



**POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL**

UNIVERSITÉ  
D'INGÉNIERIE

## **PHS2223 – INTRODUCTION À L'OPTIQUE MODERNE**

**Équipe : 04**

---

### **Expérience 3**

Mesure de polarisation

---

**Présenté à**

Guillaume Sheehy

Esmat Zamani

**Par :**

Émile **Guertin-Picard** (2208363)

Laura-Li **Gilbert** (2204234)

Tom **Dessauvages** (2133573)

30 octobre 2024

Département de Génie Physique  
Polytechnique Montréal

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Théorie</b>	<b>1</b>
2.1	Polarisation . . . . .	1
2.1.1	Polariseurs . . . . .	1
2.2	Modèle classique . . . . .	2
2.2.1	Puissance optique . . . . .	2
2.3	Modèle de Jones . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>3</b>
3.1	Présentation des montages . . . . .	3
3.2	Manipulations . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Hypothèses</b>	<b>4</b>
4.1	Modèle classique . . . . .	5
4.2	Modèle de Jones . . . . .	5

## 1 Introduction

Les ondes électromagnétiques ont plusieurs propriétés qui permettent d'expliquer les différents phénomènes optiques observés dans la vie de tous les jours. L'une d'entre elles est la polarisation, qui dicte la direction d'oscillation du champ électrique dans une onde électromagnétique. Elle est fréquemment utilisée pour faire fonctionner différents objets communs, tels que des écrans à cristaux liquides et des verres polarisés pour des lunettes. Ce laboratoire se concentre sur l'analyse de cette propriété dans un système optique. Pour se faire, une expérience de mesure de puissance sera faite avec des filtres polariseurs linéaires, qui permettent de ne laisser passer qu'une seule polarisation de la lumière. Différents nombres et différentes orientations des polariseurs seront testés en laboratoire, mais aussi modélisés mathématiquement au préalable. Ces modélisations seront faites à l'aide de deux formalismes, soit le classique où l'expression standard d'une onde électromagnétique classique est utilisée, et le formalisme de Jones, où l'état de polarisation d'une onde est décrit par un vecteur d'état (ou de Jones). Le document présent détaille le fondement théorique de la polarisation et de ses formalismes, détaille les montages qui seront utilisés pour l'expérience, et émet des hypothèses sur les observations à faire en laboratoire à l'aide du modèle mathématique.

## 2 Théorie

Cette section présente les principes physiques et les méthodes mathématiques importantes à l'expérience à réaliser.

### 2.1 Polarisation

La polarisation est une propriété physique de la lumière, et des ondes électromagnétiques, correspondant à une mesure de l'orientation du champ électromagnétique. En d'autres termes, ce principe permet de déterminer la direction des oscillations, plus précisément celle d'un champ électrique [1], circulaire, et elliptique. Dans le cas linéaire, les ondes n'ont aucune différence de phases entre le champ électrique en  $x$  et celui en  $y$ . Cette polarisation linéaire peut être écrite par l'équation suivante [2] :

$$\vec{E}_0 = (E_x, E_y, 0) \quad (1)$$

La direction de la polarisation normalisée, dans le cas ci-dessus, peut alors être déterminée à l'aide de l'équation suivante :

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

La polarisation elliptique résulte d'une combinaison linéaire de composantes ayant une différence de phase et un rapport d'amplitude de valeurs arbitraires. Pour la polarisation circulaire, celle-ci correspond à une polarisation elliptique ayant une différence de phase de  $90^\circ$ , pouvant alors être écrite de la manière suivante [3] :

$$\vec{E}_0 = (E_0, E_0 e^{i\frac{\pi}{2}}, 0) \quad (3)$$

Ainsi, lors d'une polarisation linéaire, le champ électrique est confiné sur un plan unique dans la direction de propagation, alors que, dans le cas des deux autres polarisations, le champ électrique rotationne à mesure que l'onde se propage.

#### 2.1.1 Polariseurs

Afin d'obtenir une certaine polarisation, les polariseurs, dispositifs permettant de filtrer la lumière, sont utilisés. Le fonctionnement de ces polariseurs consiste à sélectionner certaines ondes spécifiques de sorte que

celles-ci aient une direction particulière [4], dichroïques, et biréfringents. Les polariseurs réfléchissants ont pour principe de transmettre les ondes souhaitées, tout en réfléchissant celles non-désirées. Dans le cas des dichroïques, ceux-ci, au lieu de réfléchir les faisceaux non-désirés, absorbent une polarisation spécifique et transmettent les autres. Finalement, les polariseurs biréfringents utilisent un cristal anisotrope pour séparer un faisceau lumineux en composantes de polarisation, ainsi ce type de polariseurs utilisent la dépendance de la polarisation à l'indice de réfraction [5].

## 2.2 Modèle classique

Les ondes électromagnétiques, telles que la lumière, correspondent à des perturbations oscillantes des champs électriques et magnétiques. Ces champs, perpendiculaires l'un à l'autre, oscillent également perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde, formant une configuration tridimensionnelle caractéristique des ondes transversales. Ces ondes, comparativement aux ondes mécaniques, se propagent à la vitesse de la lumière. Celles-ci, produites par des particules chargées électroniquement en accélération, ne nécessitent aucun milieu de propagation, pouvant alors se propager dans le vide [6].

Les ondes électromagnétiques sont régies par les équations de Maxwell et, à partir de celles-ci, il est possible d'obtenir les solutions générales aux équations d'onde, soient les ondes planes. Celles-ci, caractérisées par une direction de propagation  $r$ , une fréquence angulaire  $\omega$ , et un vecteur d'onde  $k$ , peuvent être écrites de la forme suivante [4] :

$$\vec{E}(\mathbf{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)} \quad \vec{H}(\mathbf{r}, t) = \vec{H}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)} \quad (4)$$

Ensemble, ces deux ondes planes sont des composantes potentielles d'une onde électromagnétique. Cependant, tel que mentionné dans la section précédente, la polarisation concerne la direction du champ électrique, ainsi seulement la première équation  $\vec{E}$  est considérée. Donc, par exemple, un champ électrique se dirigeant dans la direction  $z$  aurait pour équation la suivante :

$$\vec{E}(z, t) = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ 0 \end{pmatrix} e^{i2\pi(\frac{z}{\lambda} - \frac{t}{T})} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ 0 \end{pmatrix} e^{i(kr - \omega t)} \quad (5)$$

Où  $\lambda$  correspond à la longueur d'onde, et  $T$  à la période. Ainsi, en observant l'équation (1), celle-ci représente une polarisation linéaire en  $z$ .

### 2.2.1 Puissance optique

La puissance optique correspond à la capacité d'un système optique à converger, ou à diverger, la lumière. Cette puissance peut être calculée à l'aide de la moyenne temporelle du vecteur de Poynting ( $\vec{S}$ ), qui représente la densité de flux lié à la propagation de l'onde.

$$P = \langle S \rangle = \frac{1}{\eta} |E|^2 \quad (6)$$

Où  $\eta$  correspond à l'impédance du milieu de transmission, et  $E$  au champ électrique.

## 2.3 Modèle de Jones

En optique, la polarisation de la lumière peut être représentée à l'aide du formalisme de Jones. Cette méthode consiste à décrire les composantes d'un champ, soient les états de polarisation, par un vecteur  $(2 \times 1)$ , nommé vecteur de Jones  $\vec{J}$ , et les composantes polarisantes, soient les éléments optiques, par une matrice  $(2 \times 2)$ , nommée matrice de Jones  $M_J$ . De manière spécifique, le vecteur de Jones représente

l'amplitude et la phase d'un champ électrique dans les directions  $x$  et  $y$ , ainsi, en utilisant la formulation précédente à l'équation (4) et en ajoutant une phase  $\phi$ , le vecteur de Jones est donné par :

$$\vec{\mathcal{J}} = \begin{pmatrix} E_{0x} \\ E_{0y}e^{i\Delta\phi} \end{pmatrix} \quad (7)$$

En ce qui concerne la matrice, celle-ci peut subir des rotations, créant ainsi une nouvelle matrice. Cette rotation est décrite par la matrice de rotation suivante.

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

Où  $\theta$  correspond à l'angle de rotation de la matrice. Ne s'appliquant qu'à la lumière entièrement polarisée, ce formalisme est, généralement, utilisé lors du traitement des phénomènes d'interférence et les problèmes de superposition des amplitudes de champ [7]. À partir de cette formulation, l'état de polarisation résultant  $\mathcal{J}$  est, ensuite, déterminée à l'aide d'un produit entre la matrice et le vecteur.

$$\vec{\mathcal{J}}' = M_{\mathcal{J}} \cdot \vec{\mathcal{J}} \quad (9)$$

Le modèle de Jones permet, tout comme le modèle classique, de calculer la puissance optique. Pour ce faire, il est possible d'utiliser le vecteur de Poynting.

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

Où  $\eta$  correspond à l'impédance du milieu de transmission, et  $\vec{\mathcal{J}}$  est le vecteur de Jones.

### 3 Méthodologie

Cette section présente les méthodes et les outils utilisés pour réaliser l'expérience.

#### 3.1 Présentation des montages

Le montage utilisé lors de ce laboratoire a pour but de mesurer l'évolution de la puissance transmise par un système optique en fonction de l'angle  $\theta$  entre des polariseurs linéaires. Les figures 1 et 2 présentent, sous la forme d'un schéma, les deux montages étudiés lors de ce laboratoire [8].

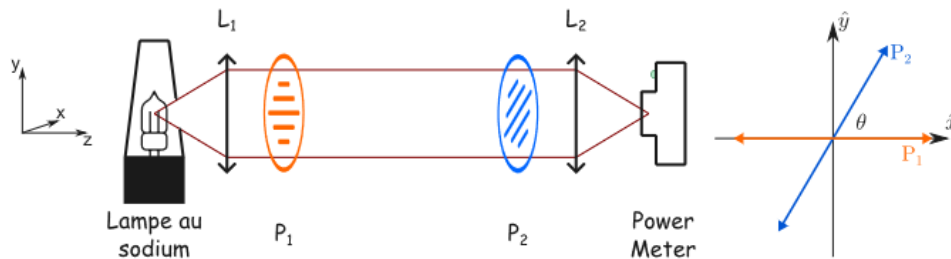


Figure 1 : Système à 2 polarisateur

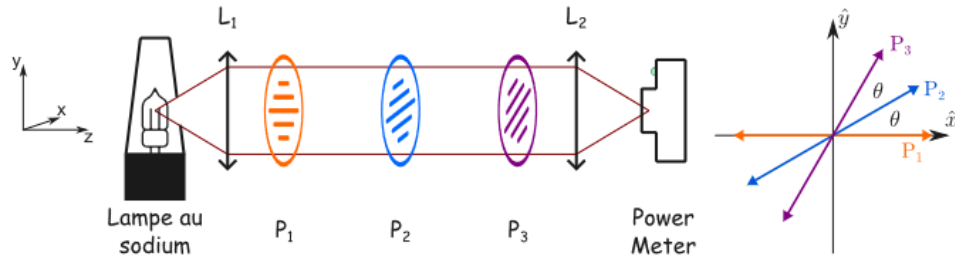


Figure 2 : Système à 3 polarisateurs

Chacun des systèmes est constitué d'une lampe au sodium comme source, suivie d'une lentille  $L_1$  permettant d'en collimer le faisceau. Ce dernier passera, ensuite, à travers une série de réseaux de polarisation pour être, finalement, focalisé par une lentille  $L_2$  sur la surface d'un *power-meter*. Dans les deux systèmes présentés, le réseau de polarisation commence par un polarisateur horizontal  $P_1$ , celui-ci est suivi, pour le premier système, d'un polarisateur à angle variable  $P_2$  et, pour le second système, de deux polarisateurs à angle variable  $P_2$  et  $P_3$ .

### 3.2 Manipulations

Pour la système à deux polarisateurs, les séries de mesure à réaliser seront donc :

1. Retirer le polariseur  $P_2$
2. Noter la puissance optique transmise par le système comme puissance de référence :  $P_0$
3. Replacer  $P_2$  sur l'axe optique et tournez-le afin de maximiser la puissance transmise. Notez cette puissance ( $P(\theta = 0)$ )

Pour le système à trois polarisateurs, les étapes seront donc :

1. Retirer le polariseur  $P_2$  et  $P_3$
2. Noter la puissance optique transmise par le système comme puissance de référence :  $P_0$
3. Replacer  $P_2$  sur l'axe optique et tournez-le afin de maximiser la puissance transmise.
4. Replacer  $P_3$  sur l'axe optique et tournez-le afin de maximiser la puissance transmise. Notez cette puissance ( $P(\theta = 0)$ )

Dans les deux cas, ces séries de mesure seront réalisées pour des angles compris entre  $0^\circ$  et  $115^\circ$  par incrémentation de  $5^\circ$ . Dans le cas du système à trois polarisateurs, l'angle  $\theta$  à mesurer est celui compris entre  $P_2$  et  $P_3$  tel que présenté à la figure 2.

## 4 Hypothèses

Cette section utilise les deux modèles présentés à la section 2 pour simuler les mesures de coefficients de transmission qui pourront être faits avec les montages. Les graphiques ont été produits à l'aide de Python, avec une simple programmation des modèles présentés.

#### 4.1 Modèle classique

Avec le modèle classique, il est possible de simplifier l'expression de l'amplitude du champ électrique  $E$  lorsqu'un rayon polarisé passe au travers d'un polariseur tourné d'un angle  $\theta$  ainsi :

$$E = E_0 \cos(\theta) \quad (11)$$

où  $E_0$  est l'amplitude du champ électrique initialement polarisée. Si un troisième polariseur est présent,  $E$  peut être utilisé dans (11) comme la nouvelle amplitude polarisée initiale. En utilisant cette amplitude dans (6), il est possible d'obtenir une expression pour le coefficient  $C$  de transmission de puissance pour une série de polariseurs :

$$C = \frac{P(\theta)}{P(\theta=0)} \quad (12)$$

Les courbes présentées à la figure 3 montrent la variation du coefficient de transmission en fonction de la variation de l'angle  $\theta$  autant pour le système à deux polariseurs qu'à trois polariseurs.

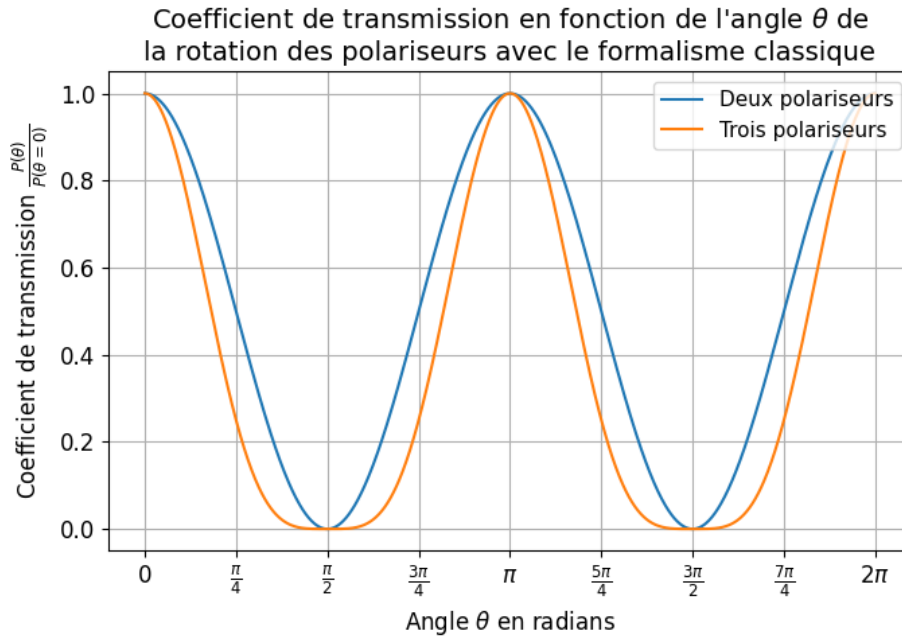


Figure 3 : Coefficients de transmission pour le modèle classique.

Il est donc possible de faire comme hypothèse que le montage à deux polariseurs présente un comportement sinusoïdal entre 0 et 1 pour son coefficient de transmission. Quant au montage à trois polariseurs, cette courbe est plus aplatie aux minimums et est toujours sous la courbe de deux polariseurs. La puissance est donc réduite avec l'ajout du polariseur, mais les minimums de puissance restent aux mêmes angles.

#### 4.2 Modèle de Jones

Pour le modèle de Jones, la matrice de Jones suivante pour une polarisation linéaire horizontale a été utilisée :

$$M_{\mathcal{J}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Pour considérer un polariseur tourné d'un angle  $\theta$ , il est possible d'y appliquer la matrice de rotation provenant de (8) :

$$M_{\mathcal{J}}(\theta) = R(-\theta) M_{\mathcal{J}} R(\theta) \quad (14)$$

Avec ce résultat et (9), il est possible d'obtenir la puissance et donc le coefficient de transmission. Pour le cas à trois polariseurs, le résultat de (9) peut être réutilisé dans cette même équation pour réappliquer le passage au travers d'un polariseur. La figure 4 présente les mêmes courbes que pour le modèle classique, mais avec le modèle de Jones.

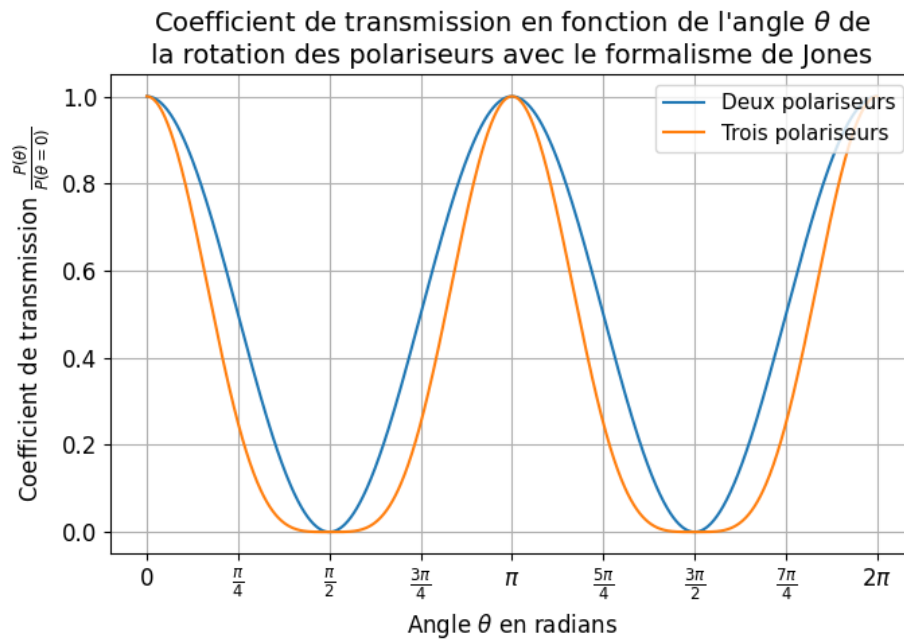


Figure 4 : Coefficients de transmission pour le modèle de Jones.

Il est possible de voir que les résultats sont les mêmes que pour le modèle classique. Les hypothèses à émettre sont donc les mêmes.



## Références

- [1] National Aeronautics and Space Administration. Anatomy of an Electromagnetic Wave, 2010. URL [https://science.nasa.gov/ems/02\\_anatomy/](https://science.nasa.gov/ems/02_anatomy/).
- [2] Matthew Schwartz. Lecture 14 : Polarization, 2021. URL <https://scholar.harvard.edu/files/schwartz/files/lecture14-polarization.pdf>.
- [3] Turan Erdogan. Understanding Polarization, 2024. URL <https://www.idex-hs.com/resources/resources-detail/understanding-polarization>.
- [4] Andrey Zangwill. *Modern Electrodynamics*. Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-0-521-89697-9.
- [5] Introduction to Polarization, 2023. URL <https://www.edmundoptics.fr/knowledge-center/application-notes/optics/introduction-to-polarization/>.
- [6] BYJU'S. Unit 5 : Electromagnetic Waves, 2020. URL <https://cdn1.byjus.com/wp-content/uploads/2022/08/TN-Board-Class-12-Physics-Vol-1-Textbook.pdf>.
- [7] Edward Collett. Jones Calculus, 2005. URL [https://spie.org/publications/spie-publication-resources/optipedia-free-optics-information/fg05\\_p57-61\\_jones\\_matrix\\_calculus#=\\_](https://spie.org/publications/spie-publication-resources/optipedia-free-optics-information/fg05_p57-61_jones_matrix_calculus#=_).
- [8] Guillaume Sheehy, Fabien Picot, Tien Nguyen, and Esmat Zamani. Expérience 3 : Mesure de polarisation, September 2024.