

Photonique Expérimentale

Polarisation

Préparation des TPs	1
1 Polarisation. Composants et méthodes d'analyse.	3
2 Mesures de biréfringence	13
3 Polarimètre à analyseur tournant.	23
4 Etude d'un modulateur électro-optique	35
Annexes	43

lense.institutoptique.fr | Deuxième année | Photonique S7

Cycle Ingénieur - 2^{ème} année - S7 -Palaiseau
Version du 13 septembre 2018
Année 2018-2019

Polarisation : "Pour bien faire, il faut bien commencer"¹

Le but des TP de polarisation est d'illustrer des situations expérimentales récurrentes où vous serez amenés à bien comprendre l'effet de la polarisation sur la propagation d'une onde lumineuse. Ils font appel à certaines des notions vues lors du cours de 1A et il est important de le relire avant de les aborder.

Les objectifs pédagogiques des quatre séances sont résumés ci-dessous. Avant le premier TP, vous devez connaître :

- les définitions de la biréfringence linéaire et circulaire,
- les effets d'une lame demi-onde et d'une lame quart-d'onde sur un état de polarisation donné,
- l'état de polarisation en sortie d'une lame biréfringente lorsqu'elle est éclairée avec une polarisation linéaire à 45° de ses axes neutres,
- l'influence de la longueur d'onde sur les propriétés de biréfringence d'un matériau,
- la définition de l'angle de Brewster.

A la fin des séances, vous saurez :

- produire un état de polarisation donné,
- analyser un état de polarisation avec différentes méthodes,
- mesurer une biréfringence linéaire avec différentes méthodes,
- caractériser un milieu présentant une biréfringence circulaire,
- réaliser une modulation d'amplitude à l'aide de matériaux électro-optiques.

L'objectif des questions suivantes est de vous remettre en tête les concepts fondamentaux que vous aurez à utiliser tout au long du bloc de travaux pratiques de polarisation. **Vous devez donc avoir répondu aux questions qui suivent avant de commencer votre première séance de**

1. Mary Poppins, 1964

polarisation. Ce sont des questions basiques de révision de cours. Les réponses à ces questions sont toutes dans votre cours. Vous pourrez les trouver parfois dans les annexes du présent polycopié.

Les réponses rédigées seront remises à l'enseignant **au début de la première séance de TP de polarisation** et notées sur 10, quel que soit le TP par lequel vous commencez.

Par ailleurs, vous devez préparer chaque séance en lisant l'énoncé et en répondant aux questions de préparation. Des consignes sont données en préambule de chaque énoncé.

P1 Quelle est l'action d'un polariseur sur la lumière ?

P2 Quand dit-on d'un matériau qu'il est "biréfringent" ?

P3 Quel est le principe de fonctionnement d'une lame d'onde ? Quelle est la définition d'un axe neutre ?

P4 Quel déphasage introduit une lame dite $\lambda/4$? une lame $\lambda/2$?

P5 Quel est l'effet de ces lames sur une polarisation linéaire incidente ?

P6 Les propriétés d'une lame d'onde dépendent-elles de la longueur d'onde ? Si oui, par quel(s) biais ?

P7 Qu'appelle-t-on "ellipticité" pour une lumière polarisée ?

P8 Quelle est la polarisation en sortie d'une lame d'onde quelconque quand elle est éclairée par une polarisation linéaire incidente, orientée à 45° des axes neutres de la lame ?

P9 Comment sont définies les polarisations "transverse électrique" (TE) et "transverse magnétique" (TM) ?

P10 Qu'est-ce que l'incidence de Brewster ?

TP 1

Polarisation. Composants et méthodes d'analyse.

Si c'est votre première séance de TP de Polarisation, pensez à préparer les questions préliminaires page 2 (à remettre à l'enseignant-e en début de séance).

L'objectif de cette première séance est l'étude de différents phénomènes de polarisation liés à la biréfringence linéaire de lames cristallines.

La première partie est une révision des notions de base du cours de polarisation. Préparez les questions à l'avance, et vérifiez si vos observations correspondent à ce à quoi vous vous attendiez.

La partie 2 fera l'objet d'un **oral**. Vous devez avoir réfléchi aux questions théoriques de ces parties avant le début du TP, et avoir préparé des schémas clairs pour expliquer la méthode d'analyse d'une lumière polarisée.

Sommaire

1	Étude de composants simples au polariscope	4
2	Méthode d'analyse d'une vibration lumineuse polarisée	6
3	Lumière blanche et convergente	9

Matériels utilisés :

- un polariscope (voir figure 1.1) : structure en bois équipée au niveau le plus bas d'un polariseur dichroïque, à celui le plus haut d'un analyseur dichroïque gradué et de deux plateformes intermédiaires avec montures permettant des rotations calibrées de 45° . Ce montage peut être éclairé soit en lumière monochromatique, soit en lumière blanche. Il suffit pour cela de tourner l'ensemble du polariscope vers l'une ou l'autre des sources.
- un montage sur banc
- des échantillons et des lames à **manipuler avec soin et à ranger dans leur boîte après utilisation.**
- un montage pour l'observation d'interférences en lumière blanche convergente.

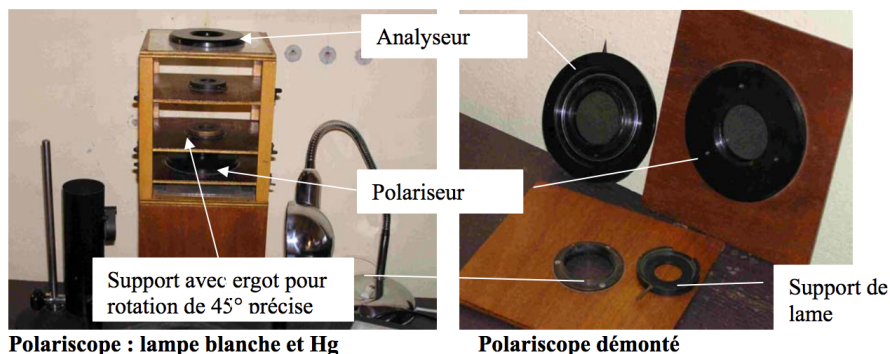


FIGURE 1.1 – Les éléments d'un polariscope.

1 Étude de composants simples au polariscope

Cette première partie vise à étudier les propriétés des polariseurs dichroïques et de lames cristallines avec le polariscope en lumière monochromatique. Il s'agit d'expériences élémentaires d'illustration du cours, qui devront être faites d'autant plus rapidement que vous aurez fait les autres TP polarisation avant celui-ci. **Ne consacrer à cette première partie que 45 minutes au maximum.**

1.1 Repérage de l'axe d'un polariseur par l'incidence Brewster

Pour déterminer la direction d'un analyseur, on peut utiliser le fait qu'à l'incidence de Brewster la polarisation TM (champ électrique $\vec{E}$ parallèle

au plan d'incidence) n'est pas réfléchi : les reflets sur une plaque de verre (ou sur le linoléum du sol) seront donc éteints pour une direction particulière du polariseur. C'est ce principe qui est utilisé en photographie pour les filtres ou polariseurs anti-reflets.

P1 Rappeler la formule donnant l'angle de Brewster. Calculer cet angle dans le cas d'une réflexion air-verre, pour un verre ordinaire d'indice $n = 1,5$. Faire un schéma explicatif, sur lequel la réflexion et la réfraction à une interface sont représentées, et où les directions de polarisation TE et TM sont précisées.

Une plaque de verre collée sur la table éclairée par une lampe de bureau bien placée permet de faire un réglage précis de l'angle de Brewster.

↪ S'entraîner à orienter les axes des polariseurs du polariscope en utilisant l'incidence de Brewster. Utiliser cette propriété pour orienter l'analyseur du polariscope (bague mobile ajustable par en dessous) de façon à ce que la direction de la pointe corresponde à sa direction passante. On aura ainsi pour toute la suite un repère absolu des axes du polariscope.

On peut ainsi, par commodité, placer le polariseur du haut (l'analyseur) de manière à ce que sa direction passante corresponde à la graduation 0 du polariscope.

1.2 Étude de lames demi-onde et quart d'onde

Pour cette partie on utilisera le polariscope éclairé par une lampe à vapeur de mercure, munie d'un filtre vert.

Vous disposez de lames de différents types : lames en mica, lames en matériau polymère (plastique étiré), lames en quartz (lames de petit diamètre). Sauf indication contraire spécifiée dans le texte, utilisez les lames en mica ou en plastique, moins fragiles et moins chères.

Repérage des axes neutres

↪ Croiser tout d'abord le polariseur et l'analyseur en l'absence de la lame cristalline à orienter. Insérer entre le polariseur et l'analyseur une lame $\lambda/2$ et l'orienter de façon à retrouver l'extinction sans toucher à l'analyseur ni au polariseur.

Q1 Expliquer simplement pourquoi cette manipulation permet de déterminer les directions des axes neutres des lames introduites dans le polariscope. La direction à 90° d'un axe neutre est-elle également un axe neutre ?

Lame $\lambda/2$

↪ Conserver entre le polariseur et l'analyseur la lame $\lambda/2$ (pour la raie verte du mercure 546.1 nm). Placer un des axes neutres de la lame sur la direction de polarisation imposée par le polariseur. Cette orientation de la lame sera choisie comme référence des angles. Tourner la lame d'un angle θ quelconque par rapport à l'orientation de référence. Tourner alors l'analyseur.

Q2 Peut-on retrouver l'extinction ? Quel type de polarisation sort de la lame $\lambda/2$?

↪ En utilisant la monture permettant **des rotations calibrées de 45°** , tourner la lame d'un angle $\theta = 45^\circ$.

Q3 Déterminer la polarisation sortante. Est-ce le résultat attendu ?

Lame $\lambda/4$

↪ Remplacer la lame précédente par une lame $\lambda/4$ pour la raie verte du mercure. Chercher les axes neutres de cette nouvelle lame. Par **rotation calibrée**, placer les axes neutres de la lame $\lambda/4$ à $\theta = 45^\circ$ de la direction du polariseur.

Q4 Que constate-on quand on tourne l'analyseur ? Quel type de polarisation sort de la lame $\lambda/4$? Expliquer ce qui se passe en quelques phrases et/ou schémas.

↪ Reprendre la manipulation en tournant cette fois d'un angle moitié (environ 20°). Noter dans ce cas les directions de l'analyseur pour lesquelles le flux globalement transmis est maximal ou minimal.

Q5 Vérifier que l'on obtient une polarisation elliptique et vérifier la direction du grand axe de l'ellipse.

2 Méthode d'analyse d'une vibration lumineuse polarisée

En utilisant le banc optique, muni de deux polariseurs et d'une lame quart d'onde dont l'axe lent correspond à la graduation 0 de la monture,

vous devez (re)trouver comment analyser un état de polarisation inconnu. Vous utiliserez la longueur d'onde verte d'une lampe à vapeur de mercure dans ces expériences.

Pour une meilleure précision de vos mesures, il est fortement recommandé de vérifier l'orientation exacte des axes neutres des lames quart d'onde et celle de l'axe passant des polariseurs. Ce n'est probablement pas exactement 0 !

2.1 Méthode générale (utilisant une lame quart-d'onde)

↪ Placer l'élément mystère sur le banc.

L'objectif est d'analyser la vibration en sortie de cet élément.

↪ Vérifier que, sur votre montage, toutes les lames sont éclairées en faisceau parallèle et en incidence normale.

Q6 Les lames biréfringentes sont calibrées pour fonctionner en incidence normale. Que se passe-t-il si cette condition d'éclairement des lames n'est pas respectée ?

La première chose à faire est de vérifier que la lumière n'est pas simplement polarisée rectilignement.

↪ Faire l'image de la fente source sur un écran et observer ce qui se passe lorsque vous tournez un polariseur placé sur le trajet de la vibration lumineuse.

Q7 De manière générale, quelles sont les différentes observations possibles suivant les types de vibrations incidentes ?

Dans le cas de figure qui nous concerne, la vibration est purement polarisée (il n'y a pas de composante non polarisée). L'idée de l'analyse est de se ramener à une polarisation rectiligne facilement caractérisable à l'aide d'un analyseur.

↪ Mettre le précédent polariseur (analyseur) sur la position du minimum d'intensité. On place une lame quart d'onde sur le trajet de la lumière, avant l'analyseur, de sorte que l'un de ses axes neutres soit aligné avec la direction passante de l'analyseur.

Q8 Quel type de polarisation trouve-t-on après la lame quart d'onde ? Pourquoi ? Quelles sont les directions possibles de cette polarisation ?

Q9 En choisissant un sens de rotation de l'ellipse, faire deux schémas correspondant aux deux positionnements possibles de l'axe lent de la $\lambda/4$, et retrouver quelle est l'orientation de la polarisation rectiligne en sortie de la lame dans les deux cas.

Q10 En reprenant l'exemple que vous avez choisi précédemment, de quel angle et dans quel sens devez-vous tourner l'analyseur pour retrouver l'extinction dans chacun des cas ? En déduire comment doit être positionné l'axe lent de la lame par rapport à la direction de l'analyseur pour retrouver l'extinction en tournant d'un angle égal à l'ellipticité et dans le sens de parcours de l'ellipse.

Q11 Décrire les étapes de la procédure **générale** d'analyse de la vibration lumineuse que vous venez de mettre en place.

↪ Appliquer cette méthode afin de mesurer l'ellipticité ε et l'orientation α de l'ellipse décrivant la polarisation en sortie de l'élément mystère. Déterminer le sens de parcours de l'ellipse.

Présenter votre analyse alors à l'enseignant-e responsable, à l'aide de quelques schémas (Oral).

Q12 De quoi peut être constitué l'élément mystère ? Proposer deux solutions.

2.2 Application à un polariseur photo

On utilise dans cette partie l'objet appelé "polariseur photo" .

↪ Analyser la vibration lumineuse issue de cet objet en fonction de la polarisation incidente, lorsqu'il est utilisé dans un sens ou dans l'autre.

Q13 Expliquer de quoi cet objet est constitué. (Bonus : ce type de polariseur est utilisé en photo ou dans les lunettes de cinéma 3D, voyez-vous l'intérêt dans chacun des cas ?)

3 Lumière blanche et convergente

Cette partie permet d'aborder des exemples plus compliqués que ceux illustrés précédemment, mais aussi rencontrés beaucoup moins fréquemment.

Il est possible de prédire relativement bien les états de polarisation en sortie de lames biréfringentes éclairées en incidence normale à une longueur d'onde donnée. Cet exercice s'avère plus délicat si on éclaire en lumière polychromatique ou si le faisceau n'est pas collimaté. Les exemples suivants vont vous permettre d'appréhender un peu mieux les phénomènes dans ces conditions.

3.1 Étude en lumière blanche de lames cristallines $\lambda/2$ (à 546,1 nm)

Les caractéristiques des lames que vous avez étudiées dans la première partie dépendent a priori de la longueur d'onde.

↪ Diriger le polariscope vers la lampe de bureau avec analyseur et polariseur croisés. Insérer entre ces deux éléments une lame $\lambda/2$ (à 546 nm). Orienter celle-ci afin que ses lignes neutres soient à $\simeq 45^\circ$ de la direction du polariseur, puis tourner l'analyseur afin d'obtenir à nouveau l'extinction.

Q14 L'extinction est-elle maintenue ? Quelle est la teinte obtenue entre polariseur et analyseur parallèles ? Entre polariseur et analyseur croisés ? Comparer aux teintes de Newton données en annexe.

En tournant la lame autour de ses axes neutres, on fait varier la différence de marche dans un sens ou dans l'autre (suivant que l'on tourne autour de l'axe ordinaire ou extraordinaire).

Q15 Faire un schéma de l'un de ces cas de figure pour expliquer le sens de variation de la différence de marche.

↪ Observer les variations de teinte lorsque vous tournez la lame autour de ses axes neutres entre polariseur et analyseur parallèles puis croisés, noter soigneusement vos observations.

Q16 A l'aide de toutes vos observations et en utilisant l'échelle des teintes de Newton (voir page 49), estimer au mieux la différence de marche introduite par la lame. Vérifier qu'il s'agit bien d'une lame $\lambda/2$ à 546,1 nm.

3.2 Obtention de l'axe lent d'une lame biréfringente

On utilise ici un montage qui permet d'éclairer en lumière blanche convergente un cristal de spath (cristal **uniaxe négatif**) taillé perpendiculairement à l'axe optique entre polariseurs croisés.

Q17 Quelle figure d'interférence observe-t-on ?

↪ Faire tourner le cristal autour de son axe puis faire tourner le polariseur et l'analyseur en les gardant croisés et observer la figure d'interférence.

Rappel sur la propagation dans les milieux uniaxes Les seuls rayons qui voient leur polarisation conservée sont ceux dont la direction de polarisation est soit ordinaire, soit extraordinaire.

- onde extraordinaire : champ électrique inscrit dans le plan formé par le rayon et l'axe optique (ici l'axe du banc optique),
- onde ordinaire : champ électrique orthogonal à ce même plan.

Ces deux ondes ne se propagent pas à la même vitesse, elles voient un indice différent. L'onde ordinaire "voit" un indice égal à l'indice ordinaire n_o . L'onde extraordinaire "voit" un indice (qui dépend de l'angle θ du rayon) :

$$n'' = \frac{1}{\sqrt{\frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2}}}$$

Cette onde se propage donc dans une direction (θ') différente :

$$\tan(\theta') = \tan(\theta) \frac{n_o^2}{n_e^2}$$

Le schéma de la figure 1.2 ci-dessous représente les deux rayons dans un plan arbitraire pour un cristal uniaxe négatif ($n_e < n_o \Rightarrow \theta' > \theta$) :

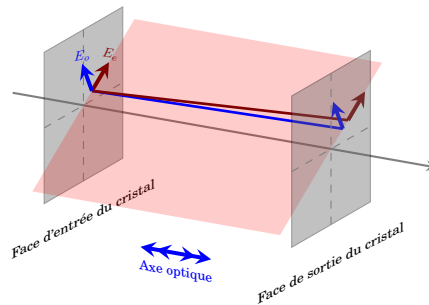


FIGURE 1.2 – Rayons ordinaire et extraordinaire. Les deux rayons sont parallèles en sortie du cristal (non représentés).

Q18 Dédurre de vos observations l'origine de la croix noire. Expliquer la figure d'interférence obtenue, et en particulier pourquoi on retrouve les teintes de Newton à centre blanc ou à centre noir lorsque l'on s'éloigne du centre de la figure.

↪ Placer l'une des lames $\lambda/4$ dont on connaît l'orientation de l'axe lent sur le trajet de la lumière de sorte que ses axes neutres soient à 45° de la croix noire.

Q19 Expliquer pourquoi deux taches noires (correspondant à une différence de marche nulle) apparaissent sur la figure d'interférence dans la direction de l'axe lent.

TP 2

Mesures de biréfringence

Si c'est votre première séance de TP de Polarisation, pensez à préparer les questions préliminaires page 2 (à remettre à l'enseignant-e en début de séance).

Sommaire

1	Préparation	14
2	Etude du spectre cannelé	14
3	Compensateur de Babinet	17
4	Conclusions sur l'ensemble des mesures	20
5	Echantillons en incidence non normale	20

L'objectif de cette séance est de déterminer le plus précisément possible la biréfringence de quelques lames cristallines, c'est-à-dire la différence de marche introduite entre leurs deux axes neutres. Pour cela, on utilisera deux différentes méthodes. Suivant les échantillons, l'une des méthodes sera plus adaptée, plus ou moins précise... Dans tous les cas, il est **indispensable d'exploiter sur place tous les résultats** et de comparer les méthodes entre elles afin de déceler d'éventuelles incompatibilités entre les mesures. On essaiera pour chaque méthode applicable d'estimer les incertitudes et de les réduire au maximum.

Il faut que chaque étudiant-e fasse toutes les mesures par les deux méthodes proposées. L'ordre des méthodes de mesure n'est pas très important. Les échantillons à étudier sont des lames en quartz, rangées dans la boîte « Polarisation B ».

ATTENTION : ces échantillons sont fragiles et chers (environ 300 euros pièce). Ils doivent être manipulés avec précaution et rangés soigneusement dans leur boîte en fin de manipulation.

À la fin de la séance, vous présenterez à l'oral le principe des deux méthodes de mesure. Afin de la préparer au mieux, vous devez avoir répondu à la question **P1** avant le début de la séance.

Méthodes mises en œuvre :

- Observation d'un spectre cannelé avec spectromètre à réseau
- Utilisation d'un compensateur de Babinet

On utilisera un tableur (ou tout autre logiciel permettant de traiter les mesures, Matlab, ...) au cours du TP pour rassembler tous les résultats de mesures de chacune des lames étudiées. On pourra ainsi tracer la courbe $\delta(\lambda)$ avec tous les points de mesures obtenus et vérifier la dépendance en fonction de la longueur d'onde ainsi que la cohérence des résultats.

1 Préparation

P1 Rappeler quel est l'état de polarisation (nature et orientation) en sortie d'une lame biréfringente dans le cas particulier où la polarisation incidente est rectiligne à 45° de ses axes. Faire un schéma représentant la polarisation incidente, les axes neutres de la lame biréfringente, et la polarisation en sortie de la lame. On ne se préoccupera pas du sens de rotation de la polarisation.

P2 Toujours dans ce cas particulier où la polarisation incidente est rectiligne à 45° des axes de la lame, donner la relation entre l'ellipticité ε de la polarisation en sortie et le déphasage φ introduit par la lame.

P3 Comment doit être orienté l'axe optique des lames étudiées par rapport à l'axe de propagation pour observer l'effet de leur biréfringence ?

2 Etude du spectre cannelé

↪ Réaliser soigneusement le montage de la figure 2.1 (alignement des éléments le long du banc et réglage des positions des lentilles et de la lame étudiée par auto-collimation).

↪ Régler précisément le polariseur et l'analyseur croisés.

↪ Placer la lame à étudier sur le banc et régler ses axes à 45° des axes du polariseur et de l'analyseur.

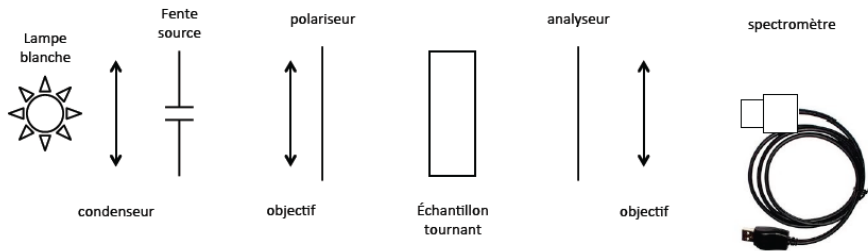


FIGURE 2.1 – Schéma du montage à réaliser

Q1 Expliquer clairement et simplement la présence des cannelures dans le spectre entre polariseurs parallèles et entre polariseurs croisés.

Q2 Quel est l'effet sur le spectre d'une rotation de l'échantillon autour de l'axe optique du montage ?

La position des cannelures **entre polariseur et analyseur soit croisés, soit parallèles**, permet de remonter à la valeur de la différence de marche pour des valeurs précises de la longueur d'onde.

Le contraste des franges d'interférences est maximal si les lignes neutres de la lame sont à 45° des polariseurs croisés ou parallèles.

Dans le cas où polariseur et analyseur sont croisés, l'intensité lumineuse en sortie de l'analyseur vaut :

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi \delta}{\lambda} \right)$$

Les radiations éteintes sont donc telles que la différence de marche introduite par la lame est un multiple de la longueur d'onde, soit $\delta = k\lambda_k = (n_e - n_o)e$.

Dans le cas où polariseur et analyseur sont parallèles, l'intensité lumineuse en sortie de l'analyseur vaut :

$$I = I_0 \cos^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi \delta}{\lambda} \right)$$

Les radiations éteintes sont donc telles que la différence de marche introduite par la lame est un multiple demi-entier de la longueur d'onde, soit

$$\delta = (k + 1/2)\lambda_{k+1/2} = (n_e - n_o)e.$$

La mesure des longueurs d'onde de deux cannelures sombres successives (correspondant à k et $k + 1$) ou d'une cannelure sombre et d'une cannelure brillante successives (correspondant à k et $k + 1/2$) permet en principe de déterminer simplement la valeur de k (par résolution d'une équation à une inconnue). Mais attention, la variation de la biréfringence avec la longueur d'onde, même si elle est faible, rend parfois cette détermination délicate : on ne trouve jamais une valeur de k entière ! Souvenez-vous en et utilisez le fait que la biréfringence $n_e - n_o$ diminue avec la longueur d'onde (loi de Cauchy) pour déterminer k (par résolution d'une inéquation à une inconnue).

Méthode pratique proposée pour vérifier chaque lame étudiée :

- Entrer dans un tableur, par ordre croissant ou décroissant, toutes les valeurs mesurées des longueurs d'onde obtenues correspondant aux cannelures noires entre polariseurs croisés et parallèles.
- Déterminer ensuite la valeur de k **entier positif** pour chacune des cannelures.
- Calculer la différence de marche correspondant à chaque cannelure et tracer cette différence de marche en fonction de la longueur d'onde : $\delta(\lambda) = k\lambda_k$ ou $(k + 1/2)\lambda'_k$.
- Vérifier ainsi la cohérence des mesures et vos calculs, en particulier la décroissance attendue de la différence de marche en fonction de la longueur d'onde.

Remarque : pour vérifier la valeur de k entier positif, on peut aussi s'aider des points d'étalonnage suivants de la biréfringence du quartz :

$$\begin{aligned} &\text{à } \lambda = 0,45 \text{ }\mu\text{m}, n_e - n_o = 0,00937 \\ &\text{à } \lambda = 0,70 \text{ }\mu\text{m}, n_e - n_o = 0,00898 \\ &\text{à } \lambda = 0,789 \text{ }\mu\text{m}, n_o = 1,5442 \text{ et } n_e = 1,5533. \end{aligned}$$

↪ Relever les cannelures observées entre **polariseur et analyseur croisés, puis parallèles**. Déterminer les valeurs de k correspondant à chaque cannelure.

Q3 Expliquer pourquoi la valeur de k est simple à déterminer si le nombre de cannelures est très faible (inférieur à 2).

Q4 Pour toutes les lames étudiées, tracer la différence de marche en fonction de la longueur d'onde.

Q5 En déduire la valeur de la différence de marche à 546,1 nm (raie verte du mercure) et en évaluer l'incertitude.

Faites vérifier ces résultats par l'enseignant-e responsable.

3 Compensateur de Babinet

Un compensateur de Babinet est constitué de deux prismes biréfringents collés (voir figure 2.2). Il permet ainsi d'introduire entre les composantes d'un faisceau polarisées verticalement et horizontalement une différence de marche variable, proportionnelle au déplacement du deuxième prisme le long de l'axe Ox .

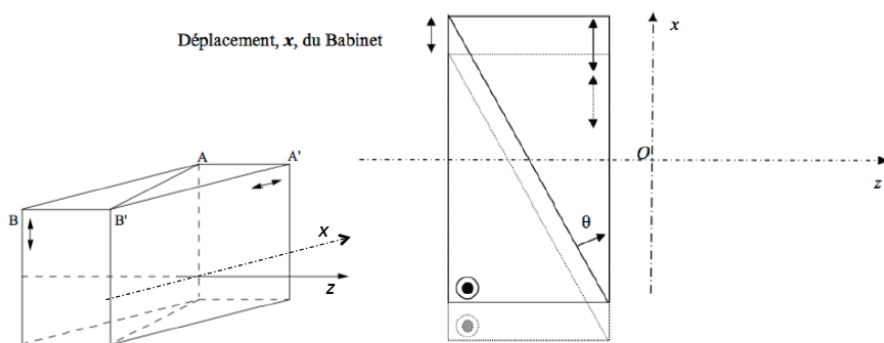


FIGURE 2.2 – Schéma de principe d'un compensateur de Babinet

Pour un déplacement x , la différence de marche s'écrit :

$$\delta_{\lambda}(x) = 2[n_e(\lambda) - n_o(\lambda)] \tan(\theta)x = K_{etalonnage}(\lambda)x$$

Elle est nulle si $x = 0$.

Considérons que le compensateur de Babinet est placé entre polariseur et analyseur croisés. On place les lignes neutres du Babinet à 45° des axes du polariseur et de l'analyseur pour obtenir un contraste maximum. On observe des franges équidistantes parallèles à l'arête Oy des prismes dont l'interfrange dans le plan xOy est égal à :

$$i(\lambda) = \frac{\lambda}{2[n_e(\lambda) - n_o(\lambda)] \tan(\theta)} = \frac{\lambda}{K_{etalonnage}(\lambda)}$$

En lumière blanche, on observe des franges colorées selon l'échelle des teintes de Newton à frange centrale blanche (pour $\delta = 0$) entre polariseur et analyseur parallèles ou à frange centrale noire entre polariseur et analyseur croisés.

Méthode de mesure d'une biréfringence : Si on ajoute entre le polariseur et l'analyseur un échantillon biréfringent dont les lignes neutres sont parallèles à celles du Babinet, les franges se déplacent proportionnellement à la différence de marche supplémentaire introduite par l'échantillon. On peut alors mesurer le décalage du Babinet nécessaire pour ramener la frange centrale au centre du champ et en déduire directement la différence de marche introduite par l'échantillon. Le déplacement transversal du Babinet est mesuré sur le vernier de la vis micrométrique avec une grande précision.

Une photo du montage avec les différents éléments est donnée figure 2.3.

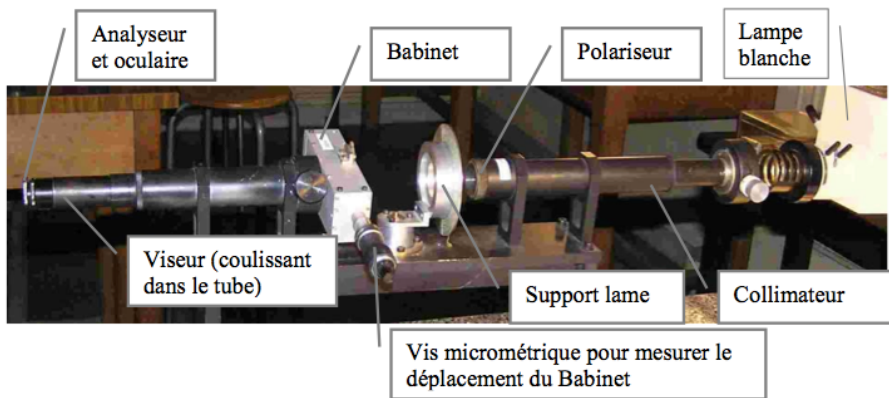


FIGURE 2.3 – Éléments du montage utilisant le compensateur de Babinet

3.1 Réglages

↪ Éclairer correctement le Babinet : un éclairage direct de la fente du collimateur par la lampe, sans condenseur, est suffisant pour couvrir toute l'ouverture du Babinet, à condition de placer la lampe suffisamment proche de la fente et de l'orienter correctement.

↪ En l'absence du compensateur, croiser polariseur (situé en bout de collimateur) et analyseur (solidaire de l'oculaire du viseur à frontale fixe). Mettre en place le compensateur (il coulisse à l'entrée du tube qui contient le viseur à frontale fixe).

↪ Mettre au point le viseur d'observation sur le réticule gravé (le viseur à frontale fixe coulisse à l'intérieur du tube pour effectuer ce réglage).

Tourner le Babinet pour retrouver l'extinction puis le basculer de 45° . Des franges bien contrastées doivent apparaître.

3.2 Étalonnage du Babinet

On peut alors procéder à l'**étalonnage du Babinet en lumière monochromatique** (lampe à mercure munie du filtre vert, 546,1 nm). On doit mesurer **aussi précisément que possible** l'interfrange (souvent appelée période du Babinet).

Q6 Déterminer le plus précisément possible l'interfrange du Babinet à 546,1 nm. **Celui-ci est d'environ 2,4 mm : refaites la mesure tant que vous êtes loin de cette valeur!** Donner la précision de votre mesure de l'interfrange. Cette calibration permet la mesure de la différence de marche introduite par une lame à la longueur d'onde de la raie verte du mercure, si cette différence de marche est inférieure à la différence de marche maximale mesurable avec ce Babinet.

Q7 Quelle est la différence de marche maximale mesurable avec le Babinet?

3.3 Mesure de la biréfringence de l'échantillon

↪ On remplace la lampe à mercure par une source de lumière blanche. Les polariseur et analyseur étant croisés, et la direction du compensateur étant à 45° des directions des polariseurs, centrer parfaitement la frange noire sur le réticule. Appuyer ensuite sur le bouton rouge du vernier électronique ("zero"). Cette position servira de référence pour la suite.

↪ Placer la lame à analyser de manière à maintenir la frange noire centrée.

Q8 Expliquer pourquoi on oriente ainsi ses axes neutres sur les directions de l'analyseur et du polariseur.

↪ Tourner la lame de 45° autour de l'axe optique. La frange noire n'est plus au centre. Il faut à présent déplacer le Babinet pour ramener la frange noire au centre. Vérifier que le défilement des teintes de Newton est bien cohérent avec l'échelle des couleurs correspondante.

Q9 Mesurer le déplacement du Babinet pour retrouver la frange noire au centre. Expliquer comment la mesure de ce déplacement de la frange noire permet de calculer directement la différence de marche introduite par l'échantillon pour la longueur d'onde de calibration.

Remarque : pour retrouver une frange noire bien contrastée en présence de la lame, il est important que les axes de la lame soient bien confondus avec ceux du Babinet.

Q10 Calculer la différence de marche introduite par la lame à 546,1 nm. Quelle est la précision de la mesure ?

Q11 Vérifier que la valeur obtenue est compatible avec celles obtenues avec la méthode du spectre cannelé.

Présenter à l'enseignant·e responsable le principe des deux méthodes de mesure (oral)

4 Conclusions sur l'ensemble des mesures

Q12 Pour chaque lame, faire une synthèse des résultats obtenus par les deux méthodes. Expliquer pourquoi, pour certains échantillons, le choix de la méthode est crucial.

Q13 Pour chaque méthode évaluer la précision des résultats.

Q14 Déterminer l'épaisseur de chaque lame en supposant qu'il s'agit bien de lame de quartz taillé parallèlement à l'axe optique. On pourra utiliser la loi de variation de $n_e - n_o$ du quartz en fonction de la longueur d'onde :

$$n_e - n_o = 8,678 \cdot 10^{-3} + \frac{145,025}{\lambda^2} \text{ avec } \lambda \text{ en nm.}$$

5 Echantillons en incidence non normale

↪ Revenir au montage du spectre cannelé. Placer l'échantillon à étudier entre polariseur et analyseur croisés avec les axes neutres de l'échantillon à 45° de l'axe du polariseur. Pour faciliter les observations, s'arranger pour qu'un axe neutre de l'échantillon soit vertical. On pourra pour cela s'aider des propriétés de l'angle de Brewster pour orienter l'axe des polariseurs.

↪ Incliner légèrement l'échantillon de façon à ce que le faisceau fasse un petit angle avec sa face d'entrée. Quelle conséquence cela a-t-il sur les cannelures ?

Q15 A l'aide de la **surface des indices** d'un milieu uniaxe, interpréter la rotation de l'échantillon en terme de différence de marche entre les deux projections de la polarisation incidente. Dans quel cas une augmentation de l'angle d'incidence entraîne-t-elle une augmentation de la différence de marche apportée par la lame ?

↪ Tourner l'échantillon de 90° . C'est son autre axe neutre qui est vertical. Refaire la même procédure et observer la conséquence sur les cannelures.

Q16 Peut on déduire de l'observation expérimentale autour de quel axe de l'échantillon la rotation est elle effectuée ? Peut-on en déduire la direction des axe lent et rapide de la lame ?

TP 3

Polarimètre à analyseur tournant.

Si c'est votre première séance de TP de Polarisation, pensez à préparer les questions préliminaires page 2 (à remettre à l'enseignant-e en début de séance).

Répondre aux 3 questions de préparation avant la séance.

Sommaire

1	Préparation	24
2	Montage utilisé	25
3	Observations qualitatives à l'oscilloscope	26
4	Mesures et traitement à l'aide d'un logiciel	27
5	Biréfringence circulaire (pouvoir rotatoire)	29
6	Analyse polarimétrique après une réflexion sur un miroir	30

Un ellipsomètre est un appareil industriel très utilisé en particulier pour caractériser les dépôts de couches minces (épaisseurs, indices). L'objectif de cette séance est l'étude du principe de fonctionnement d'un *ellipsomètre à analyseur tournant*. Vous allez dans un premier temps vous familiariser avec ce dispositif. **Un exercice de présentation orale portera sur cette première partie, c'est-à-dire sur la section??**. On utilisera ensuite l'ellipsomètre à analyseur tournant pour déterminer la nature de la vibration transmise par une lame biréfringente ou réfléchiée sur une surface métallique en fonction de l'angle et de la nature de l'onde électromagnétique incidente.

1 Préparation

P1 Rappeler les définitions des polarisations transverse magnétique, TM, et transverse électrique, TE.

La courbe d'évolution des coefficients de réflexion en intensité à une interface air-verre en fonction de l'angle d'incidence est donnée figure 3.1 :

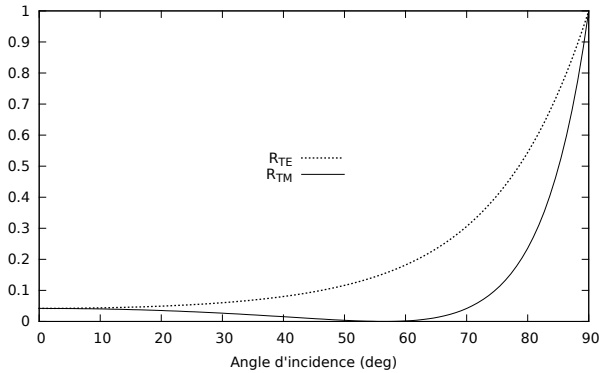


FIGURE 3.1 – Coefficients de réflexion en intensité à une interface air-verre (verre standard, $n = 1,515$ à 633 nm) en fonction de l'angle d'incidence.

P2 Pour quelle polarisation incidente le faisceau réfléchi a-t-il une intensité minimale ? Ce résultat dépend-il de l'angle d'incidence ?

P3 Calculer l'angle de Brewster pour un verre standard ($n = 1,515$ à 633 nm).

2 Montage utilisé

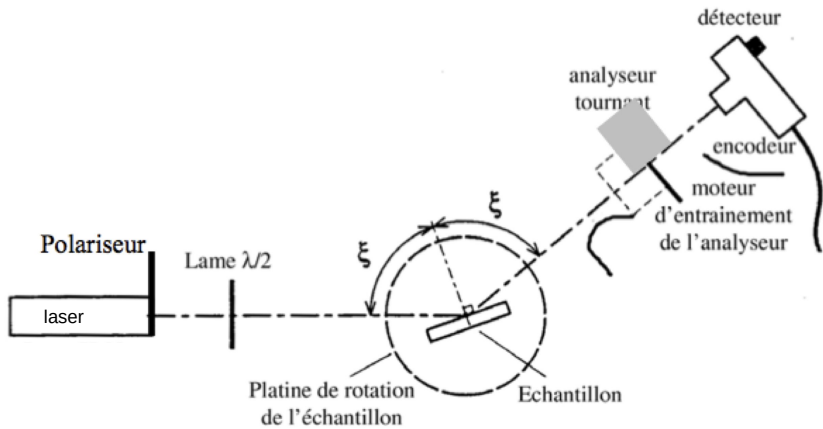


FIGURE 3.2 – Schéma du dispositif

La source lumineuse est un laser à 640 nm. Un polariseur est placé en sortie du laser.

Le détecteur est constitué d'une photodiode de grande surface sensible ($\varnothing \simeq 11$ mm) associée à un amplificateur courant-tension soigneusement conçu afin d'avoir un faible bruit et un gain le plus constant possible dans sa bande passante utile. Il dispose d'un sélecteur permettant de choisir entre trois sensibilités. Dans un tout premier temps, on visualisera ce signal avec un oscilloscope.

L'analyseur tournant est constitué d'un polariseur rectiligne, entraîné par un moteur électrique. Sa vitesse de rotation, affichée en tours par seconde sur l'écran du boîtier de gestion de l'encodeur (l'ordinateur doit être allumé), est réglable par la tension d'alimentation du moteur d'entraînement.

Un encodeur incrémental de position angulaire (boîtier de couleur orange) permet de repérer précisément la position angulaire de l'analyseur. Le modèle utilisé délivre entre autres un signal **TOP0**, qui donne une unique impulsion brève au début de chaque tour, et un signal noté **T**, constitué de 4096 fronts montants par tour.

La fréquence du signal **TOP0** donne la vitesse de rotation de l'analyseur

exprimée en tours. s^{-1} (ou Hz). Cette fréquence fondamentale sera dénommée f_0 dans la suite de ce texte.

Le codeur incrémental joue un rôle très important dans le système d'acquisition du signal que vous utiliserez dans la deuxième partie du TP. Des détails sont donnés en annexe 3.

3 Observations qualitatives à l'oscilloscope

↪ Aligner soigneusement le bras du goniomètre supportant l'analyseur tournant et le détecteur sur la direction du faisceau laser.

↪ Mettre en marche l'alimentation du détecteur et l'ordinateur. Le signal de sortie du détecteur est envoyé sur la voie A de l'oscilloscope, le signal TOP0 sur la voie B. L'oscilloscope est par ailleurs réglé pour que le déclenchement de son balayage se fasse sur ce signal TOP0 (signal TTL 5V très étroit).

↪ Alimenter le moteur d'entraînement de l'analyseur tournant à l'aide de l'alimentation continue prévue à cet effet et réglez la vitesse de rotation (lue sur l'afficheur du BOÎTIER DE GESTION DE L'ENCODEUR) à une dizaine de tours par seconde. (**Ne dépassez pas 25 tr. s^{-1}**).

↪ Choisir la sensibilité du détecteur afin d'avoir un signal important (de plusieurs volts) mais non saturé sur l'oscilloscope. Le détecteur délivre normalement une tension proportionnelle au flux lumineux qu'il reçoit, à une très faible tension d'obscurité éventuelle près. (Le polariseur de tête pourra, si nécessaire, servir à limiter le flux frappant le détecteur pour éviter une saturation éventuelle).

Q1 Expliquer les signaux observés à l'oscilloscope grâce à la loi de Malus, en particulier le rapport entre la fréquence du signal issu du détecteur et la fréquence f_0 de TOP0.

↪ Insérer une lame $\lambda/2$ (à 640 nm) sur le trajet du faisceau et faire tourner la polarisation rectiligne. Observer les modifications du signal issu du détecteur visualisé à l'oscilloscope.

Q2 Interpréter le signal obtenu en fonction de l'orientation de la lame $\lambda/2$. Observer en particulier le sens de déplacement de la courbe lorsque on fait tourner la lame $\lambda/2$.

↪ Remplacer la lame $\lambda/2$ par une lame $\lambda/4$ (à 640 nm) sur le faisceau polarisé rectilignement.

Q3 Interpréter le signal obtenu en fonction de l'orientation de la lame $\lambda/4$. Comment vérifier la qualité de cette lame ? Quelle est l'influence d'une incidence non-normale du faisceau ?

Q4 Compléter le tableau de la feuille de mesures (copié en annexe) établissant la correspondance entre

- le contraste γ et la phase ϕ du signal du détecteur,
- et l'état de polarisation du faisceau, défini par son ellipticité ε et l'orientation de l'ellipse θ .

Q5 Quelle est l'expression reliant le contraste γ du signal observé à l'oscilloscope et l'ellipticité ε ? Celle reliant la phase Φ de ce même signal et l'orientation θ de l'ellipse ?

4 Mesures et traitement à l'aide d'un logiciel

De simples mesures de phase et d'amplitude d'une sinusoïde à l'oscilloscope permettent en toute rigueur de déterminer l'état de polarisation d'un faisceau totalement polarisé frappant l'analyseur tournant. Toutefois, ces mesures sont fastidieuses et assez peu précises. Elles peuvent être très utilement assistées par ordinateur. L'objectif de la partie suivante est de prendre en main un logiciel d'acquisition de mesures d'ellipsométrie.

4.1 Utilisation du logiciel d'acquisition et de traitement sous LabVIEW

↪ Retirer les lames $\lambda/2$ et $\lambda/4$ avant de passer à la suite.

↪ Lancer le VI (Virtual Instrument) dénommé
Rotating Analyserv2018.VI.

Ce VI permet d'acquérir le signal du détecteur, de visualiser simultanément ce signal et sa FFT et de calculer les paramètres utiles pour la polarimétrie.

Le signal sinusoïdal détecté se met facilement sous la forme :

$$S(r) = V_0[1 + \gamma \cos(4\pi r + \Phi)]$$

où r est la position angulaire de l'analyseur exprimée **en tour**, V_0 la valeur moyenne du signal du détecteur, Φ sa phase à l'origine et γ son taux

de modulation. La valeur moyenne du signal étant arbitraire (elle dépend de la puissance du laser et de la sensibilité du détecteur), l'information sur la polarisation est uniquement contenue dans le taux de modulation γ et la phase Φ . La transformée de Fourier de $S(r)$, qui a pour argument des *fréquences angulaires* en tour^{-1} , a une composante continue à **0 tour** $^{-1}$ d'amplitude V_0 et une composante sinusoïdale à **2 tour** $^{-1}$ d'amplitude $\gamma V_0/2$ et de phase Φ :

$$S(r) = V_0 + \frac{\gamma V_0}{2} e^{i(4\pi r + \Phi)} + \frac{\gamma V_0}{2} e^{-i(4\pi r + \Phi)}$$

Les deux grandeurs γ et Φ sont extraites, dans le programme LabVIEW, par transformation de Fourier rapide (FFT) du signal détecteur sur un nombre **entier** de tours de l'analyseur.

On utilisera le mode de fonctionnement normal (*bouton orange dans la position Horloge externe*), pour lequel l'acquisition du signal $S(r)$ est synchronisée sur l'encodeur (fronts montants de T). La valeur de l'amplitude $\gamma V_0/2$ et la valeur de phase Φ que l'on doit mesurer seront correctement calculées grâce à la synchronisation parfaite de l'acquisition avec le signal sinusoïdal de fréquence à **2 tour** $^{-1}$ (cf annexe 3).

Remarque sur le spectre : En fait, l'analyseur tournant présente des défauts d'uniformité qui introduisent des petites distorsions se reproduisant à chaque tour. Le signal détecté est donc périodique au tour, à quelques fluctuations et bruits de mesure près. Il se décompose en série de Fourier ayant son fondamental à $\pm 1 \text{ tour}^{-1}$ et des harmoniques à $\pm 2, \pm 3, \dots \text{ tour}^{-1}$. Sa FFT présente donc des pics à ces fréquences particulières se détachant sur un fond résiduel de bruit, les pics à 0 et $\pm 2 \text{ tour}^{-1}$ étant normalement largement prépondérant. Les grandeurs γ et Φ , calculées comme indiqué précédemment peuvent être entachées d'erreurs aléatoires dues au bruit du signal et d'erreurs systématiques liées aux défauts déterministes de l'analyseur.

↪ En l'absence de lame sur le faisceau, lancer le VI et observer les différents résultats affichés : signal acquis, FFT, amplitude normalisée et phase de l'harmonique 2.

Q6 Décrire le spectre affiché et repérer la composante du spectre d'intérêt pour les mesures. Quelles sont les origines des autres composantes ?

A partir de cette mesure, le logiciel calcule et affiche l'ellipticité ε ainsi que l'évolution de l'orientation de l'ellipse.

Q7 Mesure-t-on une polarisation rigoureusement linéaire derrière un polariseur ? Pourquoi ? Analyser l'effet de la lumière parasite sur la mesure de ε .

↪ S'assurer pour la suite des mesures que le montage est protégé de la lumière parasite (en utilisant par exemple du papier noir autour du détecteur et en travaillant dans le noir).

↪ En tournant la lame $\lambda/2$, vérifier que la représentation de l'ellipse à l'écran est selon le point de vue d'un observateur regardant vers la source.

4.2 Production d'un état de polarisation

A l'aide d'une lame $\lambda/4$ et d'une lame $\lambda/2$, il est possible de régler l'état de polarisation d'un faisceau (orientation et ellipticité) à partir d'une polarisation rectiligne.

Q8 Comment déterminer la direction des axes neutres d'une lame ?

↪ En utilisant seulement la lame $\lambda/4$, régler un état de polarisation elliptique, d'ellipticité $\varepsilon = 30^\circ$ et orienté selon $\theta = \varepsilon$ par rapport à la direction de la polarisation incidente.

↪ Utiliser ensuite la lame $\lambda/2$ pour orienter l'ellipse selon un angle θ arbitraire, sans modifier l'ellipticité.

4.3 Mesure de la biréfringence d'une lame inconnue

↪ Mesurer la biréfringence (modulo λ) apportée par un échantillon composé d'un film adhésif sur une lame de microscope. Pour cela, il est nécessaire de repérer les axes neutres de l'échantillon puis de placer ces axes à 45° de la direction de la polarisation linéaire incidente.

5 Biréfringence circulaire (pouvoir rotatoire)

↪ Placer la lame de quartz (OCP445, d'épaisseur $L = 1.0$ mm) sur le support. La polarisation incidente est rectiligne.

Q9 Quel est l'état de polarisation en sortie ?

Q10 Est-il modifié lorsqu'on tourne l'échantillon autour de son axe ? Ce comportement est-il comparable à celui des lames biréfringentes étudiées jusqu'alors (ou dans les autres TPs) ?

↪ Modifier la polarisation incidente, afin que celle-ci soit circulaire.

Q11 Quel est l'état de polarisation en sortie ?

Cet échantillon présente ce que l'on appelle de la « biréfringence circulaire » ou du « pouvoir rotatoire ». L'angle de rotation α de la direction de la polarisation est proportionnelle à l'épaisseur de l'échantillon :

$$\alpha = \rho L$$

On donne pour le quartz : $\rho = \pm 22,09^\circ \cdot \text{mm}^{-1}$ pour $\lambda = 589,3 \text{ nm}$. Le signe n'est pas donné et indique si l'élément est lévogyre ou dextrogyre. ρ est une constante caractéristique du matériau, elle dépend de la longueur d'onde utilisée, suivant la loi (approchée) de Biot :

$$\rho \propto \frac{1}{\lambda^2}$$

Q12 Vérifier que la valeur de α mesurée sur l'échantillon est bien cohérente avec la valeur tabulée de ρ . Cet échantillon de quartz est-il lévogyre ou dextrogyre ?

↪ Mesurer l'angle α de rotation induit par l'échantillon épais de quartz ($L = 7,7 \text{ mm}$).

Q13 L'échantillon est-il lévogyre ou dextrogyre ?

↪ Modifier la source, et utiliser la source laser verte ($\lambda = 532 \text{ nm}$) et mesurer à nouveau l'angle de rotation α pour les deux échantillons précédents.

Q14 Vérifier la cohérence de vos résultats avec la loi de Biot.

6 Analyse polarimétrique après une réflexion sur un miroir

On utilise à nouveau le laser rouge dans toute cette partie.

6. ANALYSE POLARIMÉTRIQUE APRÈS UNE RÉFLEXION SUR UN MIROIR

Lors des manipulations précédentes, la direction "absolue" de la polarisation n'est pas connue. L'objectif de cette partie est de repérer la polarisation TM, à l'aide d'une réflexion vitreuse à un angle d'incidence égal à l'angle de Brewster ξ_B .

L'échantillon utilisé est une simple lame de verre de surface utile bien propre. Pour éviter des problèmes de réflexion parasite sur la deuxième interface, cette dernière est noircie.

↪ Visser l'échantillon sur le support. Régler par autocollimation l'échantillon normal au faisceau et placer sa surface sur l'axe de rotation de la platine. Tourner ensuite l'échantillon avec la platine de rotation afin que l'angle d'incidence soit voisin de l'angle de Brewster d'un verre standard. Chercher à obtenir à l'œil une extinction presque parfaite en jouant sur la polarisation incidente et sur l'angle d'incidence, puis orienter le bras portant l'analyseur tournant et le détecteur afin que le faisceau réfléchi passe sur l'axe de rotation de l'analyseur et frappe le détecteur, et affiner le réglage.

Q15 Quelle est alors l'orientation de la polarisation incidente ?

↪ Enregistrer l'orientation de l'ellipse obtenue pour ce réglage sur la fenêtre de mesure.

Q16 Dédurre de la mesure de l'angle de Brewster la valeur de l'indice du verre.

↪ Observer l'état de polarisation obtenu pour une polarisation incidente TE et TM et ce, pour quelques angles d'incidence (on se limitera à des angles $\xi > 60^\circ$). Vérifier en particulier que la polarisation est bien rectiligne en sortie.

↪ Tourner l'orientation de la polarisation incidente de 45° , c'est à dire une polarisation constituée pour moitié d'un composante selon TE et l'autre moitié selon TM.

Q17 La polarisation après réflexion est-elle toujours linéaire ? Cela dépend-il de l'angle d'incidence ?

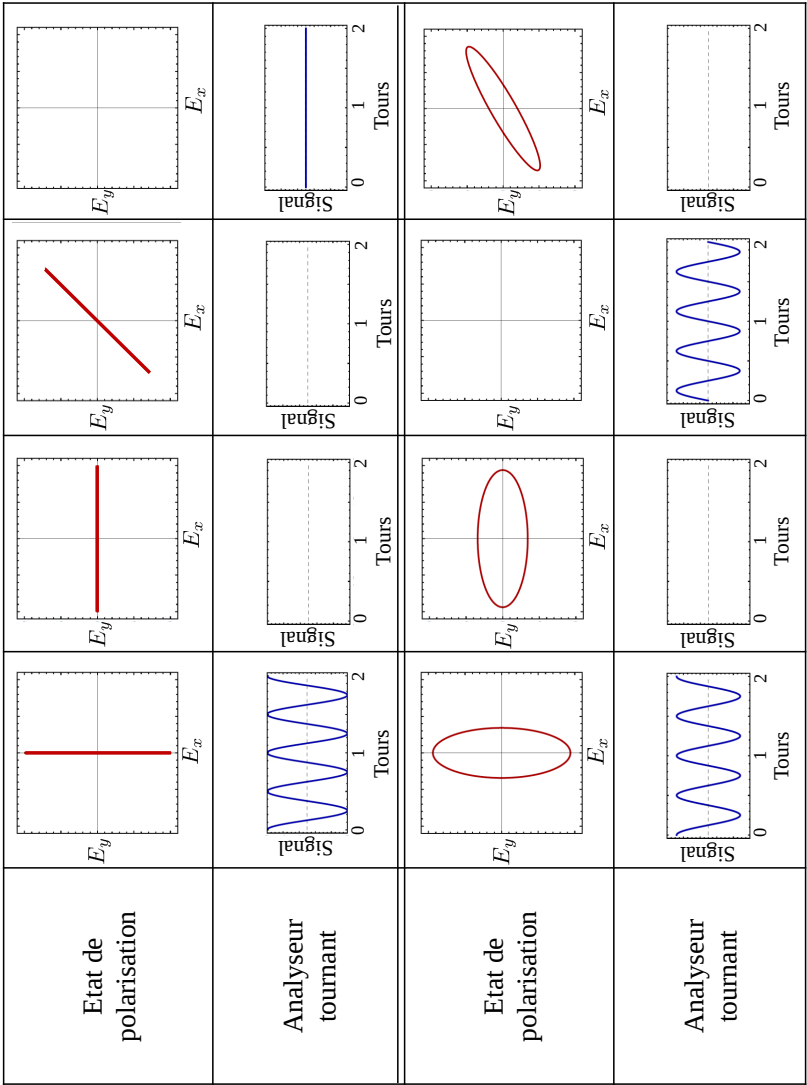
↪ Réaliser les mêmes mesures sur le miroir doré.

Q18 Observez vous un phénomène de Brewster sur cet échantillon ?

↪ Réaliser les mêmes mesures sur le miroir diélectrique (BB1-E02 de Thorlabs).

Q19 Pour quels réglages de la polarisation incidente obtient-on une polarisation linéaire en sortie ?

Annexe : relation entre le signal du détecteur et l'état de polarisation du faisceau



TP 4

Etude d'un modulateur électro-optique

Si c'est votre première séance de TP de Polarisation, pensez à préparer les questions préliminaires page 2 (à remettre à l'enseignant-e en début de séance).

L'objectif de cette séance est l'étude du principe de fonctionnement d'un modulateur électro-optique et de sa mise en œuvre en pratique.

Pour cette séance, vous n'aurez pas à produire un compte rendu mais nous vous demandons de remplir une feuille de résultats à rendre en fin de séance. Les questions pour lesquelles vous devrez reporter des résultats dans la feuille sont signalées par un petit losange $\diamond$. Les questions **P1** à **P4** sont à préparer avant la séance.

Les parties 2.3 et 2.4 feront l'objet d'un **oral** .

Sommaire

1	Introduction : l'effet électro-optique	36
2	Caractérisation du modulateur électro-optique . . .	39
2.1	Réglage de l'axe optique du modulateur	39
2.2	Réglage lorsque le modulateur est alimenté	39
2.3	Etude de la caractéristique	40
2.4	Etude de l'état de la polarisation produit par le cristal	41
2.5	Utilisation du MEO comme modulateur linéaire de flux lumineux	41
2.6	S'il vous reste du temps et que votre curiosité vous y invite	42

1 Introduction : l'effet électro-optique

L'effet électro-optique sera vu au second semestre en cours et en TD. Les quelques éléments qui suivent permettent de comprendre le TP qui concerne la biréfringence induite par un champ électrique et l'utilisation d'un composant électro-optique comme modulateur d'intensité.

L'application d'un champ électrique sur un cristal non centro-symétrique peut provoquer une modification de l'indice de réfraction. Si cette modification d'indice est proportionnelle au champ appliqué, on appelle ce phénomène l'effet Pockels (c'est le cas du cristal de KD*P étudié au cours de ce TP). Si au contraire la modification est proportionnelle au carré du champ appliqué, on appelle ce phénomène l'effet Kerr. L'effet électro-optique est donc un effet de biréfringence provoquée électriquement. **Le cristal se comporte comme une lame biréfringente avec un axe lent et un axe rapide dont les indices varient en fonction de la tension appliquée.** On décrit ces variations par une modification de l'ellipsoïde des indices. Dans un repère $Oxyz$ quelconque l'équation de l'ellipsoïde des indices est :

$$\frac{x^2}{n_{xx}^2} + \frac{y^2}{n_{yy}^2} + \frac{z^2}{n_{zz}^2} + \frac{2xy}{n_{xy}^2} + \frac{2xz}{n_{xz}^2} + \frac{2yz}{n_{yz}^2} = 1$$

Dans le repère $OXYZ$ des axes neutres du milieu, on obtient :

$$\frac{X^2}{n_{XX}^2} + \frac{Y^2}{n_{YY}^2} + \frac{Z^2}{n_{ZZ}^2} = 1$$

L'effet électro-optique se traduit par une faible variation des indices : les coefficients $1/n_{ij}^2$ subissent des variations $\Delta(1/n_{ij}^2)$ et deviennent les coefficients $1/n_{ij}'^2$:

$$\frac{1}{n_{ij}'^2} = \frac{1}{n_{ij}^2(E=0)} + \Delta \left| \frac{1}{n_{ij}^2} \right|$$

Les variations des coefficients $1/n_{ij}^2$ sont calculées en effectuant le produit de la matrice (6 x 3) des coefficients électro-optiques r_{ij} , qui dépendent de la nature du cristal, par le vecteur champ électrique, E . Pour le KD*P, qui en l'absence de champ électrique appliqué est un cristal uniaxe selon Oz , l'ellipsoïde initial a l'équation suivante :

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \text{ avec } n_o = 1,51 \text{ et } n_e = 1,47 \text{ à } \lambda = 0,6 \mu\text{m}.$$

Les propriétés de symétrie du cristal de KD*P permettent de montrer que la matrice de coefficients électro-optiques est la suivante :

$$\begin{pmatrix} \Delta \left[\frac{1}{n_{xx}^2} \right] \\ \Delta \left[\frac{1}{n_{yy}^2} \right] \\ \Delta \left[\frac{1}{n_{zz}^2} \right] \\ \Delta \left[\frac{1}{n_{yz}^2} \right] \\ \Delta \left[\frac{1}{n_{zx}^2} \right] \\ \Delta \left[\frac{1}{n_{xy}^2} \right] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

avec $r_{41} = 8,8 \cdot 10^{-12} \text{m.V}^{-1}$ et $r_{63} = 26,2 \cdot 10^{-12} \text{m.V}^{-1}$

On montre alors que l'ellipsoïde du KD*P en présence d'un champ électrique E_z appliqué selon Oz devient :

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2r_{63}E_zxy = 1$$

où l'apparition d'un terme croisé indique une rotation de l'ellipsoïde. En présence d'un champ électrique selon Oz , les axes neutres Ox' et Oy' sont à 45° des axes Ox et Oy . En effectuant le changement de variables ci-dessous, on peut écrire l'équation de l'ellipsoïde dans le repère de ses nouveaux axes neutres :

$$\begin{cases} x' = \frac{1}{\sqrt{2}}(x + y) \\ y' = \frac{1}{\sqrt{2}}(y - x) \end{cases} \Rightarrow \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{63}E_z \right) x'^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} - r_{63}E_z \right) y'^2 + \frac{z^2}{n_e^2} = 1$$

Finalement, après avoir réalisé un développement limité au premier ordre, il est facile de mettre la dernière équation sous la forme suivante :

$$\frac{x'^2}{n_{x'}^2} + \frac{y'^2}{n_{y'}^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \text{ avec } \begin{cases} n_{x'} = n_o - \frac{1}{2}n_o^3r_{63}E_z \\ n_{y'} = n_o + \frac{1}{2}n_o^3r_{63}E_z \end{cases}$$

La direction des différents axes est représentée sur la figure 4.1.

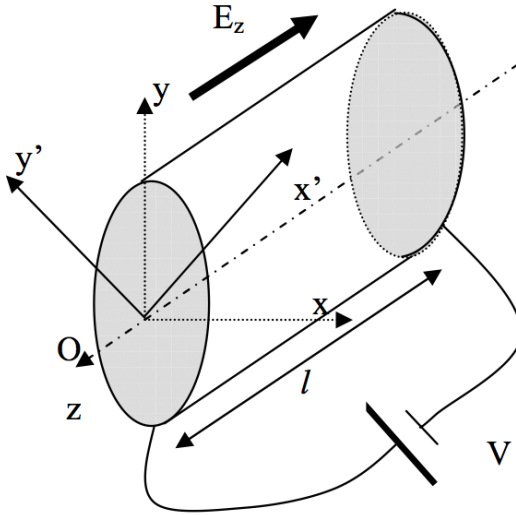


FIGURE 4.1 – Schéma du cristal, orientation.

Ainsi, en présence d'un champ E_z , on obtient deux axes neutres Ox' et Oy' dans un plan perpendiculaire à l'axe z , et une biréfringence caractérisée par la différence d'indice :

$$\Delta n = n_{y'} - n_{x'} = n_o^3 \cdot r_{63} \cdot E_z$$

On considère une onde plane monochromatique rectiligne selon Oy se propageant dans le cristal suivant la direction Oz .

P1 ◇ Donner l'expression du déphasage introduit et montrer que celui-ci est indépendant de la longueur l du cristal. Donner l'expression de la tension appelée V_π pour laquelle ce cristal se comporte comme une lame demi-onde.

P2 Proposer un montage utilisant le cristal de KD*P destiné à moduler l'amplitude d'une onde électromagnétique de polarisation rectiligne.

P3 ◇ Proposer un montage utilisant le cristal de KD*P destiné à moduler la phase d'une onde électromagnétique de polarisation rectiligne.

P4 ◇ Chercher des exemples d'applications des modulateurs électro-optiques sur internet.

2 Caractérisation du modulateur électro-optique

On réalise le montage de la figure 4.2 :

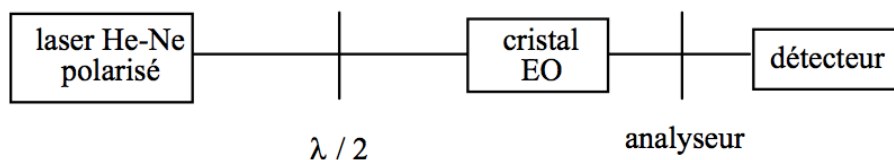


FIGURE 4.2 – Montage de caractérisation du modulateur électro-optique

2.1 Réglage de l'axe optique du modulateur par rapport au faisceau laser

↪ Croiser l'analyseur avec la polarisation rectiligne produite par la lame demi-onde.

↪ Placer et régler le modulateur électro-optique sur le faisceau laser (pour l'instant, le modulateur n'est pas alimenté).

↪ Observer la figure d'interférence obtenue derrière l'analyseur.

↪ Régler l'orientation du modulateur de manière à faire coïncider le centre de la croix noire et le spot du faisceau laser transmis par l'analyseur.

2.2 Réglage lorsque le modulateur est alimenté

L'alimentation haute tension (HT) délivre une tension comprise entre 0 et 3000 V.

Attention Haute Tension

- Ne jamais débrancher un câble lorsque l'alimentation est en fonctionnement.
- N'utiliser que des câbles coaxiaux haute-tension (verts) dont l'âme est très bien protégée.
- Ne jamais brancher directement un câble haute-tension sur un câble basse tension.

L'alimentation HT est réglable par le potentiomètre.

↪ Appliquer une haute tension continue au cristal voisine de 1500 V.

↪ Placer les axes neutres du cristal, Ox' et Oy' , à 45° de l'analyseur. Pour cela, deux méthodes sont possibles :

1. Rechercher l'extinction en tournant le modulateur autour de son axe. Puis à partir de l'extinction tourner de 45° le modulateur autour de son axe.
2. Ne pas toucher au modulateur (pour ne pas le dérégler). Rechercher l'extinction en tournant la lame demi-onde et l'analyseur. Ensuite, éteindre l'alimentation HT et tourner l'analyseur de 45° , puis tourner la lame demi-onde pour retrouver à nouveau l'extinction.

Q1 Expliquer clairement et commenter la méthode de réglage que vous avez choisie à votre encadrant.e.

↪ Vérifier visuellement la variation d'intensité obtenue en faisant varier la tension appliquée à l'électro-optique.

2.3 Etude de la caractéristique du flux transmis en fonction de la tension appliquée

↪ ◇ Mesurer l'évolution de la puissance de sortie en fonction de la tension appliquée au modulateur pour des tensions comprises entre 0 V et 3000 V.

↪ ◇ Evaluer le taux de modulation obtenu, défini par :

$$\eta = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}}$$

↪ ◇ Mesurer la tension correspondant à la transmission maximum. Pour cette tension, préciser l'état de polarisation produit par le modulateur. Expliquer pourquoi cette tension est appelée V_π .

Q2 ◇ Dédire de la valeur de V_π mesurée la valeur de r_{63} , en tenant compte du fait que le modulateur étudié comporte deux cristaux identiques en série, soumis au même champ E_z , dont les déphasages s'ajoutent.

2.4 Etude de l'état de la polarisation produit par le cristal

Q3 ◇ Pour quelle valeur de la tension appliquée le cristal électro-optique est-il équivalent à une lame $\lambda/2$? à une lame $\lambda/4$?

↪ ◇ Vérifier pour ces deux valeurs, en expliquant la méthode, l'état de polarisation à la sortie du cristal.

↪ ◇ Appliquer une tension de 700 V puis de 1800 V au cristal. Dans chaque cas, déterminer l'état de polarisation obtenu. Déterminer la position du grand axe et du petit axe de l'ellipse et mesurer son ellipticité par une mesure photométrique.

Q4 ◇ Déduire le déphasage introduit par le cristal et vérifier que le déphasage mesuré est cohérent avec les valeurs attendues.

Présentez les résultats obtenus sous forme d'un oral (noté sur 5 points) à l'enseignant et responsable.

2.5 Utilisation de l'électro-optique comme modulateur linéaire de flux lumineux

Q5 ◇ Autour de quel point de fonctionnement de la caractéristique obtenue précédemment l'électro-optique peut-il être utilisé comme un modulateur linéaire de flux ?

On remplace l'alimentation HT, qui n'est pas modulable, par un Générateur Basses Fréquences. *En pratique : un petit boîtier bleu d'adaptation BT -> HT permet d'envoyer la tension délivrée par le GBF directement sur le modulateur.*

Pour se placer dans la zone linéaire de la caractéristique, on peut placer une lame d'onde que l'on ajoute juste avant le modulateur.

Q6 ◇ Quelle lame d'onde a un effet équivalent à la haute tension précédente ? Comment doit-on régler cet élément pour se placer autour du point de fonctionnement choisi dans la partie précédente ?

Q7 Expliquer comment effectuer le réglage.

↪ ◇ Evaluer l'ordre de grandeur de la bande passante du montage en observant le signal à l'oscilloscope.

↪ Utiliser ce montage pour transmettre par le faisceau laser une modulation dans la bande audio d'un signal provenant du lecteur de cassettes de la minichaîne.

Q8 Commenter et interpréter. Faites valider votre montage par l'enseignant-e.

↪ ◇ Mesurer le taux de modulation obtenu pour une tension de 20 V crête à crête appliquée au cristal. Vérifier que ce taux de modulation est cohérent avec la caractéristique obtenue précédemment.

Q9 ◇ Commenter l'évolution de la modulation du flux lorsque l'on modifie l'orientation de la lame d'onde.

2.6 S'il vous reste du temps et que votre curiosité vous y invite

Retirer la lame d'onde. Observer, discuter et analyser la distribution d'intensité obtenue en sortie avec le modulateur hors tension pour la polarisation incidente et l'analyseur croisés (croix noire observée en début de séance).

Annexes

Sommaire

1	Paramètres d'une polarisation elliptique	43
2	Mesure de l'ellipticité à l'aide d'une lame quart d'onde	47
3	Echelle des teintes de Newton	49

1 Paramètres d'une polarisation elliptique

1.1 Définitions

La figure 4.3 indique les grandeurs caractéristiques d'une polarisation elliptique.

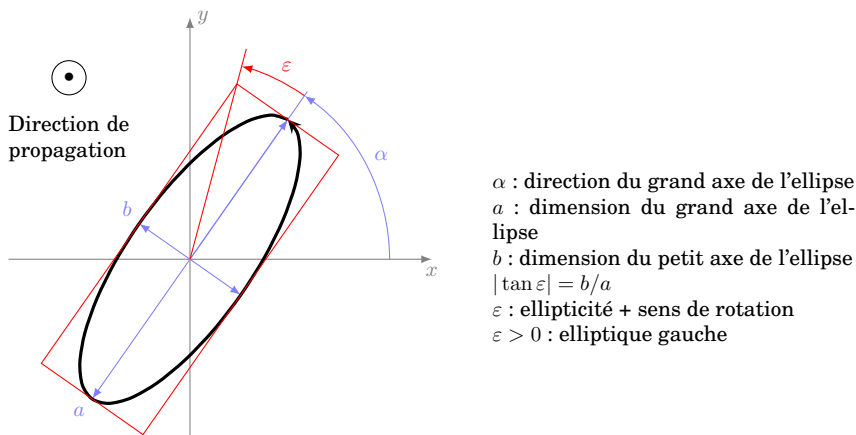


FIGURE 4.3 – Paramètres d'une polarisation elliptique

1.2 Sens de rotation et déphasages

La projection du champ électrique dans la direction du grand axe E_a et celle selon le grand axe E_b sont déphasées de $\pm 90^\circ$. Selon le signe de ce déphasage, on obtient une polarisation elliptique droite ou gauche, comme illustré sur la figure 4.4

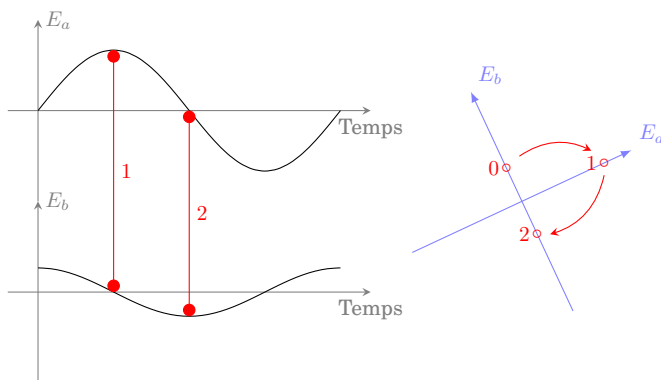


FIGURE 4.4 – Illustration du lien entre déphasage et sens de rotation de l'ellipse

1.3 Polarisation elliptique en sortie d'une lame quart d'onde

On crée en particulier une polarisation elliptique si on place une lame quart d'onde sur le chemin d'une onde polarisée rectilignement.

L'ellipticité est alors égale à l'angle entre la direction de la polarisation incidente et l'axe neutre de la lame $\lambda/4$. Comme sur le schéma de la figure 4.5, l'ellipse reste inscrite dans un rectangle dont une diagonale est la direction de la polarisation entrante.

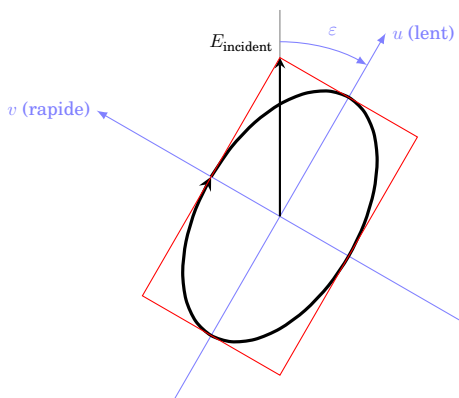


FIGURE 4.5 – Ellipse obtenue en sortie d’une lame quart d’onde pour une polarisation incidente rectiligne. L’ellipticité est égale à l’angle entre la direction de la polarisation incidente et la direction de l’axe neutre de la lame quart d’onde.

Les axes de l’ellipses sont donc orientés dans la direction des axes neutres de la lame quart d’onde.

1.4 Polarisation elliptique en sortie d’une lame biréfringente quelconque à 45°

Pour une lame biréfringente quelconque, le cas particulier où les axes neutres sont à 45° de la direction de la polarisation incidente est souvent rencontré. Les axes de l’ellipses sont alors dans la direction de la polarisation rectiligne incidente.

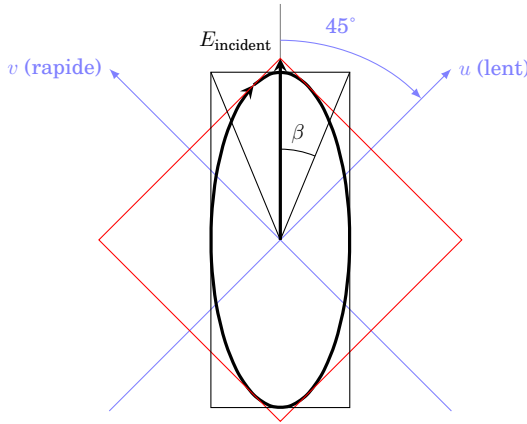


FIGURE 4.6 – Ellipse obtenu en sortie d’une lame biréfringente pour une polarisation incidente rectiligne.

On appelle β l’angle entre une diagonale du rectangle dans lequel est inscrite l’ellipse décrite par l’extrémité du vecteur champ électrique de cette polarisation elliptique et l’axe de la polarisation linéaire incidente (voir schéma de la figure 4.6). β vérifie la relation suivante :

$$\tan |\beta| = \left| \tan \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right| \quad \beta < \pi/2$$

où φ est le déphasage apporté par la lame (entre la projection du champ selon l’axe rapide et la projection selon l’axe lent).

Sur le schéma précédent, β est strictement équivalent à l’ellipticité ε . Mais attention ! Il y a aussi des cas où $\beta > 45^\circ$. Dans ce cas, le grand axe de l’ellipse est perpendiculaire à la direction incidente. On a toujours $\tan |\beta| = \left| \tan \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right|$ mais $\varepsilon = 90^\circ - \beta$. Pour mesurer φ , il suffit de mesurer β . On peut aussi déduire de β l’ellipticité de l’état de polarisation émergent.

Attention : si la polarisation incidente n’est pas à 45° des axes de la lame, attention la direction et l’ellipticité ne sont plus facilement obtenues.

Sur la figure 4.7 suivante, le déphasage introduit par la lame varie de 0 à 180° par pas de 15° . L’ellipticité de la polarisation résultante est telle que l’ellipse est inscrite dans un carré ($E_u = E_v$) et :

- les axes de l’ellipse sont fixes à 90°
- l’ellipticité ε est égale $\pm\varphi/2$ (modulo $\pi/2$)

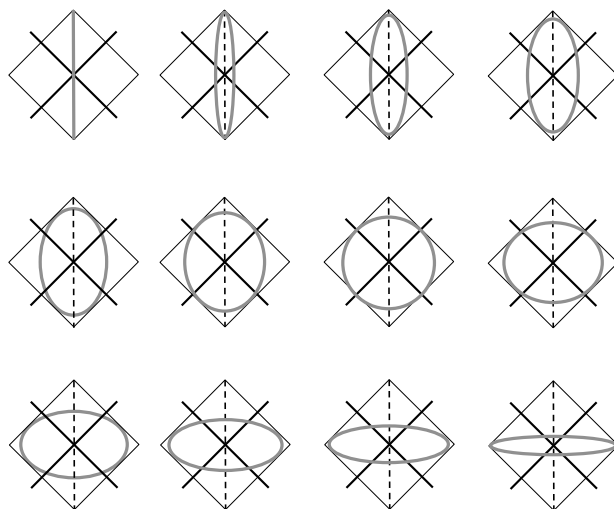


FIGURE 4.7 – Ellipses obtenues en fonction du déphasage φ introduit par une lame biréfringente. La polarisation incidente est représentée par un trait gras gris, pour un déphasage nul, puis par une ligne pointillée. Son orientation est à 45° des axes neutres de la lame, représentés en traits gras noirs.

2 Mesure de l'ellipticité à l'aide d'une lame quart d'onde

On procède en deux étapes :

1. On détermine la direction du petit axe de l'ellipse à l'aide d'un analyseur.
2. On ajoute une lame quart d'onde devant l'analyseur avec son axe lent perpendiculaire au petit axe de l'ellipse précédente (et donc perpendiculaire à l'analyseur). On crée ainsi une polarisation rectiligne faisant un angle ε avec l'axe lent de la lame quart d'onde. On retrouve donc une extinction en tournant l'analyseur d'un angle ε . Dans ce cas, l'angle de rotation de l'analyseur est inférieur ou égal à 45° .

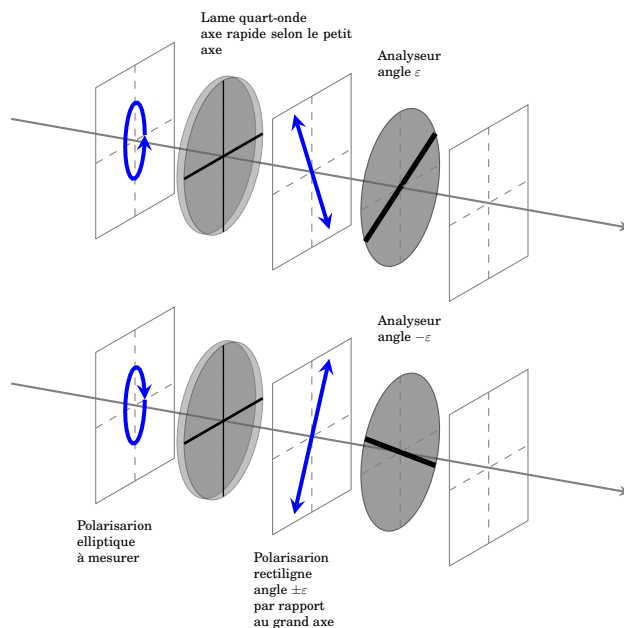


FIGURE 4.8 – Illustration de la méthode « de la lame quart d'onde » pour mesurer les caractéristique d'une polarisation elliptique gauche (en haut) ou droite (en bas)

3 Echelle des teintes de Newton

δ en nanomètres différence de marche	échelle à centre blanc $I = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi \delta}{\lambda} \right)$	échelle à centre noir $I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi \delta}{\lambda} \right)$
0	blanc	noir
40	blanc	gris de fer
97	blanc jaunâtre	gris lavande
158	blanc jaunâtre	bleu gris
218	brun jaune	gris plus clair
234	brun	blanc verdâtre
259	rouge clair	blanc
267	rouge carmin	blanc jaunâtre
275	brun rouge sombre	jaune paille pâle
281	violet sombre	jaune paille
306	indigo	jaune clair
332	bleu	jaune vif
430	bleu gris	jaune brun
505	vert bleuâtre	orangé rougeâtre
536	vert pâle	rouge chaud
551	vert jaunâtre	rouge plus foncé
565	vert plus clair	pourpre
575	jaune verdâtre	violet
589	jaune d'or	indigo
664	orangé	bleu de ciel
728	orangé brunâtre	bleu verdâtre
747	rouge carmin clair	vert
826	pourpre	vert plus clair
843	pourpre violacé	vert jaunâtre
866	violet	jaune verdâtre
910	indigo	jaune pur
948	bleu sombre	orangé
998	bleu verdâtre	orangé rougeâtre vif
1101	vert	rouge violacé foncé
1128	vert jaunâtre	violet bleuâtre clair
1151	jaune sale	indigo
1258	couleur chair	bleu (teinte verdâtre)
1334	rouge brun	vert de mer
1376	violet	vert brillant
1426	bleu violacé grisâtre	jaune verdâtre
1495	bleu verdâtre	rose (nuance claire)
1534	bleu vert	rouge carmin
1621	vert terne	carmin pourpre
1658	vert jaunâtre	gris violacé
1682	jaune verdâtre	bleu gris
1711	jaune gris	vert de mer
1744	mauve gris rouge	vert bleuâtre
1811	carmin	beau vert
1927	gris rouge	gris vert
2007	bleu gris	gris presque blanc
2048	vert	rouge clair
2338	rose pâle	vert bleu pâle
2668	vert bleu pâle	rose pâle

