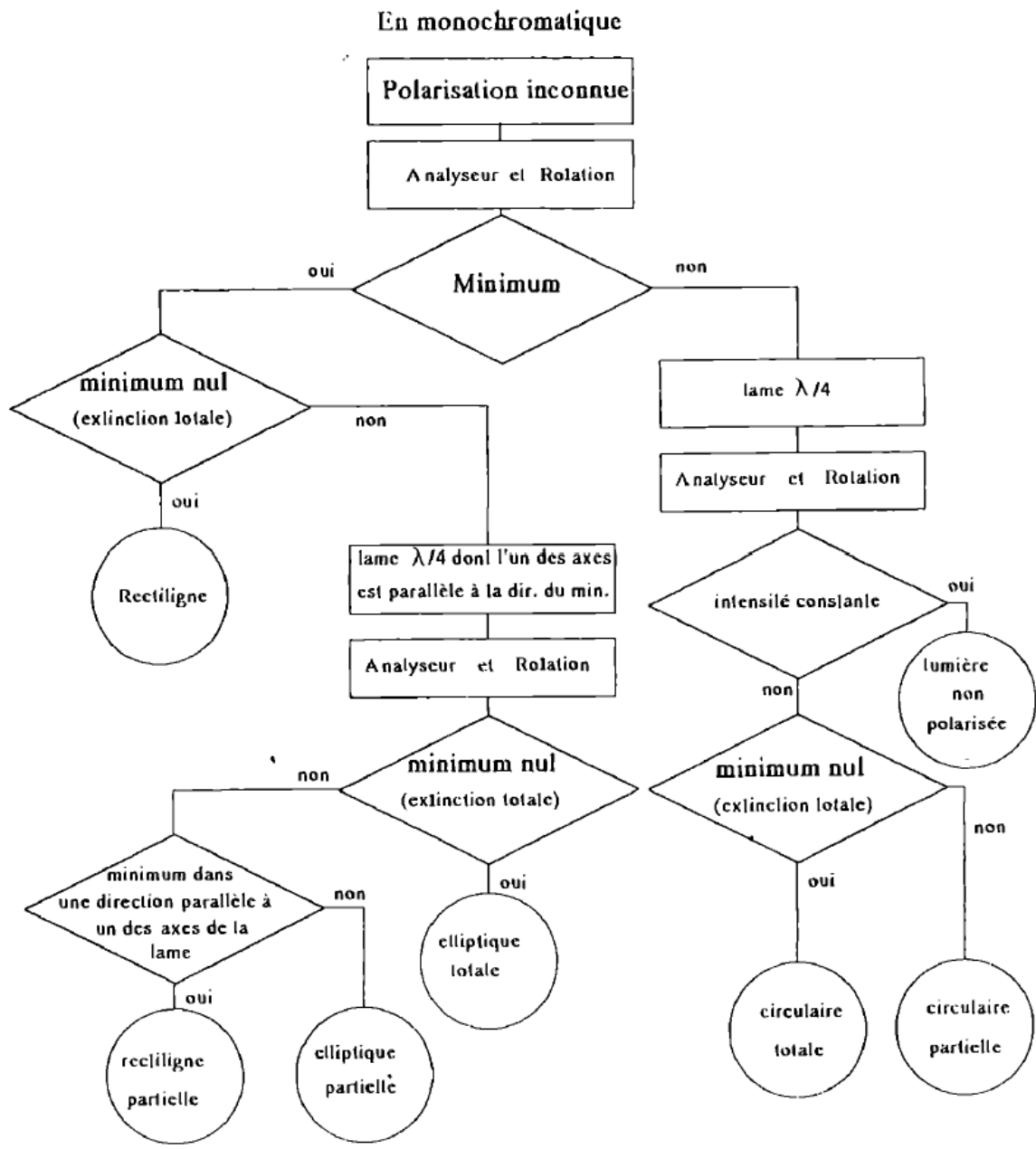


Fig. 7 – Principe de l'analyse d'une onde polarisée elliptiquement.

#### 3.3 Utilisation d'un polariseur tournant

La méthode exposée au paragraphe précédent a l'inconvénient d'être visuelle et manuelle : l'opérateur doit repérer avec précision un minimum d'intensité, ce qui n'est pas facile à l'oeil, puis rechercher une extinction en tournant l'analyseur. Par ailleurs, on préfère souvent obtenir le résultat de la mesure sous forme d'un signal électrique, lequel se prête mieux à une acquisition systématique de données.

Nous présentons ici la technique du polariseur tournant et de la photodiode. Il s'agit de faire tourner un analyseur devant le faisceau dont on veut déterminer l'état de polarisation. On mesure l'intensité transmise à l'aide d'une photodiode, dont on envoie le signal sur un oscilloscope (fig. 9). On enverra également sur



**Fig. 8** – Protocole d'analyse d'une lumière. Les rectangles symbolisent un instrument ajouté sur le trajet de la lumière. Les losanges symbolisent l'observation. Les cercles symbolisent la conclusion sur le type de polarisation.

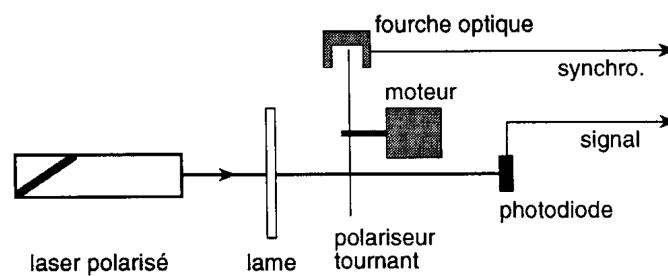
l'oscilloscope, via une fourche optique par exemple, le signal de référence qui assurera le déclenchement du signal de synchronisation.

En supposant que l'onde à analyser est monochromatique et complètement polarisée, l'allure de la trace indique immédiatement l'état de polarisation :

- ▷ si le signal est continu : la polarisation est circulaire.
- ▷ si le signal est sinusoïdal avec un minimum nul : la polarisation est rectiligne.
- ▷ si le signal est sinusoïdal et a un minimum non nul : la polarisation est elliptique.

Le signal est proportionnel au flux reçu, donc à  $E_2$ . En mesurant les valeurs extrêmes  $V_{\max}$  et  $V_{\min}$  de la tension détectée, on obtient le degré d'ellipticité, qui vaut  $\sqrt{V_{\max}/V_{\min}}$ . Dans le cas d'une polarisation rectiligne, la direction de polarisation s'obtient à partir de la phase du signal par rapport au signal de synchronisation. On peut s'arranger par exemple pour que le déclenchement corresponde à une polarisation verticale. On détermine de même la direction du grand axe d'une polarisation elliptique.

Un bon exemple d'utilisation du dispositif consiste à éclairer une lame quart d'onde par une onde monochromatique, polarisée rectilignement. Suivant l'orientation de la lame, on peut obtenir tous les cas de figure cités précédemment.



**Fig. 9** – Détermination d'un état de polarisation inconnu à l'aide d'un polariseur tournant.

### 3.4 Application à l'ellipsométrie

L'ellipsométrie est le nom donné à la technique consistant à mesurer la modification de la polarisation d'un faisceau à la réflexion sur un échantillon. Il s'agit de caractériser ou contrôler un échantillon généralement plan à surface polie constitué d'un empilement de films diélectriques minces à faces parallèles. La modification de la polarisation étant très sensible aux indices de réfraction et aux épaisseurs des couches de l'échantillon, cette étude se révèle donc un moyen puissant d'investigation de la constitution fine de celui-ci.

Cette technique est très utilisée dans certaines branches de l'industrie de pointe et de la recherche (microélectronique, traitement de surfaces, technologie des matériaux). Les manipulations proposées ici ont pour objet de comprendre le principe d'une analyse photométrique de la polarisation d'une vibration lumineuse avec un analyseur tournant : cette technique est souvent utilisée dans les ellipsomètres.

## 4 Manipulations

### 4.1 Etude d'une lame quelconque

Reprendre le dispositif expérimental présenté sur la figure 5. Éclairer à l'aide d'une lampe spectrale et ajouter un filtre interférentiel de façon à sélectionner une raie et travailler ainsi en lumière monochromatique (choisir une longueur d'onde adaptée à la lame utilisée), ou bien utiliser un laser. La lame étudiée est une lame de quartz parallèle d'épaisseur inconnue, placée entre un polariseur  $P$  et un analyseur  $A$  croisés.

- ▷ En tournant la lame, montrer qu'on obtient 4 positions pour lesquelles l'extinction est rétablie. On fait ainsi apparaître les lignes neutres de la lame. Peut-on distinguer l'axe lent de l'axe rapide ?
- ▷ Dans une position de la lame où il n'y a pas d'extinction, tourner l'analyseur pour vérifier qu'il n'y a pas d'extinction. Quel est l'état de polarisation de la lumière transmise par la lame ?

### 4.2 Etude de lames à retard particulières



### ► Action d'une lame $\lambda/2$ sur une vibration rectiligne

Après avoir repéré les lignes neutres de la lame entre polariseur et analyseur croisés, tourner la lame d'un angle  $\alpha < \pi/4$ . Montrer que la vibration obtenue est rectiligne et déterminer sa direction par rapport aux directions des lignes neutres de la lame et de la polarisation rectiligne incidente.

### ► Action d'une lame $\lambda/4$ sur une vibration rectiligne

Après avoir repéré les lignes neutres de la lame entre polariseur et analyseur croisés, tourner la lame de manière à placer ses lignes neutres à  $45^\circ$  de la polarisation incidente. Montrer que la vibration obtenue est polarisée circulairement. Si  $0 < \alpha < \pi/4$ , montrer que la vibration obtenue est elliptique.

## 4.3 Analyse d'une vibration elliptique quelconque : méthode manuelle

On souhaite mettre en application la technique présentée au paragraphe 3.2 afin de caractériser précisément une polarisation elliptique inconnue.

- ▷ Produire une lumière polarisée elliptiquement à l'aide de la lame de quartz précédemment étudiée. Repérer avec un analyseur la direction de la vibration d'intensité minimale (petit axe de l'ellipse).
- ▷ Introduire avant l'analyseur une lame  $\lambda/4$  (et donc travailler en lumière monochromatique) de manière à ce que son axe lent coïncide avec la direction du petit axe que l'on vient de repérer. À la sortie de la lame quart d'onde, on a alors une vibration rectiligne (fig. 7).
- ▷ Replacer l'analyseur à sa position croisée initiale, et repérer l'extinction en le tournant à partir de cette position d'un angle  $\beta < \pi/2$ . En déduire le degré d'ellipticité ainsi que le sens de la vibration.

## 4.4 Analyse d'une vibration elliptique quelconque : méthode de l'analyseur tournant

On utilise le dispositif expérimental schématisé figure 9. La source lumineuse est constituée d'un laser He-Ne à cavité relativement longue afin d'avoir un flux assez stable. Les observations sont faites au moyen d'une photodiode et la visualisation de son signal de sortie se fait à l'oscilloscope. L'analyseur, entraîné via une courroie par un moteur électrique, effectue  $(7,8 \pm 0,1)$  tours/sec. Le dispositif est également pourvu d'une fourche optique, qui engendre un "top" électrique à chaque tour de l'analyseur, lorsque ce dernier passe par une orientation fixée.

### ► Manipulations préliminaires

- ▷ Lancer la rotation de l'analyseur et interpréter l'allure du signal.
- ▷ Comparer sa fréquence à celle du signal en sortie de la fourche optique. Expliquer.
- ▷ Évaluer la tension résiduelle délivrée par la photodiode lorsque le laser est obturé. En déduire les variations relatives de flux à la sortie de l'analyseur tournant. Qualitativement, comment est polarisé le laser ?

### ► Mesure de l'orientation d'une polarisation rectiligne

- ▷ Synchroniser le balayage de l'oscilloscope sur le signal de la fourche optique, et regarder la position des minima du signal à l'oscilloscope. Tourner le laser sur lui-même, autour de son axe de symétrie. Comment le signal évolue-t-il ? Interpréter cette évolution.
- ▷ Insérer sur le faisceau, à la sortie du laser, une lame demi-onde. Tourner la lame sur elle-même. Qu'en concluez-vous ?
- ▷ Tourner la lame d'un angle  $\alpha$  donné. Interpréter le déphasage  $\Delta\varphi$  qui survient sur le signal à l'oscilloscope. Comment remonter à  $\alpha$  à partir de ce déphasage ?
- ▷ Tracer  $\Delta\varphi$  en fonction de  $\alpha$  et vérifier ainsi quantitativement l'effet de la lame demi-onde.

### ► Caractérisation d'une polarisation elliptique

- ▷ Remplacer la lame demi-onde par une lame quart d'onde. L'orienter de sorte que le signal observé à l'oscilloscope soit constant. Que dire de la polarisation en sortie de la lame ?
- ▷ Orienter la lame de sorte que le signal présente des minima nuls. Expliquer. Vérifier que dans ce cas, la phase du signal est bien identique à celle obtenue sans la lame quart d'onde.
- ▷ À partir de la situation précédente, tourner la lame  $\lambda/4$  de  $25^\circ$ . Effectuer des mesures sur le signal temporel pour caractériser la polarisation sortante le plus précisément possible (ellipticité, orientation, sens de parcours).

