

PHS2223

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
GÉNIE PHYSIQUE

Expérience 3 : Mesure de polarisation

Auteurs :
Guillaume Sheehy
Fabien Picot
Tien Nguyen
Esmat Zamani

Sous la responsabilité de
Pr. Frédéric LEBLOND

27 août 2024

Table des matières

1	Introduction	2
2	Théorie	3
2.1	Ondes électromagnétiques classiques	3
2.2	Formalisme de <i>Jones</i>	4
3	Expérience à réaliser	5
3.1	Mesures à deux polariseurs	5
3.2	Mesures à trois polariseurs	5
4	Travail Préparatoire (première partie du rapport)	6
5	Rapport final (deuxième partie du rapport)	7
	Annexes	8
A	Vecteurs de <i>Jones</i>	8
B	Matrice de <i>Jones</i>	8
C	Grille de mesures	9

1 Introduction

La polarisation est une propriété intrinsèque de la lumière spécifiant la direction d'oscillation des ondes électromagnétiques dont elle est constituée. Ce phénomène physique peut être exploité de différentes manières dans des applications optiques. On trouve ainsi des exemples de microscopes opératoires qui utilisent des polariseurs croisés afin d'éliminer des reflets dus aux réflexions spéculaires et permettant de capturer la lumière diffusant en profondeur. La polarisation de la lumière peut également être utilisée pour moduler des patrons lumineux, l'exemple d'utilisation le plus connu étant l'écran LCD (*Liquid Crystal Display*).

Le but de ce laboratoire est de vous familiariser avec les concepts théoriques relatifs à la polarisation de la lumière ainsi que de mettre à l'épreuve ces concepts avec des manipulations pratiques.

En utilisant le matériel à votre disposition (polariseurs linéaires, source de lumière blanche et puissance-mètre), vous expérimenterez les effets de la polarisation de la lumière à l'aide d'un montage optique. Vous mesurerez le coefficient de transmission sur l'axe optique en fonction de l'angle entre des polariseurs et vous comparerez vos résultats avec les modèles théoriques afin de déterminer quel modèle est compatible avec vos observations. Finalement, vous serez amenés à réfléchir sur certains aspects quantiques de la nature des ondes électromagnétiques.

2 Théorie

La polarisation est une propriété inhérente aux ondes transverses et est intimement liée à la nature vectorielle des ondes électromagnétiques. Toujours perpendiculaire à la direction de propagation, la polarisation caractérise la direction géométrique d'une oscillation. Par convention, la polarisation est la direction vectorielle du champ électrique \vec{E} d'une onde EM (de la lumière).

Les polariseurs, parfois appelés *filtres polariseurs*, sont des éléments (filtres) optiques permettant de bloquer (ou laisser passer) la lumière selon la polarisation de celle-ci. Ils sont utilisés dans une multitude d'instruments optiques tels que les caméras, les écrans LCD, et même pour certains types de lunettes de soleil. Le type de polariseur le plus répandu est le *polariseur linéaire*. Les polariseurs linéaires sont généralement regroupés en deux catégories ; les polariseurs par absorption et les polariseurs par séparation de faisceau (beam splitter). Les polariseurs par absorption absorbent la lumière polarisée selon un certain axe (ex : \hat{x}) et ne laissent passer que la lumière polarisée selon la direction transverse (ex : \hat{y}). Vous utiliserez ce type de polariseur lors de cette expérience.

Plusieurs formalismes permettent de décrire l'état de polarisation et les effets des polariseurs. Les sections suivantes présentent un formalisme simple (OEM classique) ainsi que le formalisme de Jones qui permet de décrire un état de polarisation complète. Le formalisme de Stokes qui n'est pas présenté dans ce document permet de décrire les états de polarisation partielle.

2.1 Ondes électromagnétiques classiques

Le champ électrique d'une onde plane se propageant selon la direction \hat{z} peut s'écrire en utilisant la forme générale suivante,

$$\vec{E}(z, t) = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ 0 \end{pmatrix} e^{i2\pi(\frac{z}{\lambda} - \frac{t}{T})} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ 0 \end{pmatrix} e^{i(kz - \omega t)}. \quad (1)$$

La direction de polarisation de cette onde peut donc s'écrire :

$$\hat{\mathcal{P}} = \frac{E_x \hat{x} + E_y \hat{y}}{\sqrt{E_x^2 + E_y^2}} \quad (2)$$

Notez que la **direction** de polarisation est normalisée. La puissance optique (P) de cette onde est donnée par la moyenne temporelle du vecteur de Poynting (\vec{S}),

$$P = \langle S \rangle = \frac{1}{2\eta} |E|^2 \quad (3)$$

où η est l'impédance caractéristique du milieu de transmission. Dans le vide (\sim air), $\eta_0 = \mu_0 c_0 \approx 377\Omega$. Un modèle simplifié du filtre polariseur est de considérer que celui-ci absorbe la lumière qui n'est pas polarisée selon son axe de transmission. Par exemple, si l'on considère une onde horizontalement polarisée ($\hat{E}_0 = \hat{x}$) qui passe au travers d'un polariseur orienté à angle θ (Figure 1), l'amplitude du champ électrique transmise sera $E = E_0 \cos(\theta)$.

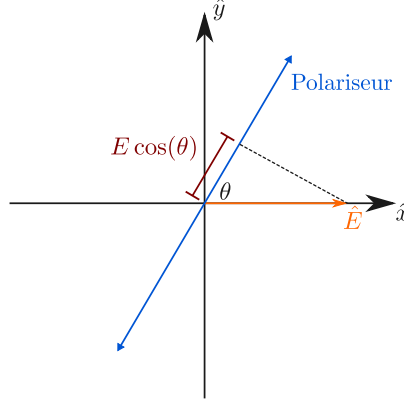


FIGURE 1 – Exemple de positionnement de polariseur avec un champ électrique polarisé horizontalement.

2.2 Formalisme de Jones

Dans le formalisme de Jones, les états de polarisation (analogue à des états quantiques) sont représentés par un **vecteur de Jones** $\vec{\mathcal{J}}$ et chaque élément optique par une **matrice de Jones** ($M_{\mathcal{J}}$). Lorsque la lumière traverse un élément optique, l'état de polarisation résultant ($\vec{\mathcal{J}}'$) est donné par

$$\vec{\mathcal{J}}' = M_{\mathcal{J}} \cdot \vec{\mathcal{J}} \quad (4)$$

Si l'on reprend la notation précédente pour une onde plane et que l'on y ajoute les termes de phase ϕ_x et ϕ_y , on peut réécrire le champ électrique tel que

$$\vec{E}(z, t) = \begin{pmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}e^{i(kz-\omega t+\phi_x)} \\ E_{0y}e^{i(kz-\omega t+\phi_y)} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}e^{i\phi_x} \\ E_{0y}e^{i\phi_y} \\ 0 \end{pmatrix} e^{i(kz-\omega t)}. \quad (5)$$

Le vecteur de Jones $\vec{\mathcal{J}}$ est donc défini à une phase globale près et est donné par

$$\vec{\mathcal{J}} := \begin{pmatrix} E_{0x} \\ E_{0y}e^{i\Delta\phi} \end{pmatrix} \quad (6)$$

avec $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$. Ainsi, le vecteur de Jones $\vec{\mathcal{J}}$ représente l'amplitude et la phase du champ électrique. Les vecteurs de Jones de plusieurs états de polarisation communs sont présentés en Annexe A et les matrices de Jones de certains éléments optiques en Annexe B. Lorsqu'un élément optique subit une rotation θ par rapport à sa position originale, sa *nouvelle* matrice de Jones est calculée par

$$M(\theta) = R(-\theta)M_0R(\theta) \quad (7)$$

avec $R(\theta)$ la matrice de rotation

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Par exemple, un polariseur linéaire aligné selon l'angle θ (Figure 1) correspond à la matrice de Jones

$$M(\theta) = R(-\theta) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} R(\theta) \quad (9)$$

Comme précédemment, la puissance optique (P) peut être calculée avec le vecteur de Poynting ;

$$P = \langle S \rangle = \frac{1}{2\eta} \left\| \vec{\mathcal{J}} \right\|^2 \quad (10)$$

3 Expérience à réaliser

Le but de cette expérience est de mesurer l'effet d'un filtre polariseur sur un faisceau de lumière polarisée. Pour ce faire, vous allez utiliser les deux montages présentés dans cette section. Les deux montages sont identiques à l'exception des polariseurs. Une lampe au sodium est utilisée comme source de lumière. La lentille L_1 est positionnée afin d'obtenir un faisceau de lumière collimé. Par la suite, un premier polariseur (P_1) est positionné pour obtenir un faisceau polarisé horizontalement. Les polariseurs (P_2 et P_3) sont positionnés et peuvent être tournés (θ) autour de l'axe optique (\hat{z}). Finalement, une lentille (L_2) et un puissance-mètre permettent de mesurer la puissance optique transmise par le système.

Note - Des grilles des mesures à compléter sont présentées en Annexe C.

3.1 Mesures à deux polariseurs

1. Réalisez le montage illustré par le schéma en Figure 2.
2. Retirez le polariseur P_2
3. Notez la puissance optique transmise par le système¹. Il s'agit de votre puissance de référence P_0
4. Remplacez P_2 sur l'axe optique et tournez-le afin de maximiser la puissance transmise. Notez cette puissance ($P(\theta = 0)$)
5. Remplissez la grille de mesure Table 1 en Annexe C en répétant un cycle de rotation - mesure de puissance.

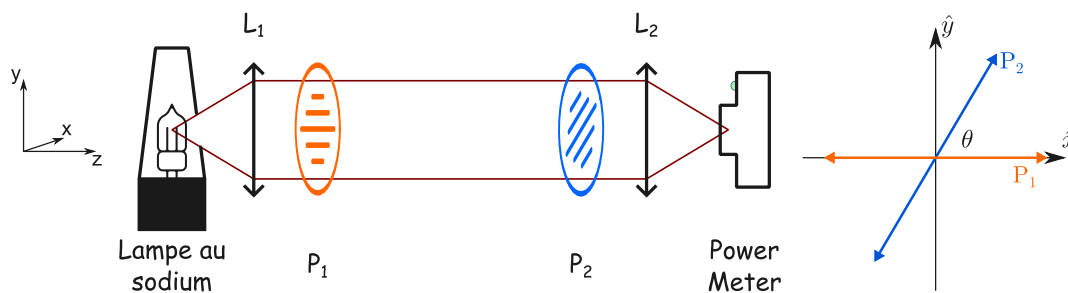


FIGURE 2 – Schéma du montage à deux polariseurs

3.2 Mesures à trois polariseurs

Ici, vous allez répéter la prise de mesure de la section 3.1, mais cette fois avec trois polariseurs.

1. Retirez le polariseur P_2
2. Répétez la mesure de P_0 faite précédemment. Notez-la dans la seconde table.
3. Remplacez P_2 sur l'axe optique et tournez-le afin de maximiser la puissance transmise.
4. Placer P_3 sur l'axe optique et tournez-le afin de maximiser la puissance transmise. Notez la puissance transmise ($P(\theta = 0)$).
5. Remplissez la grille de mesure Table 2 en Annexe C en répétant un cycle de rotation² - mesure de puissance. **Attention** ici, l'angle θ est entre (P_1 , P_2) **ET** (P_2 , P_3).

1. Attention à ne plus toucher aux montages optiques à l'exception de P_2 à partir de ce moment.

2. Ici vous devez tourner P_2 **ET** P_3 entre chaque mesure.

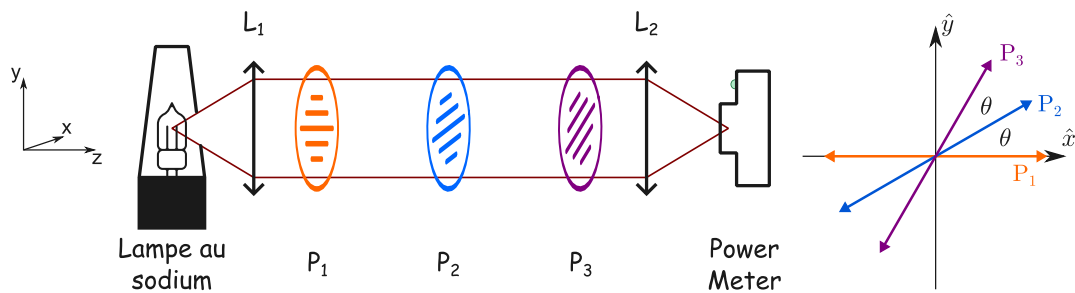


FIGURE 3 – Schéma du montage à trois polariseurs

4 Travail Préparatoire (première partie du rapport)

Vous devez remettre la première moitié de votre rapport de laboratoire **avant le début de la séance**. Cette première partie devra être constituée des sections : introduction, théorie, méthodologie et hypothèse. La grille d'évaluation suivante sera utilisée pour noter cette partie du rapport.

Partie 1			
Sections	Eléments		
Introduction			/1
Théorie		0	/3
	polariseurs et polarisation		/1
	modèle classique		/1
	modèle de Jones		/1
Méthodologie		0	/2
	présentation des montages		/1
	explications		/1
Hypothèse		0	/4
	2 polariseur, modèle classique		/1
	2 polariseurs, modèle de Jones		/1
	3 polariseur, modèle classique		/1
	3 polariseurs, modèle de Jones		/1
Total		0	/10

Écrivez une courte introduction dans laquelle vous présentez le but de l'expérience, ce que vous allez mesurer ainsi que comment vous allez le mesurer. Présentez un résumé de vos attentes ainsi que du contenu global du rapport. Entrez directement dans le vif du sujet et n'écrivez pas une introduction trop longue (max 1/2 page).

Pour la section théorie, vous devrez reprendre les éléments pertinents (pas tous) qui vous permettent d'élaborer les deux modèles que vous utiliserez pour faire vos prédictions (hypothèses). Expliquez aussi ce qu'est la polarisation et les bases du fonctionnement d'un polariseur.

Pour la méthodologie, une simple présentation des montages ainsi qu'une explication des manipulations suffisent. Vous pouvez récupérer les figures de ce document, mais assurez vous de les citer proprement.

Pour votre hypothèse, vous devez développer deux modèles permettant de calculer théoriquement le coefficient de transmission du montage suivant la rotation des polariseurs ($P(\theta)/P(\theta = 0)$). Utilisez le formalisme classique des OEM pour le premier modèle et le formalisme de Jones pour le second. Vous devez ensuite créer deux graphiques ; 1) $P(\theta)/P(\theta = 0)$ pour le premier montage (2 polariseurs) et 2)

$P(\theta)/P(\theta = 0)$ pour le second montage (3 polariseurs). Tracez deux courbes par graphique³; une pour la prédiction basée sur l'OEM classique et l'autre basée sur le formalisme de Jones. Identifiez bien vos légendes et axes.

5 Rapport final (deuxième partie du rapport)

Vous devez remettre la seconde moitié de votre rapport de laboratoire **une semaine après la séance**. Cette seconde partie devra être constituée des sections : résultats, discussion et conclusion. La grille d'évaluation suivante sera utilisée pour noter cette partie du rapport.

Partie 2			
Sections	Eléments		
Résultats			/2
Discussion		0	/7
	analyse des causes d'erreur		/1
	discussion sur les modèles		/2
	Q1		/1
	Q2		/1
	Q3		/1
	Q4		/1
Conclusion			/1
Total			/10

Pour votre section des résultats, vous devez reproduire les graphiques que vous avez présentés comme hypothèse, mais en y ajoutant les mesures effectuées. Présentez vos mesures comme un nuage de point avec des bars d'erreurs. Procédez à une estimation des erreurs en x (erreur sur l'angle θ) et en y (erreur sur la puissance mesurée).

Pour votre discussion, commencez par expliquer comment vous avez procédé pour votre estimation d'erreur. Donnez ensuite une courte liste des causes d'erreur possibles. Poursuivez en discutant des parallèles pouvant être faits entre le modèle de Jones et la mécanique quantique et spécifiquement à la notion d'états et d'opérateurs quantiques. Finalement, répondez aux questions suivantes :

1. Comment pourrait-on utiliser des polariseurs afin de fabriquer un filtre à transmission ajustable ? Ce filtre fonctionnerait-il pour tout type de faisceaux ?
2. Comment pourrait-on faire tourner l'état de polarisation 90° (de l'horizontale à la verticale par exemple) d'un faisceau en utilisant des polariseurs ? Quelle serait l'efficacité d'un tel dispositif si l'on utilisait 4 polariseurs ? Quel est l'effet du nombre de polariseurs utilisés sur l'efficacité ?
3. Les états de polarisations sont couramment utilisés comme exemple d'états quantiques, pourquoi ? Donnez un exemple en exprimant un état de polarisation horizontal comme une superposition des états de polarisation circulaire droite $|R\rangle$ et circulaire gauche $|L\rangle$. Utilisez la notation **Ket** des vecteurs de Jones. (montrez votre démarche en annexe).
4. Les vecteurs de Jones ne permettent pas d'exprimer des états partiellement polarisés, pour ce faire il faut recourir aux paramètres de Stokes. Expliquez pourquoi.

3. **Spoiler Alert !!!** : les deux modèles devraient donner les mêmes prédictions.

Annexes

A Vecteurs de *Jones*

TABLE 1 – Vecteurs de *Jones* des 6 états de polarisation de base.

État de polarisation	Vecteur de <i>Jones</i>	notation Ket
Polarisation linéaire selon \hat{x} . (Horizontale)	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$ H\rangle$
Polarisation linéaire selon \hat{y} . (Verticale)	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$ V\rangle$
Polarisation linéaire selon $+45^\circ$ de l'axe \hat{x} . (Diagonale)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$	$ D\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (H\rangle + V\rangle)$
Polarisation linéaire selon -45° de l'axe \hat{x} . (Anti-diagonale)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$	$ A\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (H\rangle - V\rangle)$
Polarisation circulaire droite. (Right hand)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$	$ R\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (H\rangle - i V\rangle)$
Polarisation circulaire gauche. (Left hand)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ +i \end{pmatrix}$	$ L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (H\rangle + i V\rangle)$

B Matrice de *Jones*

TABLE 2 – Matrices de *Jones* d'éléments optiques communs.

Élément Optique	Matrice de <i>Jones</i>
Polariseur linéaire horizontal	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
Polariseur linéaire vertical	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
Polariseur linéaire diagonal ($\pm 45^\circ$)	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \pm 1 \\ \pm 1 & 1 \end{pmatrix}$
Polariseur circulaire droite. (Right hand)	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{pmatrix}$
Polariseur circulaire gauche. (Left hand)	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{pmatrix}$

propagation d'erreur pour nos variables

addition en quadrature : p0, p et theta

// avec vecteur de jones : aka comparer vecteur jones avec état quantique et matrice à opérateur

Q1 : notre montage. Si faisceau pas polarisé, deux filtres. Si polarisé, besoin d'un seul. !!! faire attention à la pol initiale

Q2 : faut 0, 45, 90. 2 filtres : \cos^2 . trois filtres : \cos^4 . Quatres filtres : \cos^6 . Efficacité tend vers parfaite quand infini polariseurs

Q3 : (analogie au spin) photon, pas moment cinétique intrinsèque mais hélicité. polarisation est la manifestation du moment cinétique de l'électron. Faire les maths

Q4 : deux postulats pour jones : ils ne sont pas vrai pour partiellement polarisés. algèbre à 4 dim pour stokes, 2 dim pour Jones

Val réf de base : 1.294 mW

Val réf avec un pol : 0.424 mW

C Grille de mesures

Table 1

Table 2

1er pol : 0 deg

140 deg

P_0	mW
θ	$P(\theta)$
0	0.282
5	0.282
10	0.277
15	0.268
20	0.255
25	0.238
30	0.220
40	0.175
50	0.125
60	0.079
65	0.058
70	0.040
75	0.024
80	0.012
85	0.004
90	0.001
95	0.002
100	0.007
105	0.016
110	0.030
115	0.046

P_0	
θ	$P(\theta)$
0	0.188
5	0.186
10	0.179
15	0.167
20	0.150
25	0.131
30	0.110
40	0.069
50	0.035
60	0.014
65	0.007
70	0.004
75	0.002
80	0.001
85	0.001
90	0.001
95	0.001
100	0.001
105	0.001
110	0.003
115	0.006

2e pol p2 : 70

P3 : 140

Notes :

cone de lumière de la del pas parfaitement sym (pas tant circulaire) donc faisceau colime pas si bien
offset de puissance par la lumière ambiante

Certains polariseurs sont sales et d'autres absorbent plus de lumière

Incertitudes :

erreurs de lecture

power meter : + petite graduation power meter : 0.001

un angle : plus petite graduation /2

donc pour setup à deux lentilles : plus petite grad

donc pour setup à 3 lentilles : 3* plus petite grad