PROPRIETES DE POLARISATION DE LA LUMIERE, ELLIPSOMETRIE

E. Deleporte, A. Galais

Ecole Normale Supérieure de Cachan

22 Novembre 2002

INTRODUCTION

Avant d'aborder le sujet du TP: l'ellipsométrie, il est nécessaire de se familiariser avec les notions fondamentales suivantes :

- état de polarisation de la lumière; vibration lumineuse rectiligne, circulaire, elliptique, droite ou gauche; polarisation totale ou partielle
- axe optique, lignes neutres d'une lame cristalline
- polariseur, analyseur, polaroïd, lame demi-onde, lame quart d'onde

Le but des trois premiers paragraphes est de définir clairement toutes ces notions.

Le dernier paragraphe propose des manipulations. D'abord, des manipulations très simples pour apprendre l'action des lames demi-onde et quart d'onde sur une polarisation donnée et pour apprendre à analyser l'état de polarisation d'une vibration lumineuse à l'aide d'un polaroïd. Une fois que toutes ces notions seront bien assimilées,les manipulations concernant l'ellipsomètrie seront abordées.

I) POLARISATION DE LA LUMIERE

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 ω se propageant dans le vide. Cette onde est définie par la donnée du vecteur d'onde $\mathbf{k}$ et des champs électrique $\mathbf{E}(t)$ et magnétique $\mathbf{B}(t)$, solutions des équations de Maxwell. Ces équations impliquent que les champs oscillants $\mathbf{E}$ et $\mathbf{B}$ sont transverses et que le rapport des amplitudes de $\mathbf{E}$ et $\mathbf{B}$ est une constante, avec pour valeur dans le vide $E/B = c$, vitesse de la lumière. L'espace est muni d'un repère orthonormé $(\mathbf{u_x}, \mathbf{u_y}, \mathbf{u_z})$. Soit une onde se propageant suivant $\mathbf{u_z}$. Le champ $\mathbf{E}(t)$, qui caractérise entièrement l'onde plane monochromatique, est de la forme:

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E_0} e^{i(kz-\omega t)} \tag{1}$$

où $\mathbf{E_0}$, complexe et indépendant du temps, a pour expression générale:

$$\mathbf{E_0} = E_x \mathbf{u_x} + E_y e^{i\Delta\phi} \mathbf{u_y} \tag{2}$$

L'extrémité de $\mathbf{E}(t)$ décrit, dans un plan d'abscisse z donnée, une ellipse, parcourue environ 10^{14} 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 quasi-monochromatique, de pulsation moyenne ω et de largeur spectrale $\Delta\omega$. Le champ électrique d'une telle onde s'écrit:

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E_0}(t) e^{i(kz-\omega t)} \tag{3}$$

où $\mathbf{E_0}(t)$ 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 électrique $\mathbf{E_0}(t)$ sont des grandeurs aléatoires; la moyenne temporelle du module carré de $\mathbf{E}(t)$ est proportionnelle au flux lumineux supposé constant; l'extrémité du champ $\mathbf{E}(t)$ en un point d'abscisse z se déplace alors de façon aléatoire dans le plan. 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 petite 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 les paragraphes suivants (de 1) à 3)).

1) Polarisation rectiligne

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

$$\mathbf{E}(t) = E_0 \mathbf{u} e^{i(kz-\omega t)} \tag{4}$$

où E_0 est le module du champ électrique et $\mathbf{u}$ sa direction constante. L'extrémité du vecteur $\mathbf{E}(t)$ en un point d'abscisse z décrit alors un segment de droite, porté par $\mathbf{u}$ (figure 1). La direction de $\mathbf{u}$ est appelée direction de polarisation et le plan contenant $\mathbf{k}$ et $\mathbf{E}$ plan de polarisation.

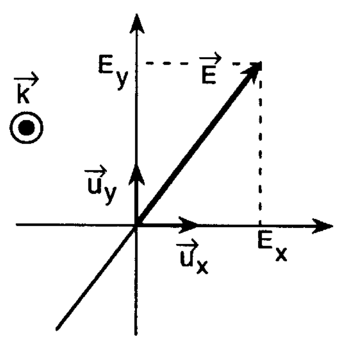

Figure 1 : Polarisation rectiligne. L'extrémité du champ électrique $\mathbf{E}$ *en un point donné de l'espace décrit un segment de droite.*

2) Polarisation circulaire

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

$$\mathbf{E}(t) = E_0(\mathbf{u_x} + e^{\pm i\pi/2}\mathbf{u_y})e^{i(kz-\omega t)} \tag{5}$$

L'extrémité du vecteur $\mathbf{E}(t)$ en un point d'abscisse z décrit alors un cercle (figure 2). En effet, la partie réelle de $\mathbf{E}(t)$ s'écrit:

$$\mathbf{E}(t) = cos(\omega t)\mathbf{u_x} \pm sin(\omega t)\mathbf{u_y} \tag{6}$$

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

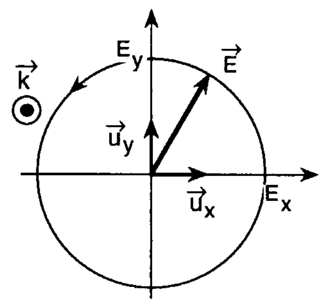

Figure 2 : Polarisation circulaire (gauche). L'extrémité du champ électrique $\mathbf{E}$ *en un point donné de l'espace décrit un cercle, ici dans le sens direct,* $\mathbf{k}$ *pointant vers le lecteur.*

3) Polarisation elliptique

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

$$\mathbf{E}(t) = [E_x\mathbf{u_x} + E_y e^{i\Delta\phi}\mathbf{u_y}]e^{i(kz-\omega t)} \tag{7}$$

avec $\Delta\phi$ prenant une valeur constante quelconque entre $-\pi$ et π, et où E_x et E_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 vecteur $\mathbf{E}$ 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 $\mathbf{u_x}$ et $\mathbf{u_y}$, au cas $\Delta\phi = \pm\pi/2$, avec le grand axe de l'ellipse dirigé selon $\mathbf{u_y}$ (figure 4). On caractérise alors la polarisation par son degré d'ellipticité E_x/E_y. On distingue, comme précédemment, polarisation elliptique droite et gauche.

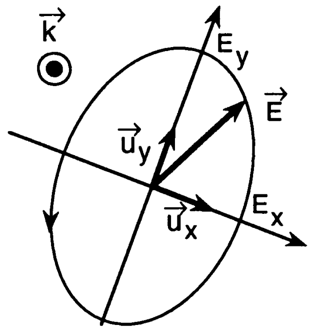

Figure 3 : Polarisation elliptique (gauche). L'extrémité du champ électrique **E** *en un point donné de l'espace décrit une ellipse, ici dans le sens direct,* **k** *pointant vers le lecteur.*

4) 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 :

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E_p}(t) + \mathbf{E_n}(t) \tag{8}$$

où $\mathbf{E_p}(t)$ s'exprime en toute généralité comme un champ de polarisation elliptique et où $\mathbf{E_n}(t)$ est un champ de lumière naturelle. On définit le taux de polarisation de l'onde par le rapport $< |E_p|^2 > / < |E_p|^2 >$ compris entre 0 et 100

5) Production de lumière polarisée

Pour obtenir une onde polarisée dans un état donné, on peut utiliser une source de lumière polarisée, ou si on ne dispose pas d'une telle source, 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 dichroïsme rectiligne (dichroïsme = absorption sélective de la lumière selon l'état de polarisation de la lumière incidente) est à la base du polariseur le plus couramment utilisé: le **polaroïd**.

Un polaroïd est une feuille en matière plastique de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur, constituée 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 (figure 4) sont les coefficients de transmission - rapport de l'intensité transmise à l'intensité de la lumière naturelle incidente - d'un couple de polariseurs dans les configurations croisée (H_{90}) ou parallèle (H_0) définies figure 6. Un polariseur idéal correspond à $H_0 = 1/2$ et $H_{90} = 0$, quelle que soit la longueur d'onde λ.

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

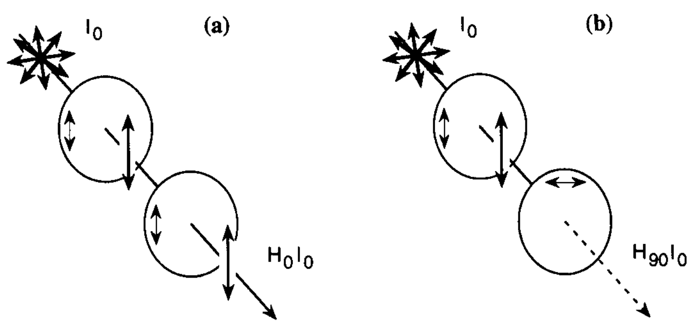

Figure 4 : Polariseurs en configuration (a) parallèle et (b) croisée.

6) Extinction, 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'angle de l'axe de polarisation 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 θ entre les axes de polarisation respectifs de P_1 et P_2. Le champ électrique $\mathbf{E_2}$ transmis par

P_2 est, au coefficient d'absorption près, la projection sur l'axe de polarisation de P_2 du champ $\mathbf{E_1}$ transmis par P_1: $E_2 = E_1 cos\theta$. On mesure ainsi que l'intensité transmise est de la forme: $I(\theta) = I_{max} cos^2\theta$, c'est la **loi de Malus**.

II) LAMES MINCES A FACES PARALLELES, BIREFRINGENCE

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 $\mathbf{k}$ et par $\mathbf{E}$ et $\mathbf{D}$, respectivement champ et induction électrique. La polarisabilité d'un milieu anisotrope dépend de la direction du champ électrique $\mathbf{E}$, si bien que généralement, l'induction électrique $\mathbf{D}$ n'est pas parallèle à $\mathbf{E}$. Les composantes des deux vecteurs dans une base orthonormée sont liées par : $\mathbf{D} = [\varepsilon]\mathbf{E}$, 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 prinicpaux du matériau), on notera les coefficients diagonaux $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$. 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 ε_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 ε_i sont différents. C'est le cas des micas par exemple.

Dans la suite, on va étudier une lame de quartz parallèle, c'est-à-dire dont l'axe optique est parallèle aux faces de la lame. A 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_1) et pour une onde polarisée perpendiculairement à l'axe optique (indice n_2).

2) Action d'une lame mince à faces parallèles 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, on attaque cette lame en incidence normale.

a) Lignes neutres d'une lame mince.

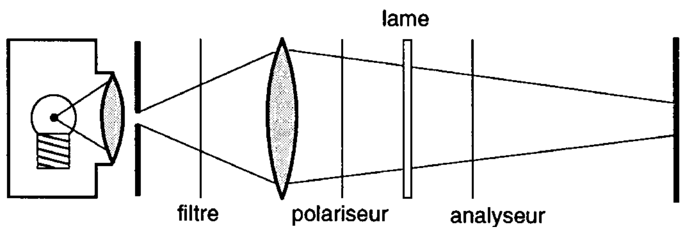

Figure 5 : Etude de l'effet d'une lame mince biréfringente sur un faisceau polarisé.

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 1 : La direction des lignes neutres est indépendante de la longueur d'onde
Remarque 2 : 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 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.

b) 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 :

$$\mathbf{E_i} = E(cos\theta\mathbf{u_1} + sin\theta\mathbf{u_2})e^{i\omega t} \tag{9}$$

(Pour alléger l'écriture, on omet la dépendance spatiale selon z).

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 :

$$\mathbf{E_t} = E(cos\theta\mathbf{u_1} + sin\theta e^{i\Delta\phi}\mathbf{u_2})e^{-i\omega t} \tag{10}$$

avec

$$\Delta\phi = 2\pi(n_2 - n_1)e/\lambda \tag{11}$$

L'onde transmise est donc elliptique dans le cas général. L'effet de la lame est tout entier contenu dans le déphasage $\Delta\phi$ qu'elle introduit entre les deux composantes suivant L_1 et L_2 de l'onde incidente.

c) Quelques cas particuliers

Une lame cristalline change donc 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 appelle λ la longueur d'onde utilisée.

- ***Lame demi-onde (lame $\lambda/2$) :***

On appelle ainsi une lame qui introduit un déphasage $\Delta\phi = \pi(mod 2\pi)$ entre deux ondes polarisées rectilignement suivant les deux lignes neutres. L'onde transmise s'écrit:

$$\mathbf{E_t} = E(cos\theta\mathbf{u_1} - sin\theta\mathbf{u_2})e^{-i\omega t} \tag{12}$$

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

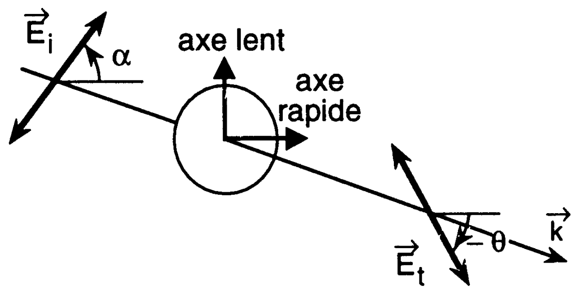

Figure 6 : Action d'une lame demi-onde sur une onde polarisée rectilignement.

- ***Lame quart d'onde (lame*** $\lambda/4$***)***

C'est une lame qui introduit un déphasage $\Delta\phi = \pi/2(mod\pi)$ entre deux ondes polarisées rectilignement suivant les lignes neutres. L'onde transmise s'écrit :

$$\mathbf{E_t} = E(cos\theta\mathbf{u_1} + sin\theta e^{i\pi/2}\mathbf{u_2})e^{-i\omega t} \tag{13}$$

soit en notation réelle :

$$\mathbf{E_t} = Ecos\theta cos(\omega t)\mathbf{u_1} + Esin\theta sin(\omega t)\mathbf{u_2} \tag{14}$$

Les axes principaux de l'ellipse sont suivant les lignes neutres de la lame quart d'onde. Le trièdre $(\mathbf{u_1}, \mathbf{u_2}, \mathbf{k})$ étant supposé direct, l'onde est elliptique gauche si $0 \leq \theta \leq \pi/2$ et droite si $-\pi/ \leq \theta \leq 0$. On utilise génèralement une telle lame dans l'une des configurations particulières $\theta = +\pi/4$ ou $\theta = -\pi/4$ pour lesquelles l'onde transmise est circulaire, respectivement gauche et droite. (figure 7).

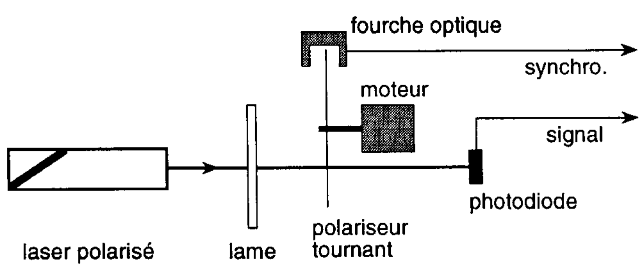

Figure 7 : Action d'une lame quart d'onde sur une onde polarisée rectilignement à 45 des lignes neutres.

Réciproquement, si l'onde incidente est circulaire, l'onde transmise est polarisée ± 45 des lignes neutres.

III) ANALYSE D'UNE LUMIERE POLARISEE

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, puis on décrit une technique expérimentale utilisant un polariseur tournant. On se placera en éclairage monochromatique

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 appelera analyseur. Plusieurs cas peuvent alors se présenter.

- ***Premier cas*** : l'intensité présente un minimum nul pour une direction donnée de l'analyseur. C'est le cas le plus simple, l'onde est totalement rectiligne.
- ***Deuxième cas*** : l'intensité transmise est indépendante de la direction de l'analyseur. La lumière est alors naturelle,ou polarisée circulairement, totalement ou partiellement. Pour lever l'indétermination, placer une lame quart d'onde avant l'analyseur.

$\star$ l'intensité transmise est toujours indépendante de la direction de l'nanlyseur: la lumière est naturelle.

$\star$ l'intensité transmise a un minimum nul: la lumière est polarisée circulairement.

$\star$ L'intensité transmise a un minimum non nul: il s'agit d'une polarisation partiellement circulaire.

- ***Troisième cas*** : l'intensité présente un minimum non nul. Il peut s'agir d'une polarisation rectiligne partielle, elliptique ou elliptique partielle. De la même manière que dans le cas précédent, on interpose une lame quart d'onde, orientée de sorte que ses lignes neutres coïncident avec les directions des maxima et minima d'intensité repérées préalablement. Ainsi la composante elliptique de la lumière incidente est transformée en rectiligne. Si on analyse alors la lumière transmise, on obtient l'une des situations suivantes:

⋆ il existe une position de l'analyseur qui provoque l'extinction: l'onde de départ est elliptique.

⋆ l'intensité présente un minimum non nul décalé par rapport aux lignes neutres de la lame: la lumière de départ est partiellement elliptique.

⋆ l'intensité présente un minimum dans la même diretion que les lignes neutres: cela signifie que la lame n'a pas modifié l'état de polarisation de la lumière, qui est donc partiellement rectiligne.

L'ensemble de cette procédure est résumé sur la figure 8.

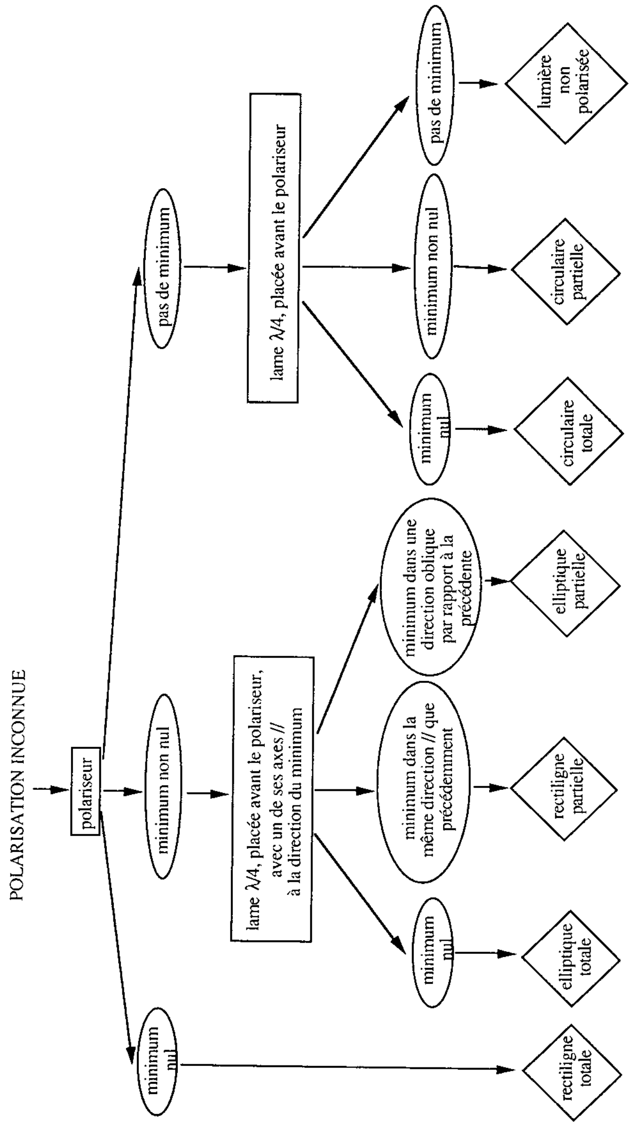

Figure 8 : Protocole d'analyse d'une lumière. Les carrés symbolisent un instrument ajouté sur le trajet de la lumière. Les ellipses symbolisent l'observation. Les losanges symbolisent la conclusionsur le type de polarisation.

2) Analyse 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 9).

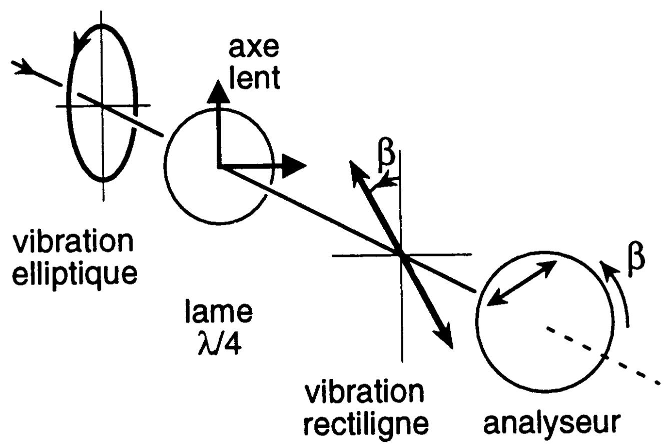

Figure 9 : Principe de l'analyse d'une onde polarisée elliptiquement.

Si on projette sur les lignes neutres le champ arrivant sur la lame, on a :

$$\mathbf{E_i} = (E_1\mathbf{u_1} + E_2 e^{i\pi/2}\mathbf{u_2})e^{-i\omega t} \tag{15}$$

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 :

$$E_t = (E_1 u_1 + E_2 e^{i\pi} u_2)e^{-i\omega t} \tag{16}$$

L'onde transmise est donc rectiligne et dans la direction qui fait l'angle $arctg(E_1/E_2)$ avec $\mathbf{u_2}$. Pour obtenir l'extinction, il faut tourner l'analyseur du même angle. le degré d'ellipticité E_1/E_2 est donc égal à $tg\beta$, et le sens de la vibration elliptique est identique à celui dont on a tourné l'analyseur pour rétablir l'extinction.

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 la forme d'un signal électrique, lequel de 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 (figure 10). On enverra également sur l'oscilloscope, via une fourche optique par exemple, le signal de référence qui assurera le déclenchement du signal de synchronisation.

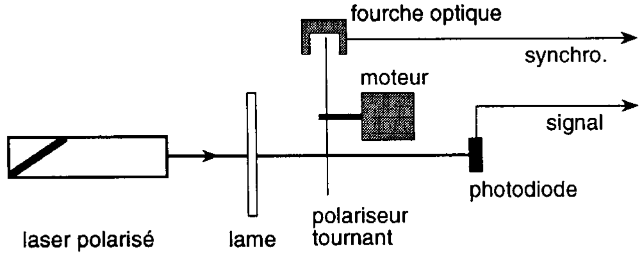

Figure 10 : Détermination d'un état de polarisation à l'aide d'un polariseur tournant.

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

- le signal est continu: la polarisation est circulaire.

- le signal est sinusoïdal avec un minimum nul: la polarisation est rectiligne.

- 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 $(V_{max}/V_{min})^{1/2}$.

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.

IV) MANIPULATIONS

1) Lames minces à faces parallèles

D'abord, il est bon de se familiariser avec les lames minces et les méthodes d'analyse d'une lumière polarisée.

a) Etude d'une lame de quartz parallèle quelconque Reprendre le dispositif expérimental présenté sur la figure 5. Prendre 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 adapté à la lame utilisée) ou alors utiliser un laser. On va étudier une lame de quartz parallèle d'épaisseur quelconque.

En l'absence de la lame, croiser le polariseur P et l'analyseur A.

Introduire la lame. 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.

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?

b) Etude de lames d'épaisseur particulière

- *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 $\pi/4$

de la polarisation incidente. Montrer que la vibration obtenue est polarisée circulairement. Si $0 < \alpha < \pi/4$, montrer que la vibration obtenue est elliptique.

c) Analyse d'une vibration elliptique.

Produire une lumière polarisée elliptiquement. Repérer avec un analyseur la direction de la vibration d'intensité minimale (petit axe de l'ellipse); ôter l'analyseur. Placer une lame $\lambda/4$ (et donc travailler en lumière monochromatique) de manière à ce que son axe lent coïncide avec la direction que l'on vient de repérer.

A la sortie de la lame quart d'onde, on a alors une vibration rectiligne. Replacer l'analyseur avec son orientation initiale et repérer l'extinction en tournant l'analyseur d'un angle $\beta < \pi/2$.

L'angle β dont on a dû tourner l'analyseur permet d'avoir le degré d'ellipticité de la vibration par $tg\beta = E_1/E_2$ avec $E_1 < E_2$, ainsi que le sens de la vibration.

2) 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 consitution fine de celui-ci. Cette méthode 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.

a) Dispositif expérimental

La méthode photométrique, dite de l'analyseur tournant, utilise une mesure quantitative du flux d'un faisceau polarisé en aval d'un polariseur animé d'un mouvement de rotation, elle permet de remonter aux paramètres de polarisation.

La figure 10 schématise le dispositif expérimental.

La source lumineuse est constituée d'un laser He-Ne polarisé rectilignement à cavité relativement longue afin d'avoir un flux assez stable.

Les observations sont faites au moyen d'un détecteur à photodiode et la visualisation du signal électrique délivrée par le détecteur est réalisée à l'oscilloscope.

L'analyseur tournant est constitué d'un analyseur monté sur un roulement à bille d'axe de rotation horizontale entraîné via une courroie par un moteur électrique. L'analyseur effectue 7.8 tours par seconde. Le dispositif engendre un "top" électrique à chaque tour de l'analyseur, lorsque ce dernier passe par une orientation fixée.

Remarque : la fréquence de rotation de l'analyseur n'est pas tout à fait constante, on trouve $f_A = 7.8 \pm 0.1 tr/sec.$

b) Manipulation préliminaire.

Lancer la rotation de l'analyse: on doit obtenir un signal périodique sur l'écran de l'oscilloscope. Déterminer sa fréquence et comparer-là à la vitesse de rotation de l'analyseur qui peut être déterminée grâce aux tops de synchronisation disponibles sur la sortie du boîtier d'alimentation.

Déterminer le niveau électronique fourni par le détecteur lorsque le faisceau laser est masqué. En déduire les variations relatives de flux à la sortie de l'analyseur tournant. Sachant que le laser est polarisé rectilignement, interpréter les signaux observés à l'oscilloscope en terme de la loi de Malus.

Remarque : Le signal fourni par la photodiode est effectivement périodique et sinusoïdal. Sa fréquence est double par rapport à celle du signal de "top". Pourquoi?

c) Mesure de l'orientation d'une polarisation rectiligne.

α) Synchroniser le balayage de l'oscilloscope sur les tops engendrés par l'analyseur tournant 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.

β) Insérer sur le faisceau, à la sortie du laser, un lame demi-onde. Tourner la lame sur elle-même. Comment voit-on sur l'oscilloscope que la polarisation est toujours rectiligne?

Tourner la lame d'un angle $\Delta\phi$ donné. En mesurant l'évolution de la phase du signal vu à l'oscilloscope, remonter au changement de la direction $\Delta\phi$ de la polarisation rectiligne. Vérifier ainsi la loi donnant l'influence d'une lame demi-onde sur une polarisation rectiligne.

d) Caractérisation d'une polarisation elliptique.

Remplacer la lame demi-onde par une lame quart d'onde. Faire tourner la lame.

Que voit-on à l'oscilloscope?

Dans quel cas la modulation du signal vu à l'oscilloscope est-elle nulle alors que la valeur moyenne est non-négligeable?

Quelle est la polarisation arrivant sur l'analyseur tournant lorsque le signal vu à l'oscilloscope présente une modulation nette sans que les minima ne soient nuls?

Que représente dans ce cas, en terme d'ellipse de polarisation, la valeur des maxima et des minima et les instants où ils sont atteints relativement au top de synchronisation?

Dans quel cas le flux lumineux a-t-il des minima nuls derrière l'analyseur tournant? Vérifier que dans ce cas, la phase de la sinusoïde est bien identique à celle obtenue sans la lame quart d'onde. En déduire une méthode générale pour déterminer, à l'analyseur tournant, la direction des axes neutres par rapport à la direction de polarisation de la source, d'une lame quelconque. Vérifier que cette méthode est bien applicable à la lame demi-onde.

Placer une ligne neutre de la lame quart d'onde sur la direction de la polarisation du faisceau laser et noter la phase du signal. Tourner la lame de 25; déterminer expérimentalement à partir des observations à l'oscilloscope les paramètres de la polarisation elliptique ainsi obtenue.

BIBLIOGRAPHIE

- Optique expérimentale, Sextant, Collection Enseignement des Sciences, Hermann.
- Optique, Bruhat-Kastler

LISTE DE MATERIEL

- Ellipsomètre didactique (ENSC 0.50)
- Laser He-Ne (non polarisé)
- Laser He-Ne polarisé
- Lames demi-onde et quart d'onde
- Lame mince de quartz parallèle d'épaisseur quelconque
- Dtecteur à photodiode (ENSC 0.43)
- Oscilloscope