

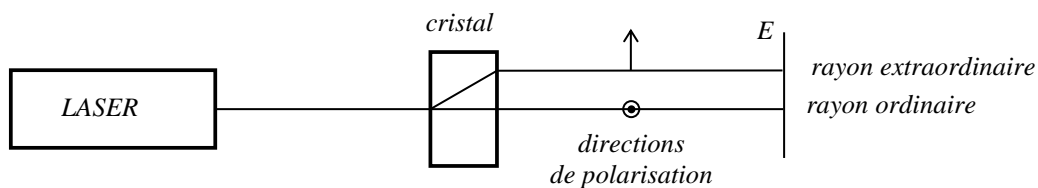
POLARISATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

On présente séparément la production et l'analyse d'une lumière polarisée mais une synthèse est sûrement nécessaire pour une présentation de ces expériences.

I PRODUCTION D'UNE LUMIERE POLARISEE RECTILIGNEMENT

I.1 Par biréfringence

On utilise une lame à faces parallèles très épaisse en calcite taillée avec un angle inconnu par rapport à l'axe optique et fixée dans un dispositif tournant. On envoie à travers ce cristal biréfringent le faisceau d'un laser **non polarisé**.

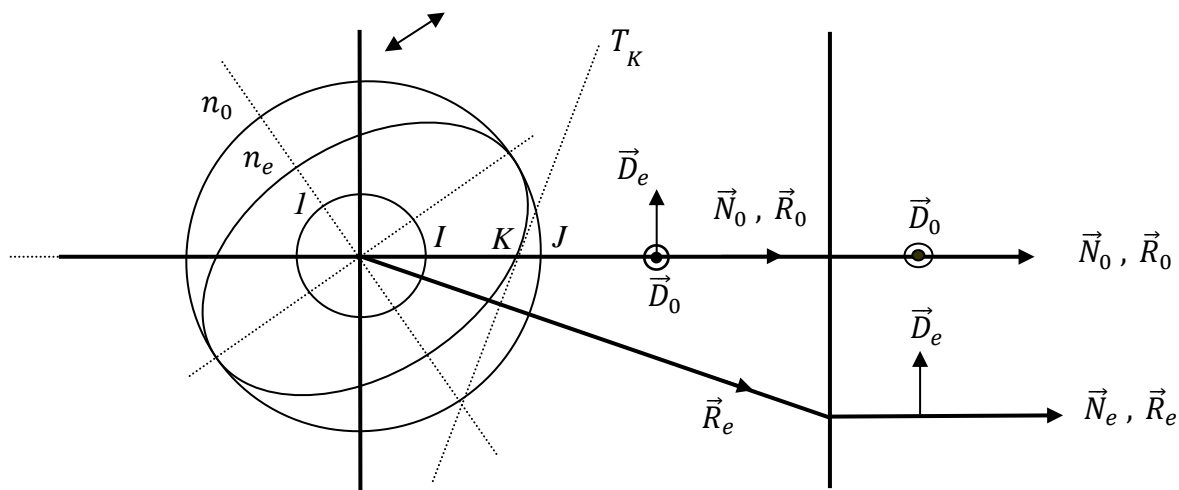


Manipulation :

On repère les rayons ordinaire et extraordinaire en faisant tourner la lame autour de l'axe optique (le rayon extraordinaire doit suivre la rotation alors que l'ordinaire ne doit pas bouger si les faces du cristal sont bien perpendiculaires). On peut vérifier que les deux vibrations sont polarisées rectilignement et perpendiculairement entre elles en intercalant un polariseur dichroïque.

Explication :

La calcite (CaCO_3) est un cristal uniaxe négatif ($n_o = 1,658$ et $n_e = 1,486$). Sa forte biréfringence permet une séparation nette des deux rayons dont la trajectoire dans et après la lame cristalline peut s'obtenir à l'aide du schéma classique suivant :

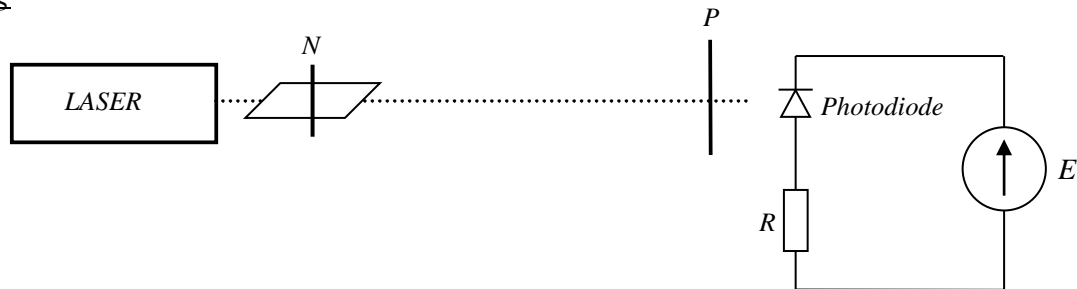


Avant l'apparition des Polaroids, on utilisait ces types de cristaux pour réaliser des polariseurs rectilignes (prisme de Nicol, Glan, Rochon, ... → cf. [4], p. 195 ou [1], § 294 pour plus de précisions). On s'en sert encore si on souhaite obtenir une polarisation rectiligne de grande qualité car c'est 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).

I.2 Par dichroïsme

Le dichroïsme rectiligne est à la base du polariseur le plus couramment utilisé à l'heure actuelle : le Polaroid. Les polariseurs 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 tel polariseur. Pour ce faire, il faut disposer d'un faisceau lumineux polarisé rectilignement avec un taux de polarisation supérieur à celui que peut fournir un Polaroid. 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 : laser **polarisé rectilignement** allumé pendant suffisamment longtemps pour être stable.

N : prisme de Nicol

P : polariseur dichroïque de qualité

Photodiode : OSD 5 T polarisée en inverse (mesure de la tension aux bornes de la résistance à l'aide multimètre lumineux).

Prévoir un drap noir.

Polarisation du faisceau incident :

On enlève le polariseur P , on fait 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. [3], p.264) le coefficient de transmission H_0 lorsqu'il est passant. On pourra le comparer avec celui du polaroid.

Mesures :

On commence sans le Polaroid. On ajuste la valeur de la résistance R pour avoir un signal fort mais sans saturation. On note alors le signal V_1 reçu par la photodiode dans le noir en la recouvrant par le drap. On remet ensuite le Polaroid et on l'oriente pour avoir le signal le plus fort possible (P est alors parallèle à la vibration incidente). On note au noir le signal V_2 dans ces conditions puis on tourne le Polaroid pour avoir un signal minimum (P est alors perpendiculaire à la vibration incidente). On note au noir le signal V_3 et on vérifie que celui donné par le courant inverse d'obscurité de la photodiode est négligeable en masquant la photodiode avec le drap noir¹.

Exploitation :

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

$$H_{90} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$H_0 = \frac{V_3}{V_1}$$

¹ Si ce n'est pas le cas, il faut corriger les formules qui suivent.

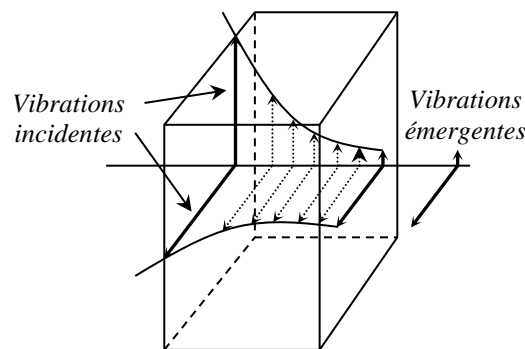
Les Polaroid courants ont un H_0 pouvant monter jusqu'à 60 % (ce qui est bon) et un H_{90} d'environ 3.10^{-4} . On peut éventuellement vérifier la loi de Malus (cf. [3], p. 265).

Explication :

Une substance dichroïque est biréfringente (i.e. 2 indices) mais, de plus, elle 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



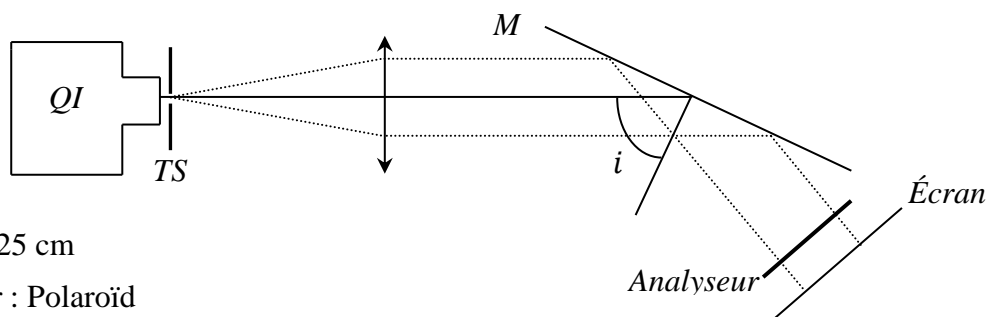
La différence de comportement suivant la direction provient de la constitution du Polaroid. Il se présente sous la forme d'une feuille en matière plastique de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur. Cette feuille est constituée de longues chaînes de polymères étirées majoritairement dans une direction. 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 ce qui fait que l'absorption de la feuille dépend très fortement de la direction de la vibration incidente.

Remarque :

Les Polaroids sont souvent très mauvais dans l'infrarouge (cf. [3], p. 265). On peut le vérifier en mesurant le H_{90} en utilisant une lampe QI avec et sans filtre infrarouge.

I.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

On réalise un faisceau de lumière blanche **parallèle** à l'aide d'une lentille et d'un trou source fin réglés par auto collimation. On l'envoie sur le miroir M et on étudie la polarisation du faisceau réfléchi à l'aide d'un polariseur en fonction de l'angle d'incidence i . On doit vérifier qu'on a l'extinction totale

du faisceau réfléchi pour une certaine incidence $i = i_B$ lorsque le sens passant de l'analyseur est parallèle au plan d'incidence. On peut alors en déduire l'indice n du verre par la relation :

$$\boxed{\operatorname{tg} i_B = n}$$

Et le coefficient de réflexion de la composante perpendiculaire au plan d'incidence pour cet angle i_B (cf. [3], p. 270 ou [1], § 205) :

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

Remarques :

Pour une bonne mesure, il faut que le faisceau incident ainsi que la normale au miroir soient horizontaux. Lorsque le miroir est parallèle au faisceau incident, il faut aussi que l'angle indiqué soit nul ou corriger la mesure si ce n'est pas le cas. On peut aussi utiliser comme source un laser polarisé.

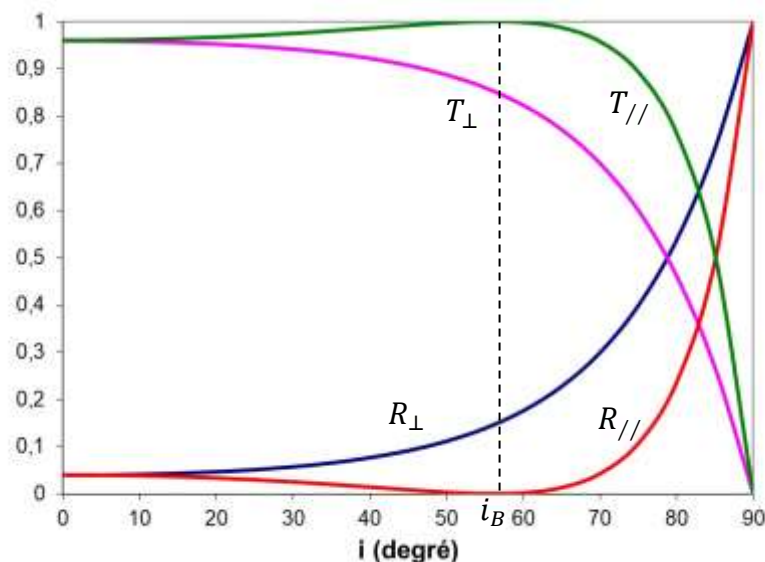
Explication :

Le calcul des coefficients de réflexion et de transmission en intensité (cf. [1], § 202 et 203) conduit aux formules de Fresnel :

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)} \quad R_{//} = \frac{\operatorname{tg}^2(i - r)}{\operatorname{tg}^2(i + r)}$$

$$T_{\perp} = 1 - R_{\perp} \quad T_{//} = 1 - R_{//}$$

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 Snell Descartes pour la réfraction connaissant n) ; on obtient les courbes suivantes (cf. [4], p. 186) :



On s'aperçoit, hormis pour $i = 0$ et $i = 90^\circ$, qu'il y a toujours une prépondérance de la vibration perpendiculaire au plan d'incidence pour la réflexion vitreuse de la lumière naturelle. On constate aussi que la lumière réfléchie devient totalement polarisée à l'incidence de Brewster (polarisation perpendiculaire au plan d'incidence). En ce qui concerne la lumière transmise, on ne peut jamais avoir de lumière totalement polarisée, sauf si on empile plusieurs couches (cf. § III.1.3).

Application :

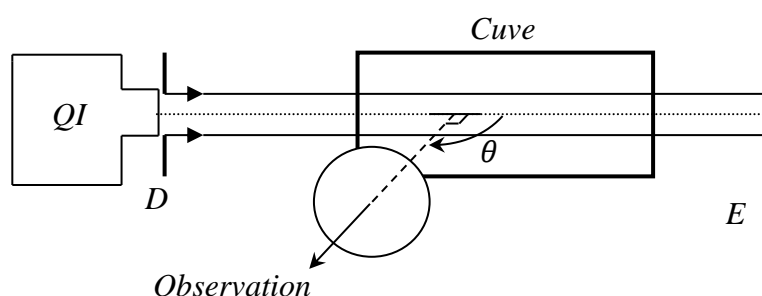
Le phénomène de polarisation par réflexion est utilisé pour réaliser des photographies d'objets à travers une vitrine en s'affranchissant des réflexions gênantes. La lumière réfléchie de manière diffuse par les objets mats reste peu polarisée et est moins absorbée par le Polaroid. On s'en sert aussi dans les films pour montrer le reflet d'une personne regardant à travers une fenêtre.

I.4 Par diffusion

Par beau temps, le ciel vu de la terre est bleu alors qu'il apparaît noir sur la lune. Cette teinte est due à l'atmosphère, dont est privée la lune, qui diffuse la lumière solaire de manière différente suivant la longueur d'onde. Le bleu du ciel, le rouge-orangé des couchers de soleil sont des manifestations chromatiques de cette diffusion. Les propriétés de polarisation de la lumière diffusée peuvent aussi être facilement mises en évidence à l'aide d'un Polaroid. Si on observe un ciel bleu sans nuages à travers lui, on s'aperçoit que l'intensité transmise est maximale pour une direction perpendiculaire au plan défini par le soleil, l'œil et la direction de visée de l'observateur. On propose ici l'illustration des propriétés de la lumière diffusée à l'aide d'une suspension diluée de particules microscopiques.

Manipulation :

La suspension est réalisée en diluant un peu de lait en poudre dans de l'eau. Il faut l'ajouter progressivement par petites pincées en mélangeant à chaque fois jusqu'à obtenir le résultat escompté. Le lait en poudre doit être parfaitement sec et récent sinon il se dissout mal et l'expérience n'est pas démonstrative.



On éclaire la cuve par un faisceau \approx parallèle de lumière blanche. On peut éventuellement diaphragmer la lampe QI pour réduire la section du faisceau. Celui-ci doit être visible dans la cuve, signe que la suspension diffuse la lumière.

Observations :

La lumière diffusée dans la direction perpendiculaire à l'axe optique du faisceau doit être bleutée. Si ce n'est pas le cas, il faut rajouter un peu de lait. Si elle est blanchâtre, c'est qu'il y en a de trop et il faut diluer la suspension. La lumière transmise sur l'écran E doit être fortement orangée comme l'est un coucher de soleil. Si on analyse la lumière à l'aide d'un polariseur, on s'aperçoit qu'il n'y a pas de direction de polarisation privilégiée pour la lumière transmise. Par contre, la lumière diffusée à 90° est polarisée rectilignement dans la direction perpendiculaire au plan de diffusion² (attention, la polarisation n'est plus totale dès qu'on regarde un peu de côté). On peut le confirmer en polarisant le faisceau incident dans le plan de diffusion. L'intensité diffusée pour $\theta = 90^\circ$ est nulle dans ce cas et on ne voit plus la trace du faisceau dans la cuve. Elle est par contre nettement visible si on polarise le faisceau incident 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 Rayleigh par de petites particules diélectriques (cf. [3], p. 275 ou [6], p.

² Plan constitué par l'axe optique du faisceau et l'axe d'observation.

236-240). L'intensité diffusée par une particule diélectrique 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 $I_{\perp}(\theta)$ et $I_{//}(\theta)$ correspondants respectivement à une onde polarisée perpendiculairement et parallèlement au plan de diffusion (α est la polarisabilité de la particule) :

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

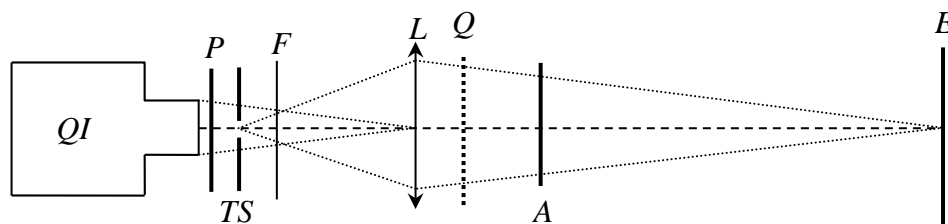
La dépendance en $1/\lambda^4$ des deux intensités conduit à une diffusion beaucoup plus forte de la lumière bleue que de la lumière rouge (d'un facteur ≈ 16) et celle en θ de $I_{//}(\theta)$ justifie la polarisation totale de la lumière lorsque $\theta = 90^\circ$. Cette théorie, obtenue en considérant 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 (cf. montage sur la diffraction). 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. Cette diffusion multiple aboutit à une onde observée dans le plan de diffusion qui n'est plus dans l'état de polarisation initial (onde dépolarisée). La taille des particules a aussi un rôle. Pour plus de précision se reporter à [3], p. 276 et à [6], p. 240-242. Cet effet explique pourquoi l'expérience est peu concluante si le lait est mal dissous. On a un effet similaire avec la fumée du tabac. Elle paraît bleue lorsqu'on l'examine latéralement sur fond noir dans un faisceau de lumière alors qu'elle devient blanche lorsqu'on la recrache après l'avoir inhalée.

II PRODUCTION D'UNE LUMIERE ELLIPTIQUE

II.1 Par biréfringence

II.1.1 Lame d'épaisseur quelconque

On peut prendre un cristal biaxe comme le mica ou uniaxe comme le quartz. Dans ce dernier cas, il faut éviter de prendre une lame taillée perpendiculairement à l'axe optique car on n'observe alors aucun effet de biréfringence.



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

P, A : polariseur et analyseur

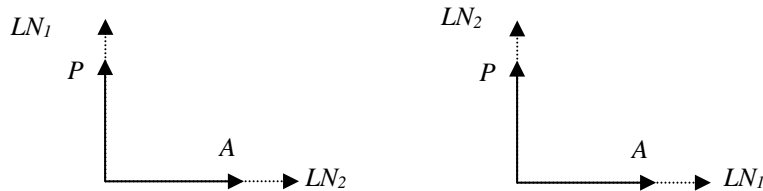
Observations :

On place l'écran assez loin pour attaquer la lame en lumière \approx convergente et on croise P et A. On introduit la lame Q et on la fait tourner autour de l'axe optique. On doit obtenir

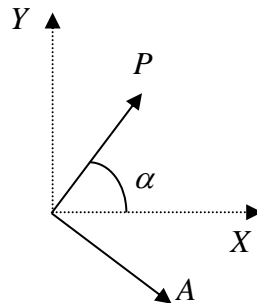
quatre positions pour lesquelles l'extinction est rétablie. On oriente ensuite Q dans une position où il n'y pas d'extinction. Si on tourne alors l'analyseur, on constate la présence de deux maximums et deux minimums. Les minimums sont d'autant plus marqués qu'on est près d'une extinction avant la rotation 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 (axes de propagation sans déformation de l'onde incidente) :



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



Soit $P = a \cdot \cos \omega t$ l'amplitude de la vibration issue de P et arrivant sur la lame. Sa projection sur les lignes neutres donne :

$$X = a \cdot \cos \alpha \cos \omega t = A \cdot \cos \omega t$$

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

Et on a en sortie de lame :

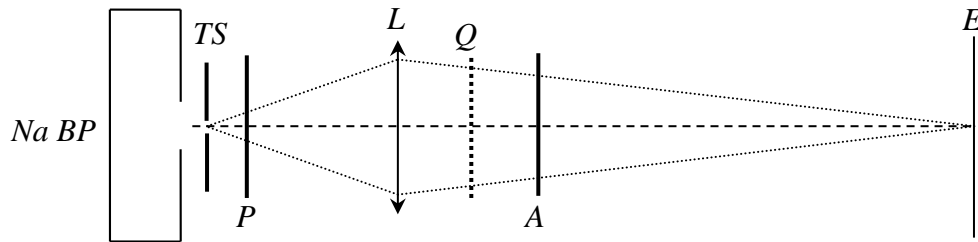
$$X = A \cdot \cos \omega t$$

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

On a donc une vibration elliptique à la sortie de la lame cristalline (cf. [2], p.184) mais il faut noter que 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 ci-après).

II.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 la lame $\lambda/4$. On peut alors utiliser un laser polarisé si on a une $\lambda/4$ accordé à sa longueur d'onde. Dans le cas contraire, on peut utiliser une lampe spectrale avec un filtre interférentiel et une lame $\lambda/4$ accordée à une des longueurs d'onde de la lampe. Le filtre n'est pas nécessaire si on a une lame accordée au doublet jaune du Sodium d'où un gain en luminosité. C'est le choix qui a été fait ici.

Manipulation :

L : 250 mm (placer 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 $\lambda/4$ accordée au doublet du sodium

A : analyseur

On croise P et A, on introduit la lame $\lambda/4$ et on repère ses lignes neutres. On tourne ensuite la lame de manière à placer ses lignes neutres à 45° de la polarisation incidente. Si on tourne l'analyseur, on doit constater que l'intensité lumineuse est constante. Les méthodes proposées au § III permettent de vérifier que la vibration obtenue est polarisée circulairement.

Explication :

Elle découle de celle donnée au § précédent. On a $A = B$ lorsque $\alpha = 45^\circ$. Une lame quart-d'onde correspondant à une épaisseur optique $e\Delta n = \lambda/4$, elle introduit un déphasage $\varphi = \pi/2$. Les composantes de la vibration sortant de la lame sont $X = A \cos \omega t$ et $Y = A \sin \omega t$. Si $\alpha = +45^\circ$, on a $X = |A| \cos \omega t$, $Y = |A| \sin \omega t$ et l'onde est circulaire gauche³. Si $\alpha = -45^\circ$, on a $X = |A| \cos \omega t$, $Y = -|A| \sin \omega t$ et l'onde est circulaire droite. Le passage d'une gauche à une droite s'effectue expérimentalement en tournant P de 90° ou en permutant les axes rapide et lent de la lame $\lambda/4$. Une application des lames $\lambda/4$ est donnée dans la référence [3], p. 289.

II.2 Par réflexion métallique

[3], p. 273 ; [1], § 213 à 225

II.2.1 Introduction

Les propriétés optiques d'un diélectrique transparent et isotrope peuvent être décrites à l'aide d'un indice de réfraction réel. Un matériau conducteur, quant à lui, à un indice complexe. L'application des formules de Fresnel donnant le coefficient de réflexion avec cet indice complexe montre que la réflexion métallique a des propriétés très différentes de la réflexion vitreuse :

- le coefficient de réflexion en intensité est proche de 1 quelle que soit l'incidence i (effet de miroir) ce qui n'est pas le cas pour la réflexion vitreuse (forte dépendance en $i \rightarrow$ cf. § I.3).

- la réflexion vitreuse s'accompagne d'un déphasage de π (milieu moins \rightarrow plus réfringent) quelle que 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, appelée incidence principale, variant entre 70° et 80° selon les métaux. Cela signifie qu'un faisceau polarisé rectilignement peut donner, par réflexion métallique, un faisceau totalement polarisé elliptiquement.

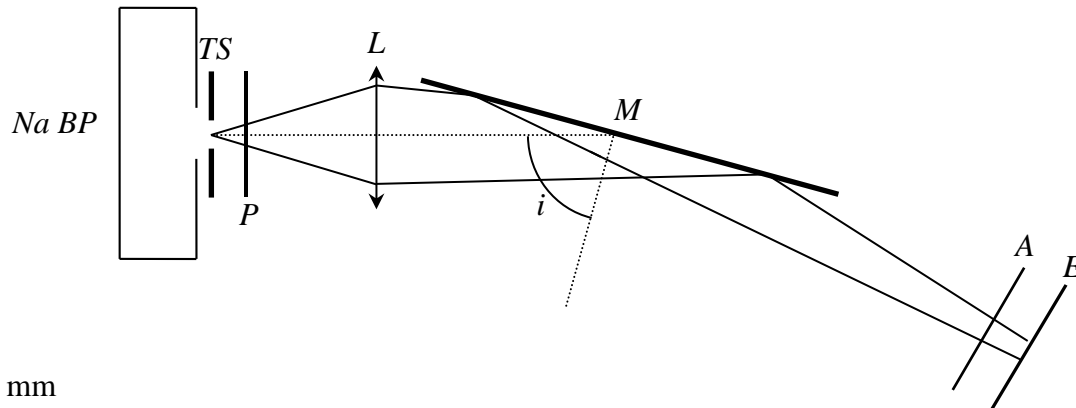
³ On peut s'en convaincre en calculant la valeur des composantes X et Y à $t = 0$ puis en regardant leur évolution lorsque t augmente à partir de zéro.

II.2.2 Manipulation

[3], p. 299

On emploie un miroir métallisé sur la face avant pour éviter les phénomènes liés à la réflexion vitreuse et on l'éclaire sous incidence principale.

Montage :



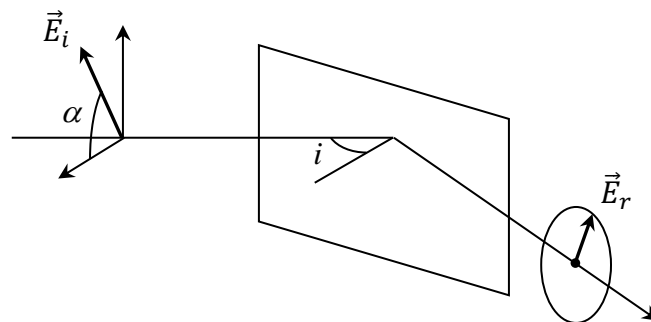
$L : 250 \text{ mm}$

P, A : polariseur, analyseur

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

TS : trou source

Le trou source doit être fin et l'écran placé assez loin pour que le faisceau incident sur le miroir soit pratiquement parallèle (même incidence pour tous les rayons). On note α l'angle de polarisation de la lumière incidente par rapport au plan d'incidence :



Observations :

On oriente le polariseur P pour avoir $\alpha = 0$ ou 90° . Si on tourne l'analyseur A, on constate la présence de deux minimums nuls. La lumière réfléchi dans ces conditions est rectiligne totale.

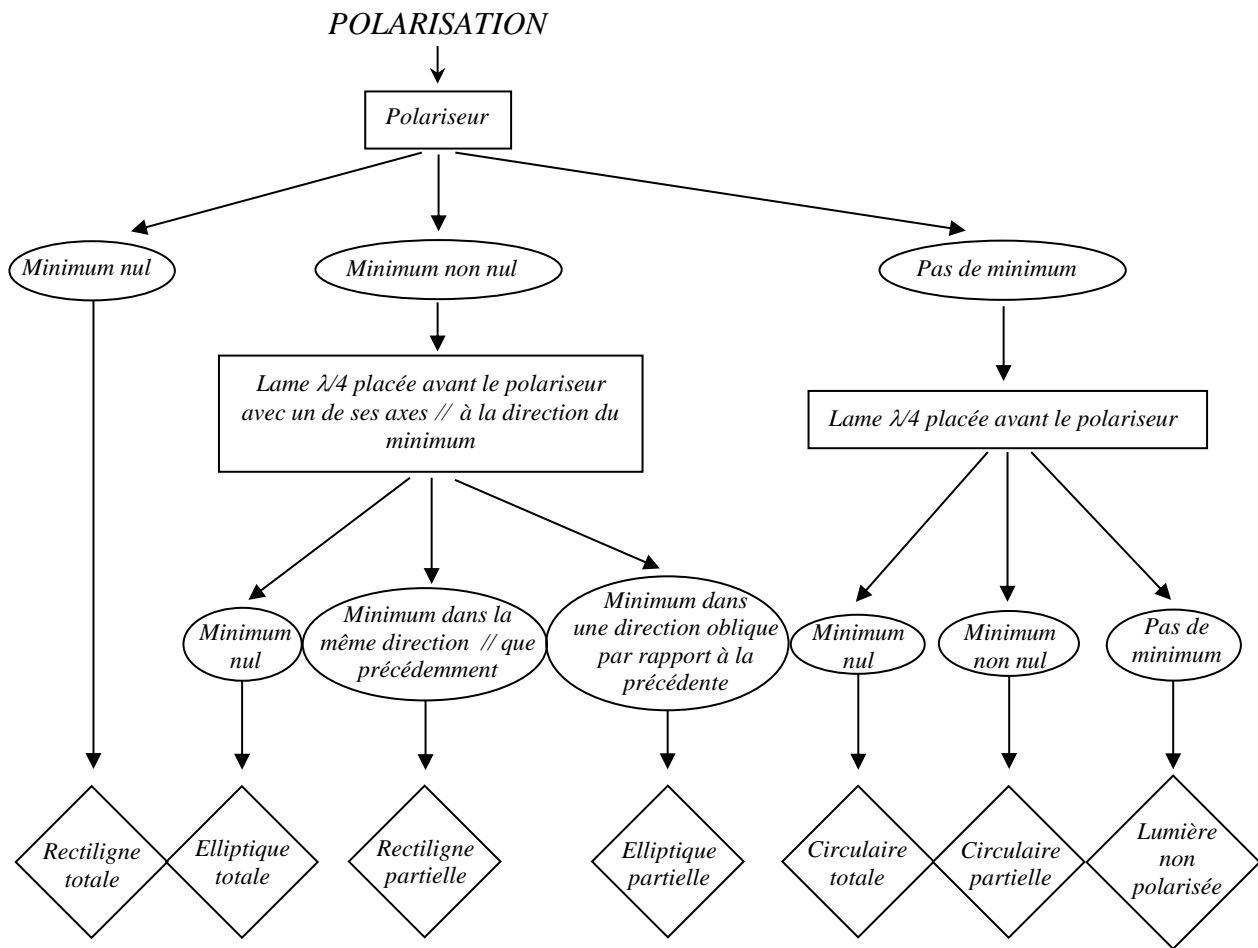
On oriente P pour tester les cas $0 < \alpha < 45^\circ$ et $45^\circ < \alpha < 90^\circ$. Cette fois ci, on doit avoir deux minimums non nuls lorsqu'on tourne l'analyseur. La lumière est elliptique dans ce cas, mais l'expérience ne permet pas de le démontrer

On termine en ajustant α à 45° . Dans ce cas, il n'y a aucun minimum lorsqu'on fait tourner l'analyseur.

Pour justifier toutes ces observations, il suffit de projeter P sur les axes perpendiculaire et parallèle au plan d'incidence.

III ANALYSE D'UNE LUMIERE

Pour déterminer une polarisation inconnue, on peut utiliser la démarche systématique suivante :

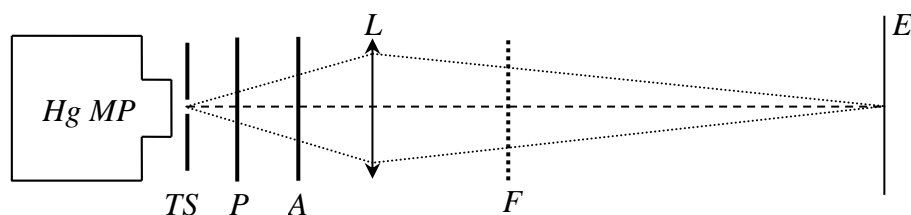


- Symbolise un élément ajouté sur le trajet de la vibration
- Symbolise l'observation
- Symbolise la conclusion sur le type d'observation

Pour une vibration elliptique, il faut aussi déterminer son degré d'ellipticité et le sens droite ou gauche de la vibration. Pour une lumière partiellement polarisée, il faut quantifier son taux de polarisation.

III.1 Vibration rectiligne

III.1.1 Analyseur à extinction



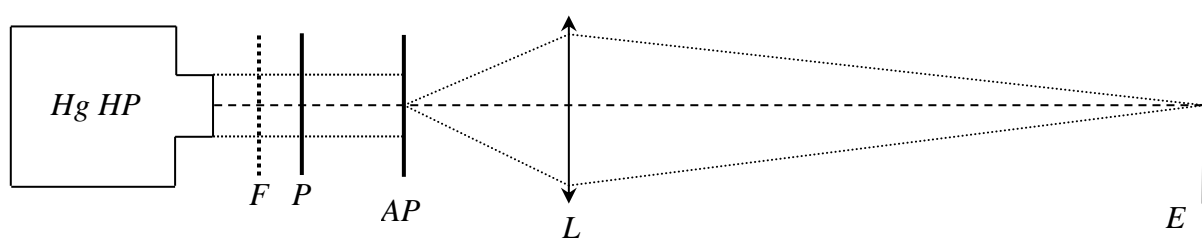
L : 150

F : filtre vert coloré

P : Polaroid

La lampe à vapeur de mercure moyenne pression est une lampe assez puissante donc **il ne faut pas placer le Polaroid sur son point de convergence sous peine de l'abîmer**. On travaille en lumière grossièrement monochromatique avec la raie verte du mercure bien que ce ne soit pas nécessaire ici pour pouvoir comparer le résultat avec le paragraphe suivant. La manipulation est triviale, il suffit de rechercher l'extinction. On peut estimer la précision sur le pointé de la vibration.

III.1.2 Analyseur à pénombre



F : filtre coloré vert

P : Polaroid

AP : analyseur à pénombre

L : 150 mm

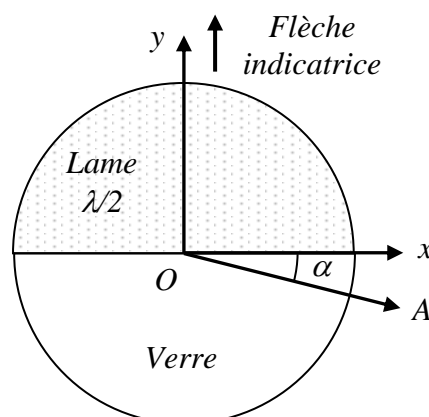
Manipulation :

On ajuste le tirage de la lampe pour obtenir un faisceau grossièrement parallèle et on forme l'image de l'analyseur à pénombre sur l'écran. On observe alors deux zones différentes sur cette image et leur éclairement respectif change, en passant d'une différence nette à l'égalité d'éclairement, lorsqu'on tourne l'analyseur. Il y a deux cas où la luminosité est identique dans les deux plages. Un premier, dans la pénombre, où la flèche de l'AP pointe dans la direction de polarisation P de l'onde incidente, et un deuxième, dans la clarté, où la flèche est perpendiculaire à P. Le pointé d'une vibration est plus précise si on recherche l'égalité dans la pénombre car l'œil détecte plus facilement des écarts de luminosité en basse lumière. On peut donc faire cette recherche et estimer la précision du pointé pour comparer le résultat avec celui d'un analyseur à extinction unique.

Description de l'analyseur à pénombre :

[2], p. 182 ; [1], p. 488 et suivantes

Il 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 peut être fixe ou variable suivant le modèle d'analyseur mais il reste faible dans tous les cas. 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.



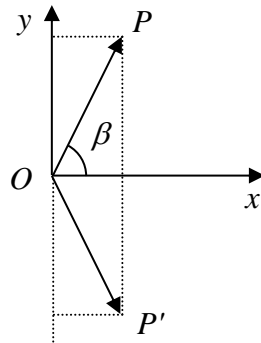
Effet de la lame $\lambda/2$:

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

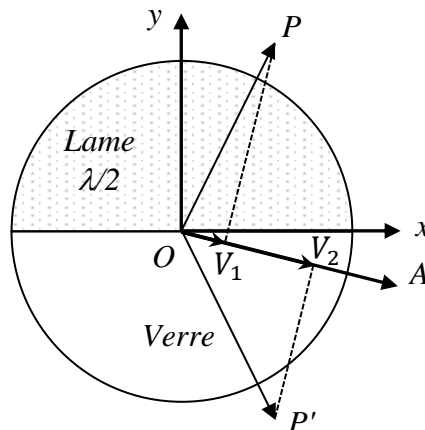
$$\text{Entrée } \lambda/2 : \quad X = a \cdot \cos\beta \cos\omega t \quad Y = a \cdot \sin\beta \cos\omega t$$

$$\text{Sortie } \lambda/2 : \quad X = a \cdot \cos\beta \cos\omega t \quad Y = a \cdot \sin\beta \cos(\omega t - \pi) = -a \cdot \sin\beta \cos\omega t$$

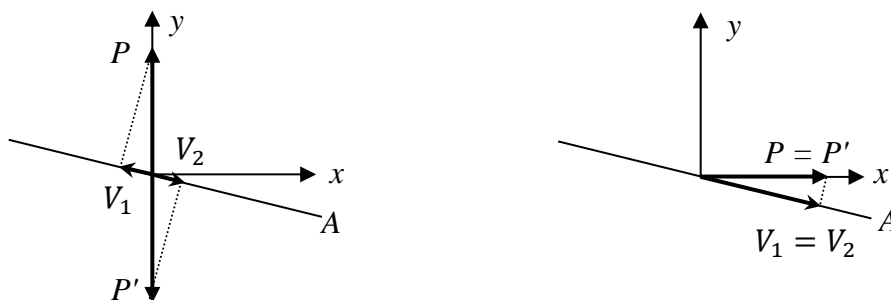
→ La lame $\lambda/2$ transforme la vibration rectiligne P en une vibration rectiligne P' symétrique à P par rapport à Ox :

Passage dans l'analyseur :

Il reçoit la vibration P ayant traversée la demi-lame en verre. On en récupère, par projection sur l'analyseur, la composante V_1 . Il reçoit aussi la vibration P' résultant du passage de P à travers la demie lame $\lambda/2$. On en récupère, par projection sur l'analyseur, la composante 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 . Elles correspondent au cas où Oy est parallèle ou perpendiculaire à la direction de la vibration rectiligne à analyser :



La configuration où Oy est parallèle à la direction de la vibration rectiligne à analyser correspond à l'égalité d'éclairement dans la pénombre qui est la mieux détectée par l'œil.

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

$$I_1 = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \beta' \right) = I_0 \sin^2 (\alpha - \beta')$$

$$I_2 = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \beta' - \alpha \right) = I_0 \sin^2 (\alpha + \beta')$$

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

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

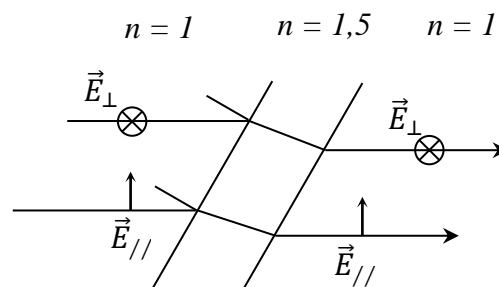
→ On détecte d'autant mieux l'égalité d'éclairement dans la pénombre que α est petit.

III.1.3 Etude d'une lumière partiellement polarisée rectilignement

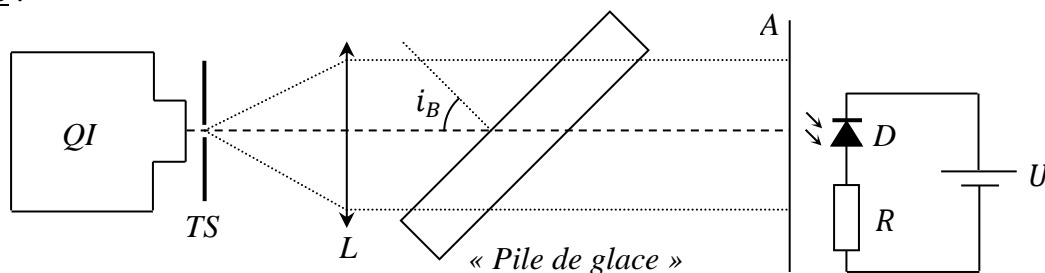
[3], p.271,

[4], p. 187.

Une transmission vitreuse unique ne permet pas l'obtention d'une lumière totalement polarisée rectilignement. Par contre, une succession d'interfaces air/verre éclairée en incidence de Brewster (dispositif dit « pile de glace ») peut augmenter le taux de polarisation de la lumière émergente car la composante parallèle au plan d'incidence de la vibration est intégralement transmise à cette incidence puisque $R_{//} = 0$ (cf. § I.3) alors que la composante perpendiculaire est atténuée à chaque passage de dioptre d'un coefficient 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 :



Avec des coefficients en intensité $T_{//} = 1$ et $T_{\perp} = (0,85)^2$ pour $n = 1,5$ → On a $T_{\perp} = (0,85)^{2N}$ pendant que $T_{//}$ reste unitaire si on empile N lames donc une pile de glace peut théoriquement fournir une lumière totalement polarisée si N est très grand.

Montage :

L : 150 mm

A : analyseur

TS : trou source suffisamment petit pour avoir un faisceau incident bien parallèle

D : photodiode avec résistance R polarisée en inverse

Mesures :

On ajuste par auto collimation la position de la lentille L pour avoir un faisceau émergent parallèle puis on oriente la pile de glace à l'incidence de Brewster $i = i_B$. Si on fait tourner l'analyseur, on observe deux maximums et deux minimums formant deux axes à 90° l'un de l'autre. Le taux de polarisation rectiligne d'une vibration se calcule par la relation $\tau = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$ avec I les intensités des deux composantes de la vibration. La photodiode étant polarisée en inverse, sa réponse est linéaire en intensité donc on mesure avec un voltmètre les tensions V_{min} et V_{max} et on en déduit le taux de polarisation de la vibration transmise par la relation :

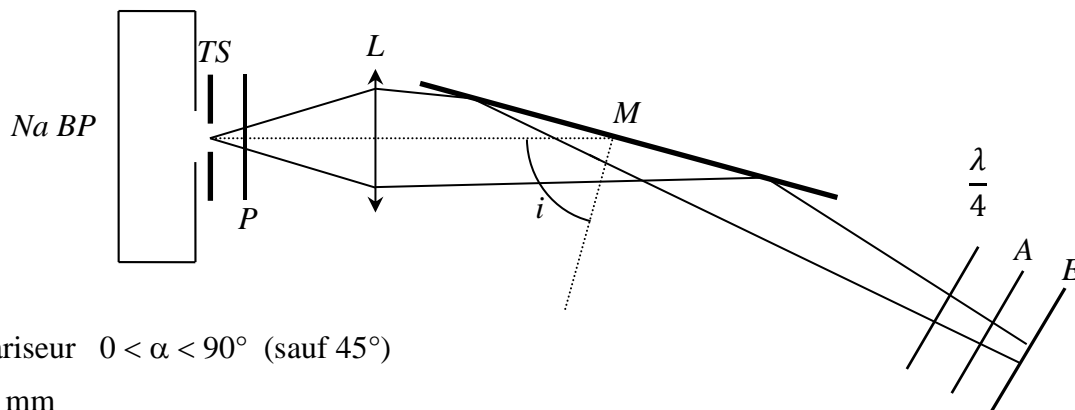
$$\tau = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}}$$

Remarque :

La pile de glace utilisée ici n'est pas constituée de lames de verre mais d'une succession de film transparents, ce qui limite les performances du système. La mauvaise qualité de poli des surfaces (rayures, perte de transparence avec le temps) entraîne la diffusion de la lumière qui dépolarise la lumière, les feuilles sont un peu gondolées et se touchent probablement par endroit, ...
→ de la lumière passe toujours en \perp .

III.2 Vibration elliptique

Pour analyser une polarisation elliptique, il faut d'abord la produire. On peut le faire par biréfringence (emploi d'une $\lambda/4$ par exemple → § II.1.2) ou par réflexion métallique (§ II.2). L'analyse d'un tel type de polarisation nécessitant l'emploi d'une lame quart d'onde, on la produit ici par réflexion métallique pour éviter d'utiliser deux fois le même principe.

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 calée sur le doublet du Sodium

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 dont on dispose.

Manipulation :

On commence sans la lame $\lambda/4$. On repère avec l'analyseur la direction où l'intensité est minimale (petit axe de l'ellipse). On place la lame quart-d'onde devant l'analyseur en faisant coïncider son axe rapide avec la direction que l'on vient de repérer. On a alors une vibration rectiligne à la sortie de la lame quart d'onde (le vérifier en tournant l'analyseur). On remplace l'analyseur dans son

orientation initiale (petit axe de l'ellipse) puis on cherche le sens de rotation permettant de retrouver l'extinction en le tournant d'un angle $\beta < \pi/2$.

Exploitation :

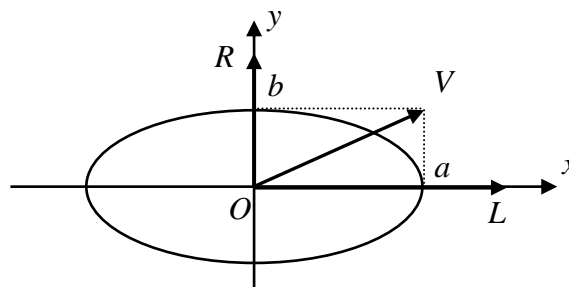
On regarde dans un premier temps l'effet de la lame $\lambda/4$ sur la vibration elliptique d'axes principaux Ox (grand axe a) et Oy (petit axe b). L'axe rapide R de la lame est aligné avec Oy, l'axe lent L avec Ox. Si on considère une vibration elliptique gauche, la projection de la vibration sur les lignes neutre de la lame donne :

$$E_x = a \cdot \cos \omega t \quad E_y = b \cdot \sin \omega t$$

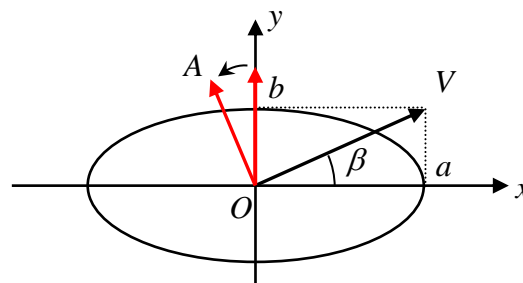
D'où, en sortie de lame :

$$E_x = a \cdot \cos(\omega t - \pi/2) = a \sin \omega t \quad E_y = b \cdot \sin \omega t$$

On a donc une vibration V polarisée rectilignement suivant la diagonale du rectangle dans lequel est inscrite l'ellipse :



Cette vibration arrive ensuite sur l'analyseur réglé de manière à ce que son sens passant coïncide avec le petit axe Oy de l'ellipse donc la rotation qu'on doit lui faire subir pour retrouver l'extinction correspond à l'angle d'ellipticité β de la vibration :



On voit immédiatement sur le schéma que cet angle vérifie la relation :

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

Et que le caractère ou droite de la vibration est donné par le sens de rotation de l'analyseur.

Remarques :

Si la vibration d'origine est circulaire, l'angle α vaut $\pi/4$. L'analyse peut aussi se faire avec un analyseur à pénombre.

III.3 Utilisation d'un polariseur tournant

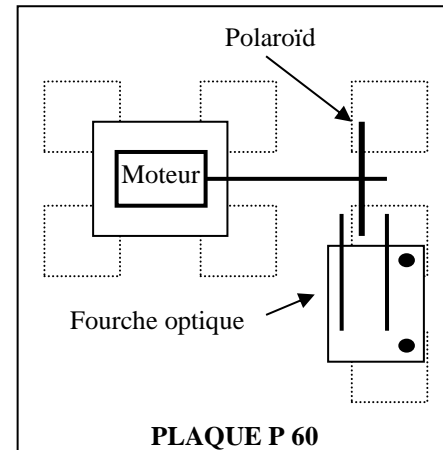
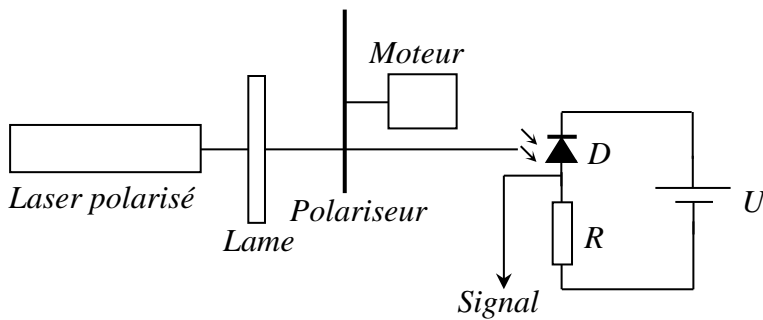
La méthode précédente n'est pas forcément très précise car il faut repérer visuellement deux extinctions. Une technique alternative consiste à utiliser un polariseur tournant et une photodiode polarisée en inverse pour récupérer un

signal sur un oscilloscope. Si on suppose que la vibration à analyser est complètement polarisée, l'allure de la trace récupérée sur l'oscilloscope indique immédiatement l'état de polarisation :

- elle est rectiligne si le signal est sinusoïdal avec un minimum nul
- elle est elliptique si le signal est sinusoïdal avec un minimum non nul
- elle est circulaire si le signal est continu

Montage :

[3], p. 301



Laser : He-Ne polarisé

Moteur : 12V continu

Lame : $\lambda/4$ accordée au laser

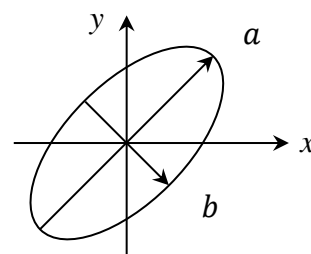
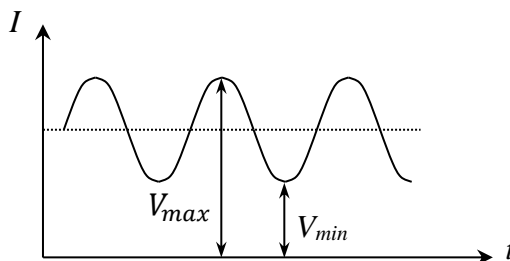
Photodiode : OSD 5T ($U = 12\text{ V}$; R à ajuster)

La réalisation pratique du polariseur tournant peut s'effectuer avec le matériel Electrome.

Observations :

On peut vérifier que le signal est conforme à celui d'une vibration rectiligne quand on intercepte directement le faisceau du laser et qu'il est en accord avec une vibration elliptique lorsqu'on intercale la lame $\lambda/4$. Le signal étant proportionnel au flux reçu, donc à E^2 (E = champ électrique de la vibration), la mesure des valeurs extrêmes V_{max} et V_{min} de la tension détectée permet d'obtenir le degré d'ellipticité :

$$tg\beta = \frac{a}{b} = \sqrt{\frac{V_{max}}{V_{min}}}$$



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 peut obtenir ce signal en plaçant un petit morceau d'adhésif opaque sur le Polaroid tournant pour assurer le déclenchement du

signal de synchronisation via une fourche optique. On détermine de même la direction du grand axe d'une polarisation elliptique.

III.4 Analyse de la lumière naturelle

On peut utiliser comme source une lampe Quartz-Iode. On applique alors le protocole indiqué au début du § III :

- on place un polariseur sur le trajet du faisceau et pour vérifier qu'on a une intensité lumineuse constante lorsqu'on le tourne.
- on ajoute avant le polariseur une lame $\lambda/4$ avec un filtre gélatine centré sur sa longueur d'onde. L'intensité doit rester constante lorsqu'on tourne l'analyseur \rightarrow la lumière naturelle n'est donc pas polarisée.

Bibliographie :

- [1] : Bruhat – Kastler : Optique (sixième édition)
- [2] : Duffait : Expériences d'optique à l'agrégation de Physique, p.177 à 189
- [3] : Sextant : Optique expérimentale, p. 263 à 277 et 298 à 301
- [4] : Serge Huard : Polarisation de la lumière
- [5] : Françon : Vibrations lumineuses, p. 240 à 256
- [6] : Fleury Matthieu : Lumière