



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

POLARISATION I

2024-2025



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

Table des matières

1	Obtention de lumière polarisée	3
1.1	[1P] Polarisation rectiligne	3
1.2	Polarisation elliptique	5
2	Analyse de l'état de polarisation d'une lumière	8
2.1	Méthode générale	8
2.2	[1P] Analyse de la lumière naturelle	8
2.3	Analyse d'une polarisation rectiligne	8
2.4	[1P] Analyse d'une polarisation elliptique	9
2.5	[2P] Cas d'une polarisation rectiligne partielle	10
3	[1P] Polarisation d'une onde centimétrique	10

Bibliographie :

FRANCON : *Vibrations lumineuses*, p. 240 à 256

MATHIEU : *Optique*, tome I, p. 93 à 121 et 261 à 283

BRUHAT-KASTLER : *Optique*, § 170 et suivants, § 242 et suivants

PEREZ : *Optique*

SEXTANT : *Optique expérimentale*

HECHT : *Optics* (2^{eme} édition), chapitre 8

DUFFAIT : *Expériences d'optique*, Agrég. de Sc. Physiques (2^{eme} édition)

Dunod, Tout-en-un PC/PC*, édition des programmes de 2004, chapitres 17 et 18

HOUARD "Optique"

Pour pouvoir profiter pleinement du temps accordé à ce TP, il est important d'avoir bien compris les notions suivantes :

- vibration lumineuse rectiligne, elliptique, circulaire ; totale ou partielle ; droite ou gauche (on rappelle que la règle adoptée est celle-ci : une vibration est droite si l'observateur qui la *reçoit* la voit tourner dans le sens des aiguilles d'une montre) ; degré (ou taux) de polarisation.
- axe optique, lignes neutres d'une lame cristalline, quartz parallèle ($\parallel$) et quartz perpendiculaire ($\perp$).
- polariseur, analyseur, lame onde λ , demi-onde $\lambda/2$, quart d'onde $\lambda/4$.

Nous avons choisi ici de séparer les paragraphes « production » et « analyse » d'une lumière polarisée, mais pour un montage, une synthèse peut être nécessaire.

Dans toutes les expériences décrites ici, P et A sont des polariseurs (en utilisation polariseur ou analyseur), D un diaphragme, E un écran et L une lentille.

1 Obtention de lumière polarisée

1.1 [1P] Polarisation rectiligne

Obtenue par dichroïsme : polaroïds Un matériau est dit «dichroïque» si son absorption dépend de la polarisation de l'onde incidente.

Montage :

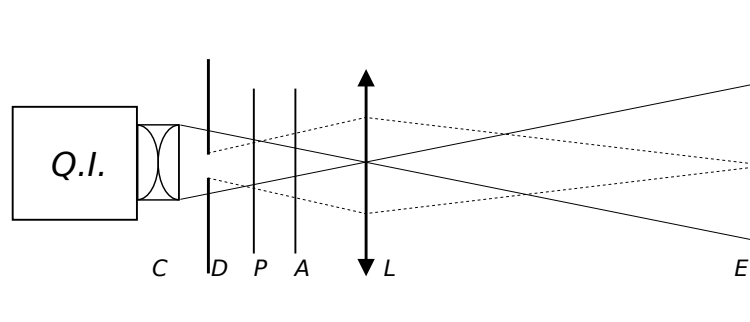


FIGURE 1 –

Faire l'image du trou D sur l'écran E avec la lentille L. Maintenir P fixe et vérifier l'extinction pour P et A croisés.

Remarque : En toute rigueur, on devrait utiliser un faisceau parallèle et ne contenant pas d'infrarouge (on dispose dans la collection de filtres antithermiques qui coupent l'infrarouge) car les polariseurs dont on dispose fonctionnent dans le visible mais très mal dans l'IR. Pour une expérience qualitative *visuelle* de cours, un faisceau quasi parallèle de lumière blanche convient. En revanche, pour une expérience quantitative et dans le cas de l'utilisation d'un capteur sensible aux infrarouges comme la photodiode, l'utilisation du filtre antithermique est indispensable.

Obtenue par réflexion vitreuse (interface air/diélectrique) On utilise un miroir de verre noir, qui consiste en un diélectrique (du verre) dont la face arrière est peinte en noir et absorbe la lumière : ainsi, seule l'interface air/verre de la face avant est réfléchissante. Pour le réglage et l'utilisation, *se reporter au mode d'emploi*.

Envoyer un faisceau parallèle de lumière blanche sur le miroir M_1 et étudier la polarisation du faisceau réfléchi à l'aide d'un analyseur.

Pour une rotation complète de 360° de l'analyseur, l'intensité lumineuse présente 2 maxima et 2 minima placés à angle droit. Si l'incidence sur M_1 est l'incidence brewstérienne ($i = i_B$ avec $\tan i_B = n$, indice du verre), les minima sont nuls ; on a affaire à de la polarisation rectiligne totale. Ici $i_B \approx 56^\circ$. Si $i \neq i_B$, la polarisation est *rectiligne partielle*, il subsiste, en plus de la vibration rectiligne précédente, une fraction de lumière naturelle. Dans les 2 cas, vérifier que la vibration rectiligne obtenue est perpendiculaire au plan d'incidence sur M_1 (plan contenant le rayon incident et la normale à M_1).

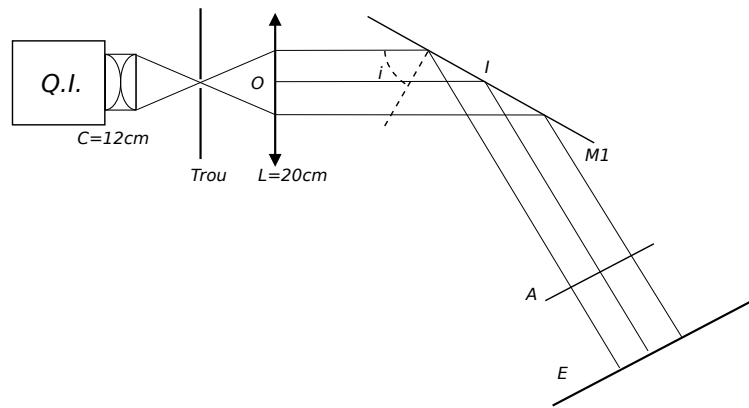


FIGURE 2 –

Application : Contrôle rapide d'un polariseur. Observer l'image d'une lampe réfléchi sur une surface brillante diélectrique (peinture, bois verni, etc...) sous une incidence de l'ordre de 45° , à travers le polariseur à contrôler. Repérer l'angle du polariseur qui donne un minimum de luminosité. Interpréter. Ceci permet de voir si l'index du polariseur repère la transmission ou l'extinction, et si le polariseur n'a pas glissé par rapport à l'index.

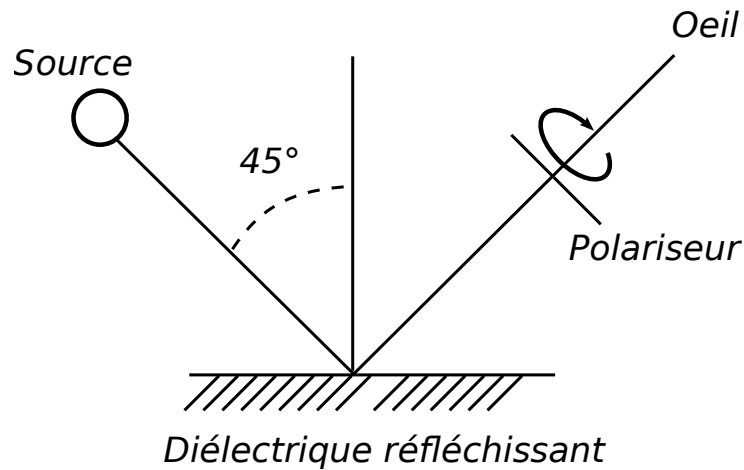


FIGURE 3 –

Obtenue par diffusion Lors de la diffusion de lumière non polarisée, la lumière réémise dans le plan perpendiculaire à la direction du faisceau incident est polarisée linéairement.

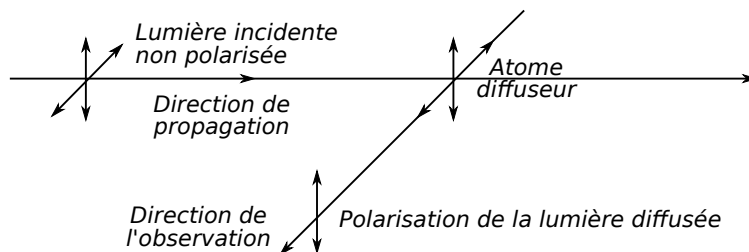


FIGURE 4 –

Par beau temps, observer le ciel avec un polaroïd : il y a une extinction très nette pour une direction d'observation perpendiculaire aux rayons solaires (en déduire le rôle des filtres polariseurs sur les appareils photo).

Expérience :

On opère avec une cuve parallélépipédique en verre. Dans la cuve pleine d'eau ajouter une pincée de lait en poudre (pour le début de l'expérience il en faut très peu, l'eau doit être à peine diffusante).

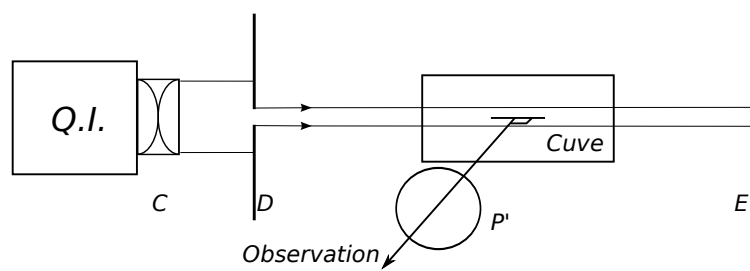


FIGURE 5 –

Montrer l'état de la lumière diffusée à 90° avec un polariseur P' de grande taille placé contre la cuve.

On place un polariseur P sur le faisceau incident et on observe toujours à 90° à travers P' . Qu'observe-t-on en tournant P ?

Revenir à l'expérience initiale, ajouter suffisamment de lait pour que l'eau deviennent blanchâtre, mais qu'on puisse encore distinguer les objets vus à travers. Vérifier à travers P' que le degré de polarisation (c'est-à-dire le contraste entre les minima et maxima d'intensité) diminue. On l'interprète par la présence de diffusion multiple, la lumière émise par la cuve dans une direction donnée pouvant avoir été diffusée plusieurs fois successivement dans la cuve, ce qui fait perdre le caractère ordonnée de l'émission pour ses propriétés de polarisation.

Enfin, observer sur l'écran E le changement de couleur du faisceau transmis. Ce phénomène est dû à la diffusion plus importante des petites longueurs d'onde, typique de la diffusion Rayleigh. La lumière diffusée est légèrement bleue, est la lumière transmise à travers la cuve prend une coloration rougeâtre. On retrouve les phénomènes qui donne le bleu du ciel, ainsi que le rouge d'un coucher de soleil. Cet effet, déjà présent quand il y a peu de lait en poudre dans la cuve, et d'autant plus visible quand la concentration augmente.

1.2 Polarisation elliptique

Rappels sur les lames cristallines (se référer à la bibliographie pour une introduction plus complète) :

Nous disposons de deux sortes de lames à faces parallèles de quartz :

quartz $\parallel$: l'axe optique est parallèle aux faces de la lame.

quartz $\perp$: l'axe optique est perpendiculaire aux faces de la lame.

Attention : Pour des lames biréfringentes, on définit l'axe optique comme l'axe d'un cristal uniaxe qui a un indice optique différent de ses deux axes. Cet axe optique de biréfringence est différent de l'axe optique géométrique utilisé pour décrire un montage optique. Lorsque c'est nécessaire, on s'assurera de bien séparer ces deux notions.

Si on attaque une lame de quartz parallèle en incidence normale, la vitesse de propagation n'est pas la même pour une onde polarisée parallèlement à l'axe optique (indice n_e) et pour une onde polarisée perpendiculairement à l'axe optique (indice n_o). C'est le phénomène de biréfringence, qui donne lieu, en incidence non normale, à l'apparition de deux rayons réfractés (faire un schéma).

Dans le cas d'un quartz $\perp$, la biréfringence n'apparaît pas en incidence normale (ces lames seront utilisées pour l'étude de la polarisation rotatoire dans le TP Polarisation II).

Nous disposons aussi de lames de spath $\parallel$ (milieu uniaxe ne présentant pas de polarisation rotatoire).

Pour le quartz $\Delta n = n_e - n_o \approx 1 \times 10^{-2}$. Pour le spath, $n_e - n_o \approx -20 \times 10^{-2}$.

Il existe d'autre part des lames de mica, milieu biaxe sans polarisation rotatoire qui se comporte dans les géométries utilisées comme un milieu uniaxe.

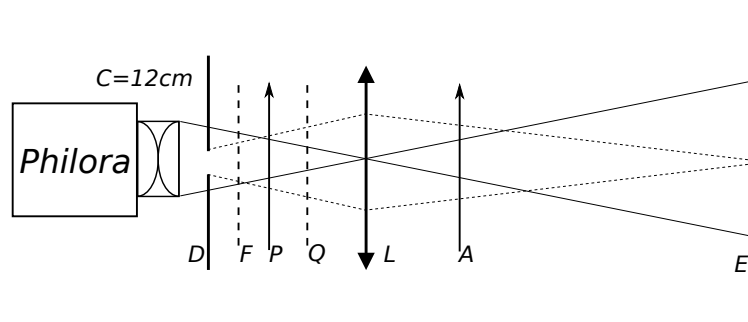


FIGURE 6 –

[1P] Obtenue par biréfringence **Lame mince quelconque**

Attention, il faut utiliser une lame **mince**, c'est-à-dire qui introduit une différence de marche $e\Delta n$ de l'ordre de λ . Dans le cas d'une lame plus épaisse (par exemple $e\Delta n \approx 50\lambda$ autrement dit $e \approx 2$ mm pour du quartz en lumière bleue) on a, avec un filtre interférentiel de bande passante typique $\delta\lambda \approx \lambda/50$ ($\lambda \approx 500$ nm et $\delta\lambda \approx 10$ nm) une différence de marche qui varie d'environ λ d'un bord à l'autre de la bande passante du filtre, ce qui ne permet pas d'avoir une lumière dans un état de polarisation bien défini.

Cependant, même avec une lame mince, il est recommandé d'**utiliser une lampe spectrale** (largeur spectrale réduite à 0,5 nm environ et meilleure luminosité). Le filtre interférentiel (F) permet de sélectionner une seule des raies du mercure (la raie verte).

En l'absence de la lame Q, croiser P et A.

Introduire Q, lame cristalline choisie en fonction des informations qui précèdent, entre les polariseurs croisés. En tournant Q, montrer qu'on obtient quatre positions pour lesquelles l'extinction est rétablie. On fait ainsi apparaître les lignes neutres de la lame.

Dans une position de Q où il n'y pas d'extinction, tourner l'analyseur pour vérifier que celle-ci ne réapparaît pas pour une autre position de A. En sortie de la lame, la lumière n'est donc plus polarisée linéairement.

Interprétation : désignons par X et Y les directions des lignes neutres de la lame qui sont par définition la direction de l'axe optique (Y) et la direction perpendiculaire (X).

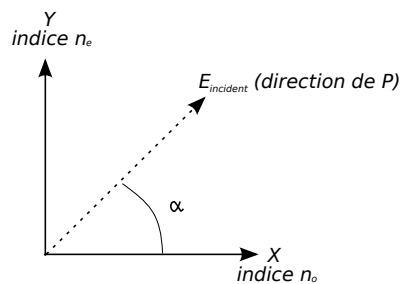


FIGURE 7 –

On décompose la vibration incidente sur les lignes neutres :

$$\vec{E}_{\text{incident}} = E_0 \cos \alpha \cos \omega t \vec{e}_X + E_0 \sin \alpha \cos \omega t \vec{e}_Y \quad (1)$$

où E_0 est l'amplitude de $\vec{E}_{\text{incident}}$. Après traversée de la lame, on a :

$$\vec{E}_{\text{emergent}} = E_0 \cos \alpha \cos \omega t \vec{e}_X + E_0 \sin \alpha \cos(\omega t - \Delta\varphi) \vec{e}_Y \quad (2)$$

avec $\Delta\varphi = 2\pi e\Delta n/\lambda$ le retard de phase entre l'axe ordinaire et l'axe extra-ordinaire et où e est l'épaisseur de la lame. La vibration résultante est en général polarisée elliptiquement.

Si $\sin \alpha = 0$ ou $\cos \alpha = 0$, $\vec{E}_{\text{incident}}$ est parallèle à l'une des lignes neutres, et la polarisation est alors inchangée. On a donc quatre positions de Q pour lesquelles l'extinction est rétablie.

Lames d'épaisseur particulière

Des lames spécialement dédiées sont disponibles, elles sont déjà montées sur un support et calibrées, elles ne sont pas dans le coffret en bois.

- Action d'une lame $\lambda/2$ sur une vibration rectiligne :

Dans ce cas, la lame introduit une différence de marche $(n_e - n_o)e$ égale à $\lambda/2$ et donc $\Delta\varphi = \pi$. La vibration émergente est polarisée rectilignement dans une direction symétrique de celle de $\vec{E}_{\text{incident}}$ par rapport aux lignes neutres :

$$\vec{E}_{\text{emergent}} = E_0 \cos \alpha \cos \omega t \vec{e}_X - E_0 \sin \alpha \cos \omega t \vec{e}_Y \quad (3)$$

Travailler en lumière monochromatique en choisissant un filtre adapté à la lame utilisée. 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 :

Ici, $\Delta\varphi = \pi/2$. La vibration émergente est polarisée elliptiquement et les axes de l'ellipse sont les lignes neutres de la lame.

$$\vec{E}_{\text{emergent}} = E_0 \cos \alpha \cos \omega t \vec{e}_X + E_0 \sin \alpha \sin \omega t \vec{e}_Y \quad (4)$$

Pour $\alpha = 45^\circ$, la vibration émergente est polarisée circulairement.

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.

Tourner l'analyseur et vérifier que l'intensité lumineuse est constante. On vérifiera au III que la vibration obtenue est polarisée circulairement.

N.B. : On retiendra qu'une lame mince donnée n'est $\lambda/2$ ou $\lambda/4$ que pour une longueur d'onde particulière. Pour obtenir un déphasage constant sur tout un intervalle de longueurs d'ondes, il faut utiliser une *lame d'onde achromatique* constituée d'une association de plusieurs matériaux biréfringents, nous n'en disposons pas.

[AP] Obtenue par réflexion métallique Sous incidence très oblique (l'optimum est obtenu pour un angle incidence d'environ 70°) sur un *miroir aluminé sur sa face avant*, un faisceau polarisé rectilignement avec un angle de polarisation de 45° par rapport au plan d'incidence, acquiert une polarisation elliptique. L'ellipticité obtenue est de l'ordre de 15° (voir Bruhat : *Optique*, chapitre XVIII).

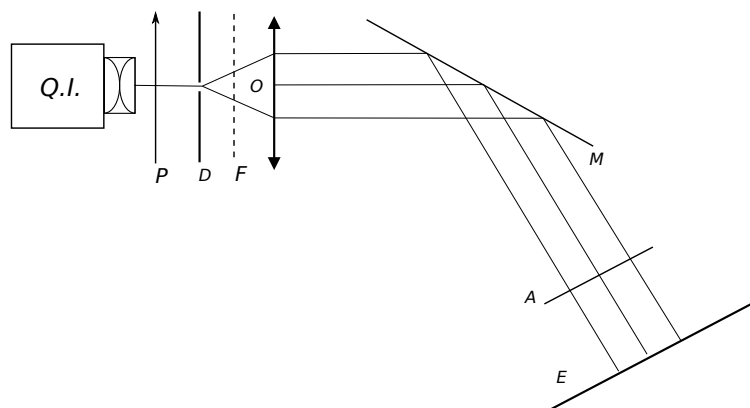


FIGURE 8 –

Tourner l'analyseur pour vérifier qu'il n'y a pas d'extinction. Notez les directions des extrema d'éclairement.

N.B. : une analyse quantitative de l'état de polarisation de l'onde réfléchie permet de remonter à l'indice optique complexe du métal.

2 Analyse de l'état de polarisation d'une lumière

2.1 Méthode générale

L'analyse complète d'une vibration lumineuse nécessite d'abord de déterminer s'il s'agit de lumière naturelle ou polarisée (totalement ou partiellement). Dans ce dernier cas, il faut déterminer le taux de polarisation. Si la lumière est polarisée, il faut déterminer si cette polarisation est rectiligne (et dans ce cas déterminer sa direction), circulaire ou elliptique (dans ces deux derniers cas, il faut déterminer l'orientation des axes et le sens droit ou gauche. Pour une polarisation elliptique, il faut enfin déterminer le rapport des deux axes de l'ellipse).

En présence d'une polarisation inconnue on doit procéder comme indiqué dans le schéma de la dernière page avec les notations ci-dessous (voir également Duffait, Chap. IX-3) :

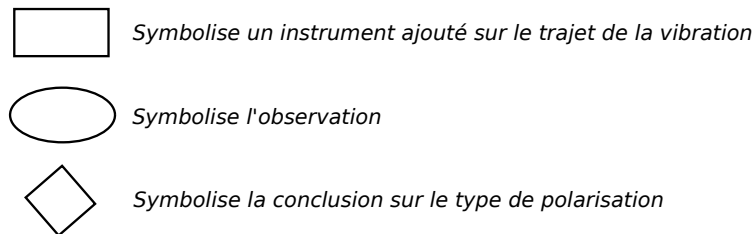


FIGURE 9 –

Par la suite, on étudie plus spécifiquement plusieurs types de polarisation

2.2 [1P] Analyse de la lumière naturelle

On peut utiliser une lampe Quartz-Iode.

Symétrie de révolution Placer un polariseur sur le trajet du faisceau et montrer qu'en le faisant tourner, l'intensité reste constante. A ce stade la vibration est soit non polarisée, soit de polarisation circulaire totale ou partielle.

Absence de polarisation Ajouter avant le polariseur une lame $\lambda/4$ avec un filtre adapté et vérifier que l'intensité obtenue en faisant tourner le polariseur est toujours constante.

La lumière naturelle n'est donc pas polarisée (pour l'interprétation, voir le paragraphe III).

2.3 Analyse d'une polarisation rectiligne

[1P] Analyseur à extinction, type polaroïd ou nicol Effectuer le montage suivant, à l'aide d'une lampe à vapeurs de mercure.

La détermination de l'extinction se fera soit visuellement, soit en utilisant une photodiode auto-alimentée¹. Évaluer l'incertitude sur la détermination de la direction de la polarisation rectiligne dans ces deux cas.

Dans la suite, on pourra distinguer les extinctions ou les minima à l'œil nu, c'est suffisant dans le cadre de ce TP. Il est cependant toujours possible d'utiliser des photodiodes, notamment dans le cadre d'un montage. Dans le cas d'une détermination visuelle directe, il faut systématiquement repérer le minimum de luminosité, et pas le maximum, car l'œil y est plus sensible².

1. Prendre l'habitude de mettre systématiquement un filtre anti-thermique dans ce cas, on rappelle que les analyseurs ne filtrent pas les infrarouges.

2. L'œil est un récepteur dont la sensibilité est approximativement logarithmique.

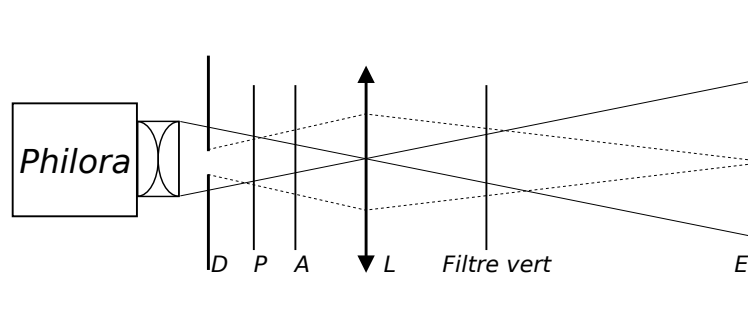


FIGURE 10 –

[1P] Polariseur tournant et pointé précis de la direction de polarisation Analyseur à pénombre : L'instrument "traditionnel" destiné à faire des pointés précis de la direction absolue (c'est-à-dire par rapport à un repère du laboratoire) est l'analyseur à pénombre. Il n'est plus très utilisé aujourd'hui. Pour sa description voir Bruhat § 278 et suivants.

Polariseur tournant : Ref : Sextant p. 301 et suivantes.

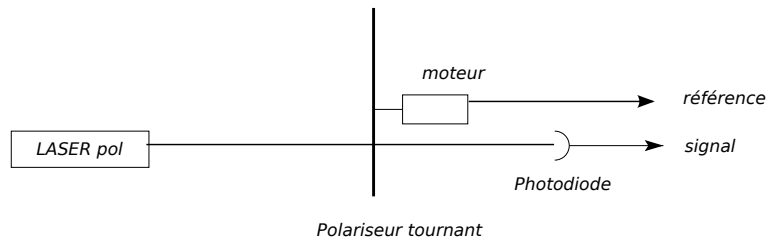


FIGURE 11 –

Un polariseur de type polaroïd a été monté sur le moteur d'un hacheur optique. Une petite languette de scotch noir est collée sur le bord du disque dans la direction de l'axe absorbant du polariseur. Son passage dans la fourche optique permet au boîtier du hacheur de fournir une tension de référence (sortie « reference out ») dont le zéro correspond au passage de l'axe absorbant dans la direction (généralement) verticale. On notera que la taille de cette languette limite déjà la précision du pointé.

Envoyer sur ce polariseur tournant le faisceau d'un laser polarisé. Observer l'évolution temporelle de l'intensité émergente avec une photodiode et un oscilloscope numérique.

Loi de Malus : Faire une acquisition de ce signal et l'ajuster par une sinusoïde. Commenter en particulier la période et la valeur moyenne. Pourquoi la loi de Malus illustre-t-elle le caractère vectoriel de la lumière ?

Pointé d'une direction de polarisation : Mesurer la phase du signal par rapport au signal de référence. En déduire la direction de polarisation. Quelle précision peut-on attendre pour un tel pointé *absolu* de la direction de polarisation ? Introduire une lame $\lambda/2$ avant le polariseur tournant. Constaté que la polarisation reste rectiligne. Tourner cette lame d'un angle arbitraire. Déduire de la courbe lue à l'oscilloscope la rotation de la direction de polarisation induite. Conclure. Quelle précision peut-on attendre de la méthode du polariseur tournant pour des pointés *relatifs* de direction de polarisation ?

2.4 [1P] Analyse d'une polarisation elliptique

Produire un faisceau de lumière polarisée elliptiquement par l'une des méthodes proposées au II.2.

Repérer avec un analyseur la direction de l'intensité minimale (petit axe de l'ellipse), puis ôter l'analyseur. Placer une lame quart d'onde (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 $\beta < \pi/4$.

L'angle β dont on a dû tourner l'analyseur permet d'avoir :

- le degré d'ellipticité de la vibration par $\tan \beta = b/a$ où a est le demi grand axe de l'ellipse (b est le demi petit axe)
- le sens de rotation de la vibration (opposé au sens de rotation de l'analyseur)

Il faut savoir faire les calculs qui permettent de trouver ces résultats.

Polariseur tournant : Envoyer la lumière polarisée elliptiquement sur le polariseur tournant décrit au paragraphe précédent. Comment déduire le degré d'ellipticité de la courbe obtenue à l'oscilloscope ?

2.5 [2P] Cas d'une polarisation rectiligne partielle

Le moyen de production le plus simple consiste à utiliser la réflexion vitreuse d'un faisceau non polarisé avec une incidence autre que l'incidence de Brewster (cf. II.1.b). On peut aussi utiliser une pile de glace par transmission (cf. II.1.b).

Pour l'analyser, repérer la direction de l'intensité minimale grâce à un analyseur, qu'on retire ensuite.

Placer une lame $\lambda/4$ (et donc travailler en lumière monochromatique) dont l'un des axes est parallèle à la direction repérée précédemment. Avec l'analyseur, vérifier que le minimum d'intensité (non nul) est parallèle à l'un des axes de la lame. En déduire que la vibration est rectiligne partielle (on ne propose pas d'aller plus loin dans l'analyse). Qu'aurait-on observé si la vibration obtenue avait été elliptique totale ? Et si elle avait été elliptique partielle ?

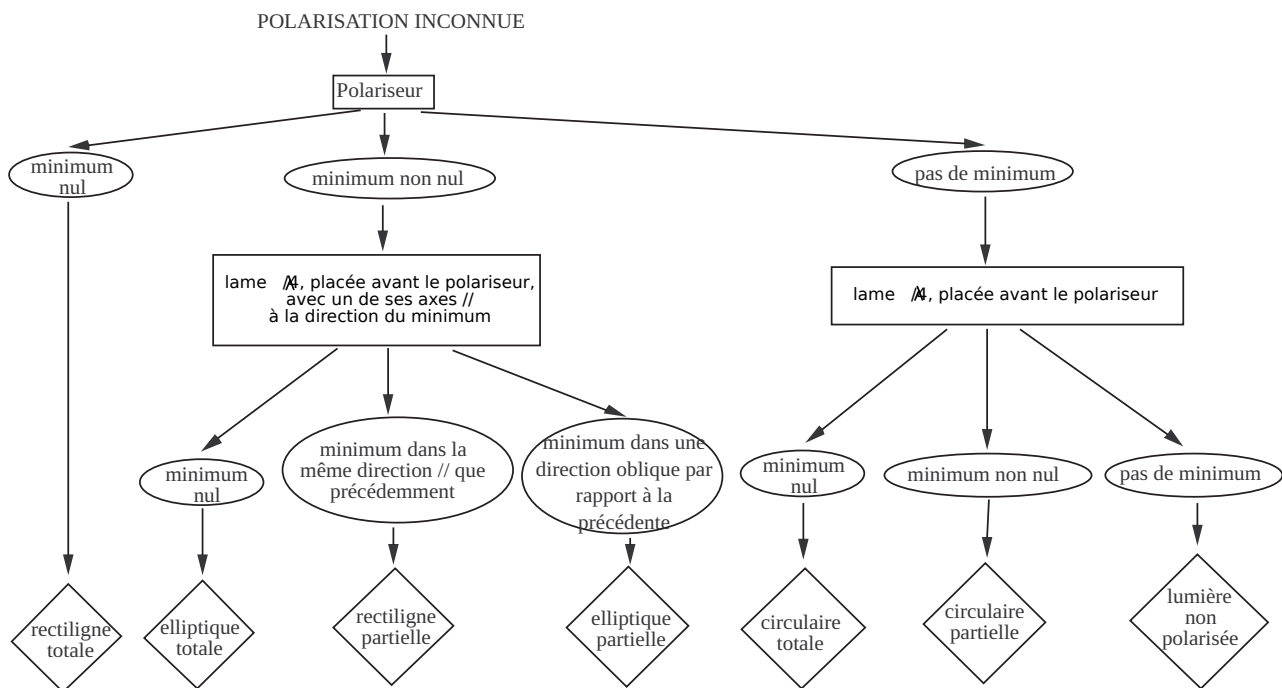


FIGURE 12 –

3 [1P] Polarisation d'une onde centimétrique

Jusqu'ici, nous avons étudié la polarisation des ondes électromagnétiques dans le domaine du visible. Mais cette notion n'est pas limitée à la lumière. Nous proposons donc ici de mettre en évidence la polarisation d'une onde électromagnétique centimétrique ($\lambda \approx 3$ cm soit $f \approx 10$ GHz), aussi appelée onde hyperfréquence. On utilise pour

cela un émetteur d'ondes centimétriques Jeulin (ENSP 3662, notice 419), sur lequel on a monté un cornet capable de tourner sur lui-même, associé à un rapporteur permettant de mesurer les rotations effectuées. Les hyperfréquences sont **dangereuses** a priori (c'est par exemple elles qui servent au chauffage dans les fours à micro-ondes), mais pas aux très faibles puissances utilisées ici. Il est quand même fortement déconseillé de regarder directement l'antenne d'émission en face.

L'émission de ces ondes se fait par une diode Gunn (dont le principe de fonctionnement n'est pas à connaître). Le récepteur est un cristal redresseur, lui aussi placé à l'extrémité d'un cornet. Le courant continu qu'il génère, proportionnel à la puissance associée à l'une des composantes du champ électrique reçu, peut être mesuré à l'aide d'un multimètre en mode milliampèremètre.

Pour plus de détails sur les ondes centimétriques et le matériel disponible à l'agrégation pour les étudier, on pourra se référer au TP Ondes II.

Protocole :

On commence par régler le boîtier émetteur. Pour ce faire, placer les cornets émetteur et récepteur l'un en face de l'autre, orientés de la même façon, à une distance d'au moins 50 centimètres. On veillera à limiter les réflexions parasites de l'onde, en plaçant les émetteur et récepteur suffisamment haut, et en dégagant les alentours de l'expérience. Moduler le boîtier émetteur par "CW" (pour "continuous wave"), et régler le bouton "tuning" de sorte à ce que le récepteur génère le plus grand courant possible.

Une fois ce réglage effectué, on place entre l'émetteur et le récepteur un polariseur à grille, qu'on prendra soin d'orienter de sorte à ce que le signal soit maximal quand les cornets émetteur et récepteur sont alignés.

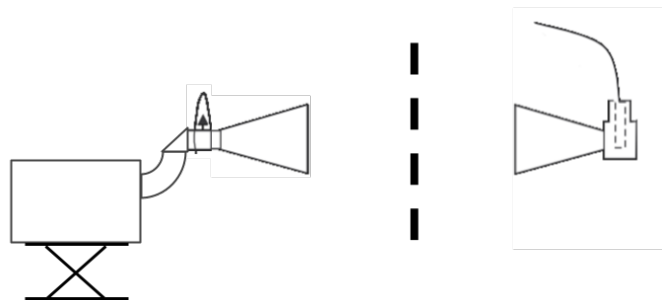


FIGURE 13 – Expérience de vérification de la loi de Malus pour les ondes centimétriques

Mesurer le courant généré par le récepteur pour différentes orientations du cornet émetteur, et remonter à la loi de Malus.

Remarque :

Puisque le récepteur n'est sensible qu'à une seule des composantes du champ électrique, on pourrait déjà considérer qu'il joue le rôle d'un polariseur. En soi, la mise en évidence de la loi de Malus peut déjà être faite en l'absence du polariseur à grille (le vérifier). Mais, pour que l'expérience soit plus visuelle et convaincante, on s'assure de ne sélectionner qu'une seule composante du champ électrique arrivant sur le récepteur en plaçant le polariseur à grille entre l'émetteur et le récepteur. Tant qu'il reste aligné avec le récepteur, il ne change rien au signal mesuré. On peut vérifier par contre que, si au lieu de tourner l'émetteur, on tourne le polariseur à grille, on aura un double effet de la loi de Malus (la puissance reçue évoluera en $\cos^4$ de l'angle entre le polariseur et l'émetteur, plutôt qu'en $\cos^2$).