

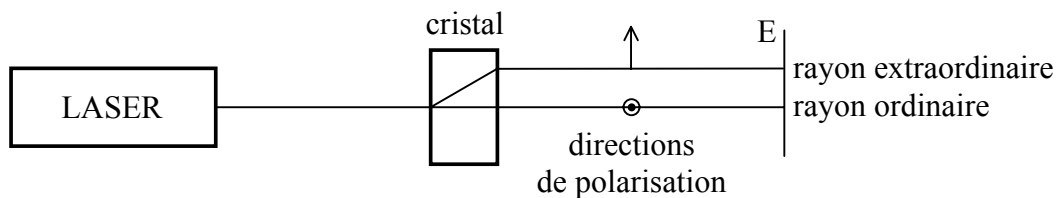
PRODUCTION ET ANALYSE D'UNE LUMIERE POLARISEE

Nous avons choisi dans ici de séparer les paragraphes "production" et "analyse" d'une lumière polarisée mais, pour un montage, une synthèse est sûrement nécessaire.

I PRODUCTION D'UNE LUMIERE POLARISEE RECTILIGNEMENT

1.1 Par biréfringence

On utilise un cristal biréfringent très épais (de plusieurs centimètres) qui est taillé avec un angle inconnu par rapport à l'axe optique fixé dans un dispositif avec molette tournante. Prendre un laser **non polarisé**.



Manipulation :

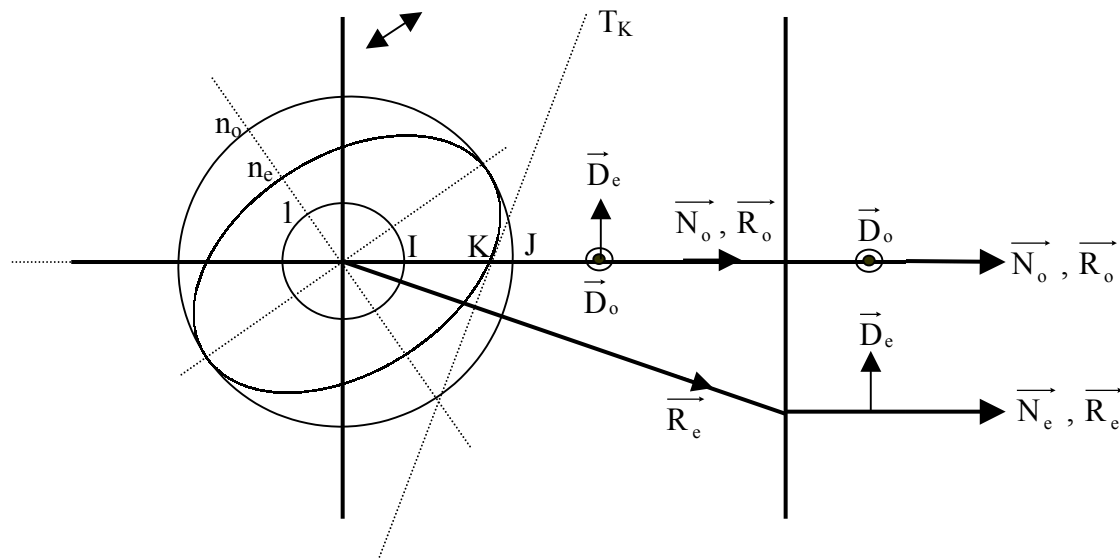
Repérez les rayons ordinaire et extraordinaire en faisant tourner la lame sur elle-même (le RO bouge un peu car la face d'entrée du cristal n'est pas parfaitement perpendiculaire au rayon laser).

En interposant un polariseur dichroïque, vérifiez que les vibrations sont bien rectilignes et perpendiculaires.

Explication :

Le cristal biréfringent est en calcite (CaCO_3) ; c'est un cristal uniaxe négatif ($n_o = 1,658$ et $n_e = 1,486$). On prend ce matériau car c'est l'un des plus biréfringent \rightarrow la séparation des faisceaux est plus nette.

La détermination des différents rayons dans et après la lame cristalline peut s'obtenir à l'aide du schéma classique suivant :



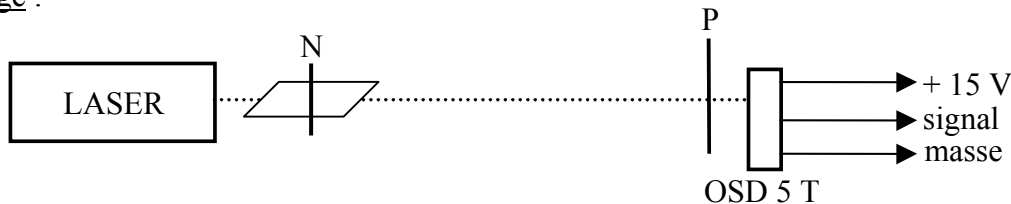
Remarque :

Avant l'apparition des Polaroids, on utilisait ces types de cristaux pour réaliser des polariseurs rectilignes (prisme de Nicol, Glan, Rochon, ... → pour plus de précision sur ce sujet, se reporter au Huard p. 195 ou au Bruhat § 294). Ces polariseurs sont encore utilisés si l'on souhaite obtenir une polarisation rectiligne la plus parfaite possible car c'est avec les cristaux biréfringents que l'on obtient les taux de polarisation les plus élevés (on se sert de cette propriété dans le paragraphe suivant).

1.2 Par dichroïsme

Le dichroïsme rectiligne est à la base du polariseur le plus couramment utilisé à l'heure actuelle : le Polaroid. Les Polaroids dichroïques modernes ont en effet des caractéristiques proches de celles des polariseurs rectilignes cristallins pour un coût beaucoup plus faible. On propose ici de mesurer les performances d'un polariseur dichroïque. Pour ce faire, il faut disposer d'un faisceau lumineux polarisé rectilignement avec un taux de polarisation supérieur à celui que peut fournir un polariseur dichroïque → on obtient un tel faisceau en utilisant un laser polarisé suivi d'un polariseur cristallin (on peut en mettre deux à suivre si l'on veut).

Montage :



Laser : Melles - Griot **polarisé rectilignement** allumé pendant **suffisamment longtemps** pour être stabilisé.

N : prisme de Nicol

P : polariseur Leybold collé contre la photodiode OSD 5 T (alimentez la photodiode avec une alimentation d'ampli. op.)

Sortie signal : le mesurer avec un voltmètre lumineux (Métrix ou Keithley).

Prévoir un drap noir.

Polarisation du faisceau incident :

Enlevez le polariseur P. Faire tourner le prisme de Nicol jusqu'à obtenir un signal maximum aux bornes de la photodiode → le sens passant du Nicol est alors aligné avec l'axe de polarisation du Laser. On peut à ce stade mesurer le signal avec et sans le Nicol pour en déduire (cf. Sextant p.264) le coefficient de transmission H_0 lorsqu'il est passant. On pourra le comparer avec celui du polaroid.

Mesures :

Sans Polaroid : Ajustez le potentiomètre de la photodiode pour avoir un signal maximum. Notez alors dans le noir le signal V_1 reçu par la photodiode.

Avec Polaroid : Recherchez dans un premier temps l'orientation du Polaroid donnant le signal le plus fort : P est alors parallèle à la vibration incidente. Notez au noir le signal V_2 reçu par la photodiode. Tournez ensuite le Polaroid pour avoir un signal minimum : P est alors perpendiculaire à la vibration incidente. Notez au noir le signal V_3 (vérifiez que le courant inverse d'obscurité de la photodiode est négligeable en la masquant avec le drap noir).

Exploitation :

On tire des mesures précédentes les coefficients de transmission en configuration croisée H_{90} et parallèle H_0 :

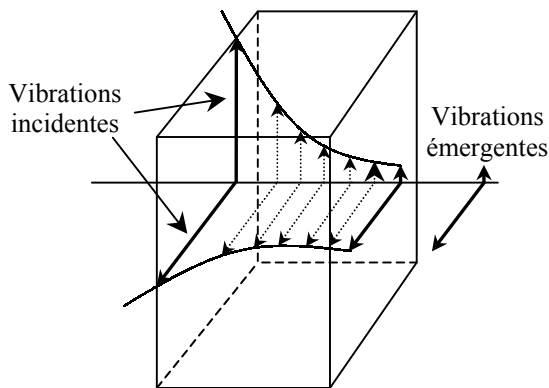
$$H_{90} = \frac{V_2}{V_1} \quad \text{et} \quad H_0 = \frac{V_3}{V_1}$$

Le Polaroid Leybold a un H_0 d'environ 60 % (ce qui est bon) et un H_{90} d'environ 3.10^{-4}

On peut éventuellement comparer ces performances avec un autre Polaroid ou vérifier la loi de Malus (cf. Sextant p. 265).

Explication :

Une substance dichroïque est biréfringente (\leftrightarrow 2 indices) mais, de plus, absorbe de manière très inégale les vibrations selon leur direction. Ces matériaux ont donc deux indices complexes correspondant à chacune des lignes neutres. A la sortie de chacune de ces lignes, l'onde résultante est du type :



$$e^{inkz} = e^{i(n' + i.n'')kz} = e^{in'kz} + e^{-n''kz}$$

terme de propagation terme d'absorption

La différence de comportement suivant la direction provient de la constitution du Polaroid : il se présente sous la forme d'une feuille en matière plastique de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur. Cette feuille est constituée de longues chaînes de polymères étirées majoritairement dans une direction. En outre, des molécules de colorant absorbant dans un large

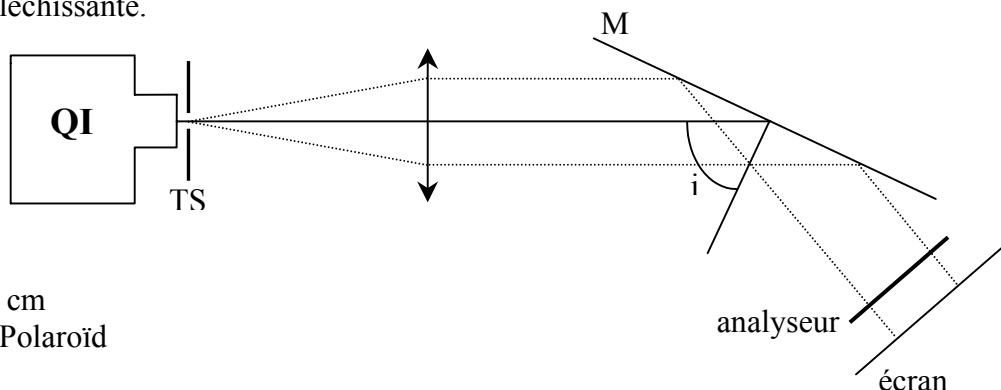
domaine spectral sont attachées sur ces chaînes. Les liaisons chimiques colorant - chaîne sont toutes orientées de la même façon ; de cette manière, l'absorption de la feuille dépend très fortement de la direction de polarisation.

A savoir :

Les Polaroids sont souvent très mauvais dans l'infrarouge (cf. Sextant p. 265). Pour s'en convaincre, on peut refaire la mesure de H_{90} en utilisant une lampe QI avec et sans filtre IR.

1.3 Par réflexion vitreuse

On utilise un miroir de verre noir M dont seule la face avant est réfléchissante.



L : 15 ou 25 cm
Analyseur : Polaroid

Faire tomber un faisceau **parallèle** (réglage par autocollimation avec un trou source fin) de lumière blanche sur le miroir M_1 et étudiez la polarisation du faisceau réfléchi à l'aide d'un polariseur en fonction de l'angle d'incidence i .

Pour $i = i_B$, vérifiez qu'on a $R_{\text{parallèle}} = 0$. En déduire n_{verre} par $\text{tgi}_B = n$. On peut alors calculer le coefficient (cf. Sextant p. 270 ou Bruhat § 205) :

$$R_{\perp} = \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right)^2 \quad \text{à } i = i_B$$

Conclure quant à l'efficacité de ce mode d'obtention d'une lumière totalement polarisée.

Remarque :

Pour une bonne mesure, il faut vérifier les points suivants :

- le faisceau incident ainsi que la normale au miroir doivent être horizontaux.
- lorsque le miroir est parallèle au faisceau incident, l'angle indiqué doit être zéro (si ce n'est pas le cas, ajuster la position de l'aiguille).

On peut aussi utiliser comme source un laser polarisé.

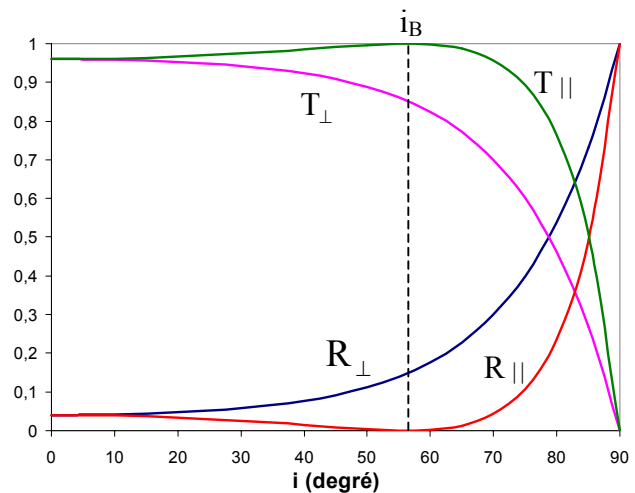
Explication :

Le calcul des coefficients de réflexion et de transmission en intensité (cf. Bruhat

§ 202 et 203) conduit aux formules de Fresnel : $R_{\perp} = \frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)}$ et $R_{\parallel} = \frac{\text{tg}^2(i - r)}{\text{tg}^2(i + r)}$
 $T_{\perp} = 1 - R_{\perp}$ et $T_{\parallel} = 1 - R_{\parallel}$

On peut représenter l'évolution de ces coefficients en fonction de l'angle d'incidence (r se déduit de i à l'aide de la loi de Descartes connaissant n) ; on obtient les courbes suivantes (Huard p. 186) :

On s'aperçoit que dans la lumière provenant de la réflexion vitreuse de la lumière naturelle, il y a toujours prépondérance de la vibration perpendiculaire au plan d'incidence (sauf pour $i = 0$ et $i = 90^\circ$).



Cette lumière n'est totalement polarisée qu'à l'incidence Brewsterienne (elle est alors polarisée perpendiculairement au plan d'incidence). En ce qui concerne la lumière transmise, on ne peut jamais avoir une lumière totalement polarisée, sauf si on empile plusieurs couches (cf. Huard p. 187 ou Sextant p. 271).

Application :

À $i = i_B$, la réflexion vitreuse donne une lumière dont on connaît exactement la

direction de polarisation → on peut s'en servir comme méthode rapide de contrôle de l'axe de polarisation d'un Polaroid afin de déterminer si le Polaroid n'a pas glissé dans son support (cette méthode a moins d'intérêt depuis qu'on dispose de laser polarisé).

Le phénomène de polarisation par réflexion est utilisé, par exemple, pour réaliser des photographies d'objets à travers une vitrine en s'affranchissant des réflexions gênantes ; la lumière réfléchie de manière diffuse par les objets mats reste peu polarisée et est moins absorbée par le Polaroid (amusez-vous à regarder un pare-brise de voiture à travers un polariseur). On peut aussi favoriser la lumière réfléchie pour montrer une personne regardant à travers une fenêtre.

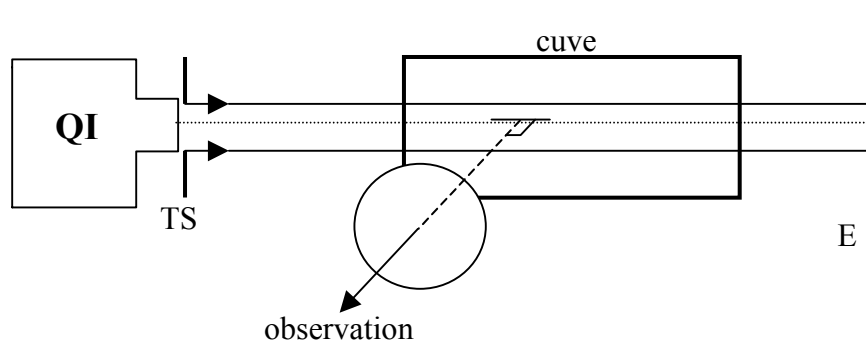
1.4 Par diffusion

Par beau temps, le ciel tout entier est d'un bleu lumineux ; le ciel lunaire, en revanche, apparaît noir sur les clichés des missions Apollo. C'est donc l'atmosphère, dont est privée la lune, qui diffuse la lumière solaire dans toutes les directions. Le bleu du ciel, le rouge-orangé des couchers de soleil sont autant de manifestations chromatiques de la diffusion de la lumière. Les propriétés de polarisation de la lumière diffusée peuvent être facilement mises en évidence : il suffit d'observer un **ciel bleu** (sinon les nuages diffusent) à travers un Polaroid. On s'aperçoit que l'intensité transmise est maximale pour une direction que l'on identifie approximativement comme étant perpendiculaire au plan défini par le soleil, l'œil et la direction de visée de l'observateur.

On propose ici l'illustration en salle des propriétés de la lumière diffusée à l'aide d'une suspension diluée de particules microscopiques.

Manipulation :

On utilise une suspension de lait dans de l'eau. Une pincée de lait en poudre dans quelques litres d'eau suffit. Le lait en poudre doit être parfaitement sec (s'il est humide, il ne se dissout pas correctement) → à Rennes, prendre les sachets de Régilait (pas la grosse boîte).



Versez la suspension de lait dans un récipient transparent rectangulaire éclairé par un faisceau presque parallèle de lumière naturelle (lampe QI). Diaphragmez éventuellement le faisceau incident. Observez le faisceau diffusé à approximativement 90° de la lumière incidente. La trace du faisceau est visible dans la cuve : la suspension diffuse la lumière.

Observations :

1) Observez la teinte de la lumière diffusée : elle doit être bleutée ; si elle n'est pas assez intense, rajoutez un peu de lait, si elle est blanchâtre, c'est qu'il y a trop de diffusant ; diluez alors la suspension. Observez sur un écran la lumière transmise : elle doit être fortement orangée (cette coloration peut être accentuée par l'adjonction ultérieure de lait : on obtient alors un "coucher de soleil").

2) Analysez à l'aide d'un Polaroid A (de grand diamètre en montage) la lumière diffusée et vérifiez qu'elle est partiellement polarisée perpendiculairement au plan de diffusion. Notez que le taux de polarisation, nul dans la direction transmise, est maximum pour $\theta = 90^\circ$; la lumière diffusée est alors presque totalement polarisée (attention, dès qu'on regarde un peu de côté, la polarisation n'est plus totale !).

3) Utilisez le Polaroid pour polariser le faisceau incident et observez pour $\theta = 90^\circ$. Montrez que pour une polarisation incidente dans le plan de diffusion, l'intensité diffusée est nulle. Elle est maximale lorsque la lumière incidente est polarisée perpendiculairement au plan de diffusion.

Explication :

La plupart des propriétés mises en évidence dans l'expérience précédente s'interprètent dans le cadre de la diffusion de Rayleigh par de petites particules diélectriques (cf. Sextant p. 275 ou Fleury Matthieu : lumière p. 236-240).

L'intensité diffusée par **une** particule (de dimension $a \ll \lambda$) à une distance $D \gg \lambda$ et dans une direction faisant un angle θ avec le vecteur d'onde incident est la somme de deux termes (α est la polarisabilité de la particule) :

$$I_{\perp}(\theta) = \frac{\pi^2 |\alpha|^2}{2R^2 \lambda^4} I_0 \quad \text{et} \quad I_{\parallel}(\theta) = I_{\perp} \cos^2 \theta$$

$I_{\perp}(\theta)$ correspond à une onde polarisée perpendiculairement au plan de diffusion (celui-ci est défini par le vecteur d'onde incident et l'axe d'observation) ; $I_{\parallel}(\theta)$ correspond à une onde polarisée parallèlement à ce même plan.

Ces expressions permettent de faire les remarques suivantes :

- la dépendance en λ^{-4} des deux intensités explique pourquoi la lumière bleue est beaucoup plus diffusée que la lumière rouge (facteur 16 entre les intensités diffusées aux deux extrémités du spectre). Ceci explique l'observation n° 1

- l'onde perpendiculaire au plan de diffusion a une intensité indépendante de θ . Par contre, la composante parallèle en dépend et s'annule quel que soit λ lorsque $\theta = 90^\circ$. Ceci explique l'observation n° 2.

Remarques :

Cette théorie, obtenue en considérant un seul centre diffusant, s'applique tant que le milieu est suffisamment dilué ; les particules peuvent alors être considérées comme indépendantes et les ondes diffusées par chaque centre comme incohérentes entre elles. Cette situation est l'analogue, à trois dimensions, de l'expérience de diffraction par des spores de lycopode : les intensités diffusées s'ajoutent et l'intensité totale est proportionnelle à N .

Dans un milieu contenant de nombreux centres diffuseurs, la probabilité est importante qu'une onde déjà diffusée par un premier centre le soit de nouveau par un second, et ainsi de suite ; on parle alors de diffusion multiple. L'onde observée dans le plan de diffusion n'est plus, en général, dans l'état de polarisation initial ; elle est dite dépolarisée.

La taille des particules a aussi un rôle. Pour plus de précision se reporter au Sextant p. 276 et au Fleury-Mathieu "Lumière" p. 240-242. Cet effet explique pourquoi l'expérience est peu concluante si le lait est mal dissous.

Autre exemple :

La fumée du tabac paraît bleue lorsqu'on l'examine latéralement sur fond noir dans un faisceau de lumière. Lorsqu'on l'inhale puis on la recrache, elle devient blanche . Expliquez pourquoi ?

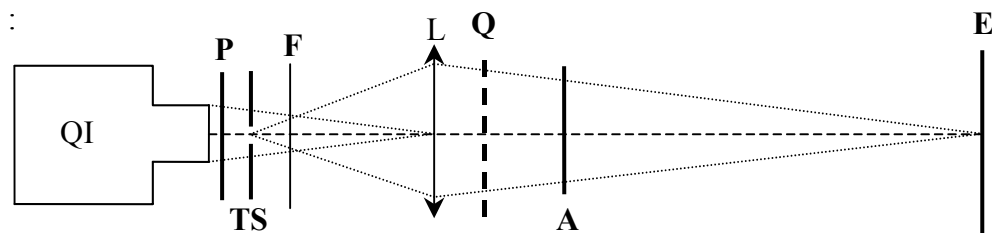
II PRODUCTION D'UNE LUMIERE ELLIPTIQUE

2.1 Par biréfringence

2.1.1 lame d'épaisseur quelconque

On peut prendre un cristal biaxe (comme le mica) ou un cristal uniaxe (comme le quartz). Dans ce dernier cas, il ne faut pas prendre de lames taillées perpendiculairement à l'axe optique car on n'observerait alors aucun effet de biréfringence.

Manipulation :



P : polariseur

TS : trou source

F : filtre gélatine jaune

Q : lame cristalline → à Rennes, prendre la lame notée "Production d'une lumière polarisée elliptiquement" ou une lame de mica (dans les supports carton vert).

L : 250 mm (placez l'écran assez loin pour attaquer la lame en lumière \approx convergente)

A : analyseur

En l'absence de Q, croisez P et A.

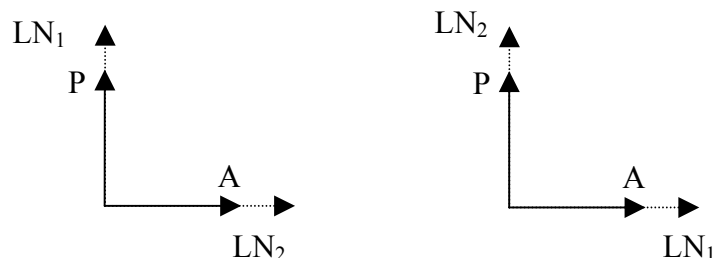
Observations :

Introduire Q. En tournant Q, montrer qu'on obtient quatre positions pour lesquelles l'extinction est rétablie.

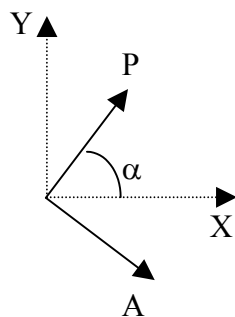
Dans une position de Q où il n'y pas d'extinction, tournez l'analyseur. Vous devez observer la présence de deux maximums et deux minimums (les minimums sont d'autant plus marqués qu'on est près d'une extinction avant la rotation de l'analyseur).

Explication :

Les deux axes pour lesquels l'extinction est rétablie lorsque A et P sont croisés correspondent aux lignes neutres de la lame (\leftrightarrow axes de propagation sans déformation de l'onde incidente).



Suivant ces deux axes, les rayons se propagent avec des vitesses de phase différentes (axe lent noté Y, axe rapide noté X). Soit un angle α quelconque entre le polariseur et l'axe rapide de la lame :



$$P = a \cos \omega t$$

$$\text{Entrée de la lame : } X = a \cos \alpha \cos \omega t = A \cos \omega t$$

$$Y = a \sin \alpha \cos \omega t = B \cos \omega t$$

$$\text{Sortie de la lame : } X = A \cos \omega t$$

$$Y = B \cos(\omega t - \varphi) \quad \text{avec} \quad \varphi = \frac{2\pi \Delta n e}{\lambda}$$

On a donc une vibration elliptique à la sortie de la lame cristalline (cf. Duffait p.184)

Remarque importante :

L'observation des deux minimums et des deux maximums ne permet pas de conclure qu'on a une polarisation elliptique (cf. l'organigramme décrivant la recherche systématique d'une polarisation inconnue) !

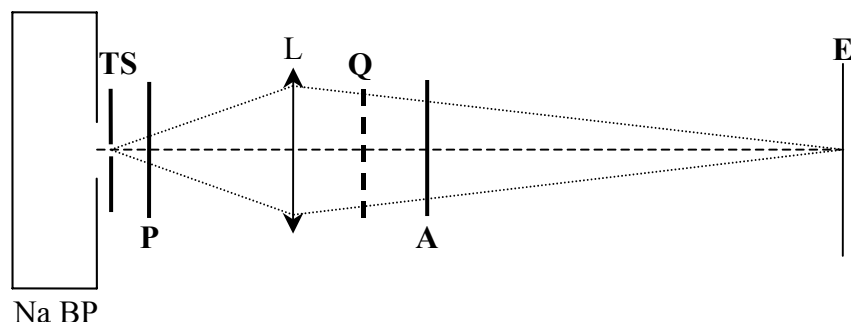
2.1.2 Action d'une lame $\lambda/4$ sur une vibration rectiligne

Le principe de la manipulation est le même que précédemment sauf que cette fois-ci, il faut impérativement se placer en lumière monochromatique pour utiliser une $\lambda/4$. Plusieurs solutions sont alors possibles :

- utiliser un laser (solution la plus simple surtout s'il est polarisé) si on a une lame $\lambda/4$ accordé à sa longueur d'onde. Ce n'est pas le cas à Rennes.
- utiliser une lampe spectrale avec un filtre interférentiel et une lame $\lambda/4$ accordés à une des longueurs d'onde de la lampe.

A Rennes, on dispose de lames $\lambda/4$ accordées au doublet jaune du Sodium ce qui nous dispense du filtre interférentiel d'où un gain en luminosité.

Manipulation :



L : 250 mm (placez l'écran assez loin pour attaquer la lame en lumière \approx convergente)

P : polariseur

TS : trou source \rightarrow le placer **le plus près** possible de la lampe (gain en luminosité)

Q : lame $\lambda/4$ notée 584 nm

A : analyseur

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

Après avoir repéré les lignes neutres de la lame entre polariseur et analyseur croisés, tournez la lame de manière à placer ses lignes neutres à 45° de la polarisation incidente. Tournez l'analyseur et vérifiez que l'intensité lumineuse est constante. On vérifiera au § III que la vibration obtenue est polarisée circulairement.

Explication :

Elle découle de celle donnée au § 2.1.1

Lorsque $\alpha = 45^\circ$, on a $A = B$.

Une lame quart-d'onde correspond à une épaisseur optique $\Delta n e = \lambda/4$. Cette lame introduit donc un déphasage $\varphi = \pi/2$.

$$\Rightarrow \text{les composantes de la vibration sortant de la lame sont : } X = A \cos \omega t \\ Y = A \sin \omega t$$

Remarque :

Si $\alpha = +45^\circ$ on a $X = |A| \cos \omega t$ et $Y = |A| \sin \omega t \rightarrow$ l'onde est circulaire gauche.

Si $\alpha = -45^\circ$ on a $X = |A| \cos \omega t$ et $Y = -|A| \sin \omega t \rightarrow$ l'onde est circulaire droite.

Pour s'en convaincre, calculez la valeur des composantes X et Y à $t = 0$ puis regardez leur évolution lorsque t augmente à partir de zéro (cf. Sextant p. 288).

Le passage d'une circulaire gauche à une circulaire droite s'effectue expérimentalement en tournant P de 90° **ou** en permutant les axes rapide et lent de la lame $\lambda/4$.

Une application amusante des lames $\lambda/4$ est donnée dans le Sextant p. 289. Jetez-y un coup d'œil.

2.2 Par réflexion métallique

Sextant p. 273 Bruhat : § 213 à 225

2.2.1 Introduction

Si les propriétés optiques d'un diélectrique transparent et isotrope peuvent être décrites à l'aide d'un seul paramètre (l'indice de réfraction), il en va tout autrement d'un matériau conducteur qui doit être décrit par deux grandeurs (les parties réelle et imaginaire de l'indice complexe). Si les formules de Fresnel donnant le coefficient de réflexion s'appliquent formellement en utilisant l'indice complexe, les propriétés de la réflexion métallique sont très différentes de celles de la réflexion vitreuse :

le coefficient de réflexion en intensité est proche de 1 quelque soit l'incidence i (effet de miroir) ce qui n'est pas le cas pour la réflexion vitreuse (forte dépendance en i \rightarrow cf. § 1.3).

la réflexion vitreuse s'accompagne d'un déphasage de π (milieu moins réfringent \rightarrow milieu plus réfringent) **quelque soit l'incidence i et la polarisation du faisceau incident** alors que la réflexion métallique introduit **un déphasage à la réflexion entre les deux composantes** de la polarisation incidente (perpendiculaire et parallèle au plan d'incidence). Cet effet, nul en incidence normale, est maximal pour une incidence oblique relativement élevée variant entre

70° et 80° (appelée incidence principale) selon les métaux. Cela signifie qu'un faisceau polarisé rectilignement donne, par réflexion métallique, un faisceau totalement polarisé elliptiquement.

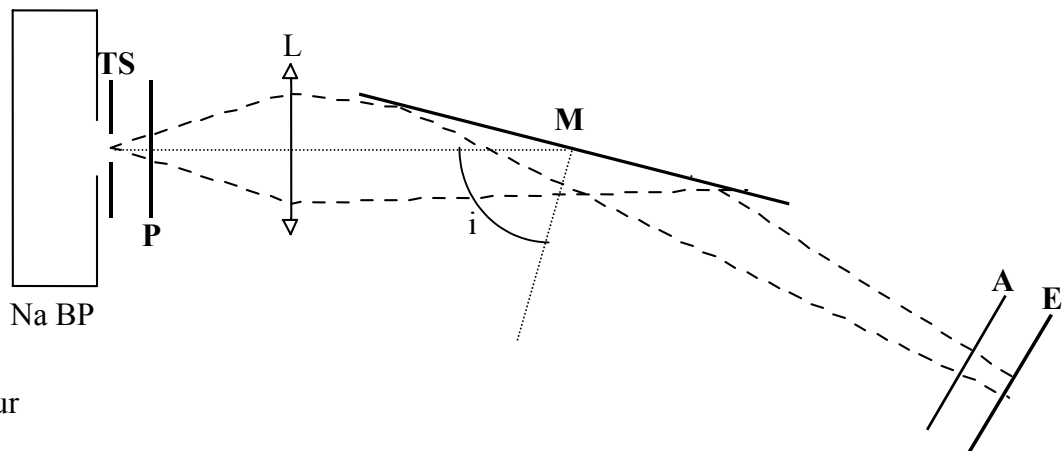
Ces résultats s'obtiennent en résolvant les équations de Maxwell à l'interface entre les deux milieux. Si le principe est simple, les calculs le sont beaucoup moins (cf. Bruhat ; plus particulièrement les § 199, 204, 224 et 225 !).

2.2.2 Manipulation

Sextant p. 299

On emploie, par exemple, un miroir métallisé sur la face avant (pourquoi à votre avis ?) que l'on éclaire dans des conditions voisines de celles décrites précédemment.

Montage :



P : polariseur

L : 250 mm

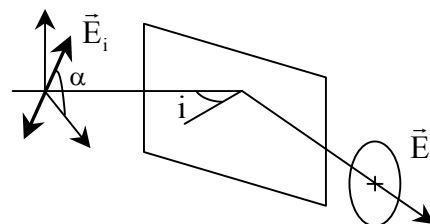
A : analyseur

M : miroir optique à $i \approx 75^\circ$ (**réglage important**)

TS : trou source → le placer le plus près possible de la lampe (gain en luminosité)

Placez l'écran assez loin de sorte que le faisceau incident sur le miroir soit à peu près parallèle (même i pour tous les rayons).

On note α l'angle de polarisation de la lumière incidente par rapport au plan d'incidence.



Observations :

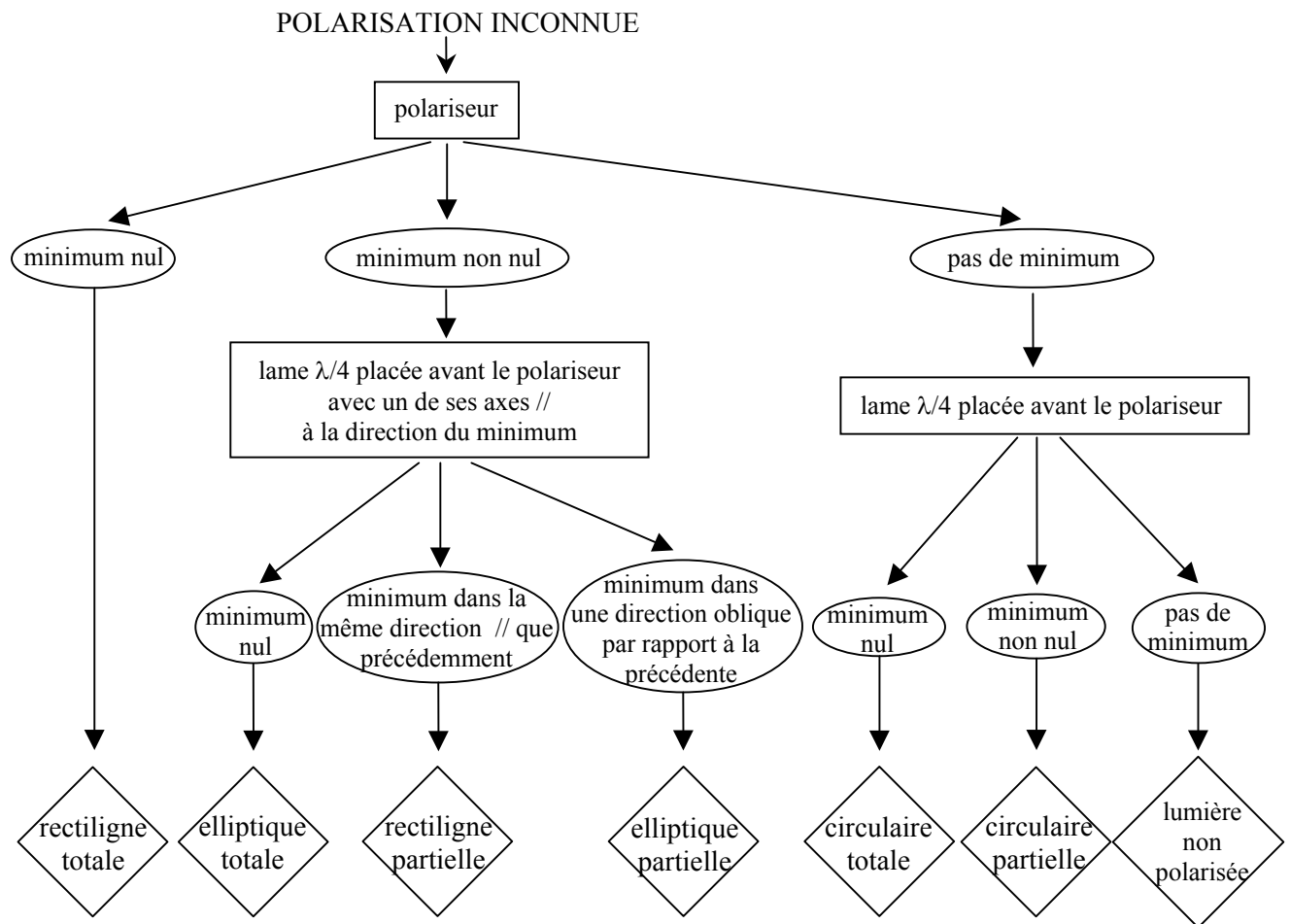
$\alpha = 0^\circ$ ou 90° : tournez l'analyseur ; vous devez constater la présence de deux minimums nuls → la lumière réfléchie est rectiligne totale.

$0 < \alpha < 45^\circ$ et $45^\circ < \alpha < 90^\circ$: tournez l'analyseur ; vous devez constater la présence de deux minimums non nuls (cela ne suffit pas pour conclure que la lumière est elliptique bien que ce soit le cas).

$\alpha = 45^\circ$: tournez l'analyseur → pas de minimum.

Justifiez ces observations (projetez P sur les axes perpendiculaire et parallèle au plan d'incidence).

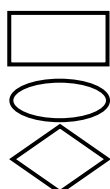
III ANALYSE D'UNE LUMIERE



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

- lumière polarisée rectiligne, circulaire, elliptique (dans les deux derniers cas, détermination du degré d'ellipticité, du sens droit ou gauche).
- lumière naturelle ou polarisée totalement ou partiellement (dans ce dernier cas, détermination du taux de polarisation).

En présence d'une polarisation inconnue, on procédera comme indiqué dans le schéma ci-dessus.



Symbolise un instrument ajouté sur le trajet de la vibration

Symbolise l'observation

Symbolise la conclusion sur le type d'observation

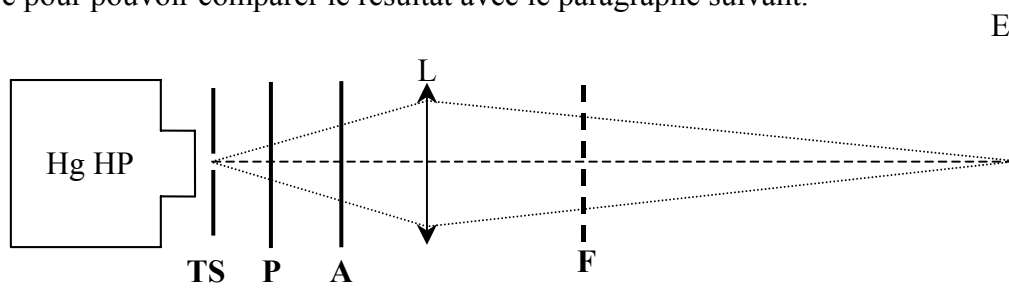
3.1 Vibration rectiligne

3.1.1 Analyseur à extinction

Prendre un Polaroid ou un prisme de Nicol.

Montage :

Bien que ce ne soit pas nécessaire ici, on travaille en lumière verte du mercure pour pouvoir comparer le résultat avec le paragraphe suivant.



F : filtre vert coloré (pas de FI car peu lumineux)

L : 150

Remarque importante :

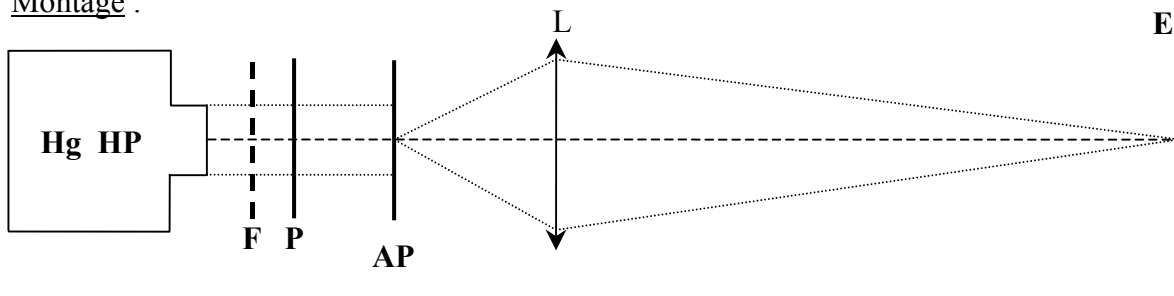
La lampe à vapeur de mercure haute pression est une lampe très puissante. **Il ne faut en aucun cas placer un Polaroid sur son point de convergence** (il peut fondre en 30 secondes !) !

Mesures :

Estimez la précision sur le pointé de la vibration.

3.1.2 Analyseur à pénombre

Montage :



Lampe : faire un faisceau grossièrement parallèle

F : filtre coloré vert

P : Polaroid

AP : analyseur à pénombre

L : 150 → faire l'image de AP sur l'écran.

Manipulation :

Tournez l'analyseur à pénombre et observez l'éclairement des deux plages ; l'éclairement de ces plages doit varier d'éclairements bien contrastés à l'égalité d'éclairement.

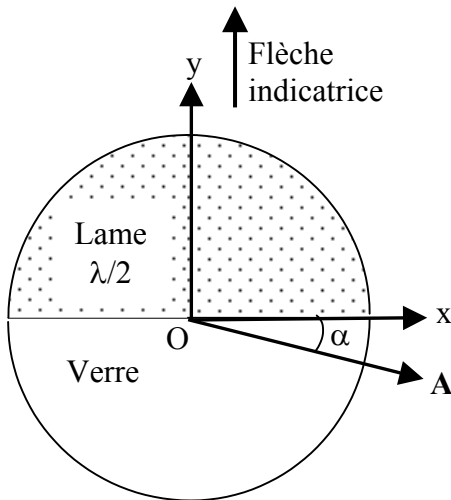
Recherchez l'égalité d'éclairement dans la pénombre ; la flèche de l'AP indique alors la direction de la polarisation de l'onde incidente.

Recherchez l'égalité d'éclairement dans la clarté ; la flèche de l'AP est alors perpendiculaire à la direction de la polarisation de l'onde incidente.

Évaluez l'incertitude sur le pointé de la vibration rectiligne pour l'égalité d'éclairements (forts ou faibles). Quelle est la configuration la plus favorable ? Justifiez. Dans les meilleures conditions, l'incertitude est-elle plus grande ou plus petite qu'avec un analyseur à extinction unique ? Comment améliorer le résultat ?

Description de l'analyseur à pénombre :

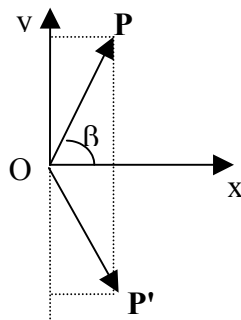
Bruhat p. 488 et suivantes
Duffait p. 182



L'analyseur à pénombre est constitué d'un ensemble solidaire comportant un analyseur A et une lame $\lambda/2$ couvrant la moitié de la surface, l'autre étant couverte par une lame de verre. On note α l'angle que fait le sens passant de l'analyseur avec une des lignes neutres de la lame $\lambda/2$, notée Ox. Cet angle est fixe sur les analyseurs dont on dispose à Rennes mais variable sur ceux qui seront disponibles à l'oral. Dans tous les cas, cet angle doit être inférieur à 10° .

L'autre ligne neutre de la lame $\lambda/2$ est parallèle à la flèche indicatrice de l'appareil. Pour simplifier l'analyse, on supposera que cette ligne neutre (notée Oy) est aussi perpendiculaire à la séparation lame cristalline-lame de verre (c'est le cas à Rennes pour un des analyseur mais pas pour l'autre).

Effet de la lame $\lambda/2$:



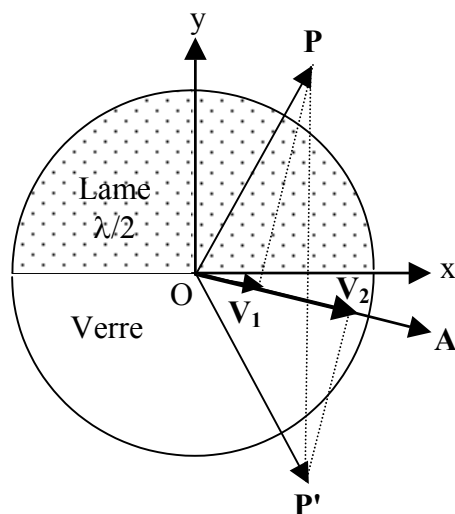
On considère que la vibration incidente fait un angle β quelconque avec la ligne neutre Ox.

$$\begin{aligned} \text{Entrée } \lambda/2 : X &= a \cos\beta \cos\omega t \\ Y &= a \sin\beta \cos\omega t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sortie } \lambda/2 : X &= a \cos\beta \cos\omega t \\ Y &= a \sin\beta \cos(\omega t - \pi) = -a \sin\beta \cos\omega t \end{aligned}$$

\Rightarrow la lame $\lambda/2$ transforme la vibration rectiligne P en une vibration rectiligne P' symétrique à P par rapport à Ox.

Passage dans l'analyseur :



Il reçoit deux vibrations :

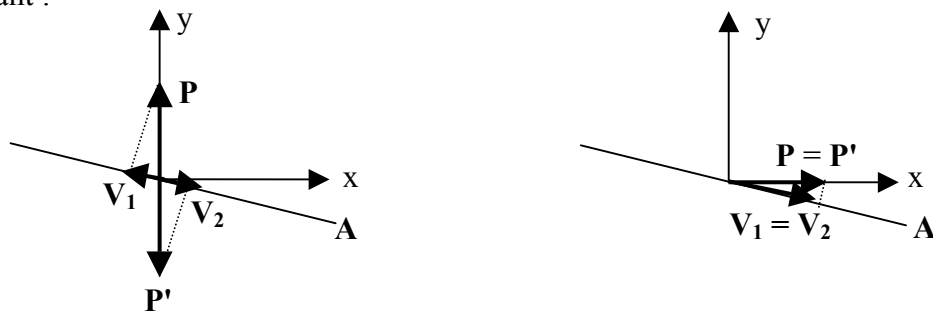
- la vibration P ayant traversée la demie lame en verre. On en récupère, par projection sur l'analyseur, la vibration V_1 .

- la vibration P' résultant du passage de P à travers la demie lame $\lambda/2$. On en récupère, par projection sur l'analyseur, la vibration V_2 .

Dans le cas général, ces vibrations n'ont pas la même intensité.

On obtient l'égalité d'éclairement pour deux valeurs particulières de l'angle β : lorsque Oy est parallèle

ou perpendiculaire à la direction de la vibration rectiligne à analyser comme le montre le schéma suivant :



L'œil étant un détecteur logarithmique, on apprécie mieux l'égalité d'éclairement dans la pénombre.

Sensibilité de l'analyseur :

A l'égalité d'éclairement dans la pénombre, on a $I_1 = I_2 = I = I_0 \sin^2 \alpha$

Lorsqu'on en est proche ($\beta \approx \pi/2$), on a alors : $I_1 = I_0 \cos^2(\pi/2 - \alpha + \beta') = I_0 \sin^2(\alpha - \beta')$
 $I_2 = I_0 \cos^2(\pi/2 - \beta' - \alpha) = I_0 \sin^2(\alpha + \beta')$

β' étant le complémentaire de β par rapport à $\pi/2$

Les angles α et β' étant faibles, on peut donner la différence relative d'éclairement sous la forme :

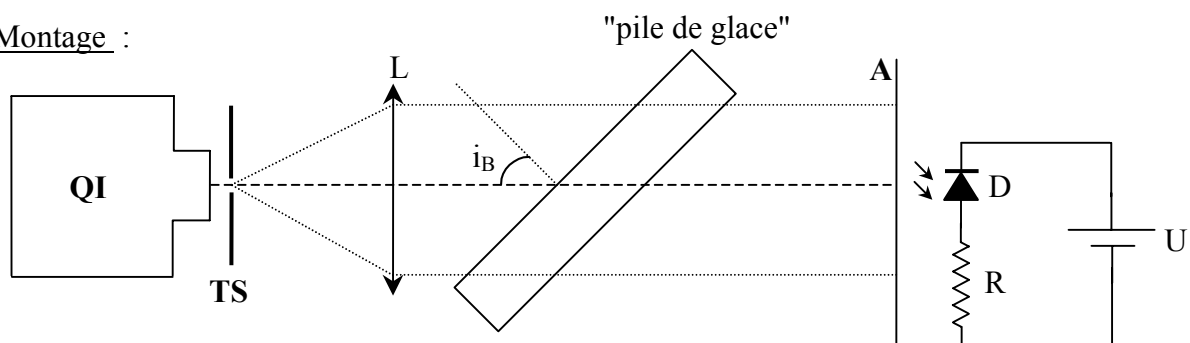
$$\frac{I_2 - I_1}{I} = \frac{(\alpha + \beta')^2 - (\alpha - \beta')^2}{\alpha^2} = 4 \frac{\beta'}{\alpha}$$

\Rightarrow on détectera d'autant mieux l'égalité d'éclairement dans la pénombre que α sera petit.

3.1.3 Mesure du taux de polarisation d'une lumière partiellement polarisée rectilignement

On a vu au § 1.3 qu'on ne pouvait jamais avoir de lumière totalement polarisée rectilignement par transmission vitreuse unique. On y arrive cependant si on augmente le nombre de transmission à l'incidence de Brewster (cf. Huard p. 187 et Sextant p. 271).

Montage :



L : 150

A : analyseur

TS \rightarrow suffisamment petit pour avoir un faisceau incident bien parallèle

D : photodiode avec résistance R
 U : + 15 V (alim pour ampli op)

Ajustez l'orientation de la pile de glace à $i = i_B$ par rapport au faisceau incident.

Mesures :

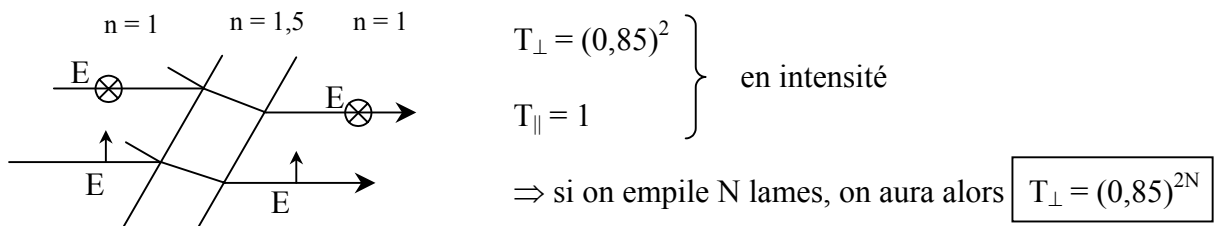
Faire tourner l'analyseur → on observe deux max et deux min formant deux axes à 90° . Mesurez au voltmètre V_{\min} et V_{\max} . En déduire le taux de polarisation τ de la vibration transmise par la relation :

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

Explication :

Sextant p. 271 ou Huard p. 187

On sait qu'à l'incidence Brewstérienne la composante parallèle au plan d'incidence de la vibration est intégralement transmise ($R_{\parallel} = 0 \rightarrow$ cf. § 1.3). La composante perpendiculaire est atténuée à chaque passage de dioptre de $R_{\perp} = 15\%$ si $n = 1,5$. Ce coefficient étant identique pour une interface air-verre et verre-air, on a après la traversée d'une lame (donc deux dioptres) la situation suivante :



Si N augmente, $T_{\perp} \rightarrow 0 \Rightarrow$ une pile de glace peut fournir théoriquement une lumière totalement polarisée.

Remarque :

Plusieurs facteurs limitent en fait les performances de ce type de polariseur : la mauvaise qualité de poli des surfaces (rayures, perte de transparence avec le temps) entraîne la diffusion de la lumière qui dépoliarise la lumière (i_B plus respectée). De plus, le raisonnement précédent n'est valable que si l'on alterne des couches de verre et des couches d'air. Or la "pile de glace" dont on dispose à Rennes est constituée d'un grand nombre de feuilles plastiques qui se touchent sans doute en certains endroits \Rightarrow de la lumière passe toujours en \perp .

Remarque : calcul de τ :

Le taux de polarisation rectiligne d'une vibration se calcule par la relation suivante :

$$\tau = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad I \text{ étant les intensités des deux composantes de la vibration}$$

On utilise ici une photodiode polarisée en inverse \Rightarrow sa réponse est linéaire en intensité (cf. montage photorécepteur ou Sextant p. 65) $\Rightarrow V$ est proportionnel à I .

3.2 Vibration elliptique

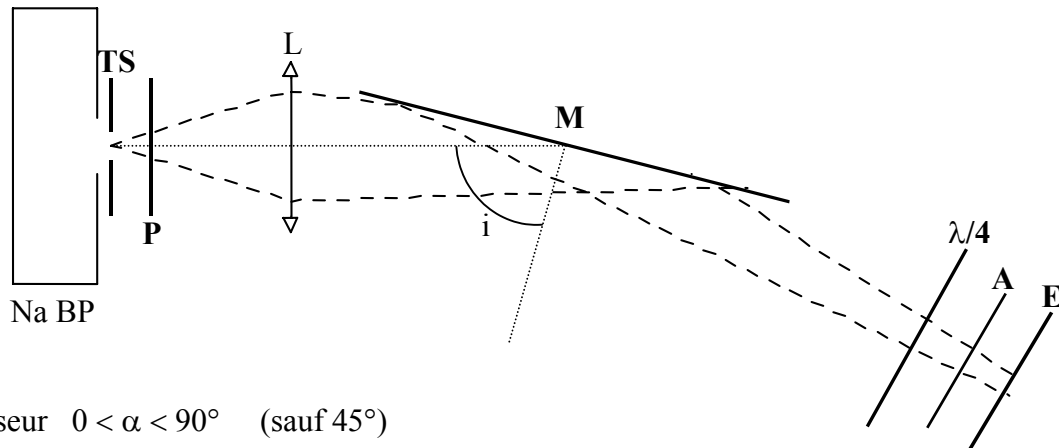
Pour en effectuer l'analyse, il faut d'abord la produire !

Deux solutions sont alors possibles :

- par biréfringence (emploi d'une $\lambda/4$ par exemple → § 2.1.2).
- par réflexion métallique (§ 2.2).

L'analyse d'un tel type de polarisation nécessitant l'emploi d'une lame quart d'onde, il peut paraître absurde de produire et analyser la vibration elliptique selon le même principe \Rightarrow on conseille donc de produire la vibration elliptique par réflexion métallique.

Montage :



P : polariseur $0 < \alpha < 90^\circ$ (sauf 45°)

L : 250 mm

M : miroir optique à $i \approx 75^\circ$ (**réglage important**)

$\lambda/4$: lame à 584 nm

A : analyseur

Si on n'a pas de lame $\lambda/4$ adaptée au doublet du sodium, on peut toujours utiliser une lampe QI ou une Hg avec un filtre interférentiel adapté à la lame $\lambda/4$ dont on dispose.

Manipulation :

Sans lame $\lambda/4$, repérez avec l'analyseur la direction de la vibration d'intensité minimale (petit axe de l'ellipse) ; ôtez l'analyseur. Placez la lame quart d'onde de manière à ce que son axe lent coïncide avec la direction que l'on vient de repérer (petit axe de l'ellipse). On a alors une vibration rectiligne à la sortie de la lame quart d'onde (le vérifier en tournant l'analyseur).

Remplacez l'analyseur avec son orientation initiale et repérez l'extinction en tournant l'analyseur d'un angle $\beta < \pi/2$. L'angle β dont on a dû tourner l'analyseur permet d'avoir le degré d'ellipticité de la vibration par $\tan \beta = a/b$ avec $a < b$. Le sens de la vibration correspond à l'opposé du sens de rotation de l'analyseur.

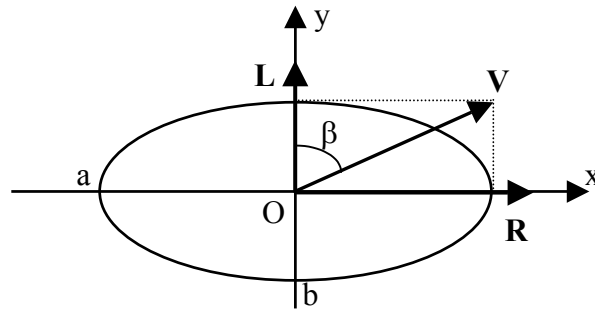
Voici quelques explications destinées à éclairer le protocole expérimental.

Effet d'une $\lambda/4$ sur une vibration elliptique :

On considère une vibration elliptique gauche d'axes principaux Ox (grand axe) et Oy (petit axe) alignées avec les lignes neutres de la lame $\lambda/4$ (L = axe lent ; R = axe rapide) :

Vibration : $E_x = a \cos \omega t$
 $E_y = b \sin \omega t$

Sortie $\lambda/4$: $E_x = a \cos \omega t$
 $E_y = b \sin(\omega t - \pi/2)$
 $= b \cos \omega t$



⇒ On a à la sortie une vibration V polarisée rectilignement suivant la diagonale du rectangle dans lequel est inscrite l'ellipse.

Association avec l'analyseur :

Le sens passant de l'analyseur est aligné au préalable avec le petit axe Oy de l'ellipse. Lorsqu'on le replace après la lame $\lambda/4$ et qu'on le tourne pour retrouver le maximum de lumière, on l'aligne avec la vibration V ⇒ l'angle dont on l'a tourné vaut β et on voit immédiatement sur le schéma que cet angle vérifie la relation :

$$\boxed{\operatorname{tg} \beta = \frac{a}{b}}$$

La mesure de β donne ainsi accès au degré d'ellipticité a/b de la vibration. On voit aussi que le sens de rotation de l'analyseur est opposé au sens de la vibration (si on recherche l'extinction, on tourne dans le même sens que la vibration).

Remarques :

Si la vibration d'origine est circulaire, l'angle α vaut $\pi / 4$.

L'analyse peut être faite avec un analyseur à pénombre.

Le sens de l'ellipse se déduit du signe de la composante E_y de la vibration. On a choisit ici $E_x = a \cos \omega t$ et $E_y = b \sin \omega t \Rightarrow$ à $t = 0$ on a $E_x = a$ et $E_y = 0$. Or $\frac{dE_y}{dt} = b \cos \omega t$
 ⇒ quand t augmente à partir de zéro, E_y augmente pendant que E_x diminue → on parcourt bien l'ellipse dans le sens gauche (on aurait une ellipse droite si on avait $E_y = -b \sin \omega t$).

3.3 Utilisation d'un polariseur tournant

La méthode exposée au paragraphe précédent a l'inconvénient d'être visuelle et manuelle : l'opérateur doit repérer avec précision un minimum d'intensité, ce qui n'est pas facile à l'œil, puis rechercher une extinction en tournant l'analyseur. Par ailleurs, on préfère souvent obtenir le résultat de la mesure sous la forme d'un signal électrique, lequel se prête mieux à une acquisition systématique de données. Pour cela, une technique possible est l'utilisation d'un polariseur tournant et d'une photodiode. Le principe de la mesure est simple. Il s'agit de faire tourner un analyseur devant le faisceau dont on veut déterminer l'état de polarisation. On mesure l'intensité transmise à l'aide d'une photodiode, dont on envoie le signal sur un oscilloscope (cf. schéma suivant). En supposant que l'onde à analyser est monochromatique et complètement polarisée, l'allure de la trace indique immédiatement l'état de polarisation :

- le signal est continu → la polarisation est circulaire

→ la polarisation est rectiligne

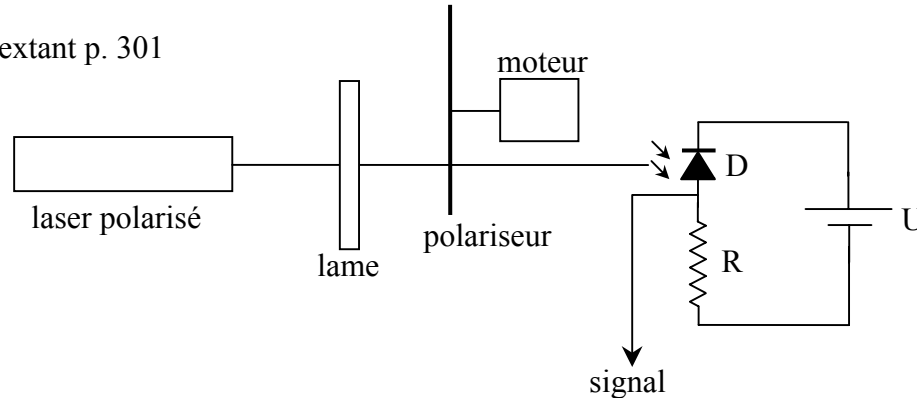
nul → la polarisation est elliptique.

- le signal est sinusoïdal avec un minimum nul

- le signal est sinusoïdal et a un minimum non

Montage :

Sextant p. 301



Laser : He-Ne polarisé Melles-Griot

Moteur : 12V continu sur plaque P60

Lame : prendre une $\lambda/4$ quelconque

Photodiode : OSD 5T avec résistance intégrée polarisée en inverse

Alimentation : prendre le modèle AL 15 → alim 0 ; +15 V pour la photodiode

→ alim 0 ; + U variable pour le moteur

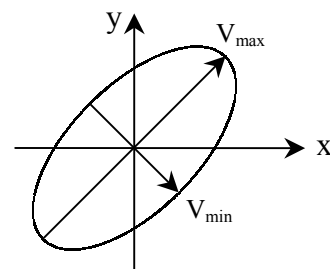
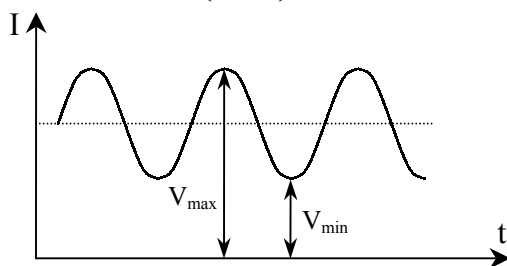
Observations :

Sans la lame $\lambda/4$ → vérifiez que le signal obtenu correspond à celui d'une vibration rectiligne.

Avec la lame $\lambda/4$ → vérifiez que le signal obtenu correspond à celui d'une vibration elliptique.

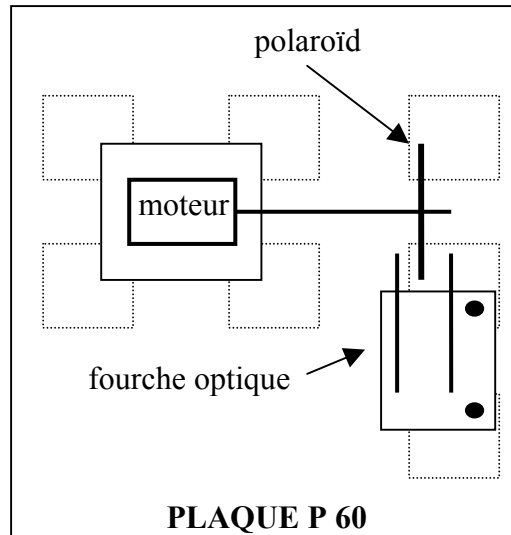
Le signal est proportionnel au flux reçu, donc à E^2 (E = champ électrique de la vibration). En mesurant les valeurs extrêmes V_{\max} et V_{\min} de la tension détectée, on obtient le degré

d'ellipticité, qui vaut $\left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} \right)^{\frac{1}{2}}$.



Remarques :

Dans le cas d'une polarisation rectiligne, la direction de polarisation peut s'obtenir à partir de la phase du signal par rapport à un signal de synchronisation ; on obtient ce signal en plaçant sur le Polaroid tournant un petit morceau adhésif opaque qui assure le déclenchement du signal de synchronisation via une fourche optique. On choisit, par exemple, la position du ruban adhésif de telle façon que le déclenchement corresponde à une polarisation verticale. La réalisation pratique d'un tel système s'effectue avec le matériel électromé :



On détermine de même la direction du grand axe d'une polarisation elliptique.

L'obtention d'une polarisation circulaire nécessiterait d'avoir une lame $\lambda/4$ accordée à la longueur d'onde du laser (pas le cas à Rennes).

3.4 Analyse de la lumière naturelle

On peut utiliser comme source une lampe Quartz-Iode.

3.4.1 Symétrie de révolution

Placez un polariseur sur le trajet du faisceau et montrez qu'on a une intensité constante lorsqu'on le tourne.

3.4.2 Absence de polarisation

Ajoutez avant le polariseur une lame $\lambda/4$ (mettre alors un filtre gélatine centré sur la longueur d'onde de la $\lambda/4$) et vérifiez que l'intensité obtenue en faisant tourner le polariseur est toujours constante.

⇒ La lumière naturelle n'est donc pas polarisée.

Bibliographie :

- BRUHAT-KASTLER : Optique (sixième édition) 535 C 10946
- DUFFAIT : Optique à l'agreg p. 177 à 189
- SEXTANT : Optique expérimentale p. 263 à 277 et 298 à 301
- HUARD : polarisation de la lumière 535 C 12452
- FRANCON: Vibrations lumineuses p. 240 à 256
- FLEURY MATHIEU : Lumière