



1. Introduction

1.1. Objectifs

Ce TP vise à étudier les propriétés de la lumière polarisée et son interaction avec différents composants optiques. Les objectifs sont :

- Vérifier quantitativement la loi de Malus pour une onde polarisée rectilignement.
- Analyser l'action d'une lame demi-onde sur l'état de polarisation.
- Étudier la réflexion vitreuse et déterminer l'angle de Brewster pour en déduire l'indice de réfraction du verre.

1.2. Sommaire

1. Vérification expérimentale de la loi de Malus.
2. Action d'une lame demi-onde sur une onde polarisée.
3. Étude de la réflexion d'une onde EM et angle de Brewster.

2. Vérification de la loi de Malus

2.1. Matériel

- Laser He-Ne (polarisé rectilignement).
- Polariseur.
- Photodiode
- Filtre non polarisant (facultatif)
- Voltmètre.

2.2. Description du montage expérimental

Le laser (1) émet une onde polarisée. On place un polariseur (2) tournant devant le détecteur (3). L'angle θ correspond à l'orientation du polariseur. θ_0 désigne l'angle correspondant à la direction de polarisation initiale du laser (direction du champ électrique incident).

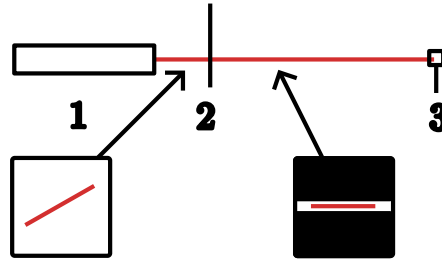


FIGURE 1 – Montage expérimental. On a représenté une polarisation arbitraire initiale du laser et une polarisation horizontale.

2.3. Mesures à effectuer

1. Allumer le laser et attendre 2min pour que la puissance envoyée soit stable.
2. Si la puissance envoyée est supérieure à 10V, placer un filtre non polarisant avant le polariseur.
3. Repérer les angles pour lesquels on obtient P_{max} et P_{min} .
4. Mesure de la puissance $P(\theta)$ par pas de 10° de 0 à 360° et par pas de 5° autour des angles d'extremas.

2.4. Données expérimentales

2.4.1. Données

TABLEAU 1 – Mesures de la tension U en fonction de l'angle θ

Angle θ ($^\circ$)	Tension U (V)	Angle θ ($^\circ$)	Tension U (V)
0	2,10	180	1,88
20	0,94	200	0,75
40	$8,12 \cdot 10^{-2}$	220	$7,70 \cdot 10^{-2}$
45	$2,16 \cdot 10^{-2}$	225	$1,85 \cdot 10^{-2}$
47	$1,06 \cdot 10^{-2}$	229	$9,82 \cdot 10^{-3}$
50	$1,45 \cdot 10^{-2}$	230	$1,54 \cdot 10^{-2}$
55	$5,58 \cdot 10^{-2}$	235	$7,65 \cdot 10^{-2}$
60	0,18	240	0,17
80	1,09	260	1,15
100	2,56	280	2,15
120	3,28	300	3,31
135	3,36	315	3,75
140	4,02	320	3,81
145	3,80	325	3,41
160	2,95	340	3,14
		350	3,08

Les données ont été prises avec le polariseur mal orienté. Pour obtenir des mesures respectant les conventions, il faut modifier l'angle θ de cette façon : $\theta = 360 - \theta$. Dans la suite, nous utiliserons ce nouvel angle.

2.4.2. Incertitudes

L'évaluation de la précision de nos mesures repose sur plusieurs facteurs limitants identifiés lors de la manipulation :

- **Incertitude de lecture angulaire** : Le polariseur utilisé possède une graduation de 1° , nous retiendrons une incertitude de lecture directe de $\pm 0,5^\circ$.
- **Incertitude sur la puissance (Tension U)** : La lecture sur le voltmètre ou la centrale d'acquisition présente une précision limitée à deux chiffres significatifs (2 cs) sur les calibres les plus bas. L'incertitude de lecture est estimée à la demi-unité du dernier rang affiché.
- **Défaut de parallélisme** : Un mauvais alignement du faisceau laser avec l'axe optique du montage peut introduire un décalage systématique sur la valeur de θ_0 . Ce défaut de parallélisme impacte la symétrie des courbes obtenues.
- **Bruit de fond et lumière parasite** : Malgré les précautions prises (extinction des lumières ambiantes), la photodiode capte un flux résiduel. Ce décalage est pris en compte dans le modèle par le paramètre P_{offset} .

2.5. Graphiques

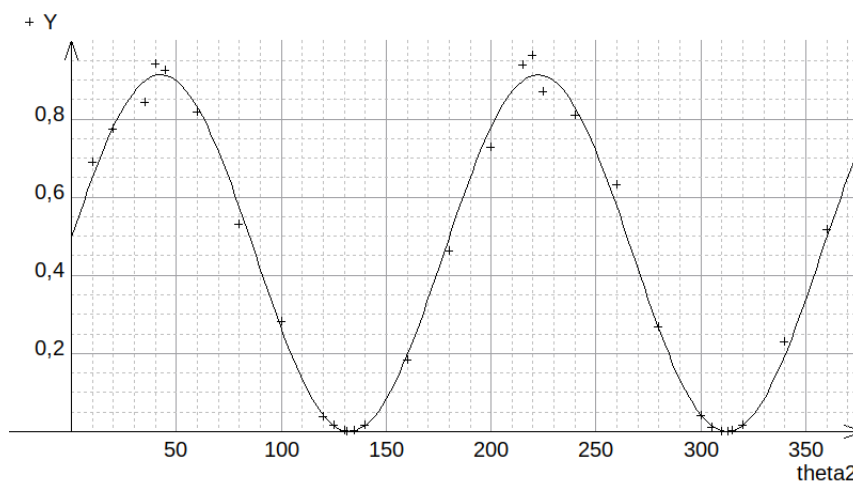


FIGURE 2 – Évolution de Y en fonction de l'angle de polarisation

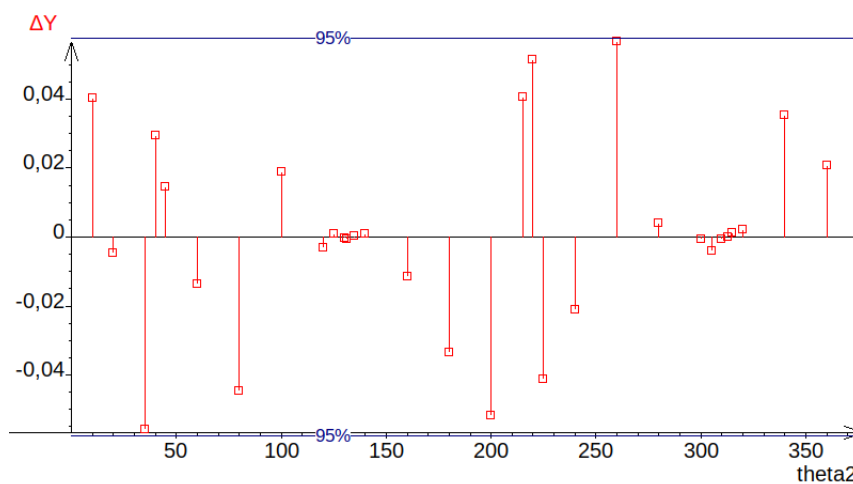


FIGURE 3 – Résidus après modélisation par $\cos^2(\theta - \theta_0)$

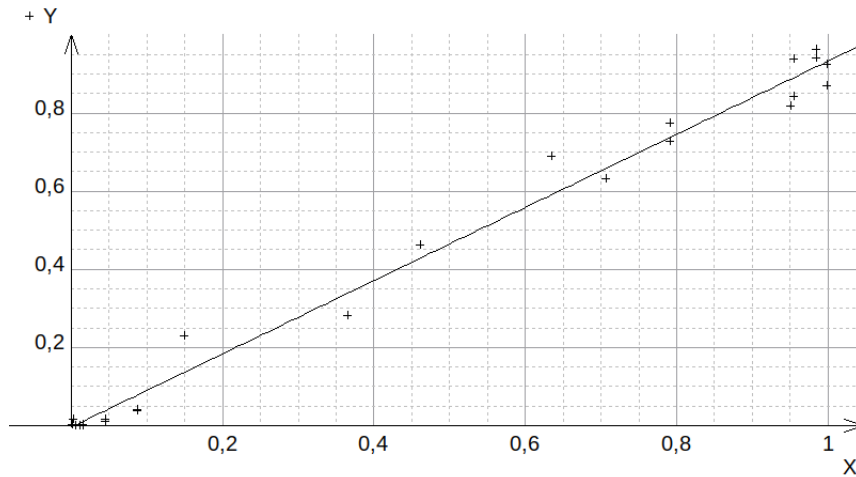


FIGURE 4 – Évolution de Y en fonction de $\cos^2(\theta - \theta_0)$

2.6. Exploitation des résultats

Théoriquement,

$$Y(\theta) = \frac{P(\theta) - P_{min}}{P_{max} - P_{min}}$$

. En remplaçant $P(\theta)$ par $P_0 \cos^2(\theta - \theta_0) + P_{offset}$ et sachant que $P_{min} = P_{offset}$ et $P_{max} = P_0 + P_{offset}$, on obtient :

$$Y(\theta) = \frac{P_0 \cos^2(\theta - \theta_0)}{P_0} = \cos^2(\theta - \theta_0)$$

On peut déduire θ_0 . Il représente l'angle d'origine (ou décalage angulaire) correspondant à la position de l'analyseur pour laquelle son axe de transmission est parfaitement aligné avec la direction de polarisation du faisceau incident, maximisant ainsi l'intensité transmise.

Regressi nous donne $\theta_0 = (44,7 \pm 1,2)^\circ$. Cependant, comme nous utilisons un polariseur Didalab, il faut rajouter ou enlever 90° pour obtenir l'angle de transmission : $\theta_0 = (-45.3 \pm 1,2)^\circ$.

Pour montrer la linéarité, on trace Y en fonction de $\cos^2(\theta - \theta_0)$. Si la polarisation est linéaire, on obtient une droite passant par l'origine de pente 1. En modélisant par une fonction affine $Y = a \times X + b$ avec Regressi, on obtient $a = (936 \pm 21) \cdot 10^{-3}$ et $b = (-4 \pm 12) \cdot 10^{-3}$ ce qui est cohérent.

3. Action d'une lame demi-onde ($\lambda/2$)

3.1. Protocole

3.1.1. Montage expérimental

On place la lame (5) entre deux polariseurs croisés (polariseur (2) et analyseur (3)) (extinction initiale).

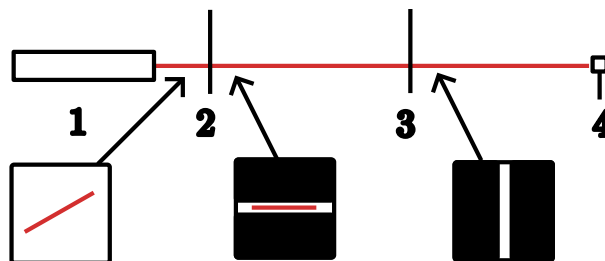


FIGURE 5 – Montage avec les polariseurs en position croisés sans lame. La lumière est bien bloquée

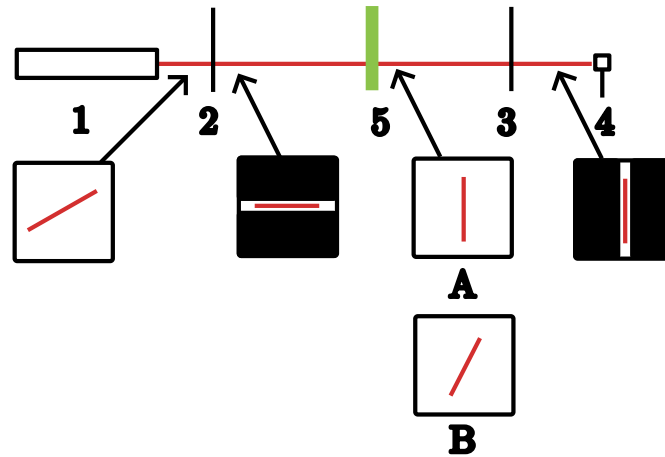


FIGURE 6 – Montage avec les polariseurs en position croisés avec la lame. La polarisation change et tourne de 90° quand la lame est tournée à 45° (A) et tourne à 60° quand elle est tournée de 30° .

3.1.2. Mesures à effectuer

1. Placer 2 polariseurs en configuration croisée, le premier étant placé de façon horizontale
2. Placer la lame sur une orientation de 0°
3. En faisant tourner l'analyseur, trouver les maximas et minimas.
4. Faire tourner l'analyseur par pas de 20° de 0 à 360° et relever la puissance
5. Refaire l'étape précédente avec une lame orientée à 30° puis 45°

3.2. Données

3.2.1. Données

Angle β ($^\circ$)	P_0 ($\alpha = 0^\circ$)	P_{30} ($\alpha = 30^\circ$)	P_{45} ($\alpha = 45^\circ$)	Sans lame
-90	3,40	0,73	0,033	3,71
-70	3,26	1,79	0,29	3,20
-50	2,39	2,98	1,28	2,36
-30	1,22	3,67	2,56	1,12
-10	0,24	3,32	3,40	0,20
0	0,035	2,90	3,50	0,025
10	0,057	2,38	3,62	0,078
30	0,74	1,17	2,67	0,85
50	1,91	0,21	1,54	1,87
70	3,14	0,065	0,57	3,30
90	3,51	0,68	0,028	3,80

TABEAU 2 – Mesures de la tension U (V) en fonction de l'angle de l'analyseur β

3.2.2. Incertitudes

La précision limitée des cadrans gradués ($\pm 0,5^\circ$) sur l'analyseur ($\Delta\beta$) et sur le support de la lame ($\Delta\alpha$) impacte directement la détermination de l'angle de rotation β . En effet, il faut prendre en compte l'incertitude des angles des 2 polariseurs en plus de celle de la lame.

L'incertitude sur la puissance lumineuse est la même qu'en partie précédente.

3.3. Graphiques

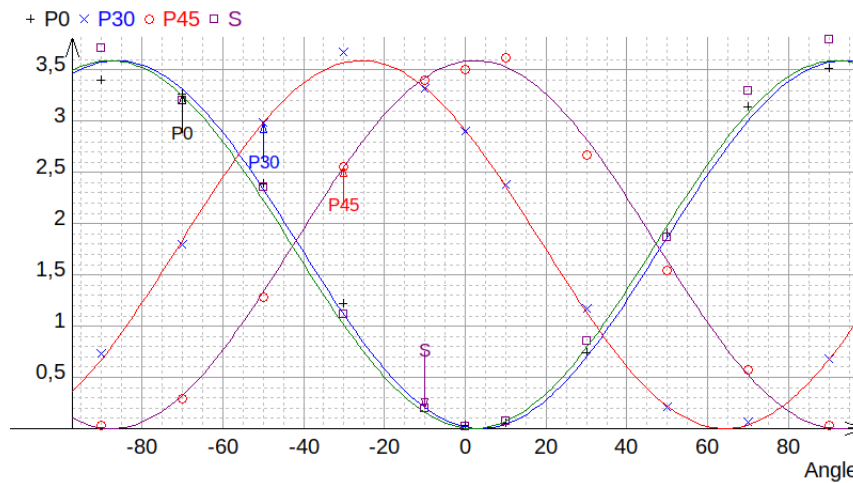


FIGURE 7 – Évolution de Y en fonction de l'angle de l'analyseur pour différentes valeurs d'orientation de la lame.

3.4. Exploitation

L'analyse repose sur la comparaison entre la référence sans lame et les séries avec lame orientée à un angle α . Sur le matériel Didalab, l'axe de transmission réel β_{abs} est décalé de 90° par rapport à l'index du cadran ($\beta_{abs} = \beta_{cadrans} + 90^\circ$).

1. Analyse de la polarisation incidente

D'après la série *Sans lame*, le minimum d'intensité ($U = 0,025$ V) est obtenu pour $\beta_{cadrans} = 0^\circ$, soit un axe de transmission vertical ($\beta_{abs} = 90^\circ$). Cette extinction prouve que le laser est polarisé **horizontalement** (0°).

2. Mécanisme de la lame $\lambda/2$ et confrontation théorique

La lame demi-onde introduit un déphasage de π entre ses axes neutres, produisant un vecteur champ électrique de sortie \vec{E}' symétrique du vecteur incident par rapport à l'axe de la lame. La polarisation tourne ainsi d'un angle $\theta = 2\alpha$.

- **Cas $\alpha = 45^\circ$:** La rotation théorique est de $2\alpha = 90^\circ$. La polarisation devient donc verticale. Expérimentalement, le nouveau minimum de tension se déplace bien à $\beta_{cadrans} = 90^\circ$ (soit $\beta_{abs} = 180^\circ \equiv 0^\circ$, position horizontale), ce qui confirme que la lumière est devenue **verticale**.
- **Cas $\alpha = 30^\circ$:** La rotation théorique est de $2\alpha = 60^\circ$. La polarisation de sortie fait un angle de 60° avec l'horizontale. On observe effectivement que le minimum de tension a "glissé" vers $\beta_{cadrans} \approx 65^\circ$, ce qui correspond à une extinction pour un axe de transmission à 155° (orthogonal à 65°). L'écart de quelques degrés s'explique par les incertitudes de positionnement des supports.

3. État de polarisation et résidus

Les minima de tension mesurés restent extrêmement faibles ($U < 0,1$ V), ce qui démontre que :

1. La polarisation demeure **rectiligne** (l'extinction est quasi-totale).
2. La lame est parfaitement adaptée à la longueur d'onde du laser (le déphasage est bien de π).

Conclusion : Les mesures valident avec précision la loi de rotation $\theta = 2\alpha$, l'écart résiduel s'expliquant par les incertitudes de positionnement des supports gradués.

4. Expérience 3 : Réflexion et angle de Brewster

4.1. Protocole

- Plan d'incidence : Plan contenant le faisceau incident et la normale à la lame.
- Relation angle de mesure : $\theta_{mes} = 180 - 2\theta_i$ (selon le montage goniométrique).
- Polarisation : Réglée parallèlement au plan d'incidence (polarisation p).

4.2. Mesures

On cherche l'angle θ_B pour lequel la puissance réfléchie P_r est minimale.

Angle mesuré θ_m (°)	Angle d'incidence θ_i (°)	Puissance P (u.a.)
180	0	0,1400
160	10	0,1400
140	20	0,1300
120	30	0,0990
100	40	0,0610
80	50	0,0220
76	52	0,0170
74	53	0,0133
72	54	0,0098
67	56,5	0,0107
64	58	0,0115
62	59	0,0123
60	60	0,0225
40	70	0,1600
20	80	0,5000

TABLEAU 3 – Mesures de la puissance réfléchie P en polarisation parallèle en fonction de l'angle d'incidence θ_i

Angle mesuré θ_m (°)	Angle d'incidence θ_i (°)	Puissance P (u.a.)
160	10	0,18
150	15	0,11
140	20	0,12
130	25	0,15
120	30	0,16
110	35	0,18
100	40	0,20
90	45	0,26
80	50	0,30
70	55	0,38
60	60	0,47
50	65	0,58
40	70	0,70
30	75	0,85
20	80	1,02
10	85	1,20

TABLEAU 4 – Mesures de la puissance réfléchie P en polarisation perpendiculaire en fonction de l'angle d'incidence θ_i

4.2.1. Incertitudes

La précision de la détermination de l'indice de réfraction n via l'angle de Brewster est limitée par plusieurs sources d'erreurs expérimentales :

- **Incertitude angulaire ($\Delta\theta_i$)** : L'erreur sur le positionnement du "zéro" (incidence normale) et la résolution mécanique du goniomètre ($\pm 0,5^\circ$) impactent directement la valeur de θ_B extraite.
- **Pureté de la polarisation (R_{\parallel})** : Si l'axe du polariseur incident n'est pas parfaitement contenu dans le plan d'incidence, une composante perpendiculaire (R_{\perp}) subsiste. Cette imperfection explique pourquoi la puissance mesurée au minimum de Brewster ($P \approx 0,0098$) n'est pas strictement nulle.
- **Bruit de fond et linéarité du capteur** : La lumière parasite ambiante et la sensibilité de la photodiode limitent la précision des mesures, particulièrement pour les faibles puissances proches de l'extinction.

4.3. Graphiques

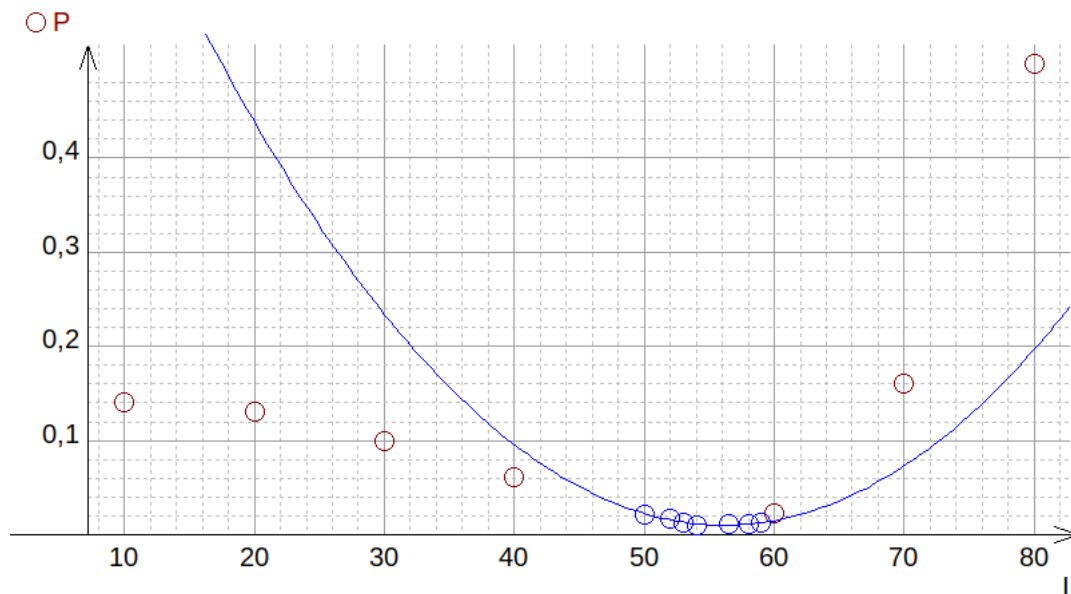


FIGURE 8 – Puissance réfléchie P_r en fonction de l'angle d'incidence θ_i (polarisation p)

4.4. Exploitation des résultats

Au voisinage de l'angle de Brewster, on ajuste par $f(\theta_i) = A(\theta_i - \theta_B)^2 + B$. Regressi nous donne $\theta_b = (56,15 \pm 0,34)^\circ$.

Calcul de l'indice de réfraction

D'après la loi de Brewster pour une interface air/verre ($n_{air} \approx 1$) :

$$n_v = \tan(\theta_B) = \tan(56,15^\circ) \approx 1,491$$

Calcul de l'incertitude

L'incertitude Δn est obtenue par différenciation de la relation $n = \tan \theta_B$:

$$dn = \frac{d(\tan \theta_B)}{d\theta_B} d\theta_B = (1 + \tan^2 \theta_B) d\theta_B$$

On peut alors écrire (avec $\Delta\theta_B$ en radians) :

$$\Delta n = (1 + n^2) \cdot \left(\Delta\theta_B \cdot \frac{\pi}{180} \right)$$

Application numérique :

$$- \Delta n = (1 + 1,491^2) \cdot (0,34 \cdot \frac{\pi}{180}) \approx 3,22 \cdot 0,0059 \approx 0,019$$

$$- \text{Résultat : } \mathbf{n_v = 1,49 \pm 0,02}$$

L'indice obtenu est en accord avec les valeurs pour le verre ($n \approx 1,5$).

5. Conclusion

Nous avons vérifié la loi de Malus avec un résidu faible, confirmant la polarisation rectiligne du laser. L'étude de la lame $\lambda/2$ a illustré la rotation du plan de polarisation. Enfin, la mesure de l'angle de Brewster à $\theta_B \approx 56^\circ$ permet d'identifier un indice de réfraction $n \approx 1,5$, cohérent avec celui du verre.